



UNIVERSIDAD DE JAÉN

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GRÁFICA,
DISEÑO Y PROYECTOS**

TESIS DOCTORAL

**EL AUTOABASTECIMIENTO ENERGÉTICO
EN LOS PAÍSES EN VÍAS DE DESARROLLO
EN EL MARCO DEL METABOLISMO
URBANO: CASO CUENCA, ECUADOR**

**PRESENTADA POR:
EDGAR ANTONIO BARRAGÁN ESCANDÓN**

**DIRIGIDA POR:
JULIO TERRADOS CEPEDA**

**JAÉN, 21 DE NOVIEMBRE DE 2018
ISBN**

UNIVERSIDAD DE JAÉN



TESIS DOCTORAL

El autoabastecimiento energético en los países en vías de
desarrollo en el marco del metabolismo urbano: caso
Cuenca, Ecuador

AUTOR

EDGAR ANTONIO BARRAGÁN ESCANDÓN

DIRECTOR

DR. JULIO TERRADOS CEPEDA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GRÁFICA, DISEÑO Y PROYECTOS
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN
JAÉN, 21 DE NOVIEMBRE 2018

UNIVERSIDAD DE JAÉN
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN

TESIS DOCTORAL

La memoria titulada «EL AUTOABASTECIMIENTO ENERGÉTICO EN LOS PAÍSES EN VÍAS DE DESARROLLO EN EL MARCO DEL METABOLISMO URBANO: CASO CUENCA, ECUADOR», presentada por Edgar Antonio Barragán Escandón, aspirante al grado de Doctor en el Programa de Doctorado en Energías Renovables, ha sido realizada dentro del Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos de la Universidad de Jaén, en la línea de investigación: Planificación, gestión y aspectos socioeconómicos de las energías renovables, bajo la dirección del doctor D. Julio Terrados Cepeda.

Jaén, 21 de noviembre de 2018

El doctorando

Fdo. Edgar Antonio Barragán Escandón

El Director de Tesis

Fdo. Dr. D. Julio Terrados Cepeda

Tesis doctoral: El autoabastecimiento energético en los países en vías de desarrollo en el marco del metabolismo urbano: caso Cuenca, Ecuador

Autor: Edgar Antonio Barragán Escandón

Director: Julio Terrados Cepeda

El tribunal nombrado para juzgar el proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente: Dr. Francisco Ortega Fernández (Oviedo)

Secretario: Dr. Gabino Almonacid Puche (Jaén)

Vocal: Dr. Ángel Mena Nieto (Huelva)

Suplente: Dr. Lorenzo Salas Morera (Córdoba)

Suplente: Dr. Pablo Aragonés Beltrán (Polt. Valencia)

Jaén, 21 de noviembre 2018

Esta tesis doctoral fue cofinanciada por la Fundación Carolina y la Universidad Politécnica Salesiana, bajo el programa de becas de doctorado, año 2015.

A la Fer y a la Azhuca.

Al Jósu y al Juanito.

A las ñañas, siempre.

Agradecimientos

Esta tesis tiene la edad de mi hijo Juanito, por eso a Fernanda que aún en cama me incentivó a seguir este camino, le agradezco, con la devoción que ella sabe que le tengo. A Jósu más que agradecimiento le pido disculpas por tomarme su tiempo para escribir y no compartir.

A mi madre, que sin su esfuerzo nada hubiese sido posible, sin ese antes no es posible reconocer el presente. A mis ñañas Luz, Toña y Eva, siempre en mi mente.

Al abuelo Samuel, por la semilla de la lectura. A la abuela Esilda, por el cariño.

A Esteban, ese buen amigo que me dio la confianza de escribir y publicar.

A Julio, por su franqueza y la libertad que me permitió crecer y conocer.

A mis estudiantes de pregrado y posgrado, especialmente a Cristian y Mario, por su colaboración para estructurar las bases de datos de energía.

A la Fundación Carolina y a la Universidad Politécnica Salesiana, por esa visión de construir pensando en las personas.

Antonio

Cuenca, 2018

Resumen

Las ciudades son responsables de más de tres cuartas partes de las emisiones de gases de efecto invernadero. Se prevé que la población urbana aumentará hasta en un 80 % a mediados del siglo XXI, lo que hará que el modelo energético actual sea insostenible, pues se basa en el uso intensivo de recursos fósiles. De allí que se han establecido propuestas para modificar el modelo energético urbano actual. Varios estudios mencionan que la energía renovable puede usarse en las ciudades, pero no identifican los recursos y las tecnologías que se pueden aprovechar. En esta tesis se analiza esta posibilidad, bajo el marco del metabolismo urbano, pues permite integrar aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales.

Se propone y aplica una metodología para analizar la inclusión de las energías renovables en el área urbana de una ciudad. Se utilizan herramientas metodológicas que permiten seleccionar la tecnología más adecuada para un entorno específico. Además, se modela la ciudad en términos de su energía directa para luego incorporar la producción de energía renovable. Se establecen factores clave para la selección de las tecnologías renovables en la ciudad, así como indicadores energéticos de sostenibilidad.

Se aplica la metodología a la ciudad intermedia de Cuenca, en Ecuador. A través de la construcción de escenarios y la evaluación de balances energéticos e indicadores urbanos de sostenibilidad, se concluye que es posible disminuir los flujos de energía que ingresan a la ciudad con este tipo de tecnologías. Sin embargo, no se llega a un autoabastecimiento total. Se requiere incluir en la planificación urbana, políticas energéticas que adopten estrategias de eficiencia, arquitectura pasiva o modos sostenibles en la transportación pública.

Abstract

Cities produce more than three quarters of greenhouse gas emissions. It is expected that urban population would increase by up to 80 % towards middle of the 21st century, which will make the current energy model unsustainable, based on the intensive use of fossil resources. Several proposals have been established to modify the current urban energy model. Current research focus on renewable energy can be produced in cities, but they do not identify specific resources and technologies. This thesis analyzes different options, under the framework of urban metabolism, which allows to integrate technical, economic, social and environmental aspects.

A methodology is proposed to analyze renewables in urban areas. Methodological approaches tools are applied to select the most appropriate renewables for a specific environment. In addition, a city as case study is modeled in terms of its direct energy consumption and then incorporating renewable energy production scenarios. Key factors are established for the selection of renewables in the city according to its capabilities, as well as energy sustainability indicators.

The methodology is applied to an intermediate city, Cuenca, in Ecuador. Through different scenarios development, energy balances valuation and urban indicators of sustainability, it has been concluded that it is possible to reduce energy in-flows to the city applying energy self-production; however, total self-sufficiency is not reached. Besides it is necessary to include in urban planning energy policies adopting strategies of energy efficiency, passive architecture strategies and sustainable transportation, complementing each other.

Índice

Agradecimientos	xi
Resumen.....	xiii
Abstract.....	xv
Índice	xvii
Índice de figuras.....	xxi
Índice de gráficos	xxv
Índice de tablas.....	xxvii
Lista de acrónimos	xxxiii
Lista de símbolos	xli
1 Objetivos y alcance de la tesis	1
1.1 <i>Introducción</i>	2
1.2 <i>Objetivos de la tesis</i>	5
1.2.1 <i>Objetivos específicos</i>	5
1.3 <i>Alcance de la tesis</i>	6
1.4 <i>Aportaciones de la tesis</i>	8
1.5 <i>Contenido y estructura de la tesis</i>	9
2 El metabolismo urbano y la energía	11
2.1 <i>La ciudad y el desarrollo energético</i>	12
2.2 <i>Los recursos energéticos renovables de las ciudades</i>	14
2.3 <i>El metabolismo urbano</i>	19
2.3.1 <i>Historia del concepto</i>	21
2.3.2 <i>Tendencias de metabolismo urbano</i>	23
2.3.3 <i>Métodos para evaluar el metabolismo urbano</i>	25

2.3.4	Métodos para evaluar el metabolismo urbano energético.	29
2.4	<i>La sostenibilidad en las ciudades</i>	31
2.5	<i>Necesidad de un planeamiento energético urbano</i>	33
2.5.1	Establecimiento de políticas.	35
3	Las energías renovables bajo el enfoque del metabolismo urbano	37
3.1	<i>La energía en las ciudades</i>	38
3.2	<i>Las energías renovables en las ciudades</i>	39
3.2.1	Clasificación de las energías renovables.	40
3.2.2	Biocarburantes.	54
3.2.3	Biomasa.	55
3.2.4	Biogás de biodigestores.	56
3.2.5	Biogás de vertedero controlado.	59
3.2.6	Incineración de residuos sólidos urbanos.....	60
3.2.7	Energía mareomotriz.	61
3.2.8	Energía eólica.	62
3.2.9	Energía geotérmica.....	64
3.2.10	Energía hidroeléctrica.....	66
3.2.11	Energía solar fotovoltaica.....	67
3.2.12	Energía solar térmica.	69
3.2.13	Integración de tecnologías.	71
3.2.14	Proyectos en ciudades.	73
4	Propuesta metodológica para la aplicación de las energías renovables en el metabolismo urbano de las ciudades	75
4.1	<i>Descripción general de la metodología propuesta</i>	76
4.2	<i>Métodos multicriterio</i>	78
4.2.1	Definición del problema.....	81
4.2.2	Elección del método multicriterio.	82
4.2.3	Identificación de alternativas.	102
4.2.4	Selección de criterios.....	104
4.2.5	Matriz de decision.	125
4.2.6	Asignación de pesos.....	128
4.2.7	Priorización de alternativas.....	130
4.2.8	Toma de decisions.	131
4.3	<i>Planificación energética urbana</i>	131
4.3.1	Paradigmas de planificación energética.....	132

4.3.2	Instrumentos para la planificación energética.....	133
4.3.3	Elección del modelo.....	136
4.4	<i>Potencial del recursos renovable.....</i>	<i>144</i>
4.5	<i>Indicadores energéticos de sostenibilidad.....</i>	<i>145</i>
4.5.1	Indicadores económicos.....	146
4.5.2	Indicadores ambientales.....	148
4.5.3	Indicadores sociales.....	149
4.5.4	Normalización de indicadores.....	150
5	El caso de la ciudad de Cuenca, Ecuador.....	151
5.1	<i>Descripción de la ciudad de Cuenca.....</i>	<i>152</i>
5.1.1	Caracterización del clima.....	155
5.1.2	Ríos de Cuenca.....	156
5.1.3	Población.....	157
5.1.4	Economía.....	159
5.1.5	Usos del suelo.....	159
5.1.6	Consumo de agua y producción de aguas residuales.....	160
5.1.7	Emisiones.....	160
5.1.8	Producción de residuos sólidos.....	160
5.1.9	Indicadores del metabolismo urbano en la ciudad de Cuenca.....	161
5.1.10	Cuenca como ciudad intermedia.....	162
5.2	<i>Situación energética de la ciudad de Cuenca.....</i>	<i>163</i>
5.2.1	Energía eléctrica.....	164
5.2.2	Combustibles.....	166
5.3	<i>Selección de tecnologías renovables para la ciudad de Cuenca.....</i>	<i>169</i>
5.3.1	Pesos utilizados.....	170
5.3.2	Subcriterios cualitativos.....	174
5.3.3	Alternativas para biocombustibles para transporte.....	175
5.3.4	Alternativas para la producción de energía eléctrica.....	195
5.3.5	Alternativas para el calentamiento de agua sanitaria.....	220
5.4	<i>El modelo LEAP de Cuenca urbana.....</i>	<i>239</i>
5.4.1	Energía en el sector residencial.....	239
5.4.2	Energía en el sector industrial.....	244
5.4.3	Energía en el sector transporte.....	250
5.4.4	Energía en el sector comercial.....	253
5.4.5	Energía en el sector alumbrado público.....	253
5.4.6	Energía en otros sectores.....	254

5.4.7	Balance de energía.....	254
5.4.8	Ajuste.....	256
5.5	<i>Potencial energético de las energías renovables en la ciudad de Cuenca.....</i>	257
5.5.1	Transporte.....	257
5.5.2	Electricidad.....	260
5.5.3	Calentamiento de agua.....	282
5.6	<i>Escenarios.....</i>	283
5.6.1	Escenarios descritos mediante los balances de energía.....	284
5.6.2	Escenarios descritos mediante los indicadores energéticos de sostenibilidad.....	298
6	Discusión, conclusiones, futuras líneas de investigación.....	309
6.1	<i>Discusión.....</i>	310
6.2	<i>Conclusiones de la investigación.....</i>	325
6.3	<i>Estudios futuros propuestos.....</i>	334
6.4	<i>Publicaciones resultado de la tesis.....</i>	336
	Referencias.....	339
	Anexos.....	373

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Las energías renovables bajo el metabolismo urbano.....	17
Figura 2-2. Métodos para evaluar la contribución de las ER en la ciudad	30
Figura 3-1. Modelo conceptual del uso de las energías renovables en la ciudad.....	53
Figura 4-1. Esquema metodológico propuesto.....	76
Figura 4-2. Clasificación de los métodos multicriterio	79
Figura 4-3. Modelo energético actual y propuesto	103
Figura 4-4. Usos de las energías renovables en la ciudad.....	104
Figura 4-5. Aplicación del método multicriterio para diferentes usos energéticos	104
Figura 4-6. Estructura jerárquica para la selección de alternativas.....	127
Figura 4-7. Estructura de la demanda en el modelo LEAP	141
Figura 4-8. Estructura de la transformación en el modelo LEAP.....	142
Figura 4-9. Estructura de los recursos en el modelo LEAP	143
Figura 5-1. Localización espacial del cantón Cuenca, área urbana.....	153
Figura 5-2. Ríos que atraviesan la ciudad de Cuenca.....	157
Figura 5-3. Densidad poblacional por zonas urbanas.....	158
Figura 5-4. Alternativas tecnológicas para aplicarlas en la ciudad Cuenca.	170
Figura 5-5. Selección de biocombustibles	176
Figura 5-6. Resultados PROMETHEE, considerando diferentes pesos (biocombustibles).....	192
Figura 5-7. Diagramas de GAIA (biocombustibles)	193
Figura 5-8. Diagrama de araña del biogás proveniente de biodigestores	195

Figura 5-9. Perfil de los del biogás proveniente de biodigestores.....	195
Figura 5-10. Selección de tecnologías de producción de energía eléctrica	196
Figura 5-11. Hitos de los mecanismos de promoción de las ER en el Ecuador	211
Figura 5-12. Resultados PROMETHEE, considerando diferentes pesos (producción de electricidad)	214
Figura 5-13. Diagramas de GAIA (producción de electricidad).....	215
Figura 5-14. Diagrama de araña de la tecnología hidroeléctrica (Caso DRM).....	217
Figura 5-15. Perfil de los subcriterios de la tecnología hidroeléctrica (Caso DRM).....	217
Figura 5-16. Diagrama de araña de la tecnología fotovoltaica (Caso DRM)	218
Figura 5-17. Perfil de los subcriterios de la tecnología solar fotovoltaica (Caso DRM)	218
Figura 5-18. Diagrama de araña de la tecnología biogás de vertedero (Caso DRM)	219
Figura 5-19. Perfil de los subcriterios de la tecnología biogás de vertedero (Caso DRM).....	219
Figura 5-20. Selección de tecnologías de producción de ACS	221
Figura 5-21. Resultados PROMETHEE, considerando diferentes pesos (agua caliente sanitaria)	236
Figura 5-22. Diagramas de GAIA (agua caliente sanitaria).....	237
Figura 5-23. Diagrama de araña para los sistemas solares térmicos (Caso DRM).	238
Figura 5-24. Perfil de los subcriterios de los sistemas solares térmicos (Caso DRM)	239
Figura 5-25. Árbol de demanda del sector residencial en Cuenca urbana	240
Figura 5-26. Árbol de demanda del sector industrial en Cuenca urbana	244
Figura 5-27. Esquema de obtención participación industrial (VAD y energía eléctrica)	247
Figura 5-28. Árbol de demanda del sector transporte en Cuenca urbana.....	250

Figura 5-29. Diagrama de Sankey de Cuenca urbana (kBEP).....	255
Figura 5-30. Recursos hídricos que atraviesan la ciudad de Cuenca urbana.....	261
Figura 5-31. Coeficiente de cobertura del suelo para instalaciones solares fotovoltaicas	275
Figura 5-32. Diagrama de Sankey (ES ₁).....	286
Figura 5-33. Diagrama de Sankey (ES ₂).....	288
Figura 5-34. Diagrama de Sankey (ES ₃).....	290
Figura 5-35. Diagrama de Sankey (ES ₄).....	292
Figura 5-36. Diagrama de Sankey (ES ₅).....	294
Figura 5-37. Diagrama de Sankey (ES ₆).....	296

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 4-1. Criterios utilizados en investigaciones que utilizan técnicas multicriterio	111
Gráfica 4-2. Criterios para las ER aplicables en la ciudad.....	111
Gráfica 5-1. Temperatura en Cuenca	155
Gráfica 5-2. Irradiación diaria promedio (0° inclinación)	156
Gráfica 5-3. Habitantes en el área urbana de la ciudad de Cuenca.....	158
Gráfica 5-4. Demanda de energía en Cuenca urbana	163
Gráfica 5-5. Participación en el consumo de energía	164
Gráfica 5-6. Demanda de energía eléctrica en Cuenca urbana	165
Gráfica 5-7. Participación en el consumo de energía eléctrica en Cuenca urbana .	166
Gráfica 5-8. Demanda de combustibles en Cuenca urbana.....	167
Gráfica 5-9. Participación en el consumo de combustibles fósiles en Cuenca urbana	168
Gráfica 5-10. Participación del consumo de combustibles en Cuenca urbana	168
Gráfica 5-11. Posibilidades de uso de las ER en Cuenca.....	169
Gráfica 5-12. Resultados de las encuestas por grupos profesionales.....	173
Gráfica 5-13. Resultados de las encuestas, Ecuador – España	174
Gráfica 5-14. Flujos de superación (biocombustibles)	192
Gráfica 5-15. Costos de producción de electricidad.....	204
Gráfica 5-16. Flujos de superación caso EW (producción de electricidad).....	213
Gráfica 5-17. Flujos de superación caso DRM (producción de electricidad).....	213
Gráfica 5-18. Flujos de superación caso OR (producción de electricidad).....	214

Gráfica 5-19. Flujos de superación (agua caliente sanitaria).....	236
Gráfica 5-20. Usos de la energía en el sector residencial	241
Gráfica 5-21. Participación energética de la industria	245
Gráfica 5-22. Participación energética del transporte	251
Gráfica 5-23. Curva de caudales clasificados, río Tarqui	266
Gráfica 5-24. Curva de caudales clasificados, río Yanuncay	267
Gráfica 5-25. Curva de caudales clasificados, río Tomebamba	268
Gráfica 5-26. Curva de caudales clasificados, río Machángara.....	269
Gráfica 5-27. Irradiación media para diferentes orientaciones	276
Gráfica 5-28. Irradiación media anual para diferentes inclinaciones.....	276
Gráfica 5-29. Comparación de indicadores energéticos de sostenibilidad	306

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Justificación del estudio en el marco del metabolismo urbano.....	18
Tabla 2-2. Diferentes estudios que aplican los principios del metabolismo urbano.....	26
Tabla 3-1. Clasificación de las energías renovables según el IDAE	41
Tabla 3-2. Estudios realizados en diferentes ciudades relacionados al uso de las energías renovables	42
Tabla 3-3. Potencial energético técnico para diferentes ciudades	48
Tabla 4-1. Sustitutos energéticos de las ER.....	81
Tabla 4-2. Métodos multicriterio utilizados para seleccionar ER.....	84
Tabla 4-3. Métodos multicriterio utilizados para seleccionar tecnologías.....	89
Tabla 4-4. Ventajas y desventajas de los MCDA más comunes	93
Tabla 4-5. Elección del método MCDA.....	97
Tabla 4-6. Criterios de las diferentes alternativas.....	97
Tabla 4-7. Flujos netos de los unicriterios	101
Tabla 4-8. Criterios utilizados en otras investigaciones	106
Tabla 4-9. Criterios identificados para el uso de las energías renovables en la ciudad	112
Tabla 4-10. Subcriterios para la elección de tecnologías.....	114
Tabla 4-11. Puntajes para medir autoevaluación de los expertos.....	124
Tabla 4-12. Presentación de la matriz de decisión.....	126
Tabla 4-13. Aplicación del modelo LEAP en diferentes estudios.....	139
Tabla 4-14. Indicadores energéticos de sostenibilidad	146
Tabla 4-15. Parámetros de normalización de indicadores.....	150

Tabla 5-1. Instituciones nacionales y locales	154
Tabla 5-2. Evolución del metabolismo urbano de la ciudad de Cuenca mediante indicadores per cápita	161
Tabla 5-3. Tasa de crecimiento de energía eléctrica 2008-2015	165
Tabla 5-4. Tasa de crecimiento promedio de combustibles 2009-2015.....	167
Tabla 5-5. Principales criterios que influyen en la implantación de las ER en la ciudad	172
Tabla 5-6. Pesos utilizados.....	173
Tabla 5-7. Criterios cualitativos utilizados	175
Tabla 5-8. Eficiencia (producción de biocombustibles).....	177
Tabla 5-9. Disponibilidad del recurso (producción de biocombustibles).....	177
Tabla 5-10. Madurez de la tecnología (producción de biocombustibles)	178
Tabla 5-11. Obstáculos urbanos y disponibilidad de área (producción de biocombustibles)	178
Tabla 5-12. Integración arquitectónica (producción de biocombustibles).....	179
Tabla 5-13. Costos de inversión de plantas que producen bioetanol	181
Tabla 5-14. Costos de inversión de plantas que producen biogás	182
Tabla 5-15. Costo de inversión (producción de biocombustibles)	183
Tabla 5-16. Costo de operación y mantenimiento (producción de biocombustibles)	183
Tabla 5-17. Costos de energía (producción de biocombustibles)	184
Tabla 5-18. Emisiones de CO ₂ (producción de biocombustibles).....	186
Tabla 5-19. Emisiones de SO ₂ (producción de biocombustibles).....	186
Tabla 5-20. Emisiones de NO _x (producción de biocombustibles)	186
Tabla 5-21. Plantas de referencia para la producción de bioetanol.....	188
Tabla 5-22. Plantas de referencia para la producción de biometano	189

Tabla 5-23 Indicador de empleo (producción de biocombustibles).....	190
Tabla 5-24. Aceptación social (producción de biocombustibles).....	190
Tabla 5-25. Compatibilidad de políticas públicas (producción de biocombustibles)	191
Tabla 5-26 Matriz de decisión para la producción de biocombustibles	191
Tabla 5-27. Ordenamiento de las alternativas para cada dimensión de análisis (producción de biocombustibles).....	194
Tabla 5-28. Eficiencia (producción de electricidad)	197
Tabla 5-29. Disponibilidad del recurso (producción de electricidad)	198
Tabla 5-30. Madurez de la tecnología (producción de electricidad).....	198
Tabla 5-31. Obstáculos urbanos y disponibilidad de área (producción de electricidad)	199
Tabla 5-32. Integración arquitectónica (producción de electricidad).....	199
Tabla 5-33. Costo de inversión (producción de electricidad).....	201
Tabla 5-34. Costo de operación y mantenimiento (producción de electricidad)....	202
Tabla 5-35. Costo de la energía (producción de electricidad)	203
Tabla 5-36. Emisiones de CO ₂ (producción de electricidad).....	204
Tabla 5-37. Emisiones de SO ₂ (producción de electricidad).....	206
Tabla 5-38. Emisiones de NO _x (producción de electricidad)	207
Tabla 5-39. Indicador de empleo (producción de electricidad)	208
Tabla 5-40. Aceptabilidad social (producción de electricidad)	210
Tabla 5-41. Compatibilidad con las políticas públicas (producción de electricidad)	211
Tabla 5-42. Matriz de decisión de tecnologías de producción de energía eléctrica	212
Tabla 5-43 Ordenamiento de las alternativas para cada dimensión de análisis (producción de electricidad)	216

Tabla 5-44. Eficiencia (producción de ACS).....	221
Tabla 5-45. Disponibilidad del recurso (producción de ACS).....	222
Tabla 5-46 Madurez de la tecnología (producción de ACS).....	223
Tabla 5-47. Obstáculos y disponibilidad de área (producción de ACS)	223
Tabla 5-48. Integración arquitectónica (producción de ACS).....	224
Tabla 5-49. Costos de inversión (producción de ACS).....	225
Tabla 5-50. Costo de operación y mantenimiento (producción de ACS).....	227
Tabla 5-51. Demanda de ACS para la ciudad de Cuenca y equipamiento requerido	228
Tabla 5-52. Datos utilizados para el cálculo de costo de la energía para ACS.....	230
Tabla 5-53. Costos de energía (producción de ACS)	230
Tabla 5-54. Emisiones de CO ₂ (producción de ACS).....	231
Tabla 5-55. Emisiones de SO ₂ (producción de ACS).....	232
Tabla 5-56. Emisiones de NO _x (producción de ACS)	233
Tabla 5-57. Indicador de empleo (producción de ACS).....	234
Tabla 5-58. Aceptación social (producción de ACS).....	234
Tabla 5-59. Compatibilidad de políticas públicas (producción de ACS).....	235
Tabla 5-60. Matriz de decisión para la producción de ACS.....	235
Tabla 5-61. Ordenamiento de las alternativas para cada dimensión de análisis (producción de ACS).....	238
Tabla 5-62. Información requerida para el modelo LEAP Cuenca, residencial, cocción	241
Tabla 5-63. Información requerida para el modelo LEAP Cuenca, residencial, ACS	242
Tabla 5-64. Información requerida para el modelo LEAP Cuenca, residencial, iluminación	242

Tabla 5-65. Información requerida para el modelo LEAP Cuenca, residencial, refrigeración	243
Tabla 5-66. Información requerida para el modelo LEAP Cuenca, residencial, otros usos	243
Tabla 5-67. Valor agregado y energía eléctrica en la industria en el cantón Cuenca	246
Tabla 5-68. Energéticos consumidos por la industria en el cantón Cuenca	247
Tabla 5-69. Participación de los energéticos en la industria	249
Tabla 5-70. Intensidades energéticas del transporte por carretera en el cantón Cuenca	252
Tabla 5-71. Valor agregado y energía en el sector comercial en el cantón Cuenca	253
Tabla 5-72. Valor agregado y energía requerida para el alumbrado público en el cantón Cuenca	253
Tabla 5-73. Valor agregado y energía requerida para otros sectores.....	254
Tabla 5-74. Balance de energía de la ciudad del cantón Cuenca (kBEP).....	256
Tabla 5-75. Ajuste entre las bases de datos y el modelo LEAP	257
Tabla 5-76. Valores adoptados para el cálculo de emisiones de CH ₄ anuales en Cuenca (biogás de aguas residuales).....	259
Tabla 5-77. Localización de puntos de interés para el caudal de equipamiento	262
Tabla 5-78. Mínimo gradiente para la producción de energía hidroeléctrica	263
Tabla 5-79. Aportaciones anuales en el río Tarqui	265
Tabla 5-80. Aportaciones anuales en el río Yanuncay	266
Tabla 5-81. Aportaciones anuales, en el río Tomebamba	267
Tabla 5-82. Potencial de energía hidroeléctrica	269
Tabla 5-83. Potencial de energía hidroeléctrica con restricciones.....	270
Tabla 5-84. Factores de utilización utilizados para el cálculo de la superficie disponible de techos	273

Tabla 5-85. Coeficiente de cobertura del suelo y área de servicio	275
Tabla 5-86. Factores de reducción del potencial de energía solar fotovoltaica	277
Tabla 5-87. Potencial de la energía solar fotovoltaica de Cuenca urbana	278
Tabla 5-88. Valores adoptados para el cálculo de emisiones de CH ₄ anuales en Cuenca (biogás de vertedero)	280
Tabla 5-89. Datos incluidos en la transformación en el modelo LEAP	284
Tabla 5-90. Balance energético Es ₁ (kBEP)	285
Tabla 5-91. Balance energético Es ₂ (kBEP)	287
Tabla 5-92. Balance energético Es ₃ (kBEP)	289
Tabla 5-93. Balance energético Es ₄ (kBEP)	291
Tabla 5-94. Balance energético Es ₅ (kBEP)	293
Tabla 5-95. Balance energético Es ₆ (kBEP)	297
Tabla 5-96. Autarquía energética en los diferentes escenarios	298
Tabla 5-97. Datos para el cálculo de precios de las ER	299
Tabla 5-98. Precios de los energéticos provenientes de las ER	300
Tabla 5-99. Precios de los energéticos en el Ecuador	300
Tabla 5-100. Precio medio de la energía	301
Tabla 5-101. Uso de las ER en la oferta de energía	302
Tabla 5-102. Uso de las ER en la oferta de energía eléctrica	303
Tabla 5-103. Pureza de la energía	304
Tabla 5-104. Empleo de los energéticos tradicionales de energía	305
Tabla 5-105. Empleo	305

LISTA DE ACRÓNIMOS

ACS	Agua caliente sanitaria
AE	Autarquía energética
A_{fv}	Área disponible para la colocación de paneles fotovoltaicos en techos
A_{st}	Área para la colocación de paneles solares térmicos
AHP	Proceso analítico jerárquico (del inglés Analytical Hierarchy Proces)
A_j	Ajuste de energía
AL	Nivel de actividad (del inglés Activity Level)
APIS	Asociaciones de Producción Integrada
ARCH	Agencia de Regulación y Control de Hidrocarburos
BAU	Escenario base (del inglés Business As Usual)
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
B_o	Máxima capacidad de producir metano
C	Valor de los subcriterios
C_{pm}	Cociente de pesos moleculares
C_{as}	Restricciones debido al área para acceso y mantenimiento requerida
C_c	Coste de producir calor
C_{con}	Restricciones constructivas
C_e	Coste de producir energía
C_a	Calor específico del agua
CEC	Emissiones relacionadas a la demanda de energía (del inglés Carbon Emission from the final energy Consumption)
C_{el}	Coste de producir energía eléctrica
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CET	Emissiones relacionadas a la transformación de energía (del inglés Carbon Emission from Energy Transformation)
C_{fv}	Disponibilidad para la colocación de paneles solares fotovoltaicos
CGA	Comisión de Gestión Ambiental de Cuenca

C_{GCR}	Restricciones debido a la separación de paneles
CH₄	Metano
CHP	Tecnologías de producción de electricidad y calor combinados (del inglés Combined Heat & Power)
CIM	Número de personas que se utilizó para la construcción de una infraestructura de referencia en MW, durante N _i años
CIM_i	Cantidad de personas que se requiere para la construcción instalación y manufactura de una instalación de referencia
C_{in}	Restricciones debido a la inclinación de la superficie
CO₂	Dióxido de carbono
COD	Fracción del carbono orgánico degradable contenido en los desechos brutos
COD_f	Fracción de carbono orgánico degradable que se descompone
COD_i	Fracción de carbono orgánico degradable por tipo de desecho
COP	Coefficiente de rendimiento (del inglés Coefficient of Performance)
COPRAS	Complex Proportional Assessment
C_{or}	Restricciones debido a la orientación de la superficie
CP	Programación por compromiso (del inglés Compromise Programming)
C_{pb}	Coste de producir energía a partir de biocombustibles
C_{prot}	Restricciones debido a que las edificaciones son históricas o patrimoniales
CSIN	Consumo Sectorizado de la Industria Nacional
C_{so}	Restricciones debido al efecto de las sombras
C_{ST}	Disponibilidad para la colocación de paneles solares térmicos
C_T	Costos de una planta de producción de energía
D	Demanda de la energía
DA	Métodos de análisis de decisión (del inglés Decision Analysis Methods)
DBO	Demanda bioquímica per cápita de oxígeno
Des	Cantidad per cápita de desechos
DPA	División Política Administrativa
DRM	Método de valoración directa (del inglés Direct Rating Method)
DSS	Sistemas de soporte para la toma de decisiones (del inglés Decision

	Support Systems)
EC	Consumo de energía agregado de un sector (del inglés aggregate Energy Consumption)
EEQ	Empresa Eléctrica Quito
EF	Factor de emisión (del inglés Emission Factor)
EI	Intensidad energética (del inglés Energy Intensity)
ELECTRE	Eliminación y selección traduciendo la realidad (del inglés Elimination and Choice Translating Reality)
EMOV	Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte de Cuenca
E_{ne}	Energía producida en un tiempo determinado
ER	Energía renovable
ERe	Producción de electricidad utilizando energías renovables
ERi	Oferta de la energía renovable
EROI	Tasa de retorno energético (del inglés Energy Return on Energy Investment)
Es	Escenario
ESMAP	Energy Sector Management Assistance Program
E_{th}	Energía requerida para el calentamiento de agua
ETP	Energía luego de la transformación energética (del inglés Energy Transformation Product)
ET	Consumo debido a la transformación (ET)
EW	Método de pesos iguales (del inglés Equal Weights)
Ex	Exportaciones de energía
FANP	Fuzzy analytic network process
F_c	Factor corrector para metano
F_{CH4}	Fracción de metano en el gas de vertedero
F_p	Factor de planta de una planta de producción de energía
F_r	Factores de reducción debido a la disponibilidad arquitectónica
FSI	Índice espacio de piso (del inglés Floor Space Index)
g	Aceleración debido a la gravedad
GCR	Coefficiente de cobertura del suelo (del inglés Ground Coverage Ratio)

GSHP	Bomba de calor geotérmico (del inglés Ground Source Heat Pump)
GLP	Gas licuado de petróleo
GTZ	Cooperación Técnica Alemana (del inglés German Organisation for Technical Cooperation)
Gr	Grado de utilización del sistema de tratamiento y/o eliminación
GWHP	Bomba de calor de agua subterránea (del inglés Ground Water Heat Pump)
H_n	Altura neta en metros
η_{hi}	Eficiencia de un sistema hidroeléctrico
η_p	Factores de reducción del potencial solar
η_m	Eficiencia del panel térmico
η_r	Factor de reducción del potencial solar
η_{ef}	Eficiencia de los módulos fotovoltaicos
η_{te}	Pérdidas por condiciones climatológicas
η_{or}	Pérdidas por el ángulo de incidencia de los rayos solares
η_{in}	Pérdidas debido a la instalación eléctrica y suciedad
I	Irradiación global anual
I+D	Investigación y desarrollo
IDBO	Factor de corrección para el DBO industrial
IDEE	Instituto de Economía Energética
I_e	Indicador de empleo para una planta de producción de energía
I_E	Importaciones de energía
IEA	Agencia Internacional de la Energía (del inglés International Agency Energy)
IE_p	Importaciones de energía primaria
IE_s	Importaciones de energía secundaria
Im	Impuestos
IMP	Importaciones
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
INER	Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables
I_{inv}	Capital requerido para la instalación de una planta de producción de energía

IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambios Climáticos (del inglés Intergovernmental Panel on Climate Change)
IRENA	Agencia Internacional de las Energías Renovables (del inglés International Renewable Energy Agency)
IVIF	Interval Valued Intuitionistic Fuzzy
K_c	Coefficiente de autovaloración
K_{com}	Coefficiente de competencia
LCOE	Costos nivelados de energía eléctrica (del inglés Levelized Cost of Electricity)
LCOH	Costos nivelados de energía calórica (del inglés Levelised Costs of Heat)
LEAP	Long Range Energy Alternatives Planning System
LHV	Poder calorífico inferior (del inglés Lower Heating Value)
MADM	Toma de decisiones multiatributo (del inglés Multiple Attribute Decision Making)
MAUT	Teoría de utilidad multiatributo (del inglés Multiple Attribute Utility Theory)
MAVT	Teoría de valor multiatributo (del inglés Multiattribute Value Theory)
MCDA	Técnicas de análisis de decisión multicriterio (del inglés Multiple Criteria Decision Analysis)
MCDM	Análisis de decisión de criterios múltiples (del inglés Multiple Criteria Decision Making)
MEER	Ministerio de Electricidad y Energías Renovables
MICSE	Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos
MODM	Toma de decisiones multiobjetivo (del inglés Multiple Objective decision Making)
MU	Metabolismo urbano
N_A	Energía no aprovechada
NAIADE	Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environments
N_i	Número de años utilizados para la construcción, instalación y manufactura de una instalación de referencia
NO_x	Óxidos de nitrógeno
NR	Energía no renovable

NREL	National Renewable Energy Laboratory
O&M	Coste de la operación y mantenimiento de una planta de producción de energía
O_E	Oferta bruta total de energía
OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
O_{Ee}	Requerimientos de energía eléctrica
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
OM	Número de empleos que se requirieron para la construcción de una instalación de referencia MW, durante un año
OM_I	Cantidad de empleos que se requiere para la operación y mantenimiento de una instalación de referencia en un año
OR	Método de calificación ordinal (del inglés Ordinal Ranking)
OT	Oferta total de energía
OWA	Ordered Weighted Averaging
OX	Factor de oxidación
p	Factor de escalamiento de las plantas de producción de energía
P	Potencia de una planta de producción de energía
PE	Precio de la energía
PME	Precio medio de la energía
PEIP	Participación Energética Industrial Provincial
PEIP	Participación Energética Industrial Cantonal
P_I	Tamaño (potencia o energía) de la instalación de referencia
PIB	Producto interno bruto
P_L	Producción local de energía
POB	Población
Pre	Pureza de la energía
PROMETHEE	Métodos de organización para la clasificación de preferencias (del inglés Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation)
Q	Consumo de agua caliente sanitaria
Q₂₇₀	Caudal igualado o superado en 270 días
Q₉₀	Caudal igualado o superado en 90 días

Q_e	Caudal ecológico
Q_{eq}	Caudal de equipamiento que pasa a través de la turbina hidráulica
Q_m	Caudal medio anual
Q_{max}	Caudal máximo absoluto
Q_{min}	Caudal mínimo absoluto
r	Tasa de descuento
ρ_a	Densidad del agua
Ren21	Renewable Energy Policy Network for the 21st Century
S	Tamaño de una planta de producción de energía expresado en unidades de potencia o energía
S_l	Componente orgánico separado
SAM	System Advisor Model
SEI	Instituto Ambiental de Estocolmo (del inglés Stockholm Environment Institute)
Senplades	Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo del Ecuador
SHIP	Solar Heat for Industrial Processes
SIMUS	Sequential Interactive Model for Urban Sustainability
SMAA	Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis
SO_2	Dióxido de azufre
SODM	Técnicas simple objetivo (del inglés Single Objective Decision Making)
t	Años de operación de una planta de producción de energía
TOPSIS	Técnica para ordenar las preferencias mediante similitud a la solución ideal (del inglés Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions)
T_R	Centros de transformación de energía
T_{red}	Temperatura de la red de agua
T_{uso}	Temperatura a la que se suministra el agua
U	Flujos de energía urbana
UDA	Universidad del Azuay
U_P	Fracción de la población según el grado de ingresos
UR	Uso de las energías renovables en la oferta total de energía
URe	Participación de la energía renovable en producción de energía

	eléctrica
Ut	Utilidad empresarial
VA	Valor agregado
VASIC	Valor Agregado Sectorizado Industrial Cantonal
VASIN	Valor Agregado Sectorizado de la Industria Nacional
VASIP	Valor Agregado Sectorizado de la Industria Provincial
VATIC	Valor Agregado Total de la Industria Cantonal
V_i	Variación de inventario de energía
VIKOR	Optimización multicriterio y solución compromiso (del bosnio Visekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje)
VKR	Vehículo Kilómetro Recorrido
W	Fracción del tipo de desechos
WASPAS	Weighted Aggregates Sum Product Assessment

LISTA DE SÍMBOLOS

$\forall x P(x)$	P(x) es verdadera para cualquier x
$\exists x P(x)$	Existe por lo menos un x tal que P(x) es verdadera
\Leftrightarrow	Si y solo si
ω	Peso de los criterios
$P_j()$	Función de preferencia
$F_j[]$	Función de preferencia
$\pi()$	Índice de preferencia
\sim	Relación de equivalencia
$\phi()$	Flujo de superación
π	Índice de preferencia
η	Eficiencia
α	Alfa de Cronbach

1 OBJETIVOS Y ALCANCE DE LA TESIS

Las ciudades invisibles son un sueño que nace del corazón de las ciudades invisibles.

Ítalo Calvino

En varias investigaciones se ha discutido las ventajas de las energías renovables y sus restricciones para incrementar su participación en los *mixes* energéticos nacionales. Se están buscando opciones para incentivar su uso, principalmente con el emplazamiento de instalaciones a gran escala. Esto mantiene las pérdidas asociadas al transporte de energía, así como la falta de empatía de la sociedad urbana frente a las externalidades producidas en otros espacios. Como alternativa se plantea el autoabastecimiento energético, promoviendo el uso de los recursos endógenos que posee una ciudad. Esta tesis propone una metodología que permite explorar la factibilidad de incorporar energías renovables en los ambientes urbanos, analizando los recursos que se disponen, la accesibilidad a las tecnologías aplicables y los usos de la energía. El marco adecuado para este análisis es el Metabolismo Urbano, pues permite integrar aspectos técnicos y socioeconómicos.

1.1 Introducción

Las ciudades son el resultado del desarrollo energético y agrupan más del 50 % del grueso de la humanidad, concentran edificios, transporte, procesos industriales u otras innovaciones. Los residentes de las ciudades importan una gran cantidad de materiales que son transformados mediante procesos que pueden ocasionar impactos críticos a escala global o regional (Ngo & Pataki, 2008). Los desechos en un poco más de treinta años se han duplicado, y siguiendo esa tendencia esta cantidad se podrá elevar en la misma proporción los próximos treinta años (Brunner, 2007). En las áreas urbanas se produce entre el 70 % y el 80 % de los gases de efecto invernadero como consecuencia de los altos requerimientos energéticos que sobrepasan los dos tercios de las necesidades energéticas mundiales (Barles, 2009; Chen & Chen, 2012; Keirstead, Jennings, & Sivakumar, 2012).

Las ciudades ocupan menos del 3 % de la superficie de la Tierra (Grewal & Grewal, 2013) con una alta concentración de la población (Weisz & Steinberger, 2010). Esto se manifiesta en la concentración de actividades económicas, acumulación de materiales y requerimientos de altas cantidades de energía y materias primas (Niza, Rosado, & Ferrão, 2009) que provocan grandes impactos sobre el medioambiente (Agudelo-Vera, Leduc, Mels, & Rijnaarts, 2012; Pincetl, 2012). Además, la alta aglomeración de individuos puede provocar una pobre calidad de vida por el incremento de ruido, disminución de la privacidad, polución o congestión vehicular (Moles, Foley, Morrissey, & O'Regan, 2008).

A pesar de los altos requerimientos de energía y materiales se mantiene la desigualdad per cápita, pues se estima que solo 10 % de la población consume el 40 % de energía y el 27 % de materiales (Weisz & Steinberger, 2010). Las expectativas futuras estiman que a mediados del siglo XXI, la población superará el 80 % en las áreas urbanas, con ello los requerimientos de energía y materiales se incrementarán (Dixon, Eames, Britnell, Watson, & Hunt, 2014). Sin embargo, se espera que la desigualdad en el consumo energético mundial no se altere radicalmente.

El descubrimiento de nuevos campos petroleros y el aumento de eficiencia en el uso de energía han pospuesto una reforma a nivel global que limite el uso de recursos no renovables. Las ciudades en el futuro deberán enfrentarse a una nueva era energética enmarcada en la escasez y encarecimiento de los recursos fósiles (Páez, 2010). La incertidumbre frente al futuro, no implica dejar de lado la formulación de políticas enmarcadas en la sostenibilidad (Dixon *et al.*, 2014). Las tendencias mundiales frente

a la urbanización, requieren la revisión de políticas urbanas que motiven la adopción de alternativas de eficiencia energética (Baño Nieva, Castilla Pascual, & Estirado Oliet, 2015; IEA, 2009).

La Asamblea General de la ONU adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en septiembre de 2015. Los países miembros se comprometieron a cumplir metas relacionadas con el uso de energía, creación de infraestructuras y mantenimiento de las ciudades bajo el enfoque de la sostenibilidad. En particular se busca que las ciudades sean más resilientes frente al cambio climático, impulsando a la vez la economía y disminuyendo la pobreza (ONU, 2015). Pero no hay soluciones únicas por las diferentes configuraciones urbanas, disponibilidad de recursos, o demandas energéticas; sin embargo, se espera que su desarrollo se potencie con la colaboración entre municipalidades y el estudio de casos de éxito.

El autoabastecimiento energético utilizando energías renovables en la ciudad está plenamente alineado con estos requerimientos. A más de ello, la alta densidad de población concentrada en las ciudades ofrece oportunidades para conseguir economías de escala así como permiten promover planes enfocados al manejo eficiente de energía, instalaciones de transporte, aguas residuales o disposición de desechos (Moles *et al.*, 2008). Varias investigaciones han planteado alternativas, que a pesar de que no son prácticas a corto plazo requieren ser analizadas más aún en ciudades en donde la planificación no considera la disminución del consumo de recursos materiales o energía (Grewal & Grewal, 2013; Páez, 2010).

Las municipalidades tienen normalmente autonomía para planificar transporte, uso de suelo, edificación, provisión de agua o manejo de desechos, pero limitada incidencia en control y aprovisionamiento energético (IRENA, 2016b). Las ciudades disponen de variada energía residual o de recursos renovables que pueden ser incorporados a las matrices energéticas. Aunque el uso de los recursos renovables puede reunir méritos ambientales, es difícil para algunas tecnologías renovables tener una participación importante en la matriz energética urbana (Ren, Zhou, Nakagami, Gao, & Wu, 2010). El reto a largo plazo es reformular una política energética que permita modificar la demanda de la comunidad (Grewal & Grewal, 2013). Y a su vez se provoque el cambio en el comportamiento de los consumidores, la dinámica del mercado y de las fuerzas políticas.

Las ciudades requieren conocer otras opciones para cubrir sus necesidades y así asegurar su resistencia en caso de que no se dispongan de recursos para su

mantenimiento y desarrollo (Agudelo-Vera *et al.*, 2012; Bristow & Kennedy, 2013c). Sin duda este aspecto puede ser válido solo si se conocen los recursos que pueden servir de sustitutos en aplicaciones definidas.

Wolman (1965) analizó y cuantificó los flujos de entrada y salida para una ciudad de un millón de habitantes, iniciando así el uso del concepto de metabolismo urbano (MU). Wolman lo definió como «todos los materiales y materias primas necesarios para sostener a los habitantes de una ciudad». Bajo esta perspectiva, a una ciudad puede considerarse como un ecosistema «nuevo» poco desarrollado (Pincetl, 2012) altamente dependiente de los recursos provenientes de fuera de sus límites.

El MU concibe a la ciudad como un ecosistema interactivo, por tanto, se aplican las reglas de los procesos bióticos y abióticos, en los procesos económicos, sociales o ecológicos y sus relaciones con el medio externo (Chen & Chen, 2012). A diferencia del metabolismo natural que se lo considera circular (entradas y salidas relacionadas), el metabolismo urbano es lineal (entradas y salidas no relacionadas) (Brunner, 2007).

Dada la presión que ejercen las ciudades sobre el medioambiente, se plantea que no mantengan un metabolismo lineal, sino más bien se aproveche y maximicen el uso de sus entradas, así como de sus salidas. Esta linealidad que se manifiesta en la mayoría de sistemas urbanos (Wouter R W A Leduc & Van Kann, 2013) consiste en disponer como entradas extensas cantidades de insumos (por ejemplo energía, alimentos o materia prima) con lo que se tienen salidas como bienes, servicios y desechos. Desde esta perspectiva se tienen dos problemas: i) una alta necesidad de recursos, que comprometen las fuentes de provisión de los mismos y ii) masiva disposición de desechos que causan contaminación (Agudelo-Vera *et al.*, 2012).

El modelamiento de una ciudad a través del concepto de metabolismo, es utilizado para obtener información de energía, eficiencia energética, reciclaje de materiales, manejo de desechos; además, permite cuantificar tanto entradas, salidas o almacenamiento de agua, energía, nutrientes, materiales y los desechos producidos (C Kennedy, Pincetl, & Bunje, 2011; Yan Zhang, 2013).

A diferencia del MU que evalúa las entradas y salidas de materiales, la energía tiene un comportamiento que difiere, pues no es reversible. La energía permite la transformación de materiales y a pesar de que puede ser almacenada, en forma general se disipa (Proops, 1977). Un análisis de las relaciones energéticas internas en una comunidad debe considerar tanto la energía directa como la energía indirecta.

Al primer tipo se entiende como los ingresos energéticos que proviene de la electricidad y de los combustibles fósiles, mientras que la energía indirecta es la que está embebida en los productos (Lixiao Zhang, Hu, & Zhang, 2014).

Agudelo-Vera *et al.* (2012) consideran que las ciudades pueden ser consideradas como reservorios de recursos y productoras de recursos secundarios. Este enfoque de análisis tradicionalmente ha servido para establecer los flujos de materiales y energía de una ciudad; y, a pesar de que se menciona como requerimiento ineludible el establecimiento de un proceso circular metabólico, los estudios se han enfocado marginalmente en el autoabastecimiento energético a través de energías renovables.

De acuerdo con la propuesta de Yan Zhang y colegas (2009) se puede simplificar como la incorporación de las ER, podrían abastecer la demanda energética. Así, si los flujos de energía urbana (U) se contabilizan como la suma de la energía renovable (ER), la energía no renovable (NR) y las importaciones (IMP), si se mantiene el requerimiento U (es decir, sin adoptar medidas de eficiencia energética), se requiere entonces incrementar el uso de la energía renovable para disminuir el uso de energía no renovable y las importaciones energéticas.

Esta tesis determina si el incremento de la energía renovable en la ciudad puede sustituir las importaciones de energía y disminuir el uso de energía proveniente de recursos fósiles. Para verificar esta propuesta se analiza el caso de la ciudad intermedia de Cuenca, ubicada en Ecuador.

1.2 Objetivos de la tesis

Mostrar que la incorporación de las ER mejora el metabolismo urbano circular en una ciudad de un país en vías desarrollo, medido bajo indicadores de sostenibilidad.

1.2.1 Objetivos específicos.

- Revisar el estado del arte del metabolismo urbano y de las tecnologías de producción de energía que pueden aprovechar recursos que disponen las ciudades.
- Formular el método de flujos de energía de forma que considere los tipos de energía y sectores de consumo.
- Identificar las energías aplicables en los ambientes urbanos según el potencial energético disponible.

- Determinar los principales criterios para la incorporación de las ER en ambientes urbanos.
- Proponer indicadores de sostenibilidad que permitan medir la influencia de las ER en los ambientes urbanos.
- Aplicar la metodología en la ciudad intermedia de Cuenca, Ecuador.

1.3 Alcance de la tesis

Este documento analiza las posibilidades para que la energía directa que se utiliza en la ciudad sea sustituida por energía proveniente de tecnologías que utilizan recursos renovables que dispone la urbe. El metabolismo urbano permite desarrollar esta propuesta pues promueve que las ciudades dependan menos del agua, materiales, nutrientes y energía que provienen del exterior de sus límites. Cuando se analiza a la ciudad bajo este enfoque varias investigaciones toman a las energías renovables como una alternativa viable para disminuir la transferencia de energía. Sin embargo, no está claro en qué medida su aplicación puede fomentar un cambio en el modelo energético urbano.

Hay varios métodos para analizar las entradas y salidas que estudia el MU (agua, materiales y energía). El estudio del estado del arte permitió definir el método de flujos de energía directa como el más adecuado para analizar la inclusión de las energías renovables en la ciudad.

Se identificaron once tecnologías renovables que pueden ser utilizadas bajo este enfoque. La búsqueda de estas tecnologías permitió definir ejemplos y estudios de propuestas en varias ciudades con diferentes entornos. Puesto que las ciudades son espacios que difieren, ya sea por su configuración, emplazamiento, clima o condiciones sociales no es posible generalizar que opción es óptima para una ciudad determinada. Con el fin de seleccionar la tecnología más adecuada para una ciudad se utilizó una técnica multicriterio (MCDA o Multiple-criteria Decision Analysis por sus siglas en inglés).

Las técnicas multicriterio han sido utilizadas para ayudar al proceso de decisión en ámbitos energéticos, principalmente en países o regiones. Estas técnicas han posibilitado elegir tecnologías de producción energética, pero marginalmente han sido utilizadas para procesos de decisión energética en ciudades. Por ello, la falta de información para seleccionar que tecnologías son aplicables en las ciudades condujo

a determinar catorce subcriterios (técnicos, económicos, ambientales y sociales) que se integran al proceso de decisión. La ponderación de los criterios, así como la valoración cualitativa se la hace con consulta a expertos locales e internacionales.

Las ciudades no suelen ser caracterizadas en términos de energía. Se propuso utilizar la caracterización que se utiliza en países y regiones a través del balance energético y el diagrama de Sankey. Esta caracterización está completamente alineada al método de análisis de los flujos de energía directa. Asimismo, para focalizar la incorporación de las diferentes tecnologías en la matriz energética urbana, se planteó ramificar la demanda de energía en sectores y subsectores.

El cambio del modelo se lo hace incorporando la estimación del potencial energético renovable. Bajo este enfoque la ciudad deja de ser receptora de energía y se admite que en sus límites es posible generar energía que puede sustituir la importación de energéticos. Para evaluar la incorporación de este potencial se propusieron escenarios, cuyos resultados expresados en balances energéticos permitieron establecer cómo cambia el modelo energético urbano. Además, se consideró siete indicadores energéticos de sostenibilidad urbana, los mismos que fortalecen el análisis de los escenarios y permiten discutir los resultados.

La propuesta metodológica elaborada fue aplicada a la parte urbana de la ciudad ecuatoriana de Cuenca. El método multicriterio PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) permitió definir cinco tecnologías que posibilitan reemplazar energéticos para transportación, producción de electricidad y calentamiento de agua. Se caracterizó a la ciudad utilizando el modelo energético LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning System). Se establecieron cuatro sectores (residencial, comercial, industrial y otros) y subsectores al lado de la demanda, para definir la situación base. Y seis escenarios en donde se incluye el potencial de las tecnologías renovables en forma individual y total. A más de los balances energéticos y diagramas de Sankey, los indicadores de sostenibilidad urbana permiten analizar el impacto de las tecnologías en la ciudad. Los resultados obtenidos si bien no se pueden generalizar, dan pautas sobre si hay posibilidad de disminuir los flujos de energía directa que entran a una ciudad utilizando las ER.

La diferencia con otros estudios es que en forma integral: i) se identifican las tecnologías factibles de aplicar en la ciudad; ii) se identifica los usos de energía, iii) se identifica las tecnologías aplicables a una ciudad determinada en función de los

recursos y la consulta a expertos y iv) se valora cómo afectaría la implantación de las tecnologías elegidas mediante el uso de indicadores de sostenibilidad.

1.4 Aportaciones de la tesis

La propuesta busca modificar el modelo energético urbano promoviendo que los flujos de energía que provienen del exterior de los límites de la ciudad disminuyan. Varias investigaciones proponen el uso de energía renovable para cambiar el metabolismo urbano lineal a uno circular, sin embargo, no cuantifican si esta opción es válida. Esta investigación contribuye a clarificar si esta opción podría modificar el modelo energético urbano en una ciudad a través de una propuesta metodológica que fue aplicada a una ciudad intermedia.

Otras contribuciones específicas de la investigación son:

- Analiza el uso de las energías renovables en el marco del metabolismo urbano. Define el modelo metabólico para analizar la inclusión de las ER en la ciudad.
- Determina once tecnologías de producción energética que utilizan recursos renovables disponibles en la ciudad.
- Utiliza un método multicriterio para seleccionar la tecnología más adecuada para una ciudad. Asimismo, establece, categoriza y jerarquiza catorce subcriterios (técnicos, económicos, ambientales y sociales) que se consideran influyentes para ayudar a la selección de las tecnologías renovables que utilizan recursos endógenos de la ciudad.
- Propone modelar integralmente a la ciudad en términos de energía directa utilizando un modelo energético que caracteriza los flujos de energía y es generalmente utilizado en países o regiones.
- Estima el potencial renovable de una ciudad intermedia y valora como el modelo energético varía, en distintos escenarios.
- Define siete indicadores de sostenibilidad energética urbana, que miden el impacto de la inclusión de las tecnologías renovables dentro del modelo energético urbano.

1.5 Contenido y estructura de la tesis

Esta tesis está compuesta por seis capítulos relacionados con los objetivos propuestos:

Como punto de partida en el Capítulo II, referente al **Metabolismo urbano y la energía**, se hace una revisión bibliográfica sobre el metabolismo urbano, tendencias y métodos para evaluarlo. Esto permitió definir qué tipo de método es factible para modelar la energía directa que se utiliza en la ciudad, con miras a realizar políticas que permitan modificar el modelo energético urbano.

Siguiendo con el estado del arte, en el Capítulo III, en el análisis de **Las energías renovables bajo el enfoque del metabolismo urbano**, se incluye una revisión bibliográfica de ciudades en las cuales se analiza la incorporación de las tecnologías renovables. Se establecen y pormenorizan once tecnologías que utilizando recursos que provienen de la ciudad pueden sustituir a los portadores energéticos.

En el Capítulo IV referente a la **Propuesta metodológica para la aplicación de las energías renovables en el metabolismo urbano de las ciudades** se describen las herramientas empleadas para lograr los objetivos planteados. En cada etapa se justifica como se optó por la herramienta utilizada. Se eligió al método PROMETHEE como el más adecuado para seleccionar tecnologías renovables en entornos urbanos. Se establece, además, catorce criterios cualitativos y cuantitativos para facilitar la selección. Asimismo, se indica cómo puede darse pesos a los criterios empleados. Para representar los flujos metabólicos de energía urbana se adapta el modelo LEAP para construir el balance de energía urbano y diagramas de Sankey. Asimismo, para la comparación de escenarios se propone el uso de indicadores de sostenibilidad energética.

En el Capítulo V se analiza **El caso de la ciudad de Cuenca, Ecuador**, a partir de la metodología propuesta. Se describe a Cuenca, especificando su situación energética con el fin de determinar la situación base. Con el *software* LEAP se construye el balance de energía y el diagrama de Sankey de la ciudad. Se establecieron los principales sectores y usos de la energía a nivel local. La aplicación del método multicriterio PROMETHEE, requirió una revisión bibliográfica para establecer los criterios cuantitativos y entrevistas locales para establecer los criterios cualitativos. Los pesos se obtuvieron aplicando una encuesta a expertos internacionales. Se estimó el potencial energético a cinco tecnologías consideradas adecuadas de implementar en la ciudad. Los resultados fueron introducidos al modelo LEAP, para

formular escenarios. Junto con los flujos de energía, los indicadores de sostenibilidad energética permitieron valorar las condiciones económicas, ambientales y sociales resultantes de los escenarios propuestos.

En la **Discusión, conclusiones y estudios futuros** del Capítulo VI se discuten en forma secuencial los resultados de la investigación. Se argumenta cómo el uso de las energías renovables contribuirían al modelo metabólico circular. Se examina cómo podría influir la incorporación de las energías renovables en la matriz energética urbana a partir de los resultados presentados en los balances de energía y los indicadores de sostenibilidad propuestos. Por último, el autor propone estudios futuros que se podrían derivar de esta investigación.

2 EL METABOLISMO URBANO Y LA ENERGÍA

Aun así, en las ciudades la fiesta continúa

como si nada.

James Lovelock

Las ciudades son ambientes creados por los humanos que requieren grandes cantidades de materiales y energía. El consumo constante de recursos ejerce presión sobre el medioambiente no solo por su explotación, sino también porque una vez procesados producen residuos, emisiones o efluentes. Las ciudades son responsables de más de tres cuartas partes de las emisiones de gases de efecto invernadero. Se prevé que la población urbana aumentará hasta en un 80 % a mediados del siglo XXI, lo que hará que el modelo energético actual sea insostenible, ya que se basa en el uso intensivo de recursos fósiles. Una de las herramientas para describir las interacciones que suceden en la ciudad es analizar su metabolismo urbano, que estudia los flujos de materiales, agua, energía y nutrientes. En este capítulo se revisan investigaciones que utilizan esta herramienta y luego se detalla cómo puede utilizarse para analizar la energía directa que las ciudades requieren. Esto como paso previo para incluir en el modelo energético urbano el uso de tecnologías de producción de energía que utilizan recursos renovables disponibles en las ciudades.

2.1 La ciudad y el desarrollo energético

Las ciudades son creaciones humanas, que inicialmente se asentaron lo más cerca posible de los sitios en donde se encontraban los recursos. A medida que los estilos de vida se modificaron, las poblaciones fueron alejándose de los lugares en donde se encontraban dichos recursos (Wouter R W A Leduc & Van Kann, 2013). Más del 50 % de la población mundial vive en áreas consideradas como urbanas, que consumen más de dos tercios de la energía primaria, que provocan entre el 70 % al 80 % de las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la energía (Barles, 2009; Chen & Chen, 2012; Keirstead *et al.*, 2012).

Las ciudades han transformado profundamente los ecosistemas en donde se han asentado, debido a la remoción del suelo y a la transformación de áreas ocupadas por plantas y animales (Pincetl, 2012). Para el año 2050, se espera que el 80 % de la población se encuentre en las zonas urbanas (Dixon *et al.*, 2014). Es decir, las transformaciones se irán acentuando dentro y fuera de sus límites, pues una ciudad puede requerir entre una a dos veces de su superficie para mantenerse (Christopher Kennedy, Cuddihy, & Engel-Yan, 2007).

Las ciudades ocupan menos del 3 % de la superficie de la Tierra (Grewal & Grewal, 2013) provocando una alta aglomeración de la población (Weisz & Steinberger, 2010). Esto se manifiesta en la concentración de actividades económicas, acumulación de materiales y requerimientos de altas cantidades de energía y materias primas (Niza *et al.*, 2009) que provocan grandes impactos sobre el medioambiente (Agudelo-Vera *et al.*, 2012; Pincetl, Bunje, & Holmes, 2012). Una alta aglomeración de individuos, además, puede provocar una pobre calidad de vida por el incremento de ruido, disminución de la privacidad, contaminación o congestión vehicular (Moles *et al.*, 2008).

Las ciudades son el resultado del desarrollo energético, que, a más de agrupar al grueso de la humanidad, concentran edificios, transporte, procesos industriales u otras innovaciones. Los residentes de las ciudades importan una gran cantidad de materiales que son transformados mediante procesos que pueden ocasionar impactos críticos a escala global o regional (Ngo & Pataki, 2008). Los desechos en un poco más de treinta años se han duplicado, siguiendo esa tendencia esta cantidad se podrá elevar en la misma proporción los próximos treinta años (Brunner, 2007).

Las actividades urbanas están influenciadas por diferentes interrelaciones no solo humanas sino institucionales, que van desde la edad de la ciudad, su nivel de

desarrollo, disponibilidad tecnológica, cultura (Pauleit & Duhme, 2000), historia, geografía o clima (Pincetl *et al.*, 2012). La estructura de la ciudad depende de flujos de bienes, materiales o servicios que se importan, exportan o transforman (S. L. Huang & Chen, 2005) y que se interrelacionan entre sí a través de la economía y el ambiente (Niza *et al.*, 2009). Las ciudades son ambientes complejos, establecidos en áreas en donde los seres humanos desarrollan diversas actividades sociales y económicas, bajo circunstancias geopolíticas y ambientales particulares. Para una evaluación completa se requiere un amplio análisis (Christopher Kennedy *et al.*, 2007) que incluya factores que son interdependientes.

Las expectativas frente al deterioro ambiental, incluyendo los futuros efectos del calentamiento global, exigen que la forma en cómo se concibe la ciudad se modifique. Como paso esencial surge la necesidad de políticas públicas y una planificación organizada que provoque un cambio en la actuación de los habitantes (Agudelo-Vera *et al.*, 2012). Dada la enorme presión que ejercen las ciudades sobre el ambiente, los cambios que se propongan son de hecho una oportunidad para promover la sostenibilidad (Pincetl, 2012; Ren *et al.*, 2010).

La alta densidad de población concentrada en las ciudades ofrece oportunidades para conseguir economías de escala, así como permiten promover planes enfocados al manejo eficiente de energía, instalaciones de transporte, aguas residuales o disposición de desechos (Moles *et al.*, 2008). Varias investigaciones han planteado alternativas, que a pesar de que no son prácticas a corto plazo requieren ser analizadas más aún en ciudades en donde la planificación no considera la disminución del consumo de recursos materiales o energía (Grewal & Grewal, 2013; Páez, 2010).

Como alternativa de cambio se plantea el aprovisionamiento autónomo, el mismo que se define como la habilidad que tiene una comunidad para proveerse internamente de sus necesidades básicas. En el caso energético lo que se busca es que la comunidad considere su geografía local, así como la disponibilidad de sus recursos para solventar su demanda de energía (Grewal & Grewal, 2013). Por lo que cada comunidad debe analizar sus propias necesidades y los recursos que dispone. De aquí que se requiere estudiar las características locales para definir obstáculos y oportunidades particulares (Wouter R W A Leduc & Van Kann, 2013) frente a la inevitable disminución de recursos energéticos no renovables.

El descubrimiento de nuevos campos petroleros y el aumento de la eficiencia en el uso de energía, ha ido posponiendo una reforma a nivel global que condicione el uso de recursos no renovables. En el caso de las ciudades, la preparación frente a este requerimiento es crucial, puesto que deben enfrentarse a una nueva era energética enmarcada en los escasos y encarecimiento de los recursos fósiles (Páez, 2010). La incertidumbre frente al futuro, no implica dejar de lado la formulación de políticas enmarcadas en la sostenibilidad (Dixon *et al.*, 2014). Las tendencias mundiales frente a la urbanización requieren que los principios de sostenibilidad sean llevados a la práctica.

La ciudad no debe mantener un metabolismo lineal, sino más bien debe aprovechar y maximizar el uso de sus entradas, así como de sus salidas. Agudelo-Vera *et al.* (2012) exponen que las ciudades pueden ser consideradas como reservorios de recursos y productoras de recursos secundarios. Actualmente la tecnología permite que la provisión de energía proveniente de fuentes renovables no solo sea desde grandes infraestructuras. Vandevyvere *et al.* (2012) sostienen que se puede extender los esfuerzos para incluir en la planificación urbana el manejo sostenible de la energía. Una ciudad con bajas importaciones de energía y alta presencia de energías renovables, así como un uso eficiente de energía, por ejemplo, repercutirá en la reducción de CO₂.

Una importación nula de energía requiere una mirada holística a varios aspectos, en los que se incluye el manejo eficiente de energía en toda la infraestructura urbana (edificios, vehículos, industria). Mientras que la energía necesaria para cubrir la demanda provendría de la energía renovable (Carlisle, Geet, & Pless, 2009).

2.2 Los recursos energéticos renovables de las ciudades

Uno de los retos del siglo XXI es sustituir la demanda de recursos energéticos no renovables utilizando tecnologías de generación no convencional. Las matrices energéticas nacionales tienen una alta dependencia de recursos fósiles o grandes infraestructuras ligadas al deterioro ambiental que se encuentran lejos de los centros de consumo. El creciente requerimiento de energía, la materia prima o la operación de las instalaciones están ligados a la disminución de recursos o a condiciones geopolíticas que no siempre son favorables. La falta de capacidad de abastecerse de recursos autóctonos para la generación de energía ha sido una de las líneas de investigación que ha tenido auge en los últimos años.

Al igual que en los países desarrollados, en los países en vías de desarrollo se está buscando cambiar el modelo energético actual. Una de las alternativas es utilizar energías renovables no convencionales en función del potencial energético disponible. Sin embargo, en países como el Ecuador, que son por una parte productores de petróleo y por otra disponen de un gran recurso hidroeléctrico todavía no explotado, la entrada de las tecnologías renovables no convencionales se ve limitada.

A diferencia de la energía basada en combustibles fósiles, las energías renovables (ER) son consideradas sustentables. Ya que pueden aportar a las necesidades energéticas sin reducir la disponibilidad de energía en el futuro. Además, las ER pueden utilizarse en aplicaciones distribuidas, «promueven la mano de obra local y constituye un recurso autóctono, lo cual tiene directo impacto en la anhelada soberanía energética de cualquier país o región» (Barragán & Espinoza, 2015, p. 2).

Barragán y Espinoza (2015) sostienen que:

«varias son las ventajas que se exponen para que el público acepte a este tipo de tecnologías, sin embargo, al ser más intensivas en capital (si se las compara con las tecnologías que utilizan recursos fósiles), sus costos las hacen menos atractivas al momento de elegir las como sustitutos de las generadoras convencionales». (p. 2)

Otro inconveniente que presentan estas tecnologías es que se apoyan en recursos renovables (energía solar y eólica), es decir, no siempre están disponibles al requerimiento del sistema.

Diversos países están buscando la manera de incentivar su uso, principalmente en instalaciones a gran escala que en muchos casos se encuentran ubicadas lejos de los sitios en donde se concentran la demanda. Como alternativa se ha propuesto el autoabastecimiento energético urbano como medida de controlar la importación de energía y utilizar los recursos endógenos que posee la urbe.

La Asamblea General de las Naciones Unidas adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en septiembre de 2015. Los países miembros se comprometieron a cumplir con los objetivos relacionados con el uso de energía, la creación de infraestructura y el mantenimiento de la ciudad bajo un enfoque de desarrollo sostenible. Este compromiso busca hacer que las ciudades sean más resilientes con respecto al cambio climático, promoviendo la economía y disminuyendo la pobreza al mismo tiempo (ONU, 2015). En la Conferencia de las

Naciones Unidas sobre Vivienda y Desarrollo Urbano Sostenible (Hábitat III), realizada en octubre de 2016 en la ciudad de Quito, Ecuador, se propuso la necesidad de promover la eficiencia energética y el uso de fuentes de energía no contaminantes a nivel urbano (ONU, 2016).

A pesar de la falta de practicidad a corto plazo, estas alternativas deben ser analizadas, especialmente en ciudades donde la planificación no considera el consumo y la disminución de los recursos materiales o la energía (Grewal & Grewal, 2013; Páez, 2010).

El concepto que permite analizar este aprovisionamiento del recurso energético es el metabolismo urbano (MU). Este se entiende como «la suma total de procesos técnicos y socioeconómicos que ocurren en las ciudades que conducen al crecimiento, producción de energía y eliminación de desechos» (Christopher Kennedy *et al.*, 2007). Este enfoque de análisis tradicionalmente ha servido para establecer los flujos de materiales y energía de una ciudad; y a pesar de que se menciona como requerimiento ineludible el establecimiento de un proceso circular metabólico, los estudios se han enfocado marginalmente en el autoabastecimiento energético a través de energías renovables.

Con lo establecido por Zhang (2009) se puede simplificar como la incorporación de las ER, podrían abastecer la demanda energética. Así, si los flujos de energía urbana (U) están dados por la contabilización de energía renovable (ER), en energía no renovable (NR) y las importaciones (IMP), según como se establece en la Ecuación 2-1.

$$U = ER + NR + IMP$$

Ecuación 2-1

Si se mantiene el requerimiento U (es decir, no se considera eficiencia energética), con el fin de disminuir el uso de energía no renovable (NR) y disminuir las importaciones energéticas (IMP), se requeriría aumentar el uso de la energía renovable (ER).

En este documento se revisaron investigaciones que demuestran que es posible abastecer total o parcialmente la demanda energética y, de esta manera, se establece que las entradas energéticas de la urbe pueden disminuirse. La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos Scopus y Web of Knowledge, se registró investigaciones referentes: i) al metabolismo urbano, que incluían conceptos

generales, revisiones, metodologías de evaluación y proponían el uso de las energías renovables, ii) investigaciones relacionadas al uso de las energías renovables, que incluían aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales. En la Figura 2-1 se esquematiza el proceso que se utilizó para relacionar a las ER con el MU.

Piña y colegas (2014) establecen varios estudios en el contexto latinoamericano, sin embargo, estos se refieren a países. Según la revisión bibliográfica, en Latinoamérica hay carencia de estudios que utilicen el MU como herramienta que ayude a monitorear las transformaciones que ocurren en las ciudades con miras a evaluar si estas contribuyen al desarrollo sustentable (Conke & Ferreira, 2015). Y el uso de estos principios centrados, en el estudio del uso de la energía renovable en ambientes urbanos, es por tanto escaso.

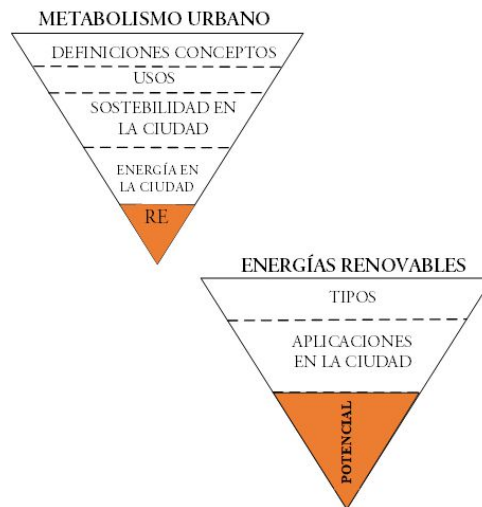


Figura 2-1. Las energías renovables bajo el metabolismo urbano

Fuente: Elaboración propia

Kennedy *et al.* (2011) mencionan que son siete las ventajas de utilizar el MU en estudios que requieren un análisis integrado. Y esas ventajas justifican que se utilice el marco del MU, para analizar los requerimientos que necesita una ciudad para que en su planificación se incorpore, primero el tema energético y luego el uso de las energías renovables. En la Tabla 2-1 se presentan las ventajas mencionadas y el marco de requerimientos para la elaboración de esta tesis.

Tabla 2-1. Justificación del estudio en el marco del metabolismo urbano

Ventajas	Requerimientos
Identifica límites	Definir el entorno de análisis (ciudad).
Contabiliza las entradas y salidas	Identificar flujos energéticos (combustibles, energía eléctrica).
Permite enfoque jerárquico	Delimitar los tópicos relevantes (energía que puede ser sustituida por fuentes no convencionales).
Permite un análisis sectorial	Definir el sector de estudio (industrial, comercial, residencial).
Analiza las políticas y la tecnología aplicables que promuevan la sostenibilidad	Definir el tipo de tecnología renovable que pueda ser aplicable (solar, biomasa, eólica, geotérmica). Definir políticas de promoción de las tecnologías.
Aproxima las soluciones y consecuencias	Analizar las implicaciones de la sustitución de las energías renovables en la ciudad.
Integración de la sociedad con la tecnología	Definir involucrados (público, expertos en municipios, sector energético, academia).

Fuente: Elaboración propia

Como complemento al análisis anterior, que se manifiesta en la bibliografía como justificación para incentivar el uso de las energías renovables en ambientes urbanos, están:

- La alta densidad de población concentrada en las ciudades ofrece oportunidades para conseguir economías de escala (Moles *et al.*, 2008), impulsar el desarrollo de nuevos empleos, el crecimiento del producto interno bruto (Eleftheriadis & Anagnostopoulou, 2015). La rápida urbanización puede ser utilizada como una oportunidad de cambiar el futuro de las ciudades si estas son concebidas como sistemas cuyos flujos energéticos pueden ser utilizados en forma eficiente (W R W A Leduc & Rovers, 2008).

- Aumentar el PIB (producto interno bruto), al disminuir el consumo intermedio de energía se incrementará el valor añadido¹ (Bristow & Kennedy, 2013a).
- El nivel adecuado para realizar un análisis y plantear acciones (de reducción de emisiones o de ahorro de energía), es a nivel local (ciudades, pueblos o distritos urbanos) (Bennett & Newborough, 2001).
- Disminuir las externalidades ocasionadas por el uso de energía que se obtiene fuera de los centros urbanos (Conke & Ferreira, 2015). Ralentizar la construcción de grandes infraestructuras de producción y transporte de energía o insumos relacionados. Disminuir las emisiones de CO₂.
- Hacer a las ciudades más resilientes frente a la provisión de recursos energéticos externos (Agudelo-Vera *et al.*, 2012; Bristow & Kennedy, 2013b).
- Los cambios sociales en el uso de la energía requieren cambios que se dirijan a plantear políticas que se enmarquen en los principios del desarrollo sostenible (Vandevyvere & Stremke, 2012).
- Promover la eficiencia en el aprovisionamiento de energía, pues la pérdidas asociadas al transporte desde largas distancias disminuirá (Rosenbloom & Meadowcroft, 2014). Disminuye el consumo de materia prima pues evita las pérdidas por transformación energética (Vandevyvere & Stremke, 2012).

2.3 El metabolismo urbano

Los estudios que analizan la masa y energía en ambientes urbanos han sido referidos con diversa terminología, pero a menudo se los llama como análisis urbano-metabólico (Ngo & Pataki, 2008).

Golubiewski (2012) hace una crítica de la terminología utilizada y manifiesta que antes de considerarse a la ciudad como un organismo se la debe considerar como un

¹ Una forma de medir el PIB es a través del cálculo del valor añadido, el mismo que se define como la diferencia entre la producción total y el consumo intermedio. De esta manera, si se quiere aumentar el PIB, una de las formas es disminuir el consumo intermedio, ya sea por i) mejora en la eficiencia (de tecnología y procesos), ii) vía economías de escala.

ecosistema ecológico. En el primer caso, el metabolismo analiza sus procesos químicos y físicos, mientras que en el segundo se analiza al conjunto de múltiples individuos y sus interrelaciones en un área definida. Además, observa la incompatibilidad de manejar los términos «metabolismo» y «ecosistema» como sinónimos y las limitaciones de utilizar una terminología no apropiada.

Kennedy (2012), desde un sentido pragmático, mantiene la validez de la terminología manifestando que las ciudades no son organismos vivos en el sentido biológico. Aunque crecen, producen o transforman energía y eliminan los desechos. Argumenta que el MU es la clave para entender la conexión entre la ecología y la economía. En ese mismo sentido, concluye que se puede manejar los términos de metabolismo en un ecosistema urbano, es decir, establece que la ciudad es un ecosistema. En este trabajo se mantiene como válido el enfoque de Kennedy, toda vez que el MU permite visualizar tanto a planificadores como al público el sistema ciudad.

A las ciudades se las ha comparado con organismos biológicos, pues necesitan energía y recursos, para transformarlos y convertirlos en trabajo y desechos. Sin embargo, se prefiere compararlas no como el metabolismo de un solo organismo sino como un ecosistema o como la suma de ecosistemas (Pincetl *et al.*, 2012). Desde esta perspectiva, a una ciudad puede considerarse como un ecosistema «nuevo» poco desarrollado (Pincetl, 2012) altamente dependiente de los recursos provenientes de fuera de sus límites. En este espacio, los humanos intercambian materiales y energía con el exterior (S. L. Huang & Chen, 2005) con el fin de alimentarse, trabajar, residir, transportarse y comunicarse (Brunner, 2007).

Tres son las características de la ciudad que se tiene como referencia para considerarlas como ecosistemas: i) integración, comprende tanto el subsistema socioeconómico y el área urbana que lo rodea, ii) dependencia, pues están vinculadas a áreas y recursos que provienen fuera de los límites urbanos, iii) fragilidad, pues la cantidad de productores es inferior a la de consumidores, lo que hace que la urbe sea un ecosistema frágil e insustentable. Análogo a la organización del ecosistema natural Chen y Chen (2012) estructuran a la ciudad como la composición de productores (entorno lejano e inmediato), consumidores primarios (sector de la construcción, energía, agua y suelo), secundarios (sector agrícola, comercio y servicios) y terciarios (sector doméstico).

Bajo la analogía con un ecosistema la ciudad debe tener la capacidad de adaptarse a los cambios. Es deseable analizar la sustitución de recursos que son utilizados tradicionalmente, por otros, que procuren el desarrollo de la ciudad sin que se comprometa el entorno. Sin duda este aspecto puede ser válido solo si se conocen los recursos que pueden servir de sustitutos en aplicaciones definidas. En el caso de los ecosistemas, la diversidad de opciones puede permitir compensar los disturbios por la falta de un recurso. Permitiendo la capacidad de resistencia de la urbe, ya que se puede sustituir los recursos faltantes por otros (Agudelo-Vera *et al.*, 2012; Bristow & Kennedy, 2013b).

Algunas investigaciones presentan a la ciudad como un «superorganismo», que no mantiene una simbiosis de común beneficio con el organismo que las acoge (S.-L. Huang & Hsu, 2003; Yan Zhang, 2013; Yan Zhang *et al.*, 2009). Este tipo de simbiosis, bajo términos de la biología, es considerada como parasitismo, puesto que el huésped al obtener solo beneficio del anfitrión le puede causar daño. Puesto que las relaciones con el ambiente pueden cambiar, se propone que el parasitismo cambie a mutualismo. En este caso, el huésped y el anfitrión se benefician y mejoran mutuamente. Este cambio es crucial más aún cuando se dispone de recursos limitados y una capacidad restrictiva de absorción de desechos (Yan Zhang, Yang, & Yu, 2006).

El superorganismo urbano complica la relación con su espacio exterior pues consume materiales y energía en forma ineficiente (Yan Zhang *et al.*, 2009). Estos insumos una vez procesados en bienes o servicios son descargados en forma de residuos al ambiente exterior (Yan Zhang, Yang, Fath, & Li, 2010). Gran cantidad de aguas residuales, desechos sólidos, materiales de construcción u otros, son exportados fuera de las áreas urbanas y otros permanecen en su interior (Agudelo-Vera *et al.*, 2012). En este sentido, las ciudades son sistemas abiertos y dependientes, cuyas actividades no pueden ser sostenidas en forma autónoma con el espacio que ocupan (Niza *et al.*, 2009). Los recursos provenientes de su entorno exterior necesitan ser procesados para que tengan una calidad determinada para ser utilizados (Bristow & Kennedy, 2013b).

2.3.1 Historia del concepto.

Abel Wolman (1965) analizó y cuantificó los flujos de entrada y salida para una ciudad de un millón de habitantes, iniciando así el uso del concepto de metabolismo urbano. Wolman lo definió como «todos los materiales y materias primas necesarios

para sostener a los habitantes de una ciudad» (p. 179); entiéndase para el desarrollo de sus actividades en hogares, trabajo u ocio (Lin *et al.*, 2012b). Kennedy *et al.* (2007) definen al metabolismo urbano como «la suma total de procesos técnicos y socioeconómicos que ocurren en las ciudades que conducen al crecimiento, producción de energía y eliminación de desechos» (p. 44).

El estudio de Wolman en 1965, se postula como punto de partida para el uso del concepto de metabolismo urbano. En 1960, Ernes Burgess ya aplica una noción que concibe la analogía entre el funcionamiento de una ciudad con las interacciones de los organismos (C Kennedy, Pincetl, & Bunje, 2012; Lin *et al.*, 2012b). Marx (1859), desde un punto de vista político, usa el término metabolismo para describir el intercambio de materiales y energía con la sociedad. Otras investigaciones como las de Podolinsky (1870), Geddes (1885) o Zhang *et al.* (2013), cuantifican las interrelaciones u otras determinan el uso de recursos de las ciudades (Lin *et al.*, 2012a).

El metabolismo urbano es un concepto que según Kennedy *et al.* (2012) incluye a los procesos socioeconómicos, así como los flujos de energía y materiales. Esto último conlleva una acotación pues Lin *et al.* (2012b) cuestionan que la definición expuesta no integre a la ecología urbana y la sociología urbana, y propone que el metabolismo urbano integre estos conceptos. En otras palabras plantea que este tema sea abarcado desde un enfoque interdisciplinario, pues necesita ser analizado desde varias aristas (Haberl, 2001a). Esta complejidad se debe a que en la ciudad se reconocen procesos ecológicos y económicos, que incluyen los flujos de energía y desechos, uso de suelos y variables socioeconómicas (Pincetl *et al.*, 2012).

Evaluar a una ciudad utilizando la técnica MU se ha convertido en una metodología que permite cuantificar sus patrones de consumo de energía y materiales (Pincetl *et al.*, 2012). Varios investigadores han desarrollado técnicas para valorar principalmente cuatro flujos o ciclos: agua, materiales, energía y nutrientes (Christopher Kennedy *et al.*, 2007). Los modelos empleados han ido evolucionando desde el proceso de caja negra, pasando por un proceso cíclico, hasta un modelo que estudia los flujos internos de materiales o energía dentro de la ciudad (Yan Zhang *et al.*, 2009). Estas técnicas van encaminadas a desarrollar mecanismos que permitan que las ciudades (sistemas artificiales o semiartificiales), puedan ser diseñadas para que simulen los ecosistemas naturales, y bajo esta perspectiva eviten la presión actual que ejercen sobre el ambiente (Yan Zhang, 2013).

El MU concibe a la ciudad como un ecosistema interactivo, por tanto, se aplican las reglas de los procesos bióticos y abióticos, en los procesos económicos, sociales o ecológicos y sus relaciones con el medio externo (Chen & Chen, 2012). A diferencia del metabolismo natural que se considera circular (entradas y salidas relacionadas), el metabolismo urbano es lineal (entradas y salidas no relacionadas) (Brunner, 2007).

Esta linealidad que se manifiesta en la mayoría de sistemas urbanos (Wouter R W A Leduc & Van Kann, 2013) consiste en disponer como entradas extensas cantidades insumos (por ejemplo energía, alimentos o materia prima) con lo que se tienen salidas como bienes, servicios y desechos. Desde esta perspectiva se tienen dos problemas: i) una alta necesidad de recursos, que comprometen las fuentes de provisión de los mismos y ii) masiva disposición de desechos que causan contaminación (Agudelo-Vera *et al.*, 2012).

Mientras no se cierre el ciclo –entradas, transformación, usos– el metabolismo no estará completo, si no hay la disposición adecuada de los residuos (S.-L. Huang & Hsu, 2003). La ciudad es una estructura antropogénica no autosuficiente e incapaz de autodesintoxicarse y, por tanto, es vulnerable (Brunner, 2007) por su alta dependencia de recursos del exterior (Agudelo-Vera *et al.*, 2012). Con los argumentos anteriores y siguiendo la propuesta de (Yan Zhang, 2013) se plantea que se acoja al modelo de un ecosistema natural, cuyo manejo de energía e insumos sea sostenible, procurando el reciclaje de materiales (C Kennedy *et al.*, 2011) y la optimización del manejo de la energía.

2.3.2 Tendencias de metabolismo urbano.

El estudio de los flujos de materiales, agua, nutrientes y energía ha ido derivando en modelos que tratan las interrelaciones entre los diversos componentes de las ciudades. Desde un modelamiento de caja negra a un análisis de los componentes y sectores internos de la ciudad, las herramientas se están enfocando a que los estudios se deriven en propuestas que modifiquen la situación actual de la manera en cómo la ciudad es concebida. Huang y colaboradores (2003) proponen la necesidad de utilizar los resultados de las investigaciones sobre el metabolismo urbano, para generar políticas públicas. Esto por cuanto el concepto de la planificación urbana tradicional consiste en crear espacios visuales agradables antes que hacer ciudades ambientalmente amigables. Dichas políticas dependen de las prioridades de las ciudades, su relación con el medio y del tipo de recursos que requieran o dispongan, por ello lo que se establezca para una ciudad puede variar para otra (Brunner, 2007).

Huang *et al.* (2005) advierten la falta de estudios relacionados para evaluar las actividades urbanas que relacionen los flujos de energía, por ello promueve el desarrollo de mecanismos que posibiliten el entendimiento de estas relaciones. Kennedy *et al.* (2011) hacen una revisión de más de cincuenta artículos y determinan que la mayoría de investigaciones realizadas son estudios contables sobre indicadores del flujo de energía, materiales, desechos o gases de efecto invernadero. Anota, además, que paulatinamente se está promoviendo aplicaciones orientadas hacia el diseño de la ciudad o al establecimiento de modelos matemáticos encaminados a analizar y promover políticas. Keirstead *et al.* (2012) clasifican una serie de modelos energéticos, concluyendo que es necesaria la creación de políticas que permitan entender las relaciones entre la energía y otras características de las urbes.

Pincetl *et al.* (2012) hacen una revisión de la historia del metabolismo urbano y consideran que el MU de primera generación incluye los mecanismos de contabilización de materiales y energía, y el método de energía. Propone una segunda generación que incluya un análisis de características locales de la política, economía, entorno social y geográfico en los hábitats urbanos. Además, plantean que los parámetros que se analizan en la primera generación (análisis de materia y energía) son insuficientes para entender la complejidad de los procesos urbanos.

Zhang (2013) revisa 213 artículos y registra cómo ha evolucionado la concepción del metabolismo urbano desde lo propuesto por Wolman en 1965. Además, describe los métodos contables utilizados para la valoración del MU y las técnicas de simulación que emplean los investigadores. En esta investigación se propone que los estudios de metabolismo urbano determinen los impactos ambientales, el uso de técnicas de optimización o el análisis de externalidades.

Basado en el MU, la cosecha urbana propone investigar las opciones para utilizar los recursos renovables o secundarios disponibles en las ciudades. Los recursos secundarios se entienden como aquellos que son productos de actividades humanas (salidas) que pueden ser aprovechados como entradas de otras actividades. Las investigaciones de Vera *et al.* (2012) y Leduc *et al.* (2013) analizan cómo incrementar la eficiencia de los sistemas energéticos urbanos a través de la energía residual de sus procesos.

La «cosecha» de energía residual parte de la base de que para el desenvolvimiento de la industria y transporte se requiere gran cantidad de energía de determinada

calidad en forma de electricidad o combustibles fósiles (Bristow & Kennedy, 2013a). Sin embargo, no todos los procesos requieren una misma calidad de producto energético, y por tanto, su energía de salida puede ser utilizada en procesos que requieren energía «de menor calidad».

Bristow y Kennedy (2013b) argumentan la necesidad de valorar el almacenamiento de materiales y energía con el fin de medir la resistencia de una ciudad frente al impedimento de provisión de recursos. En la investigación de Pincetl (2012) se plantea que a través de la ecología urbana se propicie a que las decisiones de los pobladores jueguen un papel jerárquico en la modelación de ciudades más sostenibles.

La mayoría de los estudios de metabolismo urbano proveen una instantánea de usos de los recursos o de energía, pero no correlacionan las locaciones, actividades o la gente. Se desconoce, por ejemplo, cuánta energía es utilizada en locaciones específicas, así como sus usos finales. Esta falta de datos impide relacionar flujos de energía, lugares o usuarios. En otras palabras se requiere entender qué se está usando, para qué, dónde y qué se hace con la energía, así como la contaminación que producen los desechos generados (Pincetl *et al.*, 2012).

Como se advierte se han derivado varios estudios del metabolismo urbano específicos para cada componente e interrelación. Asimismo, han surgido varias vías de análisis que se han plasmado en diversos métodos para evaluar estas interacciones.

2.3.3 Métodos para evaluar el metabolismo urbano.

El modelamiento de una ciudad a través del concepto de metabolismo es utilizado para obtener información de energía, eficiencia energética, reciclaje de materiales, manejo de desechos, además, permite cuantificar tanto entradas, salidas o almacenamiento de agua, energía, nutrientes, materiales y los desechos producidos (C Kennedy *et al.*, 2011; Yan Zhang, 2013). Para estudios de metabolismo urbano se recurre a dos tipos generales de metodologías; por un lado, están aquellas que se basan en inventariar las entradas y salidas (materiales y energía), y la otra que utiliza indicadores biofísicos que permiten representar los recursos y la eficiencia energética en términos de energía y exergía (Chen & Chen, 2012; C Kennedy *et al.*, 2011; Pincetl *et al.*, 2012). En la Tabla 2-2 se presentan diferentes estudios que se han conducido

para obtener ya sea inventarios, balance, flujos, indicadores, comparaciones entre ciudades o la valoración de la eficiencia o calidad del recurso.

Tabla 2-2. Diferentes estudios que aplican los principios del metabolismo urbano

Escuela ^a	Evalúa ^b	Obtiene ^c	Ciudad	Autor	
Contabilidad de flujos	Ma	In	Múnich	(Pauleit & Duhme, 2000)	
		Inv, Fl, Ba, Ev	Lisboa	(Niza <i>et al.</i> , 2009)	
	En	Ba, In,	Toronto	(Bristow & Kennedy, 2013b)	
		Fl, Ev, In	Singapur, Hong Kong	(Bristow & Kennedy, 2013a)	
	Ma	Fl, Ev	Ciudad americana típica, Bruselas, Sídney, Tokio, Hong Kong, Viena, Londres, Ciudad del Cabo	(Christopher Kennedy <i>et al.</i> , 2007)	
		En	Inv, Fl, Ba, Ev	Los Ángeles	(Ngo & Pataki, 2008)
	Indicadores biofísicos	Em	Inv, Ba, Ev, In	París	(Moles <i>et al.</i> , 2008), (Barles, 2009)
			Inv, Fl, Ba, Ev	Curitiba	(Conke & Ferreira, 2015)
			Inv, Fl, Ba, In	Bogotá	(Alfonso Piña <i>et al.</i> , 2014)
			Inv, Fl, Ba, In	Taipéi	(S.-L. Huang & Hsu, 2003)
Indicadores biofísicos	Em	Inv, Fl, Ba, In	Taipéi	(S. L. Huang & Chen, 2005)	
		Ba, Ev, In	Pekín, Shangái, Tianjin, Chongqing	(Yan Zhang <i>et al.</i> , 2010)	

Escuela ^a	Evalúa ^b	Obtiene ^c	Ciudad	Autor
		Inv, Fl, Ba, Ev	Pekín,	(Yan Zhang <i>et al.</i> , 2009)
	Ex	Inv, Ca, Ef	Kerkrade	(Wouter R W A Leduc & Van Kann, 2013)
		Inv, Ca, Ef	Wageningen	(Agudelo-Vera <i>et al.</i> , 2012)

- (Chen & Chen, 2012; Christopher Kennedy *et al.*, 2007; Pincetl *et al.*, 2012)
- Materiales (Ma), energía (En), emergía (Em), exergía (Ex).
- Inventario de recursos (Inv), balance de entradas y salidas (Ba), flujos anuales (Fl), evaluación comparativa (Ev), indicadores (In), calidad del recurso (Ca), eficiencia del recurso (Ef).

Fuente: Elaboración propia

2.3.3.1 Flujos de materiales.

Los materiales y energía que entran a las ciudades son consumidos y transformados para crear estructuras biofísicas que sirven a los seres humanos: artefactos, edificios, carreteras, máquinas, herramientas, cultivos agrícolas y ganaderos, productos de exportación a más de desechos (Pincetl *et al.*, 2012).

La contabilización de flujos de materiales (Material Flow Analysis, MFA, por sus siglas en inglés) se basa en el principio de la conservación de la masa – la masa no se crea ni se destruye (Pincetl *et al.*, 2012). Esta herramienta ha sido utilizada no solo localmente sino a nivel nacional y regional, permitiendo determinar qué materiales son consumidos y cómo estos pueden ser controlados (Barles, 2009). La evaluación permite visualizar cómo son afectados los sitios de donde provienen los recursos y los sumideros que reciben los residuos. Con ello se busca evitar la afectación de los ciclos naturales o la vida de los seres vivos (Conke & Ferreira, 2015). En este mismo sentido el análisis del ciclo de vida provee una valoración de la cuna a la tumba que incluye los impactos asociados desde la extracción hasta su disposición final (Pincetl *et al.*, 2012).

2.3.3.2 Flujos de energía.

Considerando que la energía es una transformación de la masa – la energía no se crea ni se destruye – la contabilización del flujo de materiales suele incluir el análisis de energía. Bajo este principio la contabilización de flujos de materiales se ha utilizado

para cuantificar flujos de energía (Pincetl *et al.*, 2012). Resulta interesante el análisis de Haberl (2001a), pues expone que el análisis de la energía en el metabolismo urbano por un tiempo fue excluido por la abundancia de estudios y estadísticas referidas al tema energético. Asimismo, este autor considera que la energía y los materiales son diferentes aspectos, pero que están interrelacionados en los mismos procesos. En este sentido, menciona que es esencial analizar la energía en la ciudad para conseguir un completo entendimiento del metabolismo social (Haberl, 2001a).

Un análisis completo de las relaciones energéticas internas en una comunidad debe considerar tanto la energía directa que consume un sector como la energía indirecta. Al primer tipo se entiende como aquellos ingresos energéticos que provienen de la electricidad, gas natural, carbón u otros recursos fósiles, mientras que la energía indirecta es la que está embebida en los productos que entran a un sector (Lixiao Zhang *et al.*, 2014). Yan y colegas (2014) establecieron que para Pekín la energía directa puede estar en alrededor del 40 % del consumo total de energía.

2.3.3.3 Emergía.

Al determinar los flujos de emergía, se utiliza una base común de evaluación a través del uso de una unidad de medida (Yan Zhang *et al.*, 2010). Para ello se define a la emergía como la cantidad de energía de un tipo que se necesita modificar para obtener un bien o servicio. Para transformar los flujos de materiales o energía en emergía se utiliza una transformidad. La transformidad se define como la medida de emergía requerida para producir una unidad de energía de un tipo en otro tipo (Yan Zhang *et al.*, 2009). La necesidad de realizar la conversión, se considera un limitante pues se requiere exactitud para realizar la conversión a una única unidad (Pincetl *et al.*, 2012). Otra dificultad es la obtención de datos o la dificultad de establecer límites que permitan identificar la totalidad de material y energía que cruza el área de análisis (Niza *et al.*, 2009).

La emergía considera que las ciudades son dependientes de la energía solar (Pincetl *et al.*, 2012). El método de emergía es utilizado especialmente en la China y es un método de medición no probada, lo que ha hecho que no sea muy utilizado en el occidente. Como complemento para el análisis de emergía está el uso de redes ecológicas, las cuales permiten enlazar las interacciones entre diferentes componentes de una ciudad. Esta técnica ha sido utilizada para evaluar los flujos de energía, agua y emisiones (Chen & Chen, 2012), además, si se conocen las diferentes

relaciones entre los componentes de una ciudad, se puede facilitar las decisiones sobre regulaciones que se deban tomar en determinados aspectos.

2.3.3.4 Exergía.

La exergía es definida como cantidad máxima de energía que puede transformarse en trabajo útil. En este caso el principio se basa en asumir que solo una fracción de la energía es aprovechada (W R W A Leduc & Rovers, 2008). Lo que se busca es que los flujos de energía resultantes de un proceso no se desperdicien y puedan ser útiles para otro proceso que requiera ese remanente de menor calidad (Wouter R W A Leduc & Van Kann, 2013), es decir, se incrementa la eficiencia pues se reducen las pérdidas.

A pesar de que diferentes actividades requieren de diferentes niveles de calidad, la provisión de electricidad o agua, por ejemplo, se la entrega con un solo tipo de calidad. En otras palabras hay actividades que sin requerir altos estándares de calidad de un parámetro determinado, se les entrega una alta calidad, lo que repercute en la eficiencia del sistema (Agudelo-Vera *et al.*, 2012).

2.3.4 Métodos para evaluar el metabolismo urbano energético.

Las investigaciones revisadas muestran diversos métodos para evaluar el metabolismo urbano de una ciudad. Zhang (2013) clasifica los métodos y su evolución a lo largo de los años. Esta categorización ha permitido estudiar la evolución de los procesos ecológicos, impactos sobre el medioambiente y el funcionamiento del mecanismo urbano. De esta clasificación se desprenden los siguientes modelos:

- Dinámica ecológica: analiza la estructura y el funcionamiento del sistema urbano, los mecanismos que influyen los procesos metabólicos en la urbe.
- Análisis de redes ecológicas: estudian la estructura y funcionamiento del sistema urbano desde una perspectiva holística, considerando las relaciones de materiales y energía entre sus componentes en diferentes niveles.
- Análisis de entradas y salidas: incluyen en el análisis el factor económico con los flujos de energía y materia a macroescala.
- Análisis de procesos: se considera con detalle los insumos necesarios para la producción de bienes bajo una perspectiva a microescala.

Una categorización más específica para evaluar el perfil energético urbano (ver

Figura 2-2) basada en técnicas de arriba hacia abajo (*top down*) establece Chen y Chen (Chen & Chen, 2015):

- Flujos energéticos urbanos: permiten hacer un seguimiento al consumo de energía directa y es posible relacionar la energía importada y exportada en función del tipo de combustible utilizado (Chen & Chen, 2015; Haberl, 2001a, 2001b).
- Análisis de entradas y salidas: permiten evaluar la energía directa e indirecta aportada entre dos diferentes sectores productivos. Las relaciones se valoran en términos energéticos en función de lo que un sector aporta a otro (Proops, 1977; Yan Zhang, 2013).
- Análisis de redes ecológicas: permite evaluar la energía directa e indirecta entre varios sectores productivos. Este enfoque considera que cada sector tiene enlaces con los otros sectores (Chen & Chen, 2012; Yan Zhang, 2013).

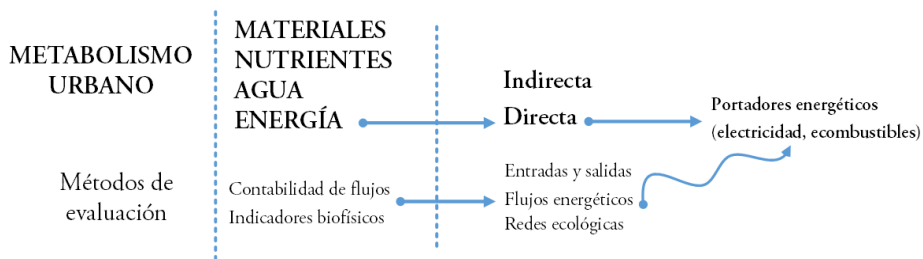


Figura 2-2. Métodos para evaluar la contribución de las ER en la ciudad

Fuente: Elaboración propia

A diferencia del MU que evalúa las entradas y salidas de materiales, la energía tiene un comportamiento que difiere, pues no es reversible. La energía permite la transformación de materiales y a pesar de que puede ser almacenada, en forma general se disipa (Proops, 1977). Un análisis de las relaciones energéticas internas en una comunidad debe considerar tanto la energía directa como la energía indirecta. Al primer tipo se entiende como los ingresos energéticos que proviene de la electricidad y de los combustibles fósiles, mientras que la energía indirecta es la que está embebida en los productos (L. Zhang *et al.*, 2014).

Puesto que se busca identificar los tipos de energías renovables que pueden utilizarse en las ciudades, para este trabajo se analiza la energía directa (Chen & Chen, 2015) que requiere una urbe (Bennett & Newborough, 2001).

Una vez establecido el consumo energético se obtienen indicadores de sostenibilidad

como costos de producción o emisiones de contaminantes atmosféricos (Lenzen, 1998). En estos análisis se puede incluir procesos que consideran la actividad humana o ecológica tal como propone Haber (2001a), quien considera que los flujos energéticos son insuficientes si no se incluye la energía correspondiente a la biomasa. Para el análisis de esta investigación no se aceptará esta inclusión y se considerará la energía útil para los procesos económicos (Chen & Chen, 2015).

Siguiendo estos principios, el modelo Hammarby propone reducir los flujos energéticos, particularmente de la energía secundaria (Pandis Iveroth *et al.*, 2013), con el uso de las energías renovables. Asimismo, el Proyecto Source (Sustainable Urban Cells) determina el balance energético entre la provisión de energía de fuentes renovables y el consumo de energía. En contraparte, Cumo *et al.* (2012) establecen la imposibilidad de mantener un equilibrio energético entre los requerimientos de energía y la energía renovable con las tecnologías existentes. El concepto de centro de energía descrito en Orehoung *et al.* (2013) examina la relación de los flujos de entrada y salida de energía. Se considera tanto las demandas energéticas en una villa como los tipos de energía requeridos y sus fuentes. La integración de diferentes tecnologías permite optimizar el consumo de energía, los costos o emisiones, ya que se dispone de múltiples fuentes que pueden ser convertidas a diferentes tipos de energías según los requerimientos de la villa. En estos proyectos se valoran los factores económicos y ambientales, pero no los sociales.

2.4 La sostenibilidad en las ciudades

La sostenibilidad condiciona al desarrollo de tal forma que no se pueda crecer sin tomar en cuenta la capacidad de rendimiento de los materiales y energía (Ngo & Pataki, 2008). Las ciudades, entonces, deberían manejar sus recursos de forma que: i) los recursos renovables que requieran no excedan su tasa de regeneración, ii) sus emisiones no excedan la capacidad que tienen los ecosistemas de asimilar los desechos, iii) los recursos no renovables requeridos no sean explotados de manera tal que su tasa de agotamiento no supere la tasa de creación de alternativas renovables (Wouter R W A Leduc & Van Kann, 2013).

Zhang (2013) afirma que las contradicciones entre el desarrollo económico y la protección del ambiente cada vez son más evidentes debido a la acelerada industrialización y urbanización. Por un lado, se busca una sociedad sostenible y por otro cada vez más se incrementa el uso de energía. Esto refleja la imposibilidad de la sociedad y sus instituciones de encaminarse a un manejo urbano que no requiera

abundantes recursos y que se enmarque en una política de austeridad (Páez, 2010).

Huang y Chen (2005) manifiestan que la intensiva urbanización e industrialización acelera los procesos entrópicos, que desembocarán en un «futuro poco prometedor para la vida». En otro trabajo Huang y Hsu (2003) enfatizan en la necesidad de cerrar el ciclo de entradas y salidas para asegurar la viabilidad de los recursos. Niza *et al.* (2009) anotan que el desarrollo sostenible en las áreas urbanas consiste en acoger el manejo de recursos y protección del ambiente a largo plazo. Esta tarea que viene a ser primordial pues como Barles (2009) lo demuestra las áreas urbanas pueden importar más de lo que ellas consumen. Yan Zhang *et al.* (2006) concluyen en su investigación en seis ciudades chinas, que las claves de la sostenibilidad son la disminución de la presión socioeconómica, la protección del ambiente y el aumento de la función del metabolismo urbano.

Haughton (1997) analiza cuatro modelos de desarrollo urbano enmarcados en la sostenibilidad (ciudades autosuficientes, rediseño de ciudades, inclusión de externalidades, ciudades justas), los mismos que postulan cambios extremos «deep green» (p. e. eliminación de vehículos personales) o propuestas menos radicales «light green» (p. e. mejora de eficiencia de vehículos). Dixon *et al.* (2014) estudian tres visiones de ciudades (inteligentes, compactas y autosuficientes) y analizan las tecnologías disruptivas que se pueden requerir a largo plazo para promover cambios. En estos modelos se infiere que un cambio a diferentes escalas (autoridades, planificadores o ciudadanos) en la manera de cómo se planifica la ciudad es indispensable si se quiere seguir un modelo de desarrollo sostenible. Asimismo, se desprende que esta transición «sociotecnológica» comprende un tiempo que no necesariamente es inmediato, y cuya metamorfosis requerirá innovación tanto en aspectos económicos o sociales (Dixon *et al.*, 2014).

Haberl *et al.* (2004) sostienen que la sociedad inevitablemente provoca cambios en los sistemas naturales y que la sostenibilidad posibilita anticiparlos antes que se produzcan catástrofes. En ese sentido, el metabolismo urbano, es una herramienta que permite monitorear y definir estrategias que garanticen una adecuada calidad de vida de los humanos mientras se transita por dichos cambios.

Otro reto es el cambio en la actitud de los usuarios, no solo por la afectación a sus intereses, sino por la sensación de impotencia. Por ejemplo, Bennett y Newborough (2001) anotan que en los hogares o empresas hay la percepción de que cualquier acción referente a aplicar prácticas referentes a eficiencia energética, es insuficiente

frente a la escala del problema, por lo que se inhiben de actuar. Por ello proponen que una escala adecuada para realizar un análisis y plantear acciones (de reducción de emisiones o de ahorro de energía), es a nivel local (ciudades, pueblos o distritos urbanos).

Las entradas de las ciudades provienen de otras regiones y los impactos ambientales asociados a su obtención no son visibles para los habitantes de las ciudades. Esto contribuye a la falta de interés por tomar acciones para precautelar la conservación de recursos y mantener el equilibrio ambiental (Conke & Ferreira, 2015). La falta de empatía de la sociedad limita las acciones encaminadas a la transferencia de los costos a otros espacios, tiempo o personas. Estos hechos han propiciado un generalizado interés por promover políticas de reducción de materiales y energía en la ciudad, como paso ineludible para conseguir la sostenibilidad (Weisz & Steinberger, 2010).

2.5 Necesidad de un planeamiento energético urbano

Para que las ciudades en el siglo XX sean aptas para las condiciones de salud de las personas se crearon infraestructuras o se propusieron políticas fundamentadas en el conocimiento científico. El objetivo fue por ejemplo dotar a la mayor cantidad de población de servicios básicos o disminuir enfermedades. El nuevo paradigma para el siglo XXI está cambiando, ya que las ciudades enfrentarán cambios ambientales o la escasez de recursos. Por ello se requerirá a más de nuevas infraestructuras políticas que promuevan un desarrollo de las ciudades condicionado a la reducción de sus entradas y a la disminución de sus desechos (Pincetl, 2012).

Se plantea que las ciudades sean diseñadas como un sistema con un metabolismo circular (Wouter R W A Leduc & Van Kann, 2013). Para contribuir al desarrollo de las energías renovables a nivel regional, se requiere establecer estrategias a largo plazo que apunten a un sistema energético sostenible y basado en recursos autóctonos (Terrados, Almonacid, & Pérez-Higueras, 2009). En este sentido, Haberl (2001a) expone que el conocimiento de los análisis derivados de estudios de flujos de materiales y energía posibilitará incrementar la eficiencia de los recursos utilizados. Las técnicas que permitan identificar las opciones futuras requieren una variedad de entradas que incluyen pronósticos, participación de grupos de interés, estudios de escenarios, análisis de la opinión de expertos o encuestas (Dixon *et al.*, 2014). Los modelos que se obtengan permitirían construir escenarios para recomendar políticas para promover cambios (H. Haberl, 2004).

En el caso de las ciudades de los países con economías emergentes, el conocimiento de su situación puede ayudar a definir una agenda que incluya el tema energético en miras a una era pospetróleo o tecnosolar (Páez, 2010). Tanto los estamentos públicos como el sector privado y los habitantes de las ciudades tendrán un papel preponderante toda vez que estén dispuestos a asimilar los cambios propuestos que conlleven a rediseñar su ambiente e infraestructura urbana.

Esta investigación propone una metodología para replantear la manera de planificar una ciudad, que incluya el autoabastecimiento energético al menos parcial, utilizando energías renovables no convencionales. Puesto que hay una separación que puede ser grande entre el «qué» hacer y el «cómo» hacer, queda de lado si la inmediatez de la propuesta es viable a corto plazo. Lo que se quiere es conocer el uso de la energía en el contexto urbano, los recursos que se disponen y las propuestas para promover un cambio a ese nivel. Todo aquello a partir de los puntos de vista de expertos en el conocimiento de la ciudad y la energía.

La planificación urbana requiere considerar varios tópicos, relacionados a la provisión de agua, materiales y energía, infraestructura pública, comercial e industrial. Si se pretende incentivar el uso de las energías renovables, se requerirá acompañar su implementación de un marco legal, herramientas, educación y ejemplos exitosos (Kanters, Wall, & Dubois, 2014; Radzi, 2014). Por ello, uno de los resultados esperados, es conocer cuáles son los inconvenientes para la implementación de las ER en ambientes urbanos, en este caso en Ecuador. El contexto ecuatoriano difiere ya sea en la situación económica, social y ambiental si se compara con el entorno en donde se han realizado otras investigaciones.

Carlisle (2009) sugiere que los planificadores definan los usos de energía y que se propongan hitos con el fin de propiciar que las comunidades sean autónomas. En los nuevos emplazamientos los planificadores pueden desde un principio establecer condiciones para promover edificaciones que acojan principios bioclimáticos o tecnologías renovables (Eicker, Monien, Duminil, & Nouvel, 2015).

Ampliando el criterio de Eleftheriadis y Anagnostopoulou (2015) al caso urbano, para este trabajo se argumenta que, la identificación de barreras que impiden la difusión de las ER es esencial para el desarrollo e implementación de políticas. Por ejemplo, Espinoza y Vredenburg (2010), en el caso de la energía eólica, concluyen que los factores que influyen para el éxito de esta industria, incluyen aspectos

económicos, las industrias relacionadas, factores informales, formales así como aspectos sociales, ambientales y financieros.

2.5.1 Establecimiento de políticas.

El MU es una herramienta que proporciona valiosa información que pueden ser utilizada para el análisis de la estructura, organización, usos de recursos, así como los impactos ambientales relacionados con la actividad humana en la ciudad (Pincetl, 2012). Más allá del concepto, el metabolismo urbano busca entender los procesos que se desarrollan en la ciudad (Yan Zhang, 2013). Este entendimiento puede llevarse luego al campo práctico, por ejemplo, mediante la adopción de políticas públicas para disminuir la huella ecológica de una ciudad (Moles *et al.*, 2008).

Un enfoque amplio e integral de cómo se entiende a la ciudad, puede ayudar a los entes organizacionales y administrativos a tomar decisiones. En este sentido, se busca promover soluciones que posibiliten el sostenimiento de la calidad de vida de los humanos sin agotar los recursos del planeta y a su vez evitar alterar las dinámicas que soportan la civilización (Pincetl *et al.*, 2012) tal como se la conoce.

El comportamiento de los habitantes, frente al consumo de materiales e insumos, o el uso de servicios energéticos o transporte tiene directa relación con el cambio de modelo lineal a circular. Esto implica, por ejemplo, el uso eficiente de recursos, el uso fuentes renovables o el aprovechamiento de recursos residuales con el fin de reducir la generación de recursos. En los estudios de Wouter *et al.* (2013) y Kennedy (2011) acotan que los propósitos del metabolismo urbano no son únicamente la cuantificación de los gases de efecto invernadero, la evaluación de los flujos y uso de materiales y energía, sino la promoción de políticas públicas.

Las políticas públicas que promuevan el cambio de tecnologías, reciclaje de materiales, reducción de residuos o emisiones o promuevan la eficiencia energética repercutirán en el uso de materia prima y en la reducción de desechos o materiales. Considerando que la relación entre entradas y salidas puede variar de 1 a 10, Brunner (2007) plantea que solo con cambios radicales de conducta se modificará la situación actual.

Al conocer los flujos de agua, energía o materiales, así como su uso, se puede relacionar con la eficiencia en el manejo de recursos e incluso se puede comparar con otras urbes. En este sentido, el manejo de recursos es el factor clave para el planeamiento urbano sustentable (Agudelo-Vera *et al.*, 2012; Niza *et al.*, 2009). De allí

que una política pública que motive este conocimiento permitiría planificar a las ciudades para limitar, reducir o reemplazar el uso de recursos (Christopher Kennedy *et al.*, 2007), convirtiéndolas gradualmente en superorganismos saludables (Yan Zhang, 2013).

3 LAS ENERGÍAS RENOVABLES BAJO EL ENFOQUE DEL METABOLISMO URBANO

*La transición hacia las energías renovables
es obligada; también cara y problemática.*

Editorial de El País

Las expectativas frente al deterioro ambiental, incluyendo los efectos del calentamiento global, exigen que se modifique el desarrollo urbano. Así surge la necesidad de políticas públicas y planificación organizada que incluyan conceptos relacionados al aprovisionamiento energético con recursos urbanos internos. Dada la enorme presión que ejercen las ciudades sobre el ambiente, se debe incluir propuestas que promuevan la sostenibilidad. La tecnología actual posibilita que la ciudad cambie de modelo energético basado en recursos externos. Varios estudios mencionan que la energía renovable debe usarse en las ciudades, pero no identifican los recursos y las tecnologías que se pueden usar para promover el metabolismo urbano circular. Una revisión de la literatura establece que hay al menos once tecnologías renovables con diferentes grados de madurez que podrían reducir la importación de recursos energéticos, lo que contribuiría a cambiar el modelo metabólico lineal en un modelo circular. Sin embargo, la aplicabilidad de las diferentes posibilidades depende de la disponibilidad de recursos, costos, políticas y aceptación de la comunidad.

3.1 La energía en las ciudades

El sector energético es estratégico, por un lado permite mantener un determinado estilo de vida y por otro es un requerimiento básico para el desarrollo económico de una sociedad (Terrados *et al.*, 2009). Tal como sucede en los ecosistemas, en un sistema abierto como el de las ciudades, la energía es indispensable para su crecimiento y mantenimiento (Bristow & Kennedy, 2013a).

Haberl (2001b) analiza las transformaciones energéticas desde una sociedad basada en la caza y recolección hasta una sociedad industrial, pasando por la sociedad agrícola. De acuerdo con cálculos empíricos sugiere que diferentes «modos de subsistencia» (p.78), que están estrechamente relacionados con la demanda de energía, y a su vez que el incremento per cápita de energía está vinculado con los problemas de sostenibilidad.

La Revolución Industrial permitió el avance de las ciencias y un crecimiento urbano vertiginoso relacionado con el uso intensivo de energía apoyado en la explotación de recursos fósiles (Pincetl *et al.*, 2012). Por más de doscientos años el modelo energético urbano se ha basado en el uso de combustibles fósiles, primero con el carbón que permitió el desarrollo industrial y luego con el petróleo que ha facilitado el crecimiento urbano (S. L. Huang & Chen, 2005), sin embargo, la «era de los combustibles fósiles» estaría en los próximos 100 a 200 años por terminar (Brunner, 2007).

Las sociedades que dependen de la importación de estos recursos son vulnerables pues tienen menos control sobre su economía (Grewal & Grewal, 2013). Además, su capacidad de recuperación frente a eventos externos se ve limitada por la falta de recursos propios. Páez (2010) analiza la situación de las ciudades en México y concluye que no están preparadas para afrontar una transición a fuentes alternativas de energía, una vez que llegue a desacelerarse la producción de petróleo y el costo de la energía se encarezca. Según este análisis la falta de preparación se debe a una carencia de leyes, políticas, planes, programas y recurso humano que imposibilitan desarrollar una agenda energética postpetróleo.

El autoabastecimiento mediante fuentes renovables, como solar fotovoltaica, solar térmica o recuperación de energía de los residuos, pueden ser una alternativa para promover un ciclo cerrado de energía en las urbes (Christopher Kennedy *et al.*, 2007), en la medida que se sustituya por tecnologías que requieran recursos fósiles. Para cada ciudad se debe hacer una valoración particular, pues sus condiciones

geográficas, la disponibilidad de recursos o los usos energéticos pueden ser limitantes para el uso de una u otra tecnología (Grewal & Grewal, 2013).

El conocer el potencial de uso que pueda existir dentro de una ciudad es un paso necesario, para su promoción frente a los impactos asociados a la extracción de recursos fósiles o los riesgos financieros debido a la incertidumbre de sus precios futuros. Similar a lo anterior Agudelo-Vera *et al.* (2012) exponen que una ciudad autosuficiente requiere en principio de un conocimiento pleno de los recursos que posee y esto puede ser un inconveniente pues la mayoría de ciudades desconocen sus recursos potenciales. Es de aclarar que la autosuficiencia se define como la habilidad de una comunidad para proveerse internamente de sus necesidades básicas (alimento, agua o energía) no necesariamente en forma total (Grewal & Grewal, 2013).

La modificación del estilo de vida de la comunidad requiere de compromisos que no son de aplicación inmediata. Se necesita replantear a mediano y largo plazo la manera en cómo se planifican las ciudades para que puedan autoabastecerse de forma que se disminuyan los requerimientos energéticos del exterior.

3.2 Las energías renovables en las ciudades

El reto en el planeamiento de las ciudades es incorporar a más de la eficiencia energética una fracción de energías renovables para abastecer su demanda. Esta transición propiciará ciudades más sustentables. El concepto de «trias» o triada energética soporta esta transición a través: i) del ahorro energético para disminuir la demanda, ii) uso de energía renovable para abastecer la demanda restante, iii) uso de recursos fósiles en forma eficiente, limpia y responsable (W R W A Leduc & Rovers, 2008; Vandevyvere & Stremke, 2012). En ese sentido, Radzi (2014) plantea que la autonomía energética se define como la habilidad de generar energía lo más cerca posible del sitio en donde se la consume.

Kennedy y colaboradores (2007) plantean que el reto es diseñar ciudades sustentables influenciadas por sus procesos metabólicos urbanos. En el caso de la energía, Chrysoulakis *et al.* (2013) añaden que se requiere maximizar y optimizar la eficiencia en las edificaciones, así como extender la participación de las energías renovables. El uso de las tecnologías renovables dentro de la ciudad puede ayudar a reducir las pérdidas de transmisión y la producción de energía y evitar la construcción de infraestructuras de generación y transporte (Ishugah, Li, Wang, &

Kiplagat, 2014), disminuir la polución, reducir el efecto de las islas de calor, mejorar la calidad de vida (Arodudu, Ibrahim, Voinov, & van Duren, 2014), (Nadaletti *et al.*, 2015), evitar cortes de energía o cubrir la demanda (Gautam, Li, & Ru, 2015). En el estudio de Hassan y Lee (2015) se concluye que la clave para conseguir la sostenibilidad urbana es la reducción del consumo de energía ya sea por su uso eficiente o por la confianza que se deposite en las energías renovables.

A pesar de que las energías renovables solar, eólica y otras son recursos que podrían abastecer una parte de la demanda de energía mundial, los costos asociados a la operación, mantenimiento y la falta de empatía con los sucesos ambientales, impiden la aceptación social y, por tanto, su uso masivo. De allí que se requiere políticas que promuevan la sostenibilidad y reviertan los inconvenientes citados.

En las ciudades construidas sin considerar la opción energética endógena, las edificaciones no adoptan la incorporación de sistemas energéticos pasivos o activos. Paulatinamente se han ido ejecutando estudios que abordan la capacidad que tiene una ciudad para autoabastecerse de energía total o parcialmente. En este sentido, Páez (2010) propone que en conjunto con los recursos renovables, se promueva la arquitectura bioclimática, eficiencia energética o la implementación de programas que se dirijan a un modelo circular de metabolismo urbano. Las investigaciones revisadas no solo se concentran en una tecnología pues se busca complementar la producción energética de varias energías renovables para mejorar el desempeño o cubrir la demanda (Eicker *et al.*, 2015; Palmas, Jensen, Haaren, & Schöner, 2012; Sarralde, Quinn, & Wiesmann, 2011; Yeo & Yee, 2014).

Sin embargo, a pesar de los esfuerzos que se hagan, se requieren acciones complementarias para alcanzar un equilibrio entre el balance de los flujos de energía de entrada y salida (Cumo *et al.*, 2012; Pandis Iveroth *et al.*, 2013). Debido a la densidad de la energía demandada dentro de una ciudad, la energía renovable puede reunir solo un pequeño porcentaje de la demanda total (Bristow & Kennedy, 2013b). De hecho, para que la demanda y oferta se acoplen se necesitará más esfuerzo para conseguir el objetivo de comunidades con cero energía exógena (W R W A Leduc & Rovers, 2008).

3.2.1 Clasificación de las energías renovables.

Se analizó bibliografía que indican propuestas de varios investigadores para promover el uso de las ER en las ciudades. Hasta el momento no existe un único

método para valorar el potencial energético dentro de una urbe. Las tecnologías aplicables dependen del recurso existente, así como de los requerimientos de los usuarios. Asimismo, no está clara cuál es la mejor opción desde el punto de vista tecnológico, social, ambiental o económico. Además, la elección dependerá de los recursos disponibles, de los beneficios perseguidos o de la disminución de externalidades (Arodudu *et al.*, 2014; Vandevyvere & Stremke, 2012).

En este trabajo se identifican tecnologías renovables que puedan aplicarse en las ciudades, y que podrían permitir un abastecimiento relevante. Se considera como referencia la clasificación del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España (IDAE, 2011). En la Tabla 3-1 se establecen 11 sectores y 22 sistemas de energías renovables. A través de una revisión bibliográfica, se identificaron potenciales usos de las tecnologías dentro de la ciudad. Se eligió aquellos sistemas cuyos recursos se dispone dentro de la urbe (biomasa, energía solar, eólica o geotérmica) o provienen de ella (residuos o aguas residuales).

Tabla 3-1. Clasificación de las energías renovables según el IDAE

Sector	Sistema	Para integración urbana
Biocarburantes	Bioetanol	Sí
	Biodiésel	No
Biomasa	Gasificación	No
	Combustión directa	Sí
	Co-combustión	No
Biogás	Biogás	Sí
	Biogás RSU vertedero	Sí
Residuos	Incineración y co-incineración	Sí
	Gasificación RSU	No
Energías del mar*	Corrientes	No
	Mareomotriz	Sí
Eólico	Terrestre (eje vertical u horizontal)	Sí
	Marítima	No
Geotérmico	Generación eléctrica	No
	Climatización (lazo cerrado o lazo abierto)	Sí
Hidroeléctrico	Minicentral hidroeléctrica**	Sí
Solar fotovoltaico	Fotovoltaico (terrazas o fachadas)	Sí
Solar térmico	Solar térmica	Sí
Solar termoelectrico	Cilindro parabólico	No
	Receptor central	No
	Colectores lineales	No

Sector	Sistema	Para integración urbana
	Discos parabólicos Stirling	No

* El IDAE incluye la energía de las olas o undimotriz, pero su estado de desarrollo es «incipiente» por lo que en esta clasificación se presenta la energía mareomotriz, también incluida en IDAE (2011) y estaría disponible en ciudades con borde costero.

** Menor a 10 MW según la clasificación del IDAE

Fuente: Elaborado en función del IDAE (2011)

La energía directa o materia que provenga del exterior no se considera pues lo que se promueve es el metabolismo energético urbano circular. Por ello, los biocarburantes que requieren materia prima del exterior o dispositivos solares termoelectricos se descartan. En el caso de la energía hidroeléctrica y la energía mareomotriz, aun cuando existen experiencias de su aplicación en áreas urbanas, su uso quedaría limitado en aquellas ciudades que presenten condiciones adecuadas.

A través de una revisión bibliográfica utilizando las bases de datos *Scopus* y *Web of Knowledge*, se identificaron varios estudios que analizan diversas aplicaciones del uso de las energías renovables en las áreas urbanas. En la Tabla 3-2 se muestran diferentes tecnologías propuestas para diferentes ciudades, así como los objetivos de las investigaciones.

Tabla 3-2. Estudios realizados en diferentes ciudades relacionados al uso de las energías renovables

Tecnología	Objetivo del estudio	Ciudad	Referencia
Biomasa	Evalúa el potencial de biomasa y la densidad energética.	Seúl, Daegu, Daejeon, Gwangju, Busan (Corea del Sur)	(Kook & Lee, 2015)
	Calcula el potencial energético de la biomasa que proviene de las áreas urbanas, utilizando información geográfica y ciclo de vida.	Ciudades Países Bajos	(Arodudu <i>et al.</i> , 2014)

Tecnología	Objetivo del estudio	Ciudad	Referencia
Biogás	Determina el potencial bioenergético de la biomasa no leñosa de las áreas de conservación y bordes de carreteras, incluidas las zonas urbanas.	Área de Flanders (Bélgica)	(Van Meerbeek <i>et al.</i> , 2015)
Residuos Biogás Incineración	Analiza el potencial de residuos sólidos urbanos en África, para la producción de energía.	Ciudades de África	(Scarlat, Motola, Dallemand, Monforti-Ferrario, & Mofor, 2015)
Residuos Biogás	Calcula el biogás que podría obtenerse de la disposición de residuos sólidos en vertederos. Cuantifica la producción de energía para generar electricidad.	Ciudades metropolitanas de la India San Pablo (Brasil)	(Kumar & Sharma, 2014) (de Barros Miranda Gomes, Sacomano, Papalardo, & da Silva, 2014)
Mareomotriz	Se presenta una metodología para maximizar la energía generada por una planta mareomotriz en un estuario.	San Luis (Brasil)	(Leite Neto, Saavedra, & Souza Ribeiro, 2015)
Eólica	Revisa la situación de la tecnología eólica utilizable en áreas urbanas.	Boston, Baréin, Tianhe	(Ishugah <i>et al.</i> , 2014)
	Evalúa el potencial eólico y hace un análisis estadístico del viento.	Área urbana de Hong Kong (China)	(Shu, Li, & Chan, 2015)
	Estudia el comportamiento del viento y de las turbinas microeólicas con diferentes densidades de urbanización	Hong Kong, (China)	(Li, Cheung, Chan, Cheng, & Wong, 2013)
	Desarrolla una metodología para predecir la velocidad del viento sobre las azoteas y las locaciones viables para la colocación de turbinas en las urbes.	Leeds (Inglaterra)	(Millward-Hopkins, Tomlin, Ma, Ingham, & Pourkashanian, 2013)

Tecnología	Objetivo del estudio	Ciudad	Referencia
Fotovoltaica	Analiza la difusión de los sistemas fotovoltaicos considerando los costos de inversión.	Medellín (Colombia)	(Radomes & Arango, 2015)
	Hace una revisión del potencial solar fotovoltaico en Canadá, incluido las ciudades.	Toronto, Ontario, Calgary (Canadá)	(Rosenbloom & Meadowcroft, 2014)
	Evalúa el rendimiento fotovoltaico en ambientes con altas temperaturas y con presencia de polvo.	Kuwait (Kuwait)	(Al-Otaibi, Al-Qattan, Fairouz, & Al-Mulla, 2015)
	Evalúa las oportunidades y barreras para la promoción de la tecnología, comparando con la situación internacional.	Ciudades de Tailandia	(Chaianong & Pharino, 2015)
	Desarrolla una aplicación para evaluar el potencial fotovoltaico basada en modelamiento en 3D.	Boston (Estados Unidos)	(Liang, Gong, Zhou, Ibrahim, & Li, 2015)
	Realiza una metodología basada SIG y análisis 3D, para determinar las azoteas disponibles para la instalación de sistemas fotovoltaicos.	Islamabad (Pakistán)	(Hafeez & Atif, 2014)
	Hace una clasificación de la idoneidad de los tejados de los edificios residenciales y comerciales para la instalación de paneles fotovoltaicos, utilizando LIDAR y GIS para obtener la información.	Indianápolis (Estados Unidos)	(Weng, 2014)
	Busca desarrollar un marco para analizar el potencial de la colocación de sistemas fotovoltaicos con miras a conseguir autoproducción eléctrica.	Ciudades de (Corea del Sur)	(Koo, Hong, Park, & Yun, 2014)

Tecnología	Objetivo del estudio	Ciudad	Referencia
	Evalúa los flujos de energía de las fuentes energéticas renovables y el consumo energético.	Provincia de Roma (Italia)	(Cumò <i>et al.</i> , 2012)
	Evalúa el potencial energético para la integración de plantas de producción de energía.	Provincia de Frosinone (Italia)	(Massimo, Dell'Isola, Frattolillo, & Ficco, 2014)
Biomasa Eólica Fotovoltaica Geotérmica	Establece un método estándar para el análisis del recurso renovable urbano basada en la tipología de la urbe.	Londres y Manchester (Reino Unido)	(Sarralde <i>et al.</i> , 2011)
Biomasa Fotovoltaica	Estima la instalación y operación eficiente de diferentes tecnologías.	Shangái (China)	(Ren <i>et al.</i> , 2010)
Biomasa Fotovoltaica Hidroeléctrico	A partir de los flujos de entrada y flujos salida de energía, desarrolla un modelo de optimización con restricciones económicas y ambientales.	Pueblo de Suiza	(Orehounig, Mavromatidis, Evins, Dorer, & Carmeliet, 2014)
Fotovoltaica	Utiliza el concepto de hub energético para integrar las energías renovables en una villa.	Zernez (Suiza)	(Orehounig <i>et al.</i> , 2013)
Biogás Fotovoltaica Biogás	Realiza un diseño de una instalación fotovoltaica y de biogás.	Daca (Bangladés)	(Matin & Istiaque, 2014)
Eólica Fotovoltaica Geotérmica	Visualiza la demanda y potencia de energía en un área urbana.	Países Bajos (no identifica)	(W R W A Leduc & Rovers, 2008)
Eólica Fotovoltaica	Determina la ubicación de plantas de suministro de energía y energías renovables.	Gwang-myung/Si-heung (Corea del Sur)	(Yeo & Yee, 2014)
Eólica	Extiende el concepto de edificios con cero energía a barrios en	No especifica	(Marique & Reiter,

Tecnología	Objetivo del estudio	Ciudad	Referencia
Fotovoltaico Térmica	áreas urbanas y semiurbanas.	(Bélgica)	2014)
Geotérmica Solar térmica	Presenta una aproximación para integrar la generación de energía solar y geotérmica	Región de Hannover (Alemania)	(Palmas <i>et al.</i> , 2012)
Geotérmica	Analiza los efectos de las islas de calor en los centros urbanos sobre la temperatura de las aguas subterráneas.	Turku, Lohja, Lahti (Finlandia)	(Arola & Korkka-Niemi, 2014)
Fotovoltaica Solar térmica	Analiza el potencial de energía solar en función el diseño de los bloques urbanos. Analiza y clasifica mapas solares realizados para diferentes ciudades.	Malmo, Lund (Bélgica) Ciudades de diferentes países	(Kanters, Wall, & Dubois, 2014) (Kanters, Wall, & Kjellsson, 2014)
	Explora las relaciones entre la forma de la ciudad y el potencial solar.	Londres (Inglaterra)	(Sarralde, Quinn, Wiesmann, & Steemers, 2015)

Fuente: Elaboración propia

Los estudios por lo general analizan una tecnología, pero también se establece que hay el interés por utilizar varias energías. En otros casos las investigaciones son parte de proyectos ambiciosos en donde la incorporación de las renovables son una de las herramientas para promover la sostenibilidad urbana. Estos casos, sin embargo, son aislados, pues a pesar de que se persigue un aumento en el uso de las ER, todavía hay carencia de herramientas de monitoreo que permitan establecer estrategias para su promoción en ambientes urbanos (Eicker & Klein, 2014).

La elección de la tecnología aplicable a una ciudad dependerá del recurso, la madurez de la tecnología, o los usos requeridos. Eicker y Klein (2014), por ejemplo, consideran que la energía solar fotovoltaica tiene mayor posibilidad de abastecer a las áreas urbanas, mientras que la biomasa, eólica o hidroeléctrica fuera de la ciudad puede complementar la demanda. Kanters *et al.* (2014) anotan que la energía solar, por sí mismo no puede abastecer la demanda, si no está acompañada de medidas de conservación de la energía y la integración de otras tecnologías como la eólica, geotérmica o biomasa. Asimismo, se espera que el desarrollo de las redes inteligentes

(Smart Grids), supondrá la promoción de la energía eólica y fotovoltaica, no solo para el autoabastecimiento, sino para la venta de energía.

En la Figura 3-1 se propone un modelo de autosuficiencia energética, que mantiene los principios del metabolismo urbano circular. En el modelo se indica que el aprovechamiento de la energía renovable disminuirá el requerimiento de energía externa.

Esta propuesta está condicionada al desarrollo, diseño y manejo de redes inteligentes (Galo, Macedo, Almeida, & Lima, 2014) que posibilitan la interacción producción interna-consumo y hacen factible la optimización, e integración de diferentes tecnologías de generación distribuida. Esto requerirá adecuar la capacidad de red para trasladar déficits y excedentes de acuerdo con demandas y producción intermitente de energía renovables. Por otro lado, la intermitencia de las fuentes renovables exige que coexistan con tecnologías energéticas generalmente externas controlables. En este sentido, la promoción de las ER en la ciudad no busca eliminar la exportación de energía sino más bien disminuir estos requerimientos, mientras las capacidades de almacenamiento energético sean limitadas.

En la búsqueda de información a través de las bases de datos consultadas se identificó varias investigaciones en las que se advierte la posibilidad de disminuir el consumo de los portadores energéticos utilizando recursos que disponen las ciudades. En la Tabla 3-3 se presentan trabajos académicos que poseen información para determinar la cantidad de energía que se puede sustituir con recursos renovables. Adicional a ello, se muestra los objetivos de dichos estudios, las localidades en donde se aplicaron, las demandas y los usos finales de la energía producida.

Tabla 3-3. Potencial energético técnico para diferentes ciudades

Sistema	Ciudad	Potencial*	Demanda	Uso	Referencia	Objetivo del estudio
Bioetanol	Tartu (Estonia)	93,00 %	1,29 mill. l de diésel	Combustible	(Raud <i>et al.</i> , 2017)	Demuestra que los residuos vegetales urbanos provenientes de áreas verdes y jardines pueden ser utilizados para la producción de biocombustibles.
	Áreas urbanas de China	12,60 %	42,33 mill. l de gasolina			(Shi, Ge, Chang, Shao, & Tang, 2013)
Biomasa	Leicester (Inglaterra)	3,30 %	----	Térmico	(McHugh, Edmondson, Gaston, Leake, & O'Sullivan, 2015)	Investiga el potencial para utilizar la biomasa cosechada en la ciudad con fines térmicos.
	Mar del Plata (Argentina)	4,36 %	1265,00 GWh/año	Eléctrico	(Roberts, Cassula, Osvaldo Prado, Dias, & Balestieri, 2015)	Determina el potencial energético de residuos forestales y agrícolas.
		3,32 %	2912,00 GWh/año	Térmico		
	Pekín (China)	100,00 %	9501,00 GWh/año	Eléctrico	(Shi <i>et al.</i> , 2013)	Determina el potencial energético de los residuos de jardines urbanos.
	Jiangsu (China)	51,00 %	14617,00 GWh/año			
Qinghai (China)	10,00 %	915,00 GWh/año				

Sistema	Ciudad	Potencial*	Demanda	Uso	Referencia	Objetivo del estudio	
Biogás	Estocolmo (Suecia)	11,44 %	8300,00 kWh/por habitante/año	Térmico	(Pandis Iveroth <i>et al.</i> , 2013)	Explora la integración de infraestructuras renovables para reducir los flujos metabólicos de un distrito.	
	Oakland (Estados Unidos)	120,00 %	55,00 GWh/año	Eléctrico	(Shen, Linville, Urgan-Demirtas, Mintz, & Snyder, 2015)	Examina el uso de la tecnología de digestión anaeróbica en las plantas de tratamiento de aguas residuales en Estados Unidos.	
	Mexicali (México)	6,00 %	El porcentaje es comparado con el requerimiento de iluminación	Eléctrico	(Aguilar-Virgen, Taboada-González, & Ojeda-Benítez, 2014)	Determina potencial de los residuos de vertederos.	
	Tijuana (México)	40,00 %					
	Ciudades de Brasil	100,00 %	107000 urbanos	buses	Combustible	(Nadaletti <i>et al.</i> , 2015)	Determina el número de vehículos de transporte urbano que pueden ser alimentados con biogás de los vertederos de Brasil.
	San Pablo (Brasil)	7,30 %	8723,60 GWh/año	Eléctrico	(de Souza <i>et al.</i> , 2014)	Realiza un análisis del potencial técnico para la producción de electricidad con el uso de residuos sólidos urbanos.	
	Río de Janeiro (Brasil)	6,73 %	5481,00 GWh/año				
	Tartu (Estonia)	54,50 %	0,14 t de gas natural	Combustible	(Raud <i>et al.</i> , 2017)	Se calcula el potencial energético de los residuos verdes urbanos.	

Sistema	Ciudad	Potencial*	Demanda	Uso	Referencia	Objetivo del estudio
Incineración	Río de Janeiro (Brasil)	25,03 %	8723,60 GWh/año	Eléctrico	(de Souza <i>et al.</i> , 2014)	Realiza un análisis del potencial técnico para la producción de electricidad con el uso de residuos sólidos urbanos.
	San Paulo (Brasil)	12,44 %	5481,00 GWh/año	Eléctrico		
	Estocolmo (Suecia)	9,92 %	8300 kWh/por habitante/año	Térmico	(Pandis Iveroth <i>et al.</i> , 2013)	Explora la integración de infraestructuras renovables para reducir los flujos metabólicos de un distrito.
Eólica	Wageningen (Países Bajos)	43,33 %	45,00 kWh/m ² año	Eléctrico	(Agudelo-Vera <i>et al.</i> , 2012)	Investiga el potencial que dispone la ciudad para abastecerse de energía a partir de sus propios recursos.
Geotérmico	Westminster (Inglaterra)	100,00 %	≈ 49 000 edificaciones ≈ 63 000 edificaciones	Térmico	(Yi Zhang, Choudhary, & Soga, 2015)	Se presenta un modelo para examinar la factibilidad de instalar energía geotérmica en la ciudad.
	Ludwigsburg (Alemania)	68,69 %	873,50 GWh	Térmico	(Schiel, Baume, Caruso, & Leopold, 2016)	Desarrolla un modelo para determinar el potencial de energía geotérmica.
	Ciudades de Finlandia	25,00 %	1,30 millones m ² de viviendas estándar	Térmico	(Arola, Eskola, Hellen, & Korkka-Niemi, 2014)	Investiga el potencial geotérmico para proveer calefacción a edificaciones.
	45,00 %	1,70 millones m ²				

Sistema	Ciudad	Potencial*	Demanda	Uso	Referencia	Objetivo del estudio
			de viviendas de bajo consumo			
Hidroeléctrica	Beppu (Japón)	100,00 %	29000 viviendas con consumo de 300 kWh/mes	Eléctrico	(Fujiia <i>et al.</i> , 2015)	Investiga el potencial de generación hidroeléctrica utilizando centrales colocadas en ríos que atraviesan una ciudad.
Fotovoltaica	Ostfildern (Alemania)	45,00 %	10,70 GWh		(Eicker & Klein, 2014)	Analiza el desempeño de las energías renovables en ambientes urbanos.
	Ludwigsword (Alemania)	18,00 %	430,00 GWh			
	Múnich (Alemania)	100,00 %	20,00 kWh/m ²		(Eicker <i>et al.</i> , 2015)	Evalúa el potencial energético fotovoltaico en función del diseño de la edificación.
	Wageningen (Netherlands)	50,00 % 66,00 %	45,00 kWh/m ² año		(Agudelo-Vera <i>et al.</i> , 2012)	Investiga el potencial de una ciudad para proveerse de sus propios recursos energéticos.
	Kerkrade (Netherlands)	18,00 %	481,00 GWh	Eléctrico	(Wouter R W A Leduc & Van Kann, 2013)	Propone un método para identificar la energía que se puede aprovechar dentro de la ciudad.
	Karlsruhe (Alemania)	9,05 % **	410,00 GWh		(Fath <i>et al.</i> , 2015)	Utiliza un método que calcula el potencial económico fotovoltaico en azoteas y fachadas.
	Zernez (Suiza)	64,00 %	7,40 GWh/año		(Mavromatidis, Orehounig, & Carmeliet, 2015)	Se desarrolla un marco para la integración óptima de la energía fotovoltaica en una villa.
	Ciudades de Nepal	100,00 %	1228,00 GWh		(Gautam <i>et al.</i> , 2015)	Evalúa la factibilidad de producción eléctrica con paneles fotovoltaicos para abastecer la

Sistema	Ciudad	Potencial*	Demanda	Uso	Referencia	Objetivo del estudio
						demanda no cubierta.
	Ludwingsburg (Alemania)	65,00 %	3,54 GWh Paneles colocados en techos.		(Eicker, Nouvel, Duminiel, & Coors, 2014)	Basado en un modelo 3D calcula el potencial fotovoltaico para proveer electricidad.
	Daca (Bangladés)	15,00 %	773,41 GWh/año		(Jamal, Ongsakul, Singh, Salehin, & Ferdous, 2014)	Se analiza el área disponible de azoteas y se modela el sistema energético para determinar el potencial fotovoltaico.
Solar Térmica	México (áreas residenciales urbanas)	45,60 %	29,088 GWh/año	Térmico	(Rosas-Flores, Rosas-Flores, & Fernández Zayas, 2016)	Evalúa el potencial solar para el calentamiento de agua.
	España (8005 municipios)	68,40 %	28249,00 GWh/año	Térmico	(Izquierdo, Montañés, Dopazo, & Fueyo, 2011)	Determina la superficie de techos disponible para la colocación de placas solares térmicas.
	Concepción-Chile (recientes 3233 viviendas)	75,00 %	19788,70 MW	Térmico	(Zalamea & García Alvarado, 2014)	Determina el faldón con mejor aptitud por vivienda acorde a orientación e inclinación, compara producción factible conjunta de universo de estudio frente a demandas típicas.

Fuente: Elaboración propia

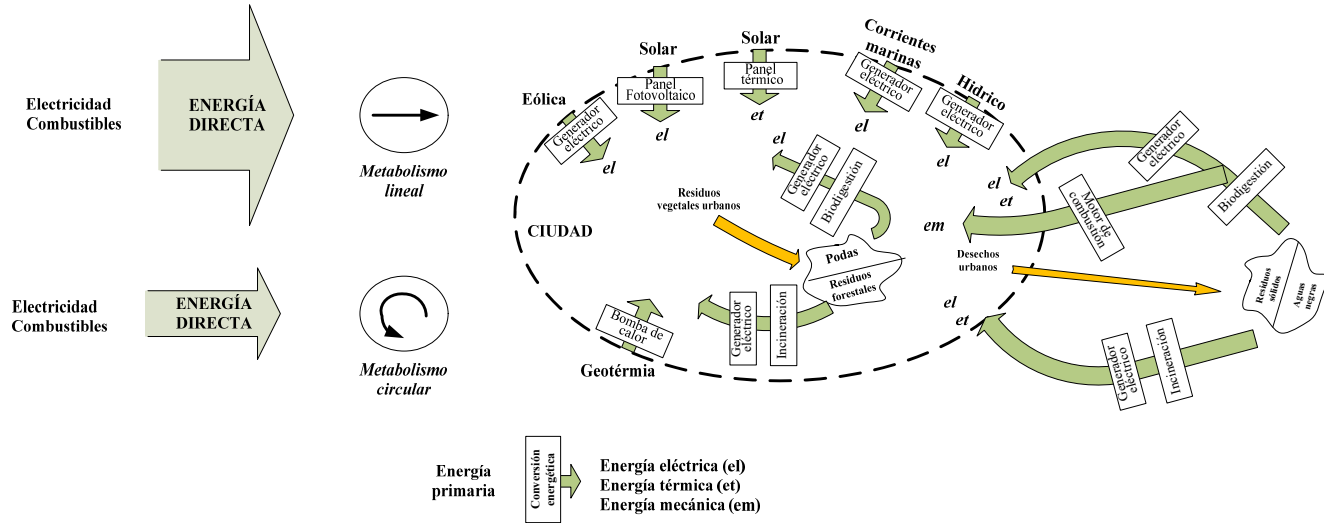


Figura 3-1. Modelo conceptual del uso de las energías renovables en la ciudad

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describen las energías renovables siguiendo la clasificación de la Tabla 3-1. Se da énfasis en las posibilidades de aprovechar los recursos energéticos endógenos de las ciudades.

3.2.2 Biocarburantes.

El bioetanol es utilizado como biocarburante y puede provenir de diferentes tipos de materia prima. Si se lo extrae de cereales, tubérculos, plantas de alto contenido de azúcar o de la agroindustria, se lo considera como de primera generación. Mientras que si se obtiene de la madera, pasto, residuos de cultivos, residuos de papel o de materiales lignocelulósicos, se lo denomina como bioetanol de segunda generación (Morales, Quintero, Conejeros, & Aroca, 2015). El bioetanol de segunda generación se produce mediante el rompimiento de la biomasa en azúcares. Un limitante a corto plazo para esta opción es que las biorefinerías para el procesamiento de materia prima lignocelulosa están en investigación y desarrollo (Vargas, 2012).

La producción de bioetanol como sustituto de los combustibles fósiles para el transporte o producción de energía, tiene beneficios sociales, económicos y ambientales. Sin embargo, crece la duda por el cambio del uso de terrenos que pasarían a ser utilizados para siembra de cultivos energéticos. Una alternativa es utilizar la biomasa vegetal que se obtiene de las podas urbanas (Avelino Gonçalves, Dos Santos, & De Macedo, 2015), esto asegura que se aprovechen los residuos y no se requieran más áreas cultivables.

El bioetanol puede producirse a pequeña y gran escala, este último caso es recomendable en áreas rurales por la disponibilidad del recurso (Avelino Gonçalves *et al.*, 2015). En el caso de la producción industrial no generan desechos ni emisiones contaminantes, además, estos procesos para incrementar su eficiencia pueden utilizar diferentes tipos de materias primas (Jacquet, Haubruge, & Richel, 2015). Si la materia prima viene de los residuos urbanos lignocelulosos, se daría un valor añadido a los residuos que en principio carecen de valor, provocan contaminación y requieren gestión (Martínez, Montoya, & Sierra, 2014). Por lo general, los residuos vegetales son combinados con los residuos urbanos comunes para ser enviados a los vertederos. Por ello se requieren políticas de gestión para su adecuada selección, procesamiento y transporte, antes de ser enviadas a las biorefinerías (Shi *et al.*, 2013).

La producción de bioetanol derivado de residuos de jardines urbanos puede alcanzar hasta el 12,6 % de la demanda anual de gasolina en China (42,334 millones

de litros) (Shi *et al.*, 2013). Saha *et al.* (2015) calculan que al obtener cultivos energéticos provenientes de terrenos urbanos marginales, se puede lograr 230 GWh anuales, equivalentes al 0,6 % de la energía primaria que requiere el estado de Massachusetts, en Estados Unidos.

En las ciudades, la disponibilidad de la materia prima no debe entrar en conflicto con los usos recreativos de los espacios de donde se obtienen los residuos vegetales (Kraxner *et al.*, 2016). La variación estacional, transporte y provisión de materia prima, así como el emplazamiento de biorefinerías son factores que se necesitan definir para la operatividad de esta opción.

Entre otros estudios que no son comunes está el descrito por Song *et al.* (2016), quién analiza los residuos de aceite en la ciudad de Changchun (China), destacando que el biodiésel puede ser una solución exitosa que en ciertos escenarios excedería el 100 % de autosuficiencia.

3.2.3 Biomasa.

Los residuos orgánicos a través de procesos químicos pueden ser convertidos en nutrientes o aprovechados para producir energía eléctrica o térmica. En este caso es de interés la biomasa en estado sólido que es combustionada en calderas. El aprovechamiento de la biomasa por combustión directa se realiza a temperaturas que pueden llegar hasta los 1000 °C dependiendo de la aplicación.

Al igual que los hidrocarburos, la biomasa tiene su origen en organismos vivos. La biomasa residual obtenida de las operaciones de poda urbanas, pueden ser utilizadas en aplicaciones industriales para la producción de vapor, generación de electricidad o transporte (Kook & Lee, 2015; Nadaletti *et al.*, 2015).

La biomasa para obtener energía puede causar severos daños ambientales o repercutir en la provisión de alimentos, mientras la biomasa que proviene de residuos de las áreas urbanas es una alternativa, pues esta no tiene valor ecológico o agrícola (Arodudu *et al.*, 2014). El mantenimiento de jardines provee un valor añadido a esta actividad, pues los residuos pueden ser utilizados con fines energéticos (Shi *et al.*, 2013). Los recursos locales utilizados disminuyen las emisiones asociadas al transporte de la materia prima, así como pueden garantizar la viabilidad del proyecto (Kraxner *et al.*, 2016; McHugh *et al.*, 2015), si se dispone suficiente materia prima con un adecuado contenido energético. A diferencia de los cultivos energéticos o biomasa forestal, los residuos de jardines estarían listos para ser transportados; su uso alternativo reduciría los costos de disposición.

En la investigación de Kook *et al.* (2015) se calcula el potencial energético para cinco ciudades de Corea del Sur (Seúl, Daegu, Daejeon, Gwangju, Busan), como paso previo para determinar la elección más adecuada del proceso de conversión de la biomasa en energía. En el estudio se realiza una clasificación de recursos en función de los sectores que provienen: i) bioproductos agrícolas, ii) productos forestales, iii) residuos ganaderos, iv), residuos sólidos urbanos. Del análisis se concluye que aun cuando la biomasa procedente de productos forestales tiene el más alto potencial energético, los residuos urbanos pueden ser el recurso más importante para su aprovechamiento, pues tienen una alta densidad energética por área.

McHugh (2015) determina el potencial de la vegetación de ciclo corto como combustible para calefacción municipal en la ciudad de Leicester (Inglaterra). El análisis concluye que con la biomasa disponible se puede abastecer el 3,3 % (4200 viviendas) de las viviendas de esta localidad. En China, el potencial suministro de energía eléctrica proveniente de residuos de jardines puede variar entre 10 % a 100 %, dependiendo de la ciudad (Shi *et al.*, 2013). Según Arodudu y colaboradores (2014), el uso de la bioenergía en países en vías de desarrollo en donde la demanda energética es inferior en comparación con los países en vías de desarrollo, puede ser atractiva como medio de provisión energética.

Para la ciudad de Mar del Plata en Argentina se determinó el potencial de biomasa con fines eléctricos y calefacción. En el análisis se incluyó tanto los recursos provenientes de la agricultura como los provenientes de los residuos forestales urbanos. El total de la producción permitiría abastecer al 23 % y 10 % de la demanda eléctrica y térmica de Mar del Plata respectivamente. Si se considera solo el potencial de la biomasa urbana la contribución es del 4 % y 3 %, respectivamente (Roberts *et al.*, 2015).

Aun cuando hay interés por este tipo de recursos se espera que la biomasa proveniente de residuos de poda y jardines con fines energéticos sea investigada con amplitud (Shi *et al.*, 2013), para consolidar y expandir su uso.

3.2.4 Biogás de biodigestores.

El biogás se produce por la descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno. Hay varias vías en las que se puede obtener, ya sea en depósitos controlados (biodigestores) o rellenos sanitarios (vertederos). El contenido de metano (CH₄) del biogás puede destinarse a la generación eléctrica o térmica, o como combustible para transporte.

Actualmente, el biogás está siendo desarrollado rápidamente como un método efectivo para generar energía renovable, de tal forma que está jugando un importante rol dentro de la producción y protección ambiental (Aguilar-Virgen *et al.*, 2014). Hay varias fuentes para la obtención de biogás en la ciudad: residuos industriales, residuos de podas urbanas, residuos sólidos urbanos, fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, aguas residuales municipales o aguas residuales de industrias. Dentro de la agroindustria se tienen residuos que provienen de la industria alimentaria, deyecciones ganaderas, plantas de biocombustibles o de servicios (hoteles, restauración o cáterin) (IDAE, 2011).

La variedad de procesos con los cuales se puede obtener el biogás puede provocar competencia entre las diferentes opciones, en lo referente al requerimiento de materia prima, por ello para este trabajo se consideran dos posibilidades de producción del biogás: i) biogás que proviene de biodigestores y ii) biogás de los vertederos controlados.

Siguiendo la clasificación de la Tabla 3-1, en los siguientes numerales, se describe el biogás producido en biodigestores que utilizan como materia prima los lodos de las plantas de depuración de agua o el componente orgánico de residuos urbanos. El biogás de vertederos controlados se revisa más adelante.

3.2.4.1 Biogás de lodos de aguas residuales.

El tratamiento de aguas residuales origina lodo, como producto de los procesos químicos, físicos y biológicos tendientes a depurarlas. Estos lodos pueden tener una concentración de sólidos de entre 0,25 % a 12 %; previo a su uso final (disposición en vertederos controlados, compost o incineración) son estabilizados ya sea en forma aeróbica o anaeróbica. Para obtener metano es de interés la estabilización anaeróbica pues a partir de ella se obtiene biogás (Zubizarreta *et al.*, 2010). La porción del metano en el biogás puede ser de 55 % a 80 %, con un poder calorífico superior a 36 MJ/m³ (Berkday & Nas, 2008), esto implica que el equipamiento que utiliza como combustibles en gas natural, puede ser modificado para utilizar el biometano.

Al igual que en los vertederos, es de interés la cantidad de metano que se disponga, y este depende de la cantidad de aguas residuales per cápita por habitante (5 l a 20 l por habitante, equivale a 50 a 70 % de CH₄) (Salomon & Silva Lora, 2009). Los procesos destinados a la estabilización de los lodos de las plantas de tratamiento de agua, que no están destinados a la producción del biogás, hacen que su productividad sea baja, por lo que su aprovechamiento con fines energéticos es

limitado (IDAE, 2011). Plantas que no disponen de tratamientos adicionales como la codigestión (uso de residuos de diferente naturaleza) producen menos biogás (0,9 a 1,1 m³ biogás diario por m³ del tanque digestor), que aquellos que si lo tienen (2,5 a 4 m³ biogás diario por m³ del tanque digestor).

La recuperación del biogás de las aguas residuales puede servir para la generación de energía eléctrica, térmica, cogeneración, combustible para vehículos o para inyectar a las redes de gas natural (Bidart, Fröhling, & Schultmann, 2014; Salomon & Silva Lora, 2009). La producción de electricidad puede servir para autoconsumo de las plantas de tratamiento de aguas negras.

Willis y colaboradores (2012) concluyen que en Estados Unidos solo el 8 % de las plantas que utilizan digestión anaeróbica, aprovechan el biogás con fines energéticos, como consecuencia de barreras socioeconómicas antes que referentes a la madurez de la tecnología. La energía es principalmente utilizada para reducir el consumo externo, aunque dependiendo de la producción de la planta se pueden exportar (Shen *et al.*, 2015). En cuanto a otras aplicaciones Pandis Iveroth y colaboradores (2013) calculan que el 10 % de la calefacción urbana para un distrito de Estocolmo puede ser provista por esta fuente.

3.2.4.2 Fracción de biodegradable de residuos urbanos orgánicos.

Los residuos orgánicos urbanos pueden ser enviados a bioreactores para producir biogás. Se puede incrementar la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica, si estos residuos son separados y diluidos en un fluido (aguas residuales) previo a un tratamiento en un reactor de digestión anaeróbica industrial. En este caso el porcentaje de metano en el biogás puede llegar hasta el 75 % (de Souza *et al.*, 2014). El material inorgánico puede ser enviado a incineradoras, con lo que se podría evitar el emplazamiento de vertederos (Raheem, Yusri, & Shakoar, 2016).

El estudio de Van Meerbeek *et al.* (2015) determina el potencial de biomasa de la poda de áreas de conservación y de los bordes de las vías la región de Flanders (Bélgica). En este caso puede disponer de 721,00 GWh para suministrar a 205 000 viviendas, sin embargo, se considera que no es rentable desde el punto de vista económico.

Arodudu *et al.* (2014) calculan el potencial energético de la biomasa proveniente de tejados, parques, residuos de jardines o alimentos y de caídas estacionales en la región Overijssel (Países Bajos). El aprovechamiento es basado en la digestión anaeróbica, para la producción de biogás, pues de esta forma se pueden aprovechar

varios tipos de biomasa. El aprovechamiento representa entre el 0,6 y 7,7 % de los objetivos regionales para el 2030.

No obstante, la producción no es ambientalmente sostenible, pues la relación entrada/salida de energía no es eficiente (Arodudu *et al.*, 2014). Aun así, este autor considera que esta condición podría ser revertida en los países en vías de desarrollo que requieren menos demanda de energía.

3.2.5 Biogás de vertedero controlado.

En un vertedero controlado se sitúan, diariamente, cientos de toneladas de residuos sólidos que son tratados con procesos técnicos. Los residuos se ubican sobre una geomembrana que impide el paso de lixiviados al suelo, luego son compactados y recubiertos. En medio de esas capas de residuos hay sistemas de conducción conectados a chimeneas. Producto de la descomposición de la materia orgánica y de otros residuos, se producen una serie de gases que se emiten a la atmósfera (Aguilar-Virgen *et al.*, 2014; Mambeli Barros, Tiago Filho, & da Silva, 2014).

El biogás extraído se compone de 50 % de CH₄, 38 % de CO₂, 10 % de oxígeno (O), nitrógeno (N) y vapor de agua; así también están presentes trazas de compuestos orgánicos volátiles (COVs) y polutantes peligrosos al aire (HAPs). Dependiendo de la calidad del biogás y en función de una valoración de su potencial energético se lo puede utilizar como combustible ya que su valor calorífico se encuentra entre los 15 a los 18 MJ/m³, que es aproximadamente la mitad del valor del gas natural (Xydis, Nanaki, & Koroneos, 2013). Para ser utilizado como combustible de vehículos requiere un proceso de limpieza, pues tiene una alta concentración de nitrógeno (Eriksson, 2010).

El biogás proveniente de los residuos sólidos urbanos está relacionado con la composición y cantidad de los mismos (Aguilar-Virgen *et al.*, 2014; Nadaletti *et al.*, 2015). En los países en vías de desarrollo en los cuales no se consolida la reducción de residuos (por reúso, reciclaje o prevención) se espera que se incremente la disposición de residuos al menos a mediano plazo (Scarlat *et al.*, 2015).

Puesto que el metano es uno de los gases de efecto invernadero (GEI), su captura y oxidación a CO₂ resulta ser beneficiosa para el ambiente. Si la porción de metano es lo suficientemente alta para la producción de electricidad, se puede utilizar motores de combustión interna (Mambeli Barros *et al.*, 2014).

En África, con altas tasas de recolección, se podría abastecer un 9 % del consumo promedio per cápita continental de electricidad (Scarlat *et al.*, 2015). En las ciudades metropolitanas de la India, la disposición de residuos en los vertederos permitiría la recuperación de 60 % al 90 % de biogás apropiado para la producción de energía o para la obtención de combustibles (Kumar & Sharma, 2014). En Mexicali y Tijuana (México), la generación de energía proveniente del biogás de vertederos podría suplir el 6 % y 40 % de la demanda para iluminación respectivamente (Aguilar-Virgen *et al.*, 2014). En San Pablo y Río de Janeiro (Brasil), Souza y colegas (2014) establecen que con la producción de biogás se podría suplir alrededor del 7 % de energía eléctrica.

Otra opción para el biogás en Brasil es la provisión de combustible para alrededor de 9 veces la flota de buses urbanos existente (107 000 unidades) (Nadaletti *et al.*, 2015). Los efectos positivos, aún no valorados completamente, serían la reducción de emisiones y contaminantes que afectan a la salud de los pobladores de las áreas urbanas.

El aprovechamiento del metano no solo garantiza un beneficio por la producción de energía, sino conlleva a la disminución de gases de efecto invernadero. No obstante, es un requisito para garantizar que este proceso sea óptimo una gestión controlada de la disposición de los residuos.

3.2.6 Incineración de residuos sólidos urbanos.

Los residuos sólidos urbanos clasificados como no peligrosos pueden ser trasladados a plantas de incineración en donde son combustionados a temperaturas superiores a los 800 °C. Este proceso es una opción de aprovechamiento, si las condiciones de humedad o presencia de materia orgánica en los residuos no permiten la producción de biogás.

Mediante técnicas de incineración de los combustibles recuperados a partir de residuos o de los residuos sólidos municipales se puede incrementar la producción de energía incluso 2 a 4 veces respectivamente, con respecto a los procesos bioquímicos (de Souza *et al.*, 2014).

El tipo de tecnología para producir energía depende del tipo de desecho y su contenido de humedad. La incineración es utilizada cuando los residuos no son biodegradables y se tiene bajo contenido de humedad. Con este método se puede tener una reducción entre 80 y 90 % del volumen de los residuos (de Souza *et al.*,

2014), consiguiéndose incluso eliminar los vertederos. Otro esquema es recuperar combustible de residuos (papel, cartón o plástico), con lo que se reducen las emisiones, se incrementa el poder calorífico y, por tanto, se obtiene mayor energía (IDAE, 2011). Si el contenido de humedad supera el 50 %, esta práctica puede ser técnica y económicamente inviable (Tan *et al.*, 2014). En otros estudios se calcula que con la incineración de los residuos se puede obtener más energía por tonelada de desecho, que con el aprovechamiento del biogás (alrededor del 22 %) y una disminución de CO₂ (alrededor del 45 %) (Tan *et al.*, 2014). No obstante, su aplicación puede estar restringida por los costos y la legislación local (de Souza *et al.*, 2014), ya que la quema de los residuos puede producir emisiones tóxicas.

En Río de Janeiro y Sao Paulo (Brasil), De Souza y colaboradores (2014) sostienen que con esta práctica se podría abastecer entre 12 y 25 % de la demanda de electricidad. Mientras que en Estocolmo (Suecia), para una demanda de electricidad específica se puede abastecer 5,37 % utilizando este procedimiento (Pandis Iveroth *et al.*, 2013).

La incineración a más de producir mayor cantidad de energía que si se compara con la opción del biogás proveniente de vertederos, puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, así como reducir las áreas requeridas para la disposición de desechos. A pesar de ello, hay inquietudes por las emisiones tóxicas que el proceso puede ocasionar, así como el requerimiento de un bajo contenido de humedad.

3.2.7 Energía mareomotriz.

La energía del mar puede ser aprovechada de diversas formas (energía mareomotriz, corrientes, maremotérmica, olas o potencia osmótica). De estas la energía mareomotriz es la que se encuentra con mayor grado de madurez tecnológica y con posibilidad de usarse a escala comercial (IDAE, 2011).

Como parte de la infraestructura se requiere un reservorio, que puede ser una bahía y un estuario. El reservorio se llena al aumentar la marea como consecuencia del movimiento gravitatorio. La diferencia de nivel del embalse y del mar es aprovechado para generar electricidad en base al mismo principio de funcionamiento de las plantas hidroeléctricas. Al igual que en las centrales hidroeléctricas la energía que se puede obtener del recurso depende de la diferencia de altura o caída del flujo de agua, así como del caudal disponible (Radtke, Dent, & Couch, 2011). A pesar de que su naturaleza es intermitente, es posible predecir el momento en que se puede generar electricidad.

Hammons (1993) considera que otro inconveniente es que los sitios que presentan condiciones geográficas adecuadas se encuentran lejos de los centros de consumo. El potencial depende de las condiciones geográficas, las mismas que pueden no estar disponibles en todo un país. Por ejemplo, mientras en España no se dispone de locaciones para estas instalaciones, en el Reino Unido se tiene un potencial que cubriría el 10 % de la demanda eléctrica (Burrows *et al.*, 2009; IDAE, 2011). Proyectos concretos como en la ciudad de San Luis (Brasil), se analiza la operación de una planta compuesta por 11 turbinas, que producirían 41 GWh anuales (Leite Neto *et al.*, 2015).

El requerimiento de reservorio puede ser un limitante, pues el espacio no está siempre disponible, si a ello se suma restricciones debidas a impactos ambientales, alto capital y los tiempos de construcción (Hammons, 1993; Radtke *et al.*, 2011; Xu, Ni, & Zheng, 2015), se incrementan las restricciones para su instalación en áreas urbanas.

3.2.8 Energía eólica.

A esta tecnología renovable se la considera como limpia, asequible y segura, pues aprovecha el viento para producir electricidad. La masa del viento choca con las palas de los aerogeneradores que se encuentran adaptados a generadores eléctricos. Su promoción ha sido para equipamiento a gran escala, mientras que su implementación dentro de la ciudad es modesta. Las turbinas eólicas en ambientes urbanos, no solo se encuentra en los mástiles colocados en los tejados, sino que puede integrarse en edificios, colocarse entre ellos o situarse para aprovechar el flujo de aire en una fachada de doble pared (Hassanli, Hu, Kwok, & Fletcher, 2017).

La instalación de turbinas eólicas pequeñas se ha incrementado en un 12 % entre 2012 y 2013 (755 MW), en el año 2011, más del 70 % de fabricantes han optado por los diseños de eje vertical, destinados principalmente para sistemas sin conexión a red (Gsänger & Pitteloud, 2015). La potencia varía desde 1 kW a 100 kW para aplicaciones residenciales (DWEA, 2015; Kwartin, 2010) y comerciales, o de 101 kW a 2,5 MW para comercios o industrias (DWEA, 2015). Se espera que las turbinas de eje vertical (Vertical Axis Wind Turbine – VAWT), dominen el mercado para usos urbanos frente a las de eje horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine – HAWT), especialmente por el espacio que ocupan (Ishugah *et al.*, 2014) y por su integración arquitectónica (DWEA, 2015; Toja-Silva, Colmenar-Santos, & Castro-Gil, 2013).

La configuración urbana o la forma de los techos juega un papel importante por la presencia de edificaciones, que son obstáculos que afectan la rugosidad, provocan turbulencias y, por tanto, afectan la velocidad del viento (Toja-Silva *et al.*, 2013). Especialmente en las turbinas de eje horizontal, la variabilidad del recurso (multidireccionalidad), disminuye el rendimiento, por la necesidad de reposicionamiento, sin embargo, la producción de energía es superior a las de eje vertical (Ishugah *et al.*, 2014). La imposibilidad de realizar mediciones a un sitio en particular por los costos asociados, dificulta valorar el recurso antes de la colocación de una turbina (Walker, 2011), por lo que la proyección de rentabilidad previo a su colocación puede ser difusa. Las aplicaciones diseñadas para residencias (rurales) requieren áreas despejadas al menos de 4000 m² (DWEA, 2015), por lo que su uso a nivel urbano tendría dificultades de implementarse (Kwartin, 2010).

Shu (2015) hace una evaluación estadística de las características y energía potencial del viento. En el estudio se establece que en el área urbana se tiene probabilidades de operación de las turbinas de 7,97 % a velocidades de 2,55 m/s y una densidad de potencia de 24,20 W/m², en comparación con 90,19 %, 9,04 m/s y 915,93 W/m² respectivamente si se compara con colinas o costas. Esta diferencia se debe a que en las áreas urbanizadas las edificaciones reducen la velocidad del viento.

En otro estudio desarrollado en Leed (Inglaterra) se sugiere que condiciones de viento de 4 m/s se podría implementar más de 9000 turbinas, en edificios altos (Millward-Hopkins *et al.*, 2013). En este estudio se evidencia la influencia de la altura de las edificaciones. En edificios altos (mástil de 5 m), distribuidos a lo largo de la urbe se puede tener velocidades comparables a las existentes en áreas rurales. Por el contrario, en sectores residenciales con similares alturas (con mástil de 2 m), en general, las velocidades son bajas para que la instalación sea viable. Karthikeya *et al.* (2016) anotan que las regulaciones aeronáuticas son otras restricciones para la altura del mástil. Salvo que las edificaciones se construyan con especificaciones propias para sostener los mástiles, su colocación en ambientes urbanos resulta peligrosa e ineficiente si se compara con la colocación de turbinas en espacios abiertos sin obstáculos (DWEA, 2015).

Puesto que la valoración del viento es un factor que debe ser considerado para evitar la incorrecta ubicación de las turbinas en ambientes urbanos (Millward-Hopkins *et al.*, 2013), las aplicaciones en las ciudades están presentes en proyectos específicos. Las diversas morfologías de la ciudad (edificios, calles, árboles u otros obstáculos) y

la madurez de la tecnología han impedido establecer estudios que reflejen el potencial dentro de una urbe.

Las instalaciones eólicas tienen una serie de ventajas como empoderamiento del usuario, mayor eficiencia global, evitan pérdidas de transporte por la proximidad a la carga a más de que no requieren emplazamiento de más infraestructuras eléctricas (IDAE, 2011).

A pesar de lo anterior aspectos como la seguridad, sombras, ruido, vibraciones o impacto visual (Ishugah *et al.*, 2014; Toja-Silva *et al.*, 2013) son condicionantes para la utilización de esta tecnología, por lo que se requiere mayor investigación para su uso en ambientes urbanos.

3.2.9 Energía geotérmica.

Esta energía aprovecha el calor del interior de la Tierra mediante sistemas que permitan captar o ceder la energía almacenada debajo de la superficie. Este tipo de tecnología utiliza el principio de la bomba de calor, de tal manera que se fuerza a que el calor fluya de una temperatura más baja a una alta, utilizando energía auxiliar. La eficiencia del sistema se mide mediante el coeficiente de rendimiento (COP o Coefficient of Performance), que es el coeficiente entre la energía calórica que produce y la energía requerida para producirla. El COP puede estar entre 3 a 5, para diferencias de temperaturas comprendidas entre 0 a 35 °C (Saner *et al.*, 2010).

La energía geotérmica superficial se emplea para calentamiento de agua o aplicaciones de climatización o refrigeración y como no depende de las condiciones externas puede proveer energía a lo largo de todo el año (Schiel *et al.*, 2016). A diferencia de las instalaciones geotérmicas utilizadas para la generación de electricidad, las aplicaciones en ciudades se consideran de baja entalpía y pueden servir para aprovechamientos en proyectos urbanos e industriales (IDAE, 2011). El crecimiento anual de instalaciones de este tipo ha superado el 10 %, sin embargo, los costos de instalación hacen que su expansión se ralentice (Schiel *et al.*, 2016).

Puesto que esta tecnología requiere de electricidad, combustible o calor residual para su operación, su condición de energía renovable solo se considera si la energía auxiliar no es superior a la energía primaria para impulsarla (IDAE, 2011). El sistema geotérmico de bomba de calor puede ser de lazo abierto o lazo cerrado (Yi Zhang *et al.*, 2015). En el primer caso se requiere de una fuente de agua, la misma que es extraída hasta la bomba de calor para luego retornar al origen (GWHP del inglés

Ground Water Heat Pump). El sistema de ciclo cerrado (GSHP) consiste en tuberías horizontales o verticales dispuestas bajo la superficie terrestre o sumergidas en agua y por las que circula un fluido que pasa por la bomba de calor. El ahorro de energía puede estar entre 15 % y más del 80 % dependiendo del tipo de energía auxiliar que se utilice y del COP (Saner *et al.*, 2010). El ahorro energético de los sistemas GWHP puede ser superior al 10 % comparado con los sistemas GSHP; sin embargo, los primeros no son comunes pues requieren una fuente de agua disponible (Aste, Adhikari, & Manfren, 2013).

En los sistemas GSHP, la temperatura interna del suelo es regular, pudiendo estar entre los 7 y 14° C a unos 15 m y el emplazamiento vertical u horizontal dependerá del espacio disponible. En la urbe la solución vertical es la más adecuada (Yi Zhang *et al.*, 2015), pues el emplazamiento horizontal requiere levantar construcciones incrementando el costo de instalación. El sistema vertical necesita pozos de profundidades entre 50 y 400 m, dependiendo de la energía que se requiera y del potencial energético del terreno (Schiel *et al.*, 2016). La profundidad puede estar condicionada por la existencia de acuíferos o por impedimentos técnicos que imposibiliten alcanzar dichas profundidades. Los pozos se pueden colocar en parcelas o jardines, o en sitios en que no hay construcciones o vías de concreto o asfalto. Además, el área disponible está limitada pues entre pozos debe haber una distancia de 6 metros para evitar agotamiento térmico, asimismo, se requiere una zona de amortiguamiento de 3 metros entre la parcela y la construcción (Schiel *et al.*, 2016; Yi Zhang *et al.*, 2015). La energía geotérmica disponible en una ciudad depende de la cubierta vegetal, las condiciones climáticas o la presencia de aguas subterráneas, pero los factores más importantes son la radiación solar que incide en la superficie y las características de almacenamiento y conducción del calor bajo la superficie.

En la investigación de Zhang y colaboradores (2015) se evalúa la aplicación de sistemas de bucle cerrado en Westminster, Londres, en donde se establecen cerca de 96 000 edificaciones de diversos tipos. Se simuló dos escenarios definidos por el área requerida para la colocación de pozos verticales (bajo o alrededor de los edificios). Se dedujo que entre un 51 y 66,6 % de edificaciones pueden ser abastecidas con la disposición de pozos bajo o alrededor de ellas. En Ludwigsburg, Alemania, se probó el modelo realizado por Schiel *et al.* (2016) para determinar el potencial por parcela de energía geotérmica para proveer calefacción y agua caliente. Se dedujo que un 40 % teórico de parcelas podrían abastecer el 100 % de la demanda.

En Finlandia, entre el 25 % (viviendas unifamiliares) y 40 % (viviendas unifamiliares con un bajo consumo de energía) de edificios residenciales construidos anualmente pueden ser provistas de calefacción mediante energía geotérmica con bucle abierto (Arola *et al.*, 2014). En las ciudades de Turku, Lohja *et al.* (2014) estudiaron el efecto de islas de calor en los centros urbanos, en la variación de temperatura en el agua subterránea. La temperatura se incrementó entre 3 y 4 °C, esto indica que los centros urbanos pueden aprovechar una potencia de calefacción máxima de 50 a 60 % en comparación con las zonas rurales.

El uso de esta tecnología está limitado por las condiciones geológicas y geotérmicas del subsuelo de las ciudades. Otro inconveniente de su adopción en las ciudades es la disponibilidad de espacio para la colocación de pozos, si bien es cierto la opción de colocarlo en forma vertical ocupa menos área, los requerimientos constructivos limitan su uso. En edificaciones proyectadas, sin embargo, puede ser una solución para disminuir el consumo energético de viviendas y edificios.

3.2.10 Energía hidroeléctrica.

La energía del agua que se puede aprovechar depende de la caída del agua, así como el caudal. La masa de agua mueve a una turbina que transmite energía cinética a un generador eléctrico.

Existen diversidad de tamaños y rangos de potencia de centrales hidroeléctricas. Pueden clasificarse en función de su potencia: micro (menos de 100 kW), mini (100 kW a 1 MW), pequeñas (1 MW a 30 MW) y grandes (mayor a 30 MW) (Moscovici, Dilworth, Mead, & Zhao, 2015). Sin embargo, cada región o país puede tener una clasificación diferente (Kilama, 2013). Dentro de la amplia clasificación están las centrales a pie de presa o centrales que aprovechan el desnivel del agua de canales de riego, y no suelen superar 5 MW (IDAE, 2011). Su operación es más fácil que las grandes centrales (Xu *et al.*, 2015), sin embargo, los costos unitarios de potencia instalada pueden ser el doble que las grandes hidroeléctricas (IEA/NEA, 2015). La potencia de las centrales incide en el tamaño de la infraestructura y en los impactos ambientales que pudiesen producir.

Las posibilidades de asegurar la provisión de energía eléctrica mediante redes distribuidas, ha vuelto atractivo el uso de centrales de potencias pequeñas, que podrían utilizarse cerca de los centros de consumo (Fujiia *et al.*, 2015). El tamaño de la instalación en los ambientes urbanos dependerá de la existencia del recurso o la

disponibilidad de espacio. Mientras en Filadelfia (Estados Unidos) se propone el uso de centrales que superen los 1000 kW (Moscovici *et al.*, 2015), en Beppu (Japón) se destaca que podría ser atractivo instalaciones menores a esa potencia (Fujiia *et al.*, 2015). El sistema de aprovisionamiento de agua en las ciudades se puede aprovechar para la instalación de pequeñas centrales hidroeléctricas, con lo que se disminuye hasta un 50 % el costo de la infraestructura civil, y a la vez se puede incrementar el tiempo de operación en comparación a instalaciones ubicadas a pie de río (Kucukali, 2010). Otras tecnologías utilizan turbinas hidrocinéticas (bajas o nulas alturas) o turbinas de ultra baja altura (0 a 3 m), pero tienen poca confiabilidad y desarrollo (D. Zhou & Deng, 2017).

La condición de que las ciudades tengan ríos que las atraviesen restringe su uso en estos ambientes. A más de ello el espacio disponible por la consolidación de las áreas urbanas pueden impedir su implementación no solo de la casa de máquinas sino de canales o tuberías para procurar una caída adecuada con el fin de garantizar la producción de electricidad.

3.2.11 Energía solar fotovoltaica.

La producción de electricidad se obtiene directamente de la radiación del sol mediante dispositivos semiconductores que se encuentran agrupados en placas fotovoltaicas. La funcionalidad de colocar estas placas en techos de edificios e incluso en fachadas ha despertado gran interés en varias investigaciones. La tendencia es adaptar a productos de revestimiento o de accesorios que se integren a la arquitectura (The Solar Heating and Cooling Programme, 2012).

Sarralde *et al.* (2015) evalúan la relación entre la forma de los edificios con el potencial solar utilizable en techos y fachadas. Este estudio muestra que las fachadas tienen limitaciones para el uso de la energía solar (cuatro veces menor que si se compara con el caso base que utiliza los paneles en los techos). Este resultado, sin embargo, depende de latitud y proporción de irradiación directa y difusa, además de condiciones arquitectónicas como el distanciamiento entre fachadas. Otros temas por considerar son el área construida (Índice espacio de piso o la relación de la superficie total del edificio y el área total en la que está construido o FSI) y la rotación del edificio. Kanters *et al.* (Kanters, Wall, & Dubois, 2014) señalan que solo con un FSI bajo (menos de 1), se podría lograr una cobertura del 100 % de la electricidad, bajo determinadas condiciones de demanda e irradiación. Zalamea (2016) demuestra que las disponibilidad del área de techumbre y las características arquitectónicas de las

viviendas son determinantes para que en una misma localidad se pueda aprovechar al máximo la irradiación, llegándose a una captación que supera el 100 % de la demanda si se dispone superficie sin obstáculos, frente a un 10 % si la techumbre es irregular y fraccionada.

Chaianong y Pahrino (2015) describen la coyuntura actual como una oportunidad para incluir los sistemas fotovoltaicos (en azoteas) en las ciudades de Tailandia, puesto que su integración pueden aportar beneficios ambientales, diversificación o autonomía energética. Se enfatiza que es una adecuada respuesta frente al alto grado de urbanización y crecimiento de la demanda. En el caso de Nepal el uso de la fotovoltaica es promovido para abastecer la demanda no cubierta de electricidad desde la red (Gautam *et al.*, 2015). Estos autores establecen que utilizando el 10 % de las áreas de las azoteas en las ciudades se dispondría de la energía que requiere este país para cubrir la demanda no satisfecha.

El estudio ejecutado para la ciudad de Karlsruhe (Alemania) considera la tecnología fotovoltaica en fachadas y la que se puede colocar en azoteas, integrada o no a la edificación (los módulos asumen la función de materiales protectores de lluvia o control solar) (Fath *et al.*, 2015). En la localidad de Zernes (Suiza) se aplicó el modelo desarrollado por Mavromatidis *et al.* (2015). Este modelo incluye el cálculo del potencial solar, la demanda eléctrica diaria y restricciones de costos (inversión de paneles, sistema de almacenamiento, energía recibida, producida y mantenimiento). La potencia pico calculada de 3150 kWp se obtiene de la máxima de superficie disponible para la instalación de paneles (25 200 m²). Según las restricciones de costos se puede tener entre un 25 a 64 % de la demanda.

Radomes y Arango (2015), para Medellín, Colombia, hacen un análisis que evalúa la cantidad de potencia instalada con paneles fotovoltaicos que se podrían instalar teniendo al 2035 como horizonte de análisis. Se concluye que para incentivar agresivamente la colocación de paneles se requiere implementar incentivos (subsídios o tarifa regulada), requiriéndose que para un incremento de 0,26 MW (70 usuarios) a 5,85 MW (1657 usuarios) se necesita 4,5 millones de dólares para el primer año de implementación.

Rosenbloom y Meadowcroft (2014) revisan la situación en Canadá y establecen que la tecnología fotovoltaica puede producir una significativa cantidad de energía. Sin embargo, a más de las restricciones técnicas (variabilidad del recurso, disponibilidad de áreas, eficiencia) se debe considerar aspectos vinculados a la economía (costos de

equipos e instalación y precios de energía), sociedad (aceptación, «impuestos al sol»), medioambiente (ciclo de vida de la fabricación de las placas) u otras industrias (existencia de fuentes de energía bajas en carbono). A escala mundial, la Agencia Internacional de Energía pronostica que para el año 2050, las instalaciones fotovoltaicas integradas en techumbres podrían suplir el 32 % de las demandas urbanas y un 17 % de la demanda eléctrica mundial (International Agency Energy, IEA, 2014). En Nueva York se estima que el uso de estas instalaciones puede propiciar beneficios económicos debido a que se evitan las pérdidas de distribución y transmisión (Byrne, Taminiu, Kim, Seo, & Lee, 2015), además, se advierten beneficios relacionados al ambiente y a la salud pública.

El análisis en 3D, para evaluar el potencial solar de las ciudades se está volviendo común pues permite considerar los efectos de las sombras (árboles, edificios), superficie de las fachadas y azoteas (Hafeez & Atif, 2014; Liang *et al.*, 2015), densidad urbana y orientación (Kanters, Wall, & Dubois, 2014). Sin embargo, se requiere esfuerzos computacionales y un levantamiento previo del entorno urbano que se va a evaluar (Liang *et al.*, 2015).

El interés por esta tecnología en aplicaciones urbanas contrasta con los diversos diseños de edificaciones que impiden disponer de condiciones solares óptimas. La energía que puede suministrar un sistema fotovoltaico está estrechamente vinculada con el espacio disponible para la colocación de las placas. La orientación y la presencia de sombras son otros factores que influyen la captación óptima de la energía solar. Las condiciones de localización son relevantes, edificios cercanos a la línea ecuatorial poseen preponderante captación en techumbre y en fachada se limita; contrariamente en zonas mediterráneas hasta latitudes elevadas las fachadas ganan importancia.

3.2.12 Energía solar térmica.

En este caso la energía solar es utilizada para incrementar la temperatura de un fluido que puede ser aire o agua. El aprovechamiento se hace a través de un panel o captador solar que transfiere la energía en forma de calor al fluido. Luego este es conducido a través de un circuito hidráulico hasta su aplicación final. Los captadores solares pueden ser planos o de tubo al vacío. Los usos pueden ser para la provisión de agua caliente sanitaria, usos industriales o para climatización (calor o frío).

En Estados Unidos, México, China y Turquía se utilizan colectores solares planos y colectores de tubo de vacío. La participación en el mercado varía, en Turquía, Estados Unidos, México y China, respectivamente el mercado representa el 99, 86, 36 y 5 % de placas planas (Benli, 2016; Han, Mol, & Lu, 2010; Rosas-Flores *et al.*, 2016). Los calentadores de tubos de vacío tienen mejor eficiencia con respecto a las placas planas, sin embargo, su costo puede superar el 20 % frente a los de placas planas (IDAE, 2011). Los colectores planos tienen una mayor área de absorción, lo que permite compensar su generación energética (Greening & Azapagic, 2014).

Para el movimiento del fluido térmico puede utilizarse circulación forzada (bombas) o natural. Además, por la variabilidad del recurso, el uso de estas tecnologías suele estar acompañadas de fuentes energéticas de respaldo (electricidad o combustibles fósiles), que garantizan al usuario que se tengan las condiciones de confort térmico requerido. Para instalaciones pequeñas no es un requerimiento bombas para la circulación de agua (Benli, 2016). En este caso se usa la convección natural para que fluya el agua desde el colector al tanque de almacenamiento (termosifón). El fluido puede ser directamente utilizado en las aplicaciones o puede utilizarse dos circuitos separados a través de un intercambiador de calor y, de esta manera, se separan el fluido que circula por el colector y el que es utilizado (International Renewable Energy Agency, IRENA, 2015). Esta variabilidad en diseños y equipamiento, hacen que los costos de inversión varíen considerablemente hasta una escala de 10 (IRENA, 2015).

La tecnología está disponible para aplicaciones en viviendas individuales, edificios o distritos urbanos. En México se valoró que en el sector residencial urbano el 45,60 % del gas licuado de petróleo utilizado para el calentamiento de agua puede ser sustituido por calentadores solares. A pesar de que existe un mercado nacional para calentadores solares y que podría ser una alternativa económica si se compara con el uso de gas licuado o gas natural, la falta de incentivos impide que esta opción se expanda (Rosas-Flores *et al.*, 2016). En contraparte en ciudades las chinas de Haining, Huzhou y Ningbo, donde se producen calentadores solares de agua (SWH del inglés Solar Water Heater), el uso de este equipamiento supera el 90 % en áreas urbanas. El éxito de la difusión de estos sistemas no solo se debe a la carencia de recursos fósiles propios, sino a una estructura industrial, incentivos económicos y políticas municipales. A más de ello se ha construido una imagen positiva del uso de esta tecnología que ha permitido una amplia aceptación del público (Han *et al.*, 2010).

Izquierdo *et al.* (2011) concluyen que se puede abastecer el 68,40 % de requerimientos de agua caliente con la utilización de SWH, en 8005 municipalidades españolas. Para cumplir esto se requiere menos del 20 % de la superficie de las azoteas, quedando el resto disponible para la instalación de paneles fotovoltaicos.

La influencia de las sombras en este tipo de instalación es menor cuando se compara con la tecnología fotovoltaica. El estudio de Marique *et al.* (2014) muestra que la densidad urbana afecta a la producción de energía térmica, debido al área disponible para la colocación de los paneles térmicos. En las zonas con menor densidad de viviendas por superficie se obtiene una menor producción de energía. En el caso del FSI con valores inferiores a 1,5 se puede abastecer totalmente la demanda térmica (Kanters, Wall, & Dubois, 2014).

Esta tecnología es madura y es utilizada en diferentes países, con diferentes grados de penetración. La disponibilidad de espacio para su colocación puede ser un limitante, así como el requerimiento de energía auxiliar para mantener el requerimiento energético, aun así, presenta ventajas indiscutibles para disminuir los requerimientos de energía.

Otra concepción interesante, pero requiere más trabajo es la investigación de Zhou *et al.* (2015), que propone aliviar la contaminación del aire en las ciudades chinas con el uso de torres solares. De esta forma el aire caliente provocado por las islas de calor en la ciudad es conducido a través de chimeneas de alturas de 1 a 1,5 km, que llevan los contaminantes a capas atmosféricas superiores para que puedan dispersarse. Esta tecnología puede ser particularmente útil en ciudades en donde se produce inversión térmica que impide la dispersión del aire contaminado. El estudio, además, analiza la colocación de un generador 12,5 MW en la parte baja de la torre cuyas turbinas son movidas por las corrientes de aire produciendo hasta 39,9 GWh de electricidad.

3.2.13 Integración de tecnologías.

Diversos estudios analizan el uso de varias tecnologías a la vez. En este caso se busca que la provisión de energía sustituya diferentes usos de fuentes no renovables, así como busca maximizar el abastecimiento, dado que el recurso primario no siempre está disponible. Es importante la integración y asociación de producción intermitente y controlable, para estabilizar la red en el caso de sistemas de generación de electricidad.

Eicker *et al.* (2015) evalúan cómo el diseño de un barrio en la ciudad de Múnich influye en la provisión de energía eléctrica o calefacción que se puede aprovechar a partir de paneles solares fotovoltaicos o una planta geotérmica respectivamente. Mientras la demanda térmica puede reducirse en un 10 % si se tienen edificaciones compactas, las sombras provocan un incremento de hasta un 13 % de la demanda energética. Con una distribución específica se puede superar los requerimientos de la demanda de energía eléctrica y si se considera las sombras disminuye en un 25 a 32 %.

Sarralde *et al.* (2011) evalúan el potencial de las ER (solar, geotérmica, eólica o biomasa). La propuesta utiliza nueve índices relacionados con el uso de suelo, área disponible y demanda. Con el estudio se busca ayudar a comprender cómo integrar las energías renovables en los ambientes urbanos.

El modelo propuesto por Yeo y colegas (2014) utiliza sistemas de información geográfica y redes neuronales para determinar la ubicación de plantas de suministro energético y de energía renovable. El modelo se aplica en distritos urbanos de Gwang-myung/Si-heung, provincia de Gyunggi-do en Corea del Sur. En el estudio se incluyen tecnologías fotovoltaicas y eólicas (eje vertical y horizontal). Se destaca las limitaciones de la implantación de turbinas eólicas ya sea por la disponibilidad de vientos o por limitaciones de potencia.

Como un paso para el autoabastecimiento energético en Dacar (Bangladés), el estudio de Matin *et al.* (2014) explora la incorporación de la energía fotovoltaica y plantas de biogás en un conjunto de edificios comerciales. A más del diseño técnico se establecen costos muy generales del equipamiento, así como del precio de energía.

Para áreas urbanas y semiurbanas, Marique *et al.* (Marique & Reiter, 2014) extienden el concepto de edificios con cero energía, a sectores que comprenden varias edificaciones. Este estudio analiza el uso de la tecnología eólica, solar térmica y fotovoltaica y propone el uso de esta última a nivel de comunidad antes que a escala individual. Las repercusiones de un manejo eficiente y sostenible están condicionadas al aislamiento térmico de las edificaciones, así como el comportamiento de los consumidores.

Orehounig *et al.* (2013) mediante un modelo de optimización que incluye restricciones económicas y de emisiones, propone la integración de la energía fotovoltaica, pequeña hidroeléctrica y biomasa, utilizando el concepto de hub energético. Una disminución de un 38 % de emisiones de CO₂ se consigue al reducir

el consumo de combustibles fósiles y electricidad de la red. La misma autora, demuestra que aplicando este concepto en la villa de Zernez en Suiza, y sin restricciones económicas, se llega a reducciones de emisiones de 86 % y una sustitución energética con renovables de un 83 % (Orehounig *et al.*, 2014).

3.2.14 Proyectos en ciudades.

Varias investigaciones y proyectos buscan la integración de las energías renovables en la ciudad. La variedad de ellos indica las dificultades de definir políticas globales, precisamente por la diversidad y complejidad urbana. Destacan los proyectos formulados en Europa y en Estados Unidos.

El proyecto «Energy Efficient Cities initiative» (EECi), en Inglaterra es una investigación de carácter multidisciplinaria que busca reducir la demanda energética y los impactos ambientales en las ciudades. Este proyecto propone que las energías renovables sean consideradas en la planificación urbana y se integren a las edificaciones (University of Cambridge, 2016).

El proyecto Music (Mitigation in Urban Areas: Solutions for Innovative Cities), tiene como objetivo la reducción del consumo de energía y la descarbonización de las ciudades. Este proyecto reúne la participación de grupos de investigación de Escocia (Reino Unido), Gante (Bélgica), Montreuil (Francia), Ludwigsburg (Alemania) y Rotterdam (Países Bajos). En este proyecto se ha desarrollado una herramienta que permite valorar el potencial de energía renovable para que los planificadores puedan elegir la ubicación y el tipo de energía que se pueda aplicar (The Music Project, 2015).

Otro proyecto de interés es el de la Asociación Europea de las Autoridades Locales en Transición Energética (Energy Cities), que busca un cambio del sistema convencional basado en recursos fósiles. Una de las propuestas es que las futuras viviendas y edificios utilicen el 100 % de energías renovables (Energycities, 2014). En Alemania, la transición energética (Energiewende) con miras al año 2050, contempla que en las viviendas sea posible no solo la autoproducción de energía eléctrica sino su venta (Ministerio Federal de Relaciones Exteriores de Alemania, 2017). Lo que implica la adaptación progresiva de la red de distribución de forma que permita gestionar las energías renovables, almacenamiento de energía y transporte (<http://www.energie-wende-global.com>).

El proyecto Project Sunroof (<https://www.google.com/get/sunroof#p=0>) analiza la incorporación de paneles solares fotovoltaicos a escala doméstica en localidades de 50 estados norteamericanos (Google, 2017).

Desde años recientes varias experiencias de inserción urbana de producción energética renovable son la consecuencia de adopción de políticas públicas, incentivos municipales y adopciones de estrategias particulares y de diversa escala. El éxito alcanzado en todos los casos es relativo y depende de las condiciones locales y en gran medida de las condiciones ambientales y recursos naturales disponibles. Un compendio detallado de estas experiencias ha sido publicado por la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2009) y la Agencia Internacional de Energías Renovables International (IRENA, 2016b).

En Latinoamérica a pesar de que se busca un desarrollo sostenible urbano, en el proyecto del Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2016) no se destacan la inclusión de tecnologías renovables en las ciudades consideradas como emergentes y sostenibles.

4 PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA APLICACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN EL METABOLISMO URBANO DE LAS CIUDADES

*El centro está dentro
de la ciudad, pero es mayor que la ciudad.*
José Saramago

En este capítulo se propone y desarrolla una metodología para analizar la inclusión de las energías renovables bajo el marco del metabolismo urbano. Se describen las herramientas metodológicas utilizadas para representar a la ciudad en términos de su energía directa. Se propone el uso de herramientas utilizadas a escala regional y nacional, las mismas que permiten modelar los flujos de energía directa que son requeridos en las actividades urbanas. Se describe de forma general la metodología propuesta para aplicar en una ciudad. La falta de homogeneidad de los municipios hace que no sea posible normalizar que tipo de datos específicos se requiere para modelar los flujos de energía urbanos, así como el potencial del recurso disponible. Sin embargo, en este capítulo con claridad se muestra el procedimiento que se podría hacer para modelar la ciudad en términos de su energía directa.

4.1 Descripción general de la metodología propuesta

La metodología propuesta está compuesta por ocho fases, según como se indica en la Figura 4-1. La aplicación de la metodología en una ciudad determinada requerirá información primaria que puede provenir de una revisión bibliográfica, solicitud de datos, entrevistas, encuestas o manejo de programas computacionales especializados.

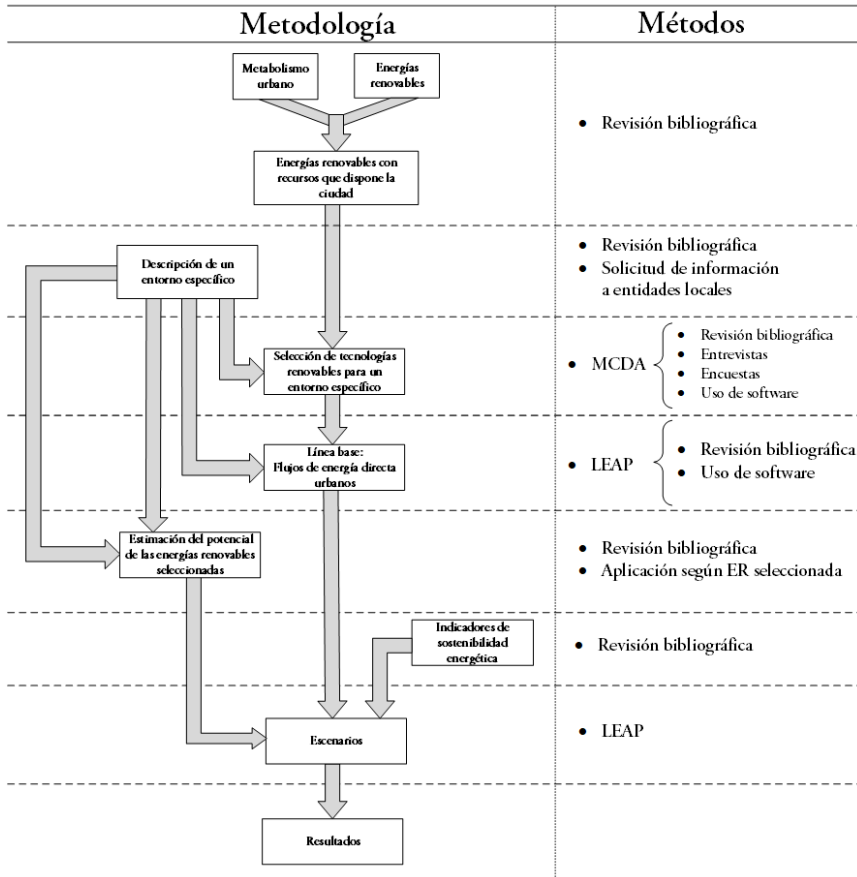


Figura 4-1. Esquema metodológico propuesto

Fuente: Elaboración propia

Fases como la descripción de la ciudad o el análisis del potencial dependen de la información disponible en las ciudades, así como de los resultados de otras etapas. Otras etapas se describen en este capítulo y se justifican las razones por las que se emplean los métodos propuestos.

La etapa del **metabolismo urbano y energías renovables** se fundamenta en el estudio del arte realizado en los capítulos 2 y 3. A través de esta revisión se identificó el método de análisis de los flujos de energía directa, así como las once tecnologías que podrían emplearse en las matrices energéticas urbanas.

La **descripción del entorno específico** requiere que se recabe información que permita establecer las condiciones del área urbana de análisis, como población, clima, recursos, economía, consumo de agua, emisiones, transporte u otras. Esta información, además, servirá para levantar la línea base de energía de la ciudad, así como estimar el potencial energético de las tecnologías seleccionadas.

En la **selección de tecnologías renovables para el entorno específico** se sugiere elegir las energías renovables que podrían emplearse en las matrices energéticas urbanas a partir de las tecnologías definidas en la Tabla 3-1. Clasificación de las energías renovables según el IDAE. Debido a la falta de certeza en los resultados y a una serie de disyuntivas que se pueden presentar al momento de seleccionar las tecnologías renovables se necesita utilizar técnicas que faciliten su selección. Con el fin de elegir la tecnología más adecuada, se plantea el uso de técnicas multicriterio (Multiple Criteria Decision Analysis por sus siglas en inglés MCDA). Las técnicas multicriterio han sido utilizadas en varios estudios para planificación energética y selección de tecnologías energéticas a nivel nacional y regional y marginalmente se han utilizado para entornos urbanos. Para esta tesis, el análisis se hizo utilizando el método multicriterio PROMETHEE. El método requiere definir un conjunto de criterios para el proceso de decisión. A diferencia de la escala regional, en el caso de la ciudad se deben incluir aspectos relacionados con la arquitectura, la disponibilidad de espacio u otros limitantes que impidan el aprovechamiento del recurso.

En la **línea base** se describirá a la ciudad en términos de la energía directa. Se plantea que al modelo LEAP (Long Range Energy Alternatives Planning System), como adecuado para este análisis. El modelo LEAP es ampliamente utilizado en la planificación energética y es elegido pues permite construir balances de energía y escenarios. La posibilidad del modelo para describir el sistema energético en las fases

de demanda, transformación y recursos lo hace ideal para conseguir el objetivo de analizar el metabolismo energético de una ciudad. Al lado de la demanda se puede describir el sistema en varios niveles de actividad.

La **estimación del potencial** dependerá de las ER seleccionadas como adecuadas para una ciudad. Existe una variedad de técnicas para valorar el potencial de las energías renovables. El uso de una u otra dependerá del tipo de la profundidad en el análisis, así como de las herramientas e información disponible. En la Tabla 3-3. Potencial energético técnico para diferentes ciudades, se destacan estudios en donde se incluyen algunos métodos. Para esta tesis se opta por técnicas que se adapten a la disponibilidad de información del área de estudio.

Los **resultados** de los balances energéticos de los **Escenarios** propuestos permiten evaluar a partir de **Indicadores de sostenibilidad** el modelo energético urbano. Los escenarios se construyen incorporando en el módulo de transformación del modelo LEAP la estimación del potencial de energía renovable. Los indicadores de sostenibilidad energética han sido seleccionados luego de una revisión bibliográfica y permiten valorar cómo se modifica las dimensiones económica, ambiental y social con la inclusión de las tecnologías renovables.

4.2 Métodos multicriterio

Para este estudio son de interés los métodos de ayuda a las decisiones MCDA (Multiple Criteria Decision Analysis), pues permiten valorar alternativas considerando aspectos técnicos, económicos, ambientales o sociales. Varios autores utilizan también el término MCDM (Multiple Criteria Decision Making), sin embargo, el MCDM y el MCDA provienen de diferentes escuelas (Roy & Vanderpooten, 1996). En el caso del MCDM (escuela americana), se asume que la solución (decisión) de un problema se deriva de un modelo matemático, sin considerar que diferentes actores tienen diferentes preferencias (Georgopoulou, Lalas, & Papagiannakis, 1997). Mientras que la escuela europea con el MCDA sostiene que los decisores pueden utilizar modelos que, sin haber sido formalizados completamente, sirven para elegir una solución basándose en sus preferencias. Roy y colaboradores (1996) consideran que no es posible afirmar que los resultados de un modelo matemático son buenos o malos, pues se deben tomar aspectos adicionales de la «vida real». Para este trabajo se considera indistinta la anterior diferencia, esto

por cuanto las investigaciones han utilizado los dos términos como uno solo. Sin embargo, el uso del término «ayuda a la decisión» resultaría más adecuado pues toma en cuenta que para un problema complejo con diversidad de variables existe más de una respuesta.

Løken (2007) considera el uso de las técnicas MCDA como una herramienta útil que ayuda a las decisiones o análisis de decisiones (decision aid – decision analysis), pues posibilitan organizar y sintetizar información para identificar los criterios más adecuados cuando se toman decisiones importantes. Las técnicas MCDA son parte de las técnicas de decisión (DA del inglés Decision Analysis Methods) (Prasad, Bansal, & Raturi, 2014; J. C. Rojas, 2012) tal como se muestra en la Figura 4-2. Dentro de esta clasificación, por un lado, están las técnicas simple objetivo (SODM del inglés Single Objective Decision Making) que permiten evaluar resultados inciertos bajo una simple opción u objetivo. Mientras que los sistemas de soporte para la toma de decisiones (DSS del inglés Decision Support Systems) son sistemas basados en la informática y permiten explorar alternativas y tomar decisiones en una organización.

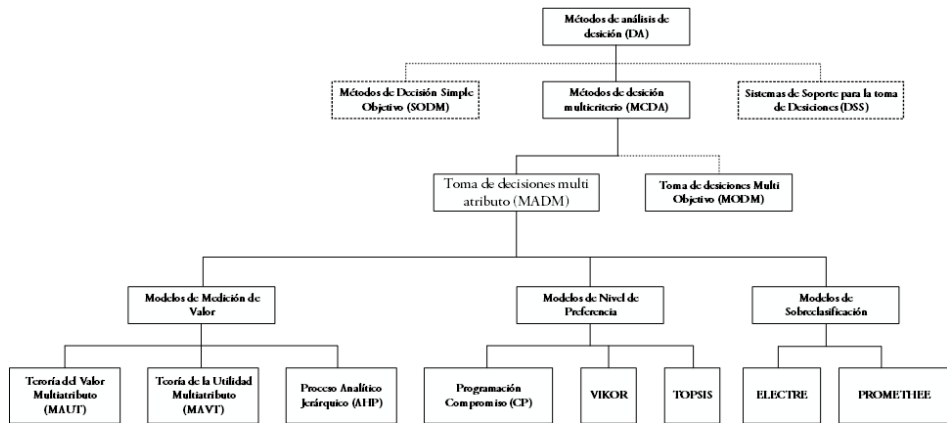


Figura 4-2. Clasificación de los métodos multicriterio
Fuente: Basado en Prasad *et al.* (2014) y Rojas (2012)

Las técnicas para la toma de decisiones multicriterio permiten tomar decisiones entre varias opciones o múltiples alternativas (a_1, a_2, \dots, a_n). Las alternativas son evaluadas en función de una serie de atributos $\{g_1(\cdot), g_2(\cdot), \dots, g_k(\cdot)\}$ que pueden ser cualitativos o cuantitativos. Las mejores alternativas son elegidas luego de hacer comparaciones que involucran los atributos seleccionados (Pohekar & Ramachandran, 2004; Wang, Jing, Zhang, & Zhao, 2009).

Estas técnicas se han vuelto populares en la toma de decisiones en los ámbitos energéticos y ambientales. Las técnicas MCDA se pueden dividir en dos (Løken, 2007; Pohekar & Ramachandran, 2004; Prasad *et al.*, 2014; J. C. Rojas, 2012), según se especifica en la Figura 4-2.

- Toma de decisiones multiatributo (MADM del inglés Multiple Attribute Decision Making): en este caso se tiene un número de alternativas numerable, que por lo general no son muy elevadas.
- Toma de decisiones multiobjetivo (MODM del inglés Multiple Objective Decision Making): en este caso el número de alternativas no está definido, y para su resolución se utilizan técnicas de optimización.

Puesto que se requiere elegir entre diferentes tecnologías renovables, el estudio se focaliza en los métodos MADM. Según Løken (2007), estos pueden ser:

- Modelos de medición de valor: en este caso se asigna una puntuación a cada alternativa y se establece una preferencia entre estas. Además, se asignan pesos para cada criterio en función de su importancia para el tomador de decisiones. Dentro de esta clasificación se tiene: teoría de valor multiatributo (MAVT del inglés Multiattribute Value Theory), teoría de utilidad multiatributo (MAUT del inglés Multiple Attribute Utility Theory) y el proceso analítico jerárquico (AHP del inglés Analytical Hierarchy Proces).
- Modelos de nivel de preferencia: buscan determinar las alternativas que están más cerca de conseguir un determinado objetivo o aspiración. Dentro de estos métodos se tiene: programación por compromiso (CP del inglés Compromise Programming), técnica para ordenar las preferencias mediante similitud a la solución ideal (TOPSIS del inglés Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions), optimización multicriterio y solución compromiso (VIKOR del bosnio ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje).
- Modelos de sobre clasificación: en este caso las alternativas son comparadas por pares y se determina cuál es la alternativa preferida con relación a cada criterio. Entre estos métodos se tiene: eliminación y selección traduciendo la realidad (ELECTRE del inglés ELimination and Choice Translating REality), métodos de organización para la clasificación de preferencias (PROMETHEE del inglés Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation).

Los resultados obtenidos para un mismo problema de decisión pueden diferir de un método a otro. Esto no indica que existan soluciones erróneas, sino que cada método trabaja en diferente forma (Løken, 2007; J. C. Rojas, 2012). Es más las técnicas multicriterio tienen en común los siguientes pasos (Al Garni, Kassem, Awasthi, Komljenovic, & Al-Haddad, 2016; Prasad *et al.*, 2014; Terrados *et al.*, 2009): i) definición del problema, ii) definición del método apropiado, iii) identificación de alternativas, iv) selección de criterios, v) elaboración de la matriz de decisión, vi) asignación de pesos, vii) priorización de alternativas y viii) toma de decisiones.

4.2.1 Definición del problema.

Se han establecido once tecnologías renovables que pueden ser aplicadas en la ciudad bajo el marco del metabolismo urbano. En la Tabla 4-1 se identifican los sustitutos energéticos y las contribuciones de las distintas fuentes renovables.

Tabla 4-1. Sustitutos energéticos de las ER

Subsistema	Materia prima	Conversión	Energía final	<u>Uso final</u>	Sustituye al portador energético:
Bioetanol	Desechos vegetales urbanos lignocelulosos	Hidrólisis química y enzimática	Combustibles líquidos		Combustible líquido
Biomasa	Desechos urbanos forestales	Combustión	Electricidad	<u>Calor</u>	Electricidad Combustible líquido o gaseoso
Biogás	Lodos de aguas residuales Fracción biodegradable de desechos urbanos y desechos de podas	Digestión anaerobia	Electricidad Combustible	<u>Calor</u>	Electricidad Combustible líquido o gaseoso
Biogás Vertederos controlados	Residuos sólidos urbanos				

Incineración Cocineración	Desechos sólidos urbanos e industriales	Combustión	Electricidad <u>Calor</u>	Electricidad Combustible líquido o gaseoso
Mareomotriz	Agua	Mecánica	Electricidad	Electricidad
Pequeña eólica	Viento	Mecánica	Electricidad	Electricidad
Geotérmica	Calor de la tierra	Intercambio de calor	<u>Calor / Refrigeración</u>	Electricidad Combustible líquido o gaseoso
Pequeña hidroeléctrica	Agua	Mecánica	Electricidad	Electricidad
Fotovoltaico en terrazas o fachadas	Radiación solar	Efecto fotoeléctrico	Electricidad	Electricidad
Solar térmica	Radiación solar	Intercambio de calor	<u>Calor</u>	Electricidad Combustible líquido o gaseoso

Fuente: Elaboración propia

Lo que se busca es que los recursos renovables que se puedan obtener en la ciudad puedan sustituir el consumo de los portadores energéticos como la electricidad o combustibles. El análisis propuesto se centra en determinar aquellas alternativas que son más adecuadas de implantar bajo un conjunto de criterios. En países con recursos limitados, este tipo de análisis es adecuado, pues permitirá focalizar el impulso en tecnologías que son más adecuadas en entornos en donde la información es escasa.

4.2.2 Elección del método multicriterio.

Hay varios métodos multicriterio para la toma de decisiones. La elección de un método puede en sí mismo requerir una técnica multicriterio. La elección podría basarse, siguiendo las siguientes pautas (Løken, 2007; Topcu & Ulengin, 2004):

- i. Aplicaciones previas que han utilizado el método para objetivos similares.
- ii. El método mida lo que se busca medir (validez).
- iii. Debe reflejar valores reales de los usuarios.

- iv. El método debe ser idóneo, de tal manera que proporcione la información que requieren los tomadores de decisiones.
- v. El método debe ser compatible con los datos que se disponga.
- vi. El método debe ser fácil de usar y de entender.
- vii. Los usuarios deben confiar en las recomendaciones del método.

Para determinar el o los métodos más populares para la selección de tecnologías que consideren ER, se realizó una revisión bibliográfica. Mediante esta revisión también se identificaron los criterios que se emplearán para la evaluación. La búsqueda se realizó en la base de datos *Web of Science* con el criterio de búsqueda: «renewable energy» and «MCDA», además de «renewable energy» and «MCDM».

En la Tabla 4-2 se muestran varios estudios que utilizan técnicas multicriterio para determinar opciones energéticas que incluyen tecnologías que emplean recursos renovables. En la revisión, asimismo, se identificó estudios que utilizan técnicas multicriterio para analizar tecnologías específicas (ver Tabla 4-3). En la Tabla 4-4 se presentan las ventajas y desventajas de los métodos más utilizados, las mismas que pueden ayudar a seleccionarlos.

De la revisión de las Tabla 4-2 y Tabla 4-3 se destaca que los métodos más populares son el AHP, PROMETHEE y ELECTRE. Existen otros métodos, sin embargo, con el fin de limitar el análisis no se discuten, a pesar de que se ha revisado investigaciones que los han utilizado con el fin de determinar los criterios que permitirán elegir las tecnologías renovables. Las investigaciones que consideran una sola tecnología utilizan los métodos para determinar las locaciones más adecuadas para la colocación de infraestructuras o para analizar la eficiencia entre diferentes opciones, así también hay estudios que utilizan el análisis multicriterio para evaluar las características de inversión o de licencias. En los estudios se evalúan opciones tecnológicas, así como escenarios que incluyen a más de las tecnologías renovables, energías convencionales. También se advierte que la mayoría de los estudios se los ejecuta para ámbitos nacionales y regionales. Es común encontrar estudios que utilizan una combinación de métodos, lo que puede fortalecer al proceso de decisión (Løken, 2007). De la revisión también se destaca el uso frecuente de técnicas difusas en el proceso de decisión.

Tabla 4-2. Métodos multicriterio utilizados para seleccionar ER

Tecnologías	Objetivos	Método	Escala	Fuente
Energía eólica, biomasa y solar térmica.	Evaluar estrategias energéticas para el aprovisionamiento de energía eléctrica.	ELECTRE III	Regional	(Georgopoulou <i>et al.</i> , 1997)
Energía solar fotovoltaica, calentadores solares térmicos, energía eólica, energía hidroeléctrica, biomasa.	Evaluar un plan para la difusión de tecnologías renovables.	ELECTRE	Regional	(Beccali, Cellura, & Mistretta, 2003)
Energía hidroeléctrica, eólica, solar y biomasa.	Evaluar los recursos con el fin de seleccionar tecnologías para producir energía eléctrica.	PROMETHEE I Y II	Nacional	(Topcu & Ulengin, 2004)
Energía fotovoltaica, energía eólica, geotérmica para calefacción, microhidroeléctrica y energía solar térmica.	Analizar la aplicación de las herramientas multicriterio para ayudar a priorizar proyectos de energías renovables.	AHP SIMUS ²	Local	(Nigim, Munier, & Green, 2004)
Energía solar, biomasa, hidroeléctrica, eólica y la energía	Comparar alternativas de generación eléctrica de pequeña y gran escala	MACBETH	Local	(Burton & Hubacek, 2007)

² SIMUS-sequential interactive model for urban sustainability.

Propuesta metodológica para la aplicación de las energías renovables en el metabolismo urbano de las ciudades

Tecnologías	Objetivos	Método	Escala	Fuente
proveniente de vertederos.	bajo criterios sociales, económicos o ambientales.			
Instalaciones eléctricas de biomasa, hidroeléctricas, fotovoltaicas, termosolares, eólicas; producción de calor con biomasa, paneles solares térmicos y biocombustibles.	Presentar una propuesta metodológica para promover un sistema energético sostenible.	PROMETHEE	Regional	(Terrados <i>et al.</i> , 2009)
Hidroeléctrica, biogás, eólica, fotovoltaica, geotérmica.	Evaluar las opciones para la provisión de energía eléctrica bajo un enfoque de sostenibilidad.	SUSTAINABILITY INDEX ³	Nacional	(Roth <i>et al.</i> , 2009)
Biomasa, energía eólica, fotovoltaica, mareomotriz, corrientes y combustión de desechos sólidos urbanos.	Evaluar escenarios de consumo de energía eléctrica y calefacción.	NAIADE ⁴	Local	(Browne, O'Regan, & Moles, 2010)
Biomasa y la energía geotérmica.	Evaluar fuentes de energía para calefacción urbana.	PROMETHEE	Local	(Ghafghazi, Sowlati, Sokhansanj, & Melin, 2010)

³ MCDA, desarrollado para la investigación.

⁴ NAIADe, Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environments.

Propuesta metodológica para la aplicación de las energías renovables en el metabolismo urbano de las ciudades 86

Tecnologías	Objetivos	Método	Escala	Fuente
Energía eólica, pequeña hidroeléctrica, biomasa con fines eléctricos, biomasa para aplicaciones térmicas en aplicaciones residenciales e industriales, sistemas fotovoltaicos centralizados, sistemas fotovoltaicos en edificios conectados a red, sistemas solares térmicos para uso residencial, sistemas solares térmicos para uso industrial, geotérmica de alta entalpía.	Analizar si los objetivos de la política energética que considera ER están relacionados con la sostenibilidad.	LINGUISTIC TOPSIS	Nacional	(Doukas, Karakosta, & Psarras, 2010)
Energía solar fotovoltaica, eólica y minicentral hidroeléctrica.	Utilizar técnicas multicriterio para elegir una tecnología de suministro de energía eléctrica para la provisión de energía en comunidades rurales.	AHP VIKOR ⁵	Local	(J. C. Rojas, 2012)
Energía eólica, solar termoeléctrica, biomasa y biocombustibles.	Seleccionar la mejor alternativa entre proyectos de energía renovable para la producción de energía eléctrica.	AHP COPRAS ⁶	Nacional	(Yazdani-Chamzini, Fouladgar, Zavadskas, & Moini, 2013)

⁵ VIKOR – VlseKriterijuska Optimizacija I Komoromisno Resenje.

⁶ COPRAS-COMplex PROportional ASsessment.

Propuesta metodológica para la aplicación de las energías renovables en el metabolismo urbano de las ciudades 87

Tecnologías	Objetivos	Método	Escala	Fuente
Energía eólica y fotovoltaica.	Estudiar el óptimo diseño de un sistema de generación eléctrica.	PROMETHEE	---	(M. Alsayed, Cacciato, Scarcella, & Scelba, 2014)
Energía hidroeléctrica, solar, biomasa, eólica y geotérmica.	Evaluar energías renovables para la producción de energía eléctrica.	ANP ⁷	Nacional	(Kabak & Dağdeviren, 2014)
Energía solar, eólica, hidroeléctrica, biomasa y geotérmica.	Evaluar los recursos renovables para seleccionar la mejor alternativa energética.	FAHP Fuzzy TOPSIS	Nacional	(Buyukozka & Guleryuz, 2014)
Solar térmica, fotovoltaica, geotérmica, biomasa, eólica e hidroeléctrica,	Elegir de tecnologías de producción de energía eléctrica.	FAHP PROMETHEE I Y II	---	(Yajure, 2015)
Energía eólica, fotovoltaica y biomasa.	Evaluar opciones de energía eléctrica limpia.	MCDA basado en medidas difusas ⁸	Regional	(Ling Zhang, Zhou, Newton, Fang, & Zhou, 2015)
Energía hidroeléctrica, eólica y geotérmica.	Evaluar opciones para la provisión de energía eléctrica.	Fuzzy TOPSIS	Nacional	(Sengül, Eren, Eslamian Shiraz, Gezder, & Ahmet Bilal, 2015)

⁷ Analytic Network Process.

⁸ Fuzzy measure.

Propuesta metodológica para la aplicación de las energías renovables en el metabolismo urbano de las ciudades

Tecnologías	Objetivos	Método	Escala	Fuente
Energía solar, hidroeléctrica, biomasa y geotérmica.	Seleccionar alternativas de producción de energía eléctrica.	FAHP Fuzzy TOPSIS	Nacional	(Erdogan & Kaya, 2015)
Energía eólica, solar, hidroeléctrica y biomasa.	Evaluar diferentes alternativas de suministro eléctrico reuniendo criterios ambientales, sociales, técnicos y económicos.	APIS ⁹	Nacional	(Shmelev & Van Den Bergh, 2016)
Energía eólica, biomasa, solar, hidroeléctrica.	Evaluar escenarios energéticos.	FAHP Fuzzy TOPSIS	-----	(Afsordegan, Sanchez, Agell, Zahedi, & L.V., 2016)
Energía solar de concentración, solar fotovoltaica, eólica, biomasa y geotérmica.	Priorizar y clasificar tecnologías de energía renovable para la producción de energía eléctrica.	AHP	Nacional	(Al Garni <i>et al.</i> , 2016)

Fuente: Elaboración propia

⁹ APIS – Asociaciones de Producción Integrada.

Tabla 4-3. Métodos multicriterio utilizados para seleccionar tecnologías

Tecnología	Objetivo	MCDA	Escala	Fuente
Eólica terrestre	Elegir las mejores opciones para aprobar solicitudes para la instalación de parques eólicos.	ELECTRE TRI	Regional	(Capros, Mavrotas, & Diakoulaki, 2003)
	Identificar los sitios adecuados para el emplazamiento de parques eólicos en tierra.	AHP	Regional	(Watson & Hudson, 2015)
	Buscar y seleccionar sitios para el emplazamiento de parques terrestres.	ELECTRE-TRI	Regional	(J. M. Sánchez-Lozano, García-Cascales, & Lamata, 2014)
	Evaluar sitios adecuados para invertir en parques eólicos.	ELECTRE III SMAA ¹⁰	Regional	(Atici, Simsek, Ulucan, & Tosun, 2015)
	Evaluar distintas tecnologías de generadores eólicos.	AHP IVIF ¹¹	Regional	(Onar, Oztaysi, Otay, & Kahraman, 2015)
Eólica	Investigar las locaciones más eficientes para emplazar parques eólicos marinos.	AHP	País	(Vagiona & Karanikolas, 2012)

¹⁰ SMAA – Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis.

¹¹ IVIF – Interval Valued Intuitionistic Fuzzy.

Propuesta metodológica para la aplicación de las energías renovables en el metabolismo urbano de las ciudades 90

Tecnología	Objetivo	MCDA	Escala	Fuente
Marina.	Seleccionar y clasificar las zonas factibles para la ubicación de parques eólicos marinos, utilizando diferentes tecnologías.	WASPAS ¹²	Regional	(Bagočius, Zavadskas, & Turskis, 2014)
	Seleccionar una estrategia de mitigación de riesgo para parques eólicos marinos.	FANP ¹³	-----	(Shafiee, 2015)
	Evaluar las mejores locaciones para la implantación de parques eólicos <i>off shore</i> .	FANP FELECTRE FDEMATEL ¹⁴ FELECTRE	Regional	(Fetanat & Khorasaninejad, 2015)
Biogás.	Evaluar el rendimiento de plantas biogás en términos ambientales, económicos y sociales.	ELECTRE TRI	Nacional	(Madlener, Antunes, & Dias, 2009)
	Evaluar escenarios para la provisión de bioenergía con fines térmicos o eléctricos.	PROMETHEE	Local	(Wilkens & Schmuck, 2012)
	Determinar los lugares más adecuados para la localización de las plantas de biogás que utilizan estiércol.	ELECTRE TRI	Regional	(Silva, Alçada-Almeida, & Dias, 2014)

¹² WASPAS – Weighted Aggregates Sum Product Assessment

¹³ FANP – Fuzzy Analytic Network Process.

¹⁴ DEMATEL – Decision Making Trial and Evaluation Laboratory.

Propuesta metodológica para la aplicación de las energías renovables en el metabolismo urbano de las ciudades 91

Tecnología	Objetivo	MCDA	Escala	Fuente
Biomasa.	Buscar y determinar los potenciales lugares para establecer proyectos de producción energética.	AHP	Regional	(Van Dael <i>et al.</i> , 2012)
	Evaluar sistemas de bioenergía que utiliza biomasa lignocelulosa.	AHP	Regional	(Silva <i>et al.</i> , 2014)
	Identificar un conjunto de tecnologías de conversión de biomasa considerando aspectos de sostenibilidad.	Fuzzy Multi-Actor MCDA	Nacional	(Cutz, Haro, Santana, & Johnsson, 2016)
Residuos.	Evaluar las alternativas tecnológicas para la generación eléctrica utilizando desechos sólidos municipales.	HANP ¹⁵	Nacional	(Nixon, Dey, Ghosh, & Davies, 2013)
Plantas de energía solar termoeléctrica.	Determinar la mejor opción para la ubicación de plantas solares térmicas.	TOPSIS FAHP ELECTRE-TRI	Regional	(Sánchez-lozano, García-cascales, & Lamata, 2015)
	Identificar lugares para la implantación de plantas de energía solar térmica.	AHP	Regional	(Wanderer & Herle, 2015)
Energía hidroeléctrica.	Estudiar el potencial para el desarrollo de proyectos hidroeléctricos.	AHP	Regional	(Supriyasilp, Pongput, & Boonyasirikul, 2009)

¹⁵ HANP – Hierarchical Analytical Network Process.

Propuesta metodológica para la aplicación de las energías renovables en el metabolismo urbano de las ciudades 92

Tecnología	Objetivo	MCDA	Escala	Fuente
Fotovoltaica.	Comparar diferentes esquemas para la promoción de pequeños sistemas fotovoltaicos.	AHP PROMETHEE ELECTRE	Nacional	(Theodorou, Florides, & Tassou, 2010)
	Evaluar licencias de proyectos fotovoltaicos.	OWA ¹⁶	Nacional	(Patlitzianas, Skylogiannis, & Papastefanakis, 2013)
	Evaluar la colocación óptima de plantas fotovoltaicas.	AHP TOPSIS	Regional	(Juan M. Sánchez-Lozano, Teruel-Solano, Soto-Elvira, & Socorro García-Cascales, 2013)
	Evaluar la idoneidad de un conjunto de lugares para la colocación de una planta solar fotovoltaica.	AHP	Regional	(Tahri, Hakdaoui, & Maanan, 2015)
Energía de las olas.	Identificar lugares adecuados donde existe cantidad óptima de energía de las olas.	AHP	Nacional	(Ghosh, Chakraborty, Saha, Majumder, & Pal, 2016)

Fuente: Elaboración propia

¹⁶OWA – Ordered Weighted Averaging

Tabla 4-4. Ventajas y desventajas de los MCDA más comunes

Método	Ventaja	Desventaja
MAVT	<ul style="list-style-type: none"> • Simple y amigable. • Puede manejar criterios cuantitativos y cualitativos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitada transparencia del método. • Todos los criterios deben ser reducidos y expresados en la misma unidad. • Puede ser difícil si se tiene muchos criterios y atributos.
MAUT	<ul style="list-style-type: none"> • Permite identificar los temas más importantes al generar y evaluar alternativas. • Es una metodología rigurosa que incorpora preferencias de riesgo e incertidumbre. • Requiere establecer una función de utilidad con las preferencias del tomador de decisión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los atributos tienen que ser mutuamente independientes. • Se requiere funciones de utilidad asociadas a cada atributo. • Se requiere independencia de preferencias entre atributos. • Cálculo complejo.
AHP	<ul style="list-style-type: none"> • Ofrece una axiomatización teórica. • Utilizado para evaluar alternativas energéticas. • Simple, flexible, intuitivo. • El procedimiento para el cálculo es complejo, pero el desarrollo computacional favorece su aplicación. • Se calcula un índice de consistencia, que asegura la coherencia de los juicios planteados. • Puede considerar factores objetivos y subjetivos. • Se puede realizar un análisis de sensibilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Consume mucho tiempo de trabajo si se tienen muchas alternativas o criterios. • Se puede sobreestimar las preferencias por las escalas de evaluación para la determinación de los pesos de los criterios. • Puede requerir información que es difícil de conseguir. • Falta de consistencia entre los juicios emitidos.

Propuesta metodológica para la aplicación de las energías renovables en el metabolismo urbano de las ciudades 94

Método	Ventaja	Desventaja
CP	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizado para evaluar alternativas energéticas. • Técnicas menos subjetivas que los modelos de medición de valor. • Procedimiento sencillo, fácilmente entendido por el tomador de decisiones. • Se puede usar en las primeras fases de planeación para elegir alternativas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta inconvenientes en la asignación de pesos, normalización de variables y determinación de objetivos. • Generalmente no se puede manejar criterios no cuantitativos. • A mayor número de criterios y restricciones mayor esfuerzo computacional. • Los resultados pueden ser de difícil interpretación para el decisor.
TOPSIS	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizado para evaluar alternativas energéticas. • Establece una referencia que permite clasificar las alternativas en soluciones ideales positivas y negativas. • Puede permite identificar rápidamente la mejor alternativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • No considera la importancia de las distancias relativas con la preferencia. • Puede proporcionar información difícil de interpretar. • Se requiere normalización de las variables y la asignación de pesos.
VIKOR	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizado para elegir alternativas energéticas. • Permite tratar criterios con unidades diferentes. • Puede realizarse un análisis de estabilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Depende de la solución ideal. • Si modifican una de las alternativas se puede afectar al resultado.

Propuesta metodológica para la aplicación de las energías renovables en el metabolismo urbano de las ciudades 95

Método	Ventaja	Desventaja
ELECTRE	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizado para evaluar alternativas energéticas. • Permite elegir alternativas que son preferidas para la mayoría de los criterios. • Proporciona una profunda visión en la estructura del problema. • Modela las preferencias del tomador de decisión de manera realista. • Capaz de tratar incertidumbres de diversas maneras. • Permite comparar alternativas donde no hay una clara preferencia. • Tiene una base científica sólida. • Se puede administrar los cambios ya sea en el número de categorías o el peso relativo y la naturaleza de los criterios (cuantitativo / cualitativo). • Permite una comparación directa con todas las ramas de la red. • Permite analizar la elasticidad en el resultado final permitiendo una comparación más detallada entre las alternativas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Podría dejarse a lado alternativas que son favorables para otros criterios. • Hay ocasiones que no puede encontrar la mejor alternativa. • Cálculos complejos resultando como una caja negra. • Presta atención a la preferencia de las alternativas e ignora el nivel de diferencia para determinar el orden de clasificación. • Puede evaluar un criterio, aunque tenga un peso igual a cero. • No toma en cuenta las preferencias de los decisores. • Sujeto a subjetividad en la definición de los umbrales de concordancia y discordancia.

Método	Ventaja	Desventaja
PROMETHEE	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de entender. • Utilizado para evaluar alternativas energéticas. • Proporciona una profunda visión en la estructura del problema. • Modela las preferencias del tomador de decisión de manera realista. • Capaz de tratar incertidumbres de diversas maneras. • Utiliza valores de preferencia positivos y negativos que indican cuando una alternativa es o no preferida frente a las otras. • Tiene una base científica sólida para llegar al índice de preferencia mediante el cálculo de las debilidades y fortalezas de las alternativas. • Es más sencillo, más simple y estable que ELECTRE. • Incluye una función del nivel de preferencia para medir el nivel de diferencia entre las alternativas al momento de clasificarlas. • Toma en cuenta las preferencias subjetivas de los participantes. • Puede manejar muchos criterios y alternativas. • Puede tratar datos inexactos e inciertos, así como el uso de tipo mixto de información. • Al igual que AHP, es fácil de utilizar y de interpretar los resultados, pero tiene mejor desempeño. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene algunas limitaciones en la evaluación elasticidad de los resultados. • Sujeto a subjetividades. • El proceso de cálculo puede ser complicado si no se utilizan herramientas computacionales.

Fuente: (Afsordegan *et al.*, 2016; Løken, 2007; Pohekar & Ramachandran, 2004; J. C. Rojas, 2012; Theodorou *et al.*, 2010)

Mediante las sugerencias señaladas y la revisión de ventajas y desventajas de los métodos, se preparó la Tabla 4-5 para facilitar la elección. Es de aclarar que la elección sigue siendo subjetiva, pero se considera que al seguir un conjunto de sugerencias se da más solidez en la decisión del método a utilizar.

Tabla 4-5. Elección del método MCDA

Sugerencias	MAVT	MAUT	AHP	CP	TOPSIS	VIKOR	ELECTRE	PROMETHEE	Comentario
i)			X		X	X	X	X	Son métodos que se han utilizado en la planificación energética con el fin de evaluar tecnologías o escenarios.
ii)	X	X	X	X	X	X	X	X	Los métodos permiten hacer un <i>ranking</i> de alternativas.
iii)					X	X	X	X	Los métodos no requieren funciones asociadas para cada atributo o se sobreestima las preferencias de los usuarios.
iv)			X			X		X	Con el método se obtiene información útil que permite seleccionar de entre las alternativas propuestas.
v)			X		X	X	X	X	Puede utilizarse con valores cualitativos y cuantitativos.
vi)	X		X					X	El método es transparente y fácil de entender.
vii)	X		X					X	Debe facilitar el desarrollo de una aplicación o debe disponerse un <i>software</i> ampliamente utilizado.

Fuente: Elaboración propia

De lo establecido en la Tabla 4-5 se considera que la mejor opción es el método PROMETHEE, pudiéndose combinar con otros. Este también permite que los criterios que se utilicen sean cuantitativos o cualitativos.

4.2.2.1 Descripción del método PROMETHEE.

El método PROMETHEE fue propuesto en 1982 por Jean-Pierre Brans. Es un método de superación que selecciona u ordena alternativas que tienen criterios que pueden ser conflictivos entre sí y de ámbitos distintos (Mareschal, 2013). Brans propuso las versiones PROMETHEE I y PROMETHEE II; junto a Bertrand Mareschal desarrolló III, IV, V y VI. Las versiones I y II permiten ordenar parcial y totalmente las alternativas; la versión III proporciona un orden de intervalo enfatizando en la indiferencia. La versión IV extiende el análisis a conjuntos continuos de posibles alternativas. PROMETHEE V se propuso como una solución para la selección múltiple bajo restricciones. PROMETHEE VI permite al tomador de decisiones explorar su espacio de libertad mediante la definición de límites superiores e inferiores para los pesos de los criterios. En 1988 proponen el método GAIA que permite la representación gráfica de la metodología PROMETHEE (Brans & Mareschal, 2005).

Si se considera un número de alternativas factibles a_i , que forman parte de un conjunto de alternativas A y un conjunto de criterios $c_j(\cdot)$. El método ayuda a que un tomador de decisiones pueda seleccionar una alternativa que tome en cuenta criterios tecnológicos, económicos, ambientales y sociales (Brans & Mareschal, 2005). El conjunto de alternativas estará sujeto a un conjunto de criterios, formándose la matriz, indicada en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6. Criterios de las diferentes alternativas

a	$c_1(\cdot)$	$c_2(\cdot)$	$c_{k-1}(\cdot)$	$c_k(\cdot)$
a_1	$c_1(a_1)$	$c_2(a_1)$	$c_{k-1}(a_1)$	$c_k(a_1)$
a_2	$c_1(a_2)$	$c_2(a_2)$	$c_{k-1}(a_2)$	$c_k(a_2)$

a	c ₁ (·)	c ₂ (·)	c _{k-1} (·)	c _k (·)
...
...
a _{n-1}	c ₁ (a _{n-1})	c ₂ (a _{n-1})	c _{k-1} (a _{n-1})	c _k (a _{n-1})
a _n	c ₁ (a _n)	c ₂ (a _n)	c _{k-1} (a _n)	c _k (a _n)

Fuente: (Brans & Mareschal, 2005)

Si se consideran dos alternativas a₁ y a₂, se tendrán las siguientes relaciones de dominancia:

$$\begin{cases} \forall_j: c_j(a_1) \geq c_j(a_2) \\ \exists_h: c_h(a_1) > c_h(a_2) \end{cases} \Leftrightarrow a_1 P a_2$$

$$\forall_j: c_j(a_1) = c_j(a_2) \Leftrightarrow a_1 I a_2$$

$$\begin{cases} \exists_h: c_h(a_1) > c_h(a_2) \\ \exists_r: c_r(a_1) < c_r(a_2) \end{cases} \Leftrightarrow a_1 R a_2$$

Ecuación 4-1

Con lo anterior se identifica alternativas preferidas (P), indiferentes (I) o incomparables (R). Siendo las alternativas que no son dominadas, alternativas eficientes. Sin embargo, se requiere información adicional para resolver el problema de decisión. Para el método PROMETHEE, se requiere la siguiente información (Brans & Mareschal, 2005; Mateo, 2012):

- Intercriterios: es la información entre distintos criterios que refleja la importancia relativa a cada uno de ellos.
- Intracriterio: es la información propia de cada criterio. Cada criterio se expresará en una escala específica.

El método puede ser puesto en marcha en 6 pasos (Brans & Mareschal, 2005; Mareschal, 2013; Mateo, 2012). Hasta el paso 5, se tiene el PROMETHEE I (ordenamiento parcial) y al realizarse el paso 6 el PROMETHEE II (ordenamiento completo):

i) Información intercriterios

Se establece un peso ω_j , que reflejan la importancia relativa de cada criterio $c_j(\cdot)$:

$$\sum_{j=1}^k \omega_j = 1$$

Ecuación 4-2

ii) Definición de la función de preferencia

A cada criterio se le debe asignar una función de preferencia que resulta de la desviación entre las evaluaciones de las alternativas para cada criterio en particular. En el método PROMETHEE se usan los denominados criterios generalizados, que consisten en asociar a cada criterio $c_j(\cdot)$ una función de preferencia $P_j(\cdot, \cdot)$:

$$P_j(a_1, a_2) = F_j[d_j(a_1, a_2)] \quad \forall a_1, a_2 \in A$$

Ecuación 4-3

Siendo:

$$d_j(a_1, a_2) = c_j(a_1) - c_j(a_2)$$

Ecuación 4-4

y

$$0 \leq P_j(a_1, a_2) \leq 1$$

Ecuación 4-5

A $\{c_j(\cdot), P_j(\cdot, \cdot)\}$, se le denomina criterio generalizado asociado al criterio $c_j(\cdot)$. $P_j(\cdot, \cdot)$, permite trasladar las desviaciones en escala de un criterio especificado en grados de preferencia independientes de la escala. El decisor establece las funciones de preferencia según la naturaleza del criterio: usual, cuasicriterio, lineal, nivel, lineal o gaussiana.

iii) Cálculo del índice de preferencia

Si se tienen dos alternativas a_1 y a_2 , el índice de preferencia multicriterio $\pi(a_1, a_2)$, expresa el grado de preferencia total de a_1 sobre a_2 y se obtiene:

$$\pi(a_1, a_2) = \sum_{j=1}^k P_j(a_1, a_2) \omega_j$$

Ecuación 4-6

Y se cumple que:

$$\begin{cases} \pi(a_1, a_1) = 0 \\ 0 \leq \pi(a_1, a_2) \leq 1 \\ 0 \leq \pi(a_2, a_1) \leq 1 \\ 0 \leq \pi(a_1, a_2) + \pi(a_2, a_1) \leq 1 \end{cases}$$

Ecuación 4-7

$\pi(a_1, a_2) \sim 0$, implica una preferencia global débil de a sobre b

$\pi(a_1, a_2) \sim 1$, implica una preferencia global fuerte de a sobre b

iv) Construcción de flujos de superación

Se definen los flujos positivos o negativos de forma que:

- El flujo positivo para el nodo a_1 , indica con qué intensidad la alternativa a es preferida a las alternativas restantes (n-1):

$$\phi^+(a_1) = \frac{1}{n-1} \sum_{a_2 \neq a_1} \pi(a_1, a_2)$$

Ecuación 4-8

- El flujo negativo para el nodo a_1 , indica con qué intensidad las otras (n-1) alternativas son preferidas a la alternativa a_1 :

$$\phi^-(a_1) = \frac{1}{n-1} \sum_{a_2 \neq a_1} \pi(a_2, a_1)$$

Ecuación 4-9

Con esto, una alternativa será mayor a otra mientras mayor sea su flujo positivo y menor sea su flujo negativo.

v) Ordenamiento parcial

A partir de estos flujos se define un preorden parcial que permite identificar la preferencia P^I , la indiferencia I^I y la incompatibilidad R^I (Brans & Mareschal, 2005):

$$a_1 P^I a_2 \Leftrightarrow \begin{cases} \phi^+(a_1) > \phi^+(a_2) \text{ si } \phi^-(a_1) < \phi^-(a_2), \text{ o} \\ \phi^+(a_1) = \phi^+(a_2) \text{ si } \phi^-(a_1) < \phi^-(a_2), \text{ o} \\ \phi^+(a_1) > \phi^+(a_2) \text{ si } \phi^-(a_1) = \phi^-(a_2) \end{cases}$$

$$a_1 I^I a_2 \Leftrightarrow \emptyset^+(a_1) = \emptyset^+(a_2) \text{ si } \emptyset^-(a_1) = \emptyset^-(a_2)$$

$$a_1 R^I a_2 \Leftrightarrow \begin{cases} \emptyset^+(a_1) > \emptyset^+(a_2) \text{ si } \emptyset^-(a_1) > \emptyset^-(a_2), \text{ o} \\ \emptyset^+(a_1) < \emptyset^+(a_2) \text{ si } \emptyset^-(a_1) < \emptyset^-(a_2) \end{cases}$$

Ecuación 4-10

También puede darse el caso que algunas alternativas sean incomparables: si a_1 es una alternativa buena para un conjunto de criterios para los que a_2 es débil, mientras que para otros criterios a_2 es buena y a_1 es débil. En este caso se obtiene un ordenamiento parcial, que puede ponerse en consideración al decisor para que determine la opción adecuada.

vi) Ordenamiento total

Mediante este método se busca un ordenamiento completo sin considerar las situaciones incomparables. Para ello se determinan los flujos de superación netos para cada alternativa:

$$\emptyset(a) = \emptyset^+(a) - \emptyset^-(a)$$

Ecuación 4-11

Mientras mayor sea el flujo neto, mejor será la alternativa. El ordenamiento completo entonces está dado por:

$$\begin{cases} a_1 P^{II} a_2 \Leftrightarrow \emptyset(a_1) > \emptyset(a_2) \\ a_1 I^{II} a_2 \Leftrightarrow \emptyset(a_1) = \emptyset(a_2) \end{cases}$$

Ecuación 4-12

En este caso todas las alternativas son comparables pues estas han sido completamente ordenadas. Se cumplen las siguientes propiedades:

$$\begin{cases} -1 \leq \emptyset(a) \leq 1 \\ \sum \emptyset(a) = 0 \end{cases}$$

Ecuación 4-13

El plano GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid)

La versión PROMETHEE GAIA permite obtener una representación gráfica del comportamiento de las alternativas frente a los criterios y los pesos (Brans & Mareschal, 2005; Mareschal, 2013). Considerando la Ecuación 4-8, la Ecuación 4-9, y la Ecuación 4-11 y Ecuación 4-12:

$$\emptyset(a) = \emptyset^+(a) - \emptyset^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{a_2 \neq a_1} \pi(a_1, a_2) - \frac{1}{n-1} \sum_{a_2 \neq a_1} \pi(a_2, a_1)$$

Ecuación 4-14

o

$$\emptyset(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{a_2 \neq a_1} [\pi(a_1, a_2) - \pi(a_2, a_1)]$$

Ecuación 4-15

Luego con la Ecuación 4-6:

$$\emptyset(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{a_2 \neq a_1} \left[\sum_{j=1}^k P_j(a_1, a_2) \omega_j - \sum_{j=1}^k P_j(a_2, a_1) \omega_j \right]$$

Ecuación 4-16

o

$$\phi(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^k \sum_{a_2 \neq a_1} [P_j(a_1, a_2) - P_j(a_2, a_1)] \omega_j$$

Ecuación 4-17

Entonces se define el flujo unicriterio:

$$\phi_j(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{a_2 \neq a_1} [P_j(a_1, a_2) - P_j(a_2, a_1)]$$

Ecuación 4-18

Donde $\phi_j(a)$, es el flujo neto unicriterio obtenido cuando únicamente un criterio $\phi_j(\cdot)$, es considerado. Esto permite representar el perfil de una alternativa en función de los distintos criterios utilizados.

Y los flujos de superación se representan según la Ecuación 4-19 (Brans & Mareschal, 2005; Mareschal, 2013):

$$\phi(a) = \sum_{j=1}^k \phi_j(a) \omega_j$$

Ecuación 4-19

En la Tabla 4-7 se presentan una matriz de los unicriterios establecidos en la Ecuación 4-19. Esta matriz no depende de los pesos de los criterios (Brans & Mareschal, 2005; Mareschal, 2013).

Tabla 4-7. Flujos netos de los unicriterios

a	$\phi_1(\cdot)$	$\phi_2(\cdot)$	$\phi_{k-1}(\cdot)$	$\phi_k(\cdot)$
a ₁	$\phi_1(a_1)$	$\phi_2(a_1)$	$\phi_{k-1}(a_1)$	$\phi_k(a_1)$
a ₂	$\phi_1(a_2)$	$\phi_2(a_2)$	$\phi_{k-1}(a_2)$	$\phi_k(a_2)$
...
...
a _{n-1}	$\phi_1(a_{n-1})$	$\phi_2(a_{n-1})$	$\phi_{k-1}(a_{n-1})$	$\phi_k(a_{n-1})$
a _n	$\phi_1(a_n)$	$\phi_2(a_n)$	$\phi_{k-1}(a_n)$	$\phi_k(a_n)$

Fuente: Brans, Y. De Smet (2005); Mareschal (2013)

Las n alternativas pueden ser representadas en un espacio k dimensional, que puede ser proyectada en un plano \mathbb{R}^k (Brans & Mareschal, 2005; Mareschal, 2013). En el plano es posible proyectar tanto las alternativas, como vectores unitarios de los ejes de coordenadas que representan a los criterios. Las posiciones tanto de criterios como de alternativas son independientes de los pesos.

En este plano se conserva la mayor cantidad de información cuando se efectúa la proyección. Se define la calidad de la información con un porcentaje δ , que indica la cantidad de información que se conserva en el plano GAIA. Se acepta que para valores de δ mayores a 80 % e incluso de 60 % la información confiable.

Las proyecciones en el plano GAIA ofrecen información referente que puede ser interpretada de la siguiente manera (Brans & Mareschal, 2005; Mareschal, 2013):

- La longitud de los ejes de un criterio indica una medida del poder discriminación de los criterios frente a las alternativas.

- Los criterios que tienen similares preferencias son representados en ejes orientados en aproximadamente la misma dirección.
- Criterios que expresan, preferencias conflictivas se orientan en direcciones opuestas.
- Criterios que cuyas preferencias no están relacionadas se representan por ejes ortogonales.
- Alternativas similares se representan por puntos que están muy cerca los unos de otros.
- Alternativas que son buenas para un criterio en particular son representadas por puntos localizados en la dirección del eje del criterio.

Los pesos se representan en el plano GAIA, utilizando un vector k dimensional. De la Ecuación 4-19 el flujo neto de una alternativa es el producto escalar de los siguientes vectores:

$$\begin{cases} \mathbf{a}_i: (\phi_1(\mathbf{a}_i), \phi_2(\mathbf{a}_i), \dots, \phi_j(\mathbf{a}_i), \dots, \phi_k(\mathbf{a}_i)) \\ \boldsymbol{\omega}: (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_j, \dots, \omega_k) \end{cases}$$

Ecuación 4-20

Entonces el flujo neto de la alternativa a_i , es la proyección del vector de este \mathbf{a}_i , sobre $\boldsymbol{\omega}$ en el plano k dimensional. Así mismo, las proyecciones de los n vectores \mathbf{a}_i , sobre $\boldsymbol{\omega}$ ofrecen el ordenamiento PROMETHEE II. El vector $\boldsymbol{\omega}$, es un eje de decisión y se representa en el plano GAIA por la proyección del vector unitario de los pesos. A la proyección se la llama «decisión PROMETHEE» y se la denomina $\boldsymbol{\pi}$.

Si los pesos están concentrados en un criterio, el eje de decisión PROMETHEE coincide con el eje de este criterio en el plano de GAIA. La longitud del vector $\boldsymbol{\pi}$ da información referente a:

- Si es largo, se tiene un fuerte poder de decisión y las alternativas alejadas del origen y que están en su dirección pueden ser las soluciones que requiere el decisor.
- Si es corto, se tiene un débil poder de decisión y los criterios son fuertemente conflictivos de acuerdo con sus pesos. Una solución adecuada será la que se encuentre próxima a los ejes.

Si se modifican los pesos, el eje de decisión también lo hace. El vector de pesos aparece como un “*bastón de decisión*”, que según la preferencia de un criterio en particular puede moverse. Esto es útil al hacer realizar un análisis de sensibilidad. Es aconsejable variar los pesos para establecer escenarios, pues esto favorece al proceso de decisión (Brans & Mareschal, 2005).

Las versiones PROMETHEE I, PROMETHEE II y PROMETHEE GAIA ayudan al decisor a tomar la decisión para seleccionar una alternativa ofreciendo una visión de las relaciones de superación. El *software* PROMETHEE GAIA permite realizar el proceso de decisión, asegurando la aplicación correcta del método, así como la visualización gráfica de los resultados. Este *software* ha sido referenciado en más de 1700 (febrero de 2017) artículos científicos, por lo que se considera fiable para los objetivos perseguidos (<http://www.PROMETHEE-gaia.net/>).

4.2.3 Identificación de alternativas.

En la práctica el uso masivo de las once tecnologías definidas como aplicables en la ciudad, bajo el marco del metabolismo urbano, tiene limitaciones. Por lo general en las ciudades se desconoce el recurso renovable que se dispone, tampoco se tiene una infraestructura sólida destinada a la promoción de estas tecnologías. Además, el interés de las autoridades locales, así como la aceptación de la comunidad repercutirá en que se extienda su uso. Otro inconveniente es el coste de las nuevas tecnologías, pues requieren en muchos casos incentivos acompañados de regulaciones, así como de políticas y objetivos claros para la instalación y sostenimiento de un nuevo modelo energético (Barragán & Espinoza, 2015).

Dadas estas limitaciones, y si los gobiernos locales promueven el aprovechamiento de recursos que dispone la urbe, es indispensable analizar qué opción tecnológica es más adecuada. En este sentido, se requiere conocer los portadores energéticos que utiliza la ciudad, así como la demanda y usos finales energéticos. Los portadores energéticos a los que se puede sustituir son la electricidad o combustibles, mientras que los usos pueden ser eléctricos térmicos o transporte. La energía proveniente de los recursos renovables puede aportar directamente al portador o puede sustituirlo si la tecnología permite su aplicación directa.

En la Figura 4-3 se esquematiza el nuevo modelo energético frente al modelo vigente.

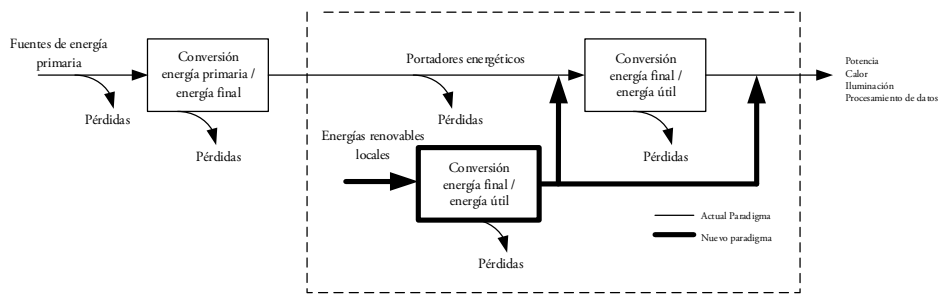


Figura 4-3. Modelo energético actual y propuesto

Fuente: Elaboración propia, basado en Haberl (2001b)

De lo especificado en el Capítulo 3, las alternativas a evaluarse son:

Bioetanol (a₁): los residuos urbanos lignocelulosos contribuyen directamente al portador energético, en este caso sirven como sustituto o mezcla de gasolina (una mezcla de hasta 15 % de bioetanol).

Biomasa (a₂): la biomasa como materia prima puede aportar energía a la red eléctrica o como materia prima destinada a usos térmicos, reduciendo el consumo de combustibles o de electricidad.

Biogás (a₃): el metano que se obtiene puede contribuir a las redes de suministro de gas natural o la producción de electricidad, mientras que el calor producido puede servir para aplicaciones térmicas.

Biogás de vertedero controlado (a₄): el contenido de CH₄ del biogás también puede ser separado en otros componentes para ser utilizado como suplemento del gas natural o como combustible para vehículos o para la producción de electricidad.

Incineración (a₅): la contribución en este caso puede ser a la red eléctrica, o el calor producto de la combustión puede ser utilizado para usos térmicos.

Energía mareomotriz (a₆): en este caso el uso de esta tecnología disminuirá los flujos de energía eléctrica a la ciudad.

Energía eólica (a₇): con el empleo de esta tecnología disminuiría el consumo proveniente de la red eléctrica.

Energía geotérmica (a₈): puede disminuir los flujos de energía eléctrica o combustibles, dependiendo de qué tipo de energía sea utilizada con fines térmicos.

Energía hidroeléctrica (a₉): la producción de energía aporta directamente a la red eléctrica.

Energía solar fotovoltaica (a₁₀): la energía que puede suministrar un sistema fotovoltaico disminuiría la importación de electricidad.

Energía solar térmica (a₁₁): el uso de estos dispositivos puede disminuir los flujos de energía eléctrica o combustibles, dependiendo de qué tipo de energía sea utilizada con fines térmicos.

En la Figura 4-4 se muestran las diferentes tecnologías, sus aplicaciones finales y los portadores a los que podrían contribuir.

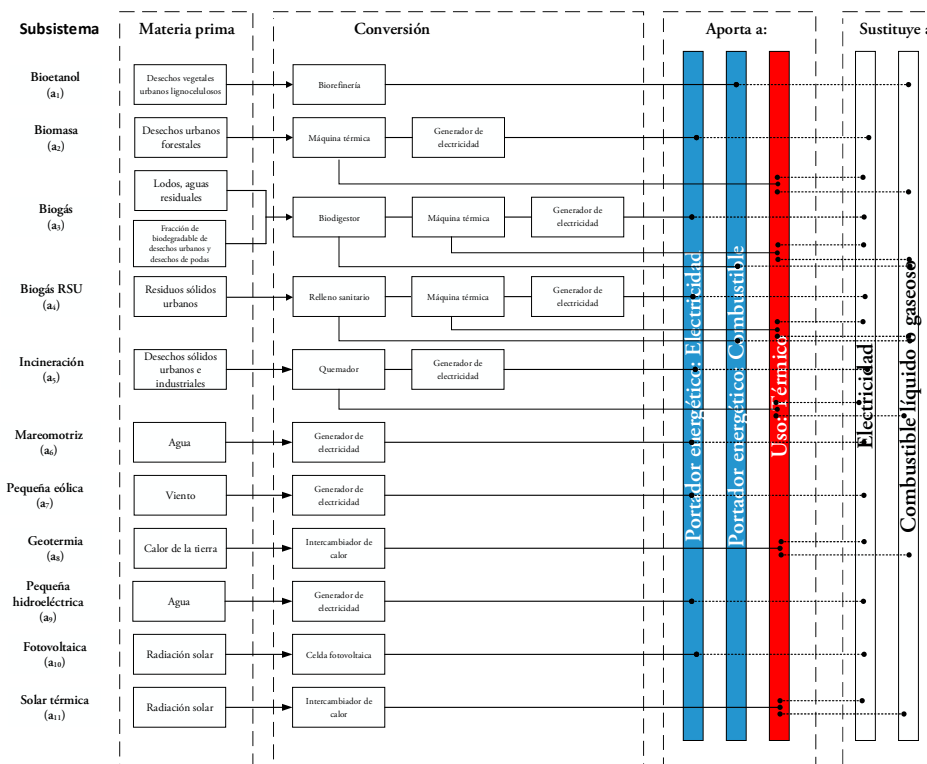


Figura 4-4. Usos de las energías renovables en la ciudad

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.1 Alternativas tecnológicas para una ciudad.

Dada la variedad de usos energéticos de las tecnologías, previo a seleccionarlas, se hace una clasificación en función de los sustitutos o usos que pueden reemplazar. De esta manera, se utilizan las herramientas multicriterio según como se indica en la Figura 4-5.

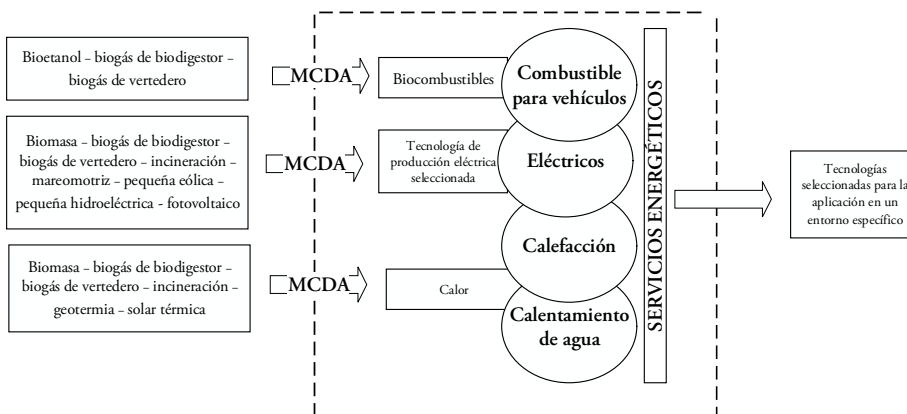


Figura 4-5. Aplicación del método multicriterio para diferentes usos energéticos

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Selección de criterios.

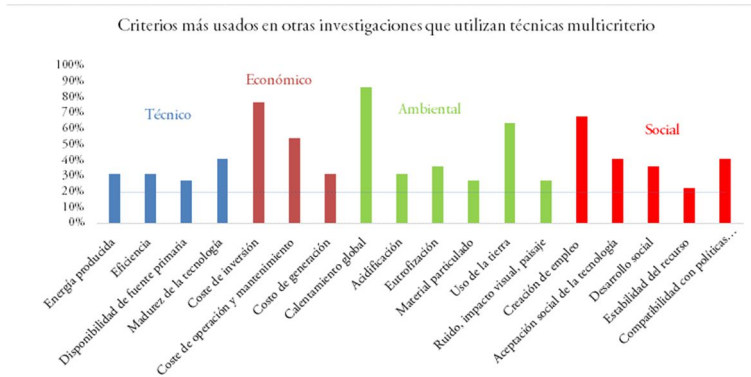
La elección de los criterios es fundamental pues en función de estos, el decisor hace la evaluación de las alternativas. Los criterios dependen de la naturaleza del problema e intentan que la evaluación sea holística, por ello se suelen dividir en técnicos, económicos, ambientales y sociales.

En la Tabla 4-8, se indican los criterios y subcriterios que se incluyen en los artículos revisados. Además, en la Tabla 4-9 se presentan subcriterios extraídos de una revisión de artículos que analizan individualmente las tecnologías discutidas previamente.

SUBCRITERIO		(J. C. Rojas, 2012)	(Yajure, 2015)	(Topcu & Ullengin, 2004)	(Shmelev & Van Den Bergh, 2016)	(Terrados <i>et al.</i> , 2009)	(Burton & Hubacek, 2007)	(Browne <i>et al.</i> , 2010)	(M. Alsayed <i>et al.</i> , 2014)	(Roth <i>et al.</i> , 2009)	(Ghaighazi <i>et al.</i> , 2010)	(Nigim <i>et al.</i> , 2004)	(Ling Zhang <i>et al.</i> , 2015)	(Doukas <i>et al.</i> , 2010)	(Yazdani-Chamzini <i>et al.</i> , 2013)	(Sengül <i>et al.</i> , 2015)	(Kabak & Dağdeviren, 2014)	(Erdogan & Kaya, 2015)	(Alsordegan <i>et al.</i> , 2016)	(Buyukozka & Guleryuz, 2014)	(Al Gami <i>et al.</i> , 2016)	(Georgopoulou <i>et al.</i> , 1997)	(Beccali <i>et al.</i> , 2003)
ECONÓMICO	Coste de inversión		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Coste anual neto	X																					
	Coste de operación y mantenimiento	X				X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Costo de la energía		X	X	X		X	X							X							X	
	Ingresos por venta de energía						X																
	Producto interno bruto							X															
	Utilidad de las empresas energéticas							X									X	X		X			
	Tiempo de retorno de la inversión																						
	Valor de las emisiones de CO ₂														X								
AMBIENTAL	Calentamiento global	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X
	Acidificación	X				X	X	X										X		X			X
	Eutrofización	X				X	X	X										X	X	X			X
	Material particulado									X	X							X		X		X	X

SUBCRITERIO	(J. C. Rojas, 2012)	(Yajure, 2015)	(Topcu & Ullengin, 2004)	(Shmelev & Van Den Bergh, 2016)	(Terrados <i>et al.</i> , 2009)	(Burton & Hubacek, 2007)	(Browne <i>et al.</i> , 2010)	(M. Alsayed <i>et al.</i> , 2014)	(Roth <i>et al.</i> , 2009)	(Chatghazi <i>et al.</i> , 2010)	(Nigim <i>et al.</i> , 2004)	(Ling Zhang <i>et al.</i> , 2015)	(Doukas <i>et al.</i> , 2010)	(Yazdani-Chamzini <i>et al.</i> , 2013)	(Sengül <i>et al.</i> , 2015)	(Kabak & Dağdeviren, 2014)	(Erdogan & Kaya, 2015)	(Alsordegan <i>et al.</i> , 2016)	(Buyukozka & Guleryuz, 2014)	(Al Gami <i>et al.</i> , 2016)	(Georgopoulou <i>et al.</i> , 1997)	(Beccali <i>et al.</i> , 2003)	
Salud								X														X	
Incremento del tráfico										X													
Diversidad cultural, racial y de género											X												
Desarrollo de la industria																X	X						X
Estabilidad del recurso		X								X						X	X			X	X		
Compatibilidad con políticas regionales, nacionales o internacionales				X		X	X	X	X	X	X				X	X	X		X	X	X	X	
Estabilidad política y legitimidad								X	X														

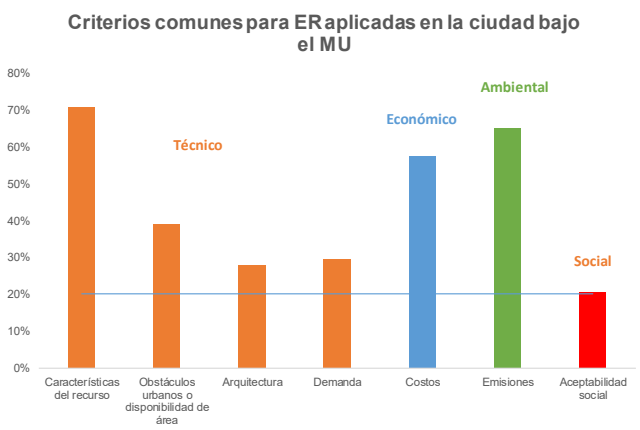
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 4-1. Criterios utilizados en investigaciones que utilizan técnicas multicriterio

Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 4-1 se muestran los subcriterios más utilizados de los estudios descritos en la Tabla 4-8. Puesto que el interés son las tecnologías que se pueden utilizar en la ciudad, la revisión de los artículos de la Tabla 4-9 permitió identificar otros subcriterios que pueden ser decisivos para la implantación en las urbes (Ver Gráfica 4-2).



Gráfica 4-2. Criterios para las ER aplicables en la ciudad

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-9. Criterios identificados para el uso de las energías renovables en la ciudad

Subsistema	Dimensión									Referencia		
	T					E		A	S			
	I	II	III	IV	V	I	II	I	I		II	III
Bioetanol	X											(Raud, Kesperi, Oja, Olt, & Kikas, 2014)
	X					X		X				(Avelino Gonçalves <i>et al.</i> , 2015)
	X	X				X						(Jacquet <i>et al.</i> , 2015)
	X	X				X		X				(Martínez <i>et al.</i> , 2014)
Biomasa (eléctrico)	X			X								(Roberts <i>et al.</i> , 2015)
	X					X		X				(Kraxner <i>et al.</i> , 2016)
	X				X			X				(Panepinto, Viggiano, & Genon, 2014)
Biomasa (térmico)	X							X				(McHugh <i>et al.</i> , 2015)
	X											(Roberts <i>et al.</i> , 2015)
	X					X		X				(Kraxner <i>et al.</i> , 2016)
	X			X				X				(Panepinto <i>et al.</i> , 2014)
	X					X X		X				(Salomon & Silva Lora, 2009)
Biogás	X							X				(Song <i>et al.</i> , 2016)
	X					X		X				(Zubizarreta <i>et al.</i> , 2010)
	X					X		X				(Berkday & Nas, 2008)
	X		X			X X		X	X X			(Willis <i>et al.</i> , 2012)
Biogás RSU vertedero	X			X		X X		X	X X			(Shen <i>et al.</i> , 2015)
	X	X	X			X		X				(Arodudu <i>et al.</i> , 2014)
	X			X	X	X		X				(de Souza <i>et al.</i> , 2014)
	X											(Raheem <i>et al.</i> , 2016)
	X					X		X				(Tan <i>et al.</i> , 2014)
	X				X	X		X				(de Souza <i>et al.</i> , 2014)
	X							X				(Harish K. Jeswani, Smith, & Azapagic, 2013)
Incineración y coincineración	X							X				(Zubizarreta <i>et al.</i> , 2010)
	X							X	X			(Song <i>et al.</i> , 2016)
	X				X	X		X				(de Souza <i>et al.</i> , 2014)
	X		X					X				(Harish K. Jeswani <i>et al.</i> , 2013)
Mareomotriz	X											(Tan <i>et al.</i> , 2014)
	X							X				(Zubizarreta <i>et al.</i> , 2010)
		X		X				X				(Leite Neto <i>et al.</i> , 2015)
		X				X		X	X	X		(Burrows <i>et al.</i> , 2009)
		X				X		X	X			(Radtke <i>et al.</i> , 2011)
	X	X			X X		X	X	X		(Radtke <i>et al.</i> , 2011)	

Subsistema	Dimensión									Referencia		
	T					E		A	S			
	I	II	III	IV	V	I	II	I	I		II	III
Eólica terrestre		X	X									(Millward-Hopkins <i>et al.</i> , 2013)
		X	X		X		X					(Karthikeya <i>et al.</i> , 2016)
		X	X	X			X			X		(Ishugah <i>et al.</i> , 2014)
			X	X							X	(Toja-Silva <i>et al.</i> , 2013)
Eólica			X	X	X		X			X		(Grieser, Sunak, & Madlener, 2015)
			X	X	X		X			X		(Schiel <i>et al.</i> , 2016)
		X	X	X		X		X				(Yi Zhang <i>et al.</i> , 2015)
		X	X		X		X		X			(Aste <i>et al.</i> , 2013)
Geotérmico		X		X								(Arola <i>et al.</i> , 2014)
		X		X								(Xu <i>et al.</i> , 2015)
		X		X								(Fujiia <i>et al.</i> , 2015)
Pequeña hidráulica			X			X		X				(Kilama, 2013)
				X		X		X		X	X	(Fujiia <i>et al.</i> , 2015)
			X			X	X	X		X		(Kilama, 2013)
Fotovoltaico		X			X	X						(Izquierdo <i>et al.</i> , 2011)
		X	X		X	X						(Massimo <i>et al.</i> , 2014)
		X	X		X	X						(Cumó <i>et al.</i> , 2012)
Solar térmico		X	X	X	X							(Kabir, Endlicher, & Jagermeyr, 2010)
				X	X	X			X			(Han <i>et al.</i> , 2010)
				X	X	X			X			(Izquierdo <i>et al.</i> , 2011)
		X			X	X	X					(Rosas-Flores <i>et al.</i> , 2016)
				X	X	X		X				(Han <i>et al.</i> , 2010)
				X	X	X			X	X		(Benli, 2016)

- | | | | |
|---|----------------|----------------|---------------------------|
| (T) Técnico: | (E) Económico: | (A) Ambiental: | (S) Social: |
| I. Característica del recurso | I. Costos | I. Emisiones | II. Personal calificado |
| II. Obstáculos urbanos o disponibilidad de área | II. Incentivos | | III. Aceptabilidad social |
| III. Arquitectura | | | IV. Creación de empleo |
| IV. Estado de Desarrollo | | | |
| V. Demanda | | | |

Fuente: Elaboración propia

4.2.4.1 Descripción de los criterios utilizados.

De la literatura analizada se evidencia que el uso de herramientas multicriterio para la elección de tecnologías o escenarios energéticos se aplica a escala nacional o regional y marginalmente se consideran para establecer alternativas tecnológicas en

las ciudades. Por tanto, la elección de los subcriterios que se utilizaron en otros estudios no son precisamente los mismos que podrían utilizarse para este. Se asumen las siguientes consideraciones para definir los criterios a utilizarse en este trabajo:

- Subcriterios que no son influyentes cuando se comparan energías renovables, no son considerados (Al Garni *et al.*, 2016).
- Se descartan subcriterios que son utilizados por menos 20 % de estudios analizados (Al Garni *et al.*, 2016).
- Los subcriterios pueden ser medidos en forma cualitativa y cuantitativa. Las escalas cualitativas se usan en aquellos casos que es dificultoso identificar los atributos de los subcriterios (Georgopoulou *et al.*, 1997).
- Los subcriterios se eligen en función de la frecuencia de su uso en la literatura, intentando dar un balance entre las distintas dimensiones que involucran el análisis (Shmelev & Van Den Bergh, 2016).
- Los subcriterios se eligen en función de la información que se disponga (Shmelev & Van Den Bergh, 2016).
- Se limita el número de subcriterios, pues una cantidad extensa de ellos diluye sus pesos e incrementa la dificultad en la aplicación del método (J. C. Rojas, 2012).
- Se eligen subcriterios que son comunes entre la Tabla 4-8 y la Tabla 4-9.

Los subcriterios cuantitativos se relacionan a las características de las tecnologías y se los obtiene de fuentes bibliográficas. Puesto que las ciudades no disponen de información referente a otras características que influyen en la instalación de las ER, se ha optado por valorar estas características en forma cuantitativa. En vista de que hay subcriterios que son más adecuados cuando tienen una valoración mayor, mientras que hay otros que son más adecuados si tienen una valoración menor, los subcriterios pueden ser maximizados o minimizados. En la Tabla 4-10 se indican los subcriterios identificados y en la siguiente sección se los describe con detalle.

Tabla 4-10. Subcriterios para la elección de tecnologías

Criterio	Subcriterio	Tipo	Min/Max	
Técnico	C1 Eficiencia	%	Cuantitativo	Max
	C2 Disponibilidad de fuente primaria		Cualitativo	Max
	C3 Madurez de la tecnología		Cualitativo	Max
	C4 Obstáculos urbanos y disponibilidad de área		Cualitativo	Max

Criterio	Subcriterio	Tipo	Min/Max
Económico	C ₅ Integración arquitectónica	Cualitativo	Min
	C ₆ Inversión inicial	USD/kW	Cuantitativo
	C ₇ Costo de operación y mantenimiento	USD/kW	Cuantitativo
	C ₈ Costo de energía	USD/kWh	Cuantitativo
Ambiental	C ₉ Calentamiento global	CO ₂ (kg/TJ)	Cuantitativo
	C ₁₀ Acidificación	SO ₂ (kg/TJ)	Cuantitativo
	C ₁₁ Eutrofización	NO _x (kg/TJ)	Cuantitativo
Sociopolítico	C ₁₂ Empleo	empleos año/GWh	Cuantitativo
	C ₁₃ Aceptabilidad social		Cualitativo
	C ₁₄ Compatibilidad con las políticas internacionales, regionales o locales		Cualitativo

Fuente: Elaboración propia

Dimensión técnica

Estos subcriterios están relacionados con las características de las tecnologías y su posibilidad de instalación como energías distribuidas. La eficiencia es una característica que permite valorar la capacidad de la tecnología de aprovechar el recurso renovable existente, y es el único subcriterio en esta dimensión valorado como cuantitativo. En el caso de la madurez, se ha optado por valorar en forma cualitativa a partir de lo especificado en la bibliografía. En este caso se ha supuesto que el espacio requerido y la posibilidad de integrarse en el entorno urbano son características que pueden influenciar al momento de seleccionar una u otra alternativa. La disponibilidad del recurso es otro factor que influye al momento de la selección. Estos tres subcriterios son valorados a partir de consulta a expertos locales que conozcan la situación energética.

Eficiencia (C₁): se refiere al coeficiente entre la energía de salida y la energía contenida en la fuente primaria. Indica, por tanto, cuanta energía puede obtenerse luego de la conversión energética. Se identificaron estudios que utilizan como indicador la eficiencia en porcentaje (Al Garni *et al.*, 2016; J. C. Rojas, 2012; Yajure, 2015), otros estudios valoran la eficiencia del sistema en unidades de energía (Sengül *et al.*, 2015). Este subcriterio también puede ser considerado como cualitativo (Afsordegan *et al.*, 2016; Buyukozka & Guleryuz, 2014; Erdogan & Kaya, 2015). Para esta investigación, se considera de tipo cuantitativo y se lo maximiza pues a mayor eficiencia se tiene mayor energía disponible.

Disponibilidad de fuente primaria (C₂): este subcriterio indica si está disponible la energía primaria para el uso de una determinada tecnología. Puede ser valorado en forma cuantitativa (Al Garni *et al.*, 2016; J. C. Rojas, 2012; Roth *et al.*, 2009), o cualitativa (Ghafghazi *et al.*, 2010; Kabak & Dağdeviren, 2014; Nigim *et al.*, 2004). Cada emplazamiento urbano tiene sus particulares condiciones, en función de su geografía, ubicación o clima, por ello se requiere un análisis específico para cada caso. La valoración del potencial energético también es un inconveniente por cuanto las ciudades por lo general carecen de estudios que permitan definir sus recursos energéticos. Por ello, el subcriterio utilizado para este trabajo es del tipo cualitativo. A mayor disponibilidad del recurso la preferencia es mayor, por lo que este se lo maximiza.

Obstáculos urbanos y disponibilidad de área (C₃): una de las condicionantes para la implementación de las tecnologías en los límites de la ciudad, es el espacio requerido para su instalación. En las áreas urbanas en donde la disponibilidad del espacio es limitada; Sarralde y colaboradores (2011) clasifican las tecnologías según su potencial difuso o concreto, siendo las primeras aquellas, que para su instalación no requieren espacios que podrían ser utilizados para otro propósito y no necesitan flujos de materiales adicionales para su operación. Las tecnologías renovables concretas, por otro lado, utilizan espacios urbanos extras y/o producen flujos de materiales. La densidad urbana desempeña un papel importante para la colocación de las tecnologías: a mayor densidad menor espacio para la colocación de algunas infraestructuras con potencial concreto (biomasa o incineración), sin embargo, para las tecnologías solares integradas en edificios (fotovoltaica), la concentración de superficies homogéneas de tejados, puede ser favorables para su instalación (Sarralde *et al.*, 2011). La colocación de sistemas solares en techos puede estar condicionada por la existencia de chimeneas, ductos, ventanas, escaleras. Generadores que aprovechan el biogás de vertedero, de plantas de aguas residuales, son instalaciones industriales que suelen ubicarse fuera de espacios residenciales. Asimismo, plantas de incineración, biomasa o biorefinerías pueden ser instaladas en áreas industriales. Debido a la falta de información para la valoración de este subcriterio se lo considera como cuantitativo. Cuanto más adecuado de instrumentar la preferencia es mayor, por lo que este se lo maximiza.

Integración arquitectónica (C₄): la intromisión de infraestructuras de generación de energía dentro del espacio urbano puede modificar el aspecto de la urbe. Este subcriterio dependerá de aspectos que son propios de la ciudad. Tecnologías poco

invasivas como la solar, al momento que se masifiquen pueden causar impacto visual y en edificaciones de valor arquitectónico su instalación podría ser restrictiva. La integración de las energías renovables y la arquitectura es esencial, así como su adecuada consideración en el diseño urbano, lo cual requiere una legislación coherente, que normalmente no existe en la mayoría de los centros urbanos. Este subcriterio se lo considera cualitativo. A mayor intromisión arquitectónica disminuye la preferencia por lo que se lo minimiza.

Madurez de la tecnología (C₅): este subcriterio indica el grado de madurez de la tecnología, siendo el nivel comercial (C) el que considera que está listo para utilizarse. Mientras que si se encuentran a nivel de investigación y desarrollo (I+D), están siendo probadas en laboratorio. Las que se encuentran en etapa demostrativa (D) se tienen plantas piloto y no hay un horizonte definido para su aplicación. Las investigaciones revisadas proponen que este subcriterio se valore de manera cualitativa (Al Garni *et al.*, 2016; Beccali *et al.*, 2003; Erdogan & Kaya, 2015; Georgopoulou *et al.*, 1997; Ghafghazi *et al.*, 2010; Kabak & Dağdeviren, 2014; Nigim *et al.*, 2004; Terrados *et al.*, 2009; Ling Zhang *et al.*, 2015). Se propone una escala cualitativa en la cual el 3 indica madurez comercial, 2 desarrollo, 1 investigación y desarrollo. La tecnología es viable de implementar mientras la escala es más alta.

Dimensión económica

Esta dimensión posibilita que en la selección se incluyan los valores monetarios asociados a la provisión, operación y mantenimiento de los sistemas energéticos, así como el costo de la producción de energía. Todos los subcriterios considerados son cuantitativos y se los extrae de reportes de instituciones internacionales, así como de investigaciones. Estos costos podrían verse afectados al momento de trasladarlos a los costos en una localidad, pues pueden verse influenciados por impuestos o por mecanismos de promoción. Al valorar solo tecnologías, este criterio puede ser insuficiente pues hay tecnologías como la fotovoltaica o solar térmica que podrían expandirse a lo largo de la ciudad y exigir mayor inversión, mientras que la implantación de la hidroeléctrica, mareomotriz, biomasa o biogás estaría condicionada a una o muy pocas plantas, por lo que podría requerirse menor inversión total. Otra consideración es que a medida que las tecnologías maduran y se expande su uso, los costos disminuyen (IRENA, 2016a).

Costo de inversión (C₆): este es uno de los subcriterios más utilizados para comparar alternativas de producción de energía que incluye tecnologías renovables. Comprende el costo de la tecnología, instalación, construcción de vías, conexión a la

red, servicios de ingeniería entre otros. Este criterio puede considerarse del tipo cuantitativo (Al Garni *et al.*, 2016; Mohammed Alsayed, Cacciato, Scarcella, & Scelba, 2013; Georgopoulou *et al.*, 1997; Ghafghazi *et al.*, 2010; Kabak & Dağdeviren, 2014; J. C. Rojas, 2012; Sengül *et al.*, 2015; Shmelev & Van Den Bergh, 2016; Terrados *et al.*, 2009; Yajure, 2015; Yazdani-Chamzini *et al.*, 2013; Ling Zhang *et al.*, 2015) o cualitativa (Afsordegan *et al.*, 2016; Burton & Hubacek, 2007; Buyukozka & Guleryuz, 2014; Doukas *et al.*, 2010; Erdogan & Kaya, 2015; Nigim *et al.*, 2004). Mientras menor es el coste la preferencia es mayor, por cuanto se invertirá menos por kW, por lo que este criterio de minimiza.

El análisis se lo hace con costes de inversión de diferentes plantas de referencia. Para evitar la influencia del tamaño, en algunos casos se extrapola los costos de una escala a otra, esto pues plantas de diferente tamaño por economías de escala suelen tener costos diferentes. El coste está influenciado por el tamaño de la planta de referencia, así para altas potencias se tiene costos menores que para sistemas pequeños. Para determinar los costos de inversión se extrapola los costos de una escala a otra, utilizando la Ecuación 4-21. Mediante esta ecuación se evita la influencia del tamaño en los costos, plantas de diferente tamaño por economías de escala suelen tener costos diferentes. Otra consideración es que a medida que las tecnologías maduran y se expande su uso, los costos también lo hacen. En general para esta investigación se consideran aceptables datos que no superen los 10 años.

$$\frac{C_{T1}}{C_{T2}} = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^p$$

Ecuación 4-21

En donde:

C_{T1} y C_{T2} son los costos de la planta de tamaño S_1 y S_2 , respectivamente (Energy Styrelsen, 2012; IEA, 2013).

p , es el factor de escalamiento que depende del tipo de proceso.

Costo de operación y mantenimiento (C7): este subcriterio considera los costos requeridos para la operación del sistema (personal, productos o servicios) y los costos que permiten el funcionamiento de la tecnología durante su vida útil. Puede valorarse como cuantitativo (Al Garni *et al.*, 2016; Georgopoulou *et al.*, 1997; Kabak & Dağdeviren, 2014; J. C. Rojas, 2012; Sengül *et al.*, 2015; Yazdani-Chamzini *et al.*, 2013) o cualitativo (Afsordegan *et al.*, 2016; M. Alsayed *et al.*, 2014; Burton & Hubacek, 2007;

Buyukozka & Guleryuz, 2014; Erdogan & Kaya, 2015). El criterio utilizado es cuantitativo y se lo obtiene a partir de los costos de inversión empleados. Cuanto más bajo sea el costo de O&M por kW, mayor será la preferencia, por lo que este criterio se minimiza.

Costo de producción de energía (C_e): este subcriterio considera el valor monetario de producir una unidad de energía. La preferencia está dada para las tecnologías que producen energía al menor costo. Puede valorarse como cuantitativo (Al Garni *et al.*, 2016; M. Alsayed *et al.*, 2014; Shmelev & Van Den Bergh, 2016; Topcu & Ulengin, 2004; Yajure, 2015) o cualitativo (Kabak & Dağdeviren, 2014). Para este estudio se considera un criterio de tipo cuantitativo. Se utiliza el método de los costes medios de generación durante la vida útil (Levelized Costs). El coste de generación durante la vida útil es el coste promedio unitario de la energía expresado en USD/kWh que debería pagarse por cada unidad de energía producida de forma que se compensen todos los costes asociados a la instalación durante toda su vida útil teniendo en cuenta el valor del dinero en cada momento (IEA/NEA, 2015; Joubert, Hess, & Niekerk, 2016). Utilizando la Ecuación 4-22 se puede calcular dicho costo.

$$C_e = \frac{\sum_t [Inv_t + O\&M_t] \cdot (1 + r)^{-t}}{\sum_t [Ene_t \cdot (1 + r)^{-t}]}$$

Ecuación 4-22

Donde:

C_e, coste de producción de la energía (C_{pb} biocombustible, Cel electricidad o C_c calor) durante su vida útil [USD/KWh].

Inv, inversión en el año (incluyendo intereses durante la construcción y todos los elementos auxiliares e infraestructura eléctrica) [USD/KWh].

O&M, coste de operación y mantenimiento al año t [USD/KWh].

r, tasa de descuento

E_{ne}, energía producida en el año t [KWh].

t, años de operación de la planta.

Dimensión ambiental

Las energías renovables se caracterizan por su baja o nula emisión de gases a la atmósfera en su fase operativa, no obstante, la fabricación de los componentes

requiere insumos y energía que se valora a través del análisis del ciclo de vida. Por ello los subcriterios utilizados consideran las fases de manufactura y operación. Todos los subcriterios ambientales son del tipo cuantitativo. El mix energético que sirvió para la energía en la etapa de manufactura, juega un importante papel, por ello se tienen diferentes factores de emisión según la fuente bibliográfica consultada. Un mix energético con plantas de energía que utilizan recursos fósiles, implicará un factor de emisión mayor, que un mix en donde tienen mayor contribución plantas de generación renovable o centrales nucleares.

Calentamiento global (C₉): las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provocan el calentamiento global. Como indicador se utiliza el CO₂, producido por la quema de combustibles fósiles. El análisis debe incluir no solo la etapa operativa, por ello se prefiere la tecnología que a lo largo de su ciclo de vida produce menos emisiones. Hay investigaciones que utilizan este criterio como cuantitativo (Al Garni *et al.*, 2016; Beccali *et al.*, 2003; Browne, O'Regan, & Moles, 2012; Georgopoulou *et al.*, 1997; Ghafghazi *et al.*, 2010; J. C. Rojas, 2012; Roth *et al.*, 2009; Terrados *et al.*, 2009; Ling Zhang *et al.*, 2015), mientras que otras investigaciones lo utilizan como un indicador cualitativo (Afsordegan *et al.*, 2016; Burton & Hubacek, 2007; Buyukozka & Guleryuz, 2014; Doukas *et al.*, 2010; Erdogan & Kaya, 2015; Nigim *et al.*, 2004; Yazdani-Chamzini *et al.*, 2013). Este subcriterio se lo minimiza, pues se prefiere las tecnologías que durante su ciclo de vida tienen menores emisiones por unidad de energía.

Acidificación (C₁₀): el dióxido de azufre (SO₂) es un gas que se oxida y provoca lluvia ácida, la cual es causante de afecciones a ecosistemas y a la salud de las personas. Al considerar el ciclo de vida de la tecnología, su producción depende del mix energético empleado para la fabricación de sus componentes. Si el mix está compuesto por plantas eléctricas que operan con combustibles fósiles que contienen azufre, se produce SO₂. Este subcriterio ha sido utilizado tanto en forma cualitativa (M. Alsayed *et al.*, 2014; Browne *et al.*, 2010; J. C. Rojas, 2012; Terrados *et al.*, 2009), como cuantitativa (Beccali *et al.*, 2003; Buyukozka & Guleryuz, 2014; Erdogan & Kaya, 2015). Mientras mayor es el factor de emisión menor será la preferencia.

Eutrofización (C₁₁): los óxidos de nitrógeno (NO_x) se producen por la quema de combustibles fósiles. El principal problema ambiental es la eutrofización que se manifiesta en el exceso de nutrientes depositados en el agua o en el suelo. El exceso de nutrientes provoca un aumento de la producción primaria o biomasa y un decremento de otras especies en los ecosistemas. Este subcriterio se puede considerar

como cualitativo (M. Alsayed *et al.*, 2014; Browne *et al.*, 2010; J. C. Rojas, 2012; Terrados *et al.*, 2009; Yajure, 2015) o cuantitativo (Afsordegan *et al.*, 2016; Beccali *et al.*, 2003; Buyukozka & Guleryuz, 2014; Erdogan & Kaya, 2015). Cuantas menos emisiones de NO_x se produzcan mayor será la preferencia.

Dimensión social

La posibilidad de que las tecnologías puedan ser utilizadas en forma distribuida en la ciudad requiere que se analicen, si las condiciones normativas o sociales son aceptables para la incorporación en los mix energéticos urbanos. La aceptabilidad de la tecnología y la compatibilidad de las políticas públicas se valoran en función de consulta a expertos locales. En el caso de la creación de empleo se utiliza indicadores cuantitativos que se obtienen de fuentes bibliográficas.

Creación de empleo (C₁₂): la posibilidad de desarrollar, manufacturar, instalar, construir, mantener y operar nuevas infraestructuras requerirá personal y mano de obra. El incremento del empleo mejora la calidad de vida de las personas y posibilita el establecimiento de nuevos negocios. Varios estudios han hecho referencia a que el emplazamiento de las tecnologías renovables crearía fuentes de empleo, más aún si se establecen economías de escala que posibiliten su masificación. Este criterio es utilizado como cuantitativo (Al Garni *et al.*, 2016; Beccali *et al.*, 2003; Browne *et al.*, 2010; J. C. Rojas, 2012; Shmelev & Van Den Bergh, 2016; Terrados *et al.*, 2009; Ling Zhang *et al.*, 2015) o como cualitativo (Afsordegan *et al.*, 2016; Buyukozka & Guleryuz, 2014; Doukas *et al.*, 2010; Erdogan & Kaya, 2015; Georgopoulou *et al.*, 1997; Kabak & Dağdeviren, 2014). Este subcriterio se maximiza, pues mientras mayor cantidad de empleos se pueda producir mayor es su grado de preferencia.

Siguiendo lo establecido por Wei *et al.* (2010), se establece dos indicadores que permitirían calcular el número de empleos en función de la potencia o energía, para las etapas de: i) construcción, instalación y manufactura (CIM) y ii) operación y mantenimiento (OM). El primero indica la cantidad de trabajadores involucrados en la etapa inicial de la implantación de la tecnología. El segundo caso expresa el número de empleos involucrados a lo largo del tiempo de vida de la operación y mantenimiento.

Con lo anterior se puede obtener la cantidad de empleos por unidad de energía (empleos-año/GWh). Como se observa en las siguientes ecuaciones si se disponen la cantidad de empleos producidos para CIM y OM, de una instalación de referencia con una determinada potencia (MW) se puede obtener los indicadores anteriores

para una planta conociendo la vida útil y factor de planta utilizando la Ecuación 4-23.

$$CIM = \frac{CIM_I * N_I}{P_I}$$

Ecuación 4-23

En donde:

CIM_I , es la cantidad de personas que se requiere para la construcción, instalación y manufactura de una planta de referencia [personas-año].

N_I , es el número de años utilizados para CIM de la instalación de referencia [años].

P_I , es el tamaño de la potencia de la instalación de referencia [MW].

CIM , es el número de personas que se utilizó para la construcción de una infraestructura de referencia MW, durante N_I años [personas-año/MW].

Si OM , es el número de empleos que se requirieron para la operación y mantenimiento de una instalación de referencia MW, durante un año, en empleos/MW, se tiene:

$$OM = \frac{OM_I}{P_I}$$

Ecuación 4-24

En donde:

OM_I , cantidad de empleos que se requiere para la operación y mantenimiento de una instalación de referencia en un año [empleos-año].

P_I , tamaño de la potencia de la instalación de referencia [MW].

Con lo anterior:

$$I_e = \left[\frac{CIM}{t} + OM \right] * \frac{1000}{8760 * Fp}$$

Ecuación 4-25

En donde:

I_e , indicador de empleo para una tecnología renovable [total de empleos-año/GWh].

t , tiempo de vida de la tecnología renovable [años].

F_p , factor de planta de la tecnología renovable.

Los datos de referencia CIM_i , N_i , P_i , OM_i son constantes si se conoce la instalación de referencia y, por tanto, con CIM y OM , se puede calcular el número de empleos año por unidad de energía para una determinada instalación con un factor de planta y tiempo de vida determinado.

Aceptación social de la tecnología (C₁₃): este subcriterio considera si la población urbana está de acuerdo con la instalación de las tecnologías renovables. Los estudios analizados valoran este subcriterio en forma cualitativa (Afsordegan *et al.*, 2016; Al Garni *et al.*, 2016; Burton & Hubacek, 2007; Buyukozka & Guleryuz, 2014; Erdogan & Kaya, 2015; Nigim *et al.*, 2004; J. C. Rojas, 2012; Roth *et al.*, 2009), a través de encuestas o mediante escalas de calificación. Este factor está fuertemente influenciado por la experiencia y conocimiento de los participantes. Un análisis más extenso se consigue si se hace una encuesta para medir el grado de percepción en una ciudad determinada.

Compatibilidad con las políticas públicas (C₁₄): la creciente participación de las energías renovables en contextos nacionales se ha dado por la implementación de políticas que motivan la instalación de este tipo de tecnologías principalmente a gran escala. Sin la implementación de políticas, la entrada de tecnologías que son nuevas y en algunos casos menos favorables desde el punto de vista económico no será viable. Si se quiere cambiar el modelo energético a uno en donde el usuario sea partícipe de la producción, es necesaria la intervención del Gobierno vía regulaciones e incentivos (Barragán & Espinoza, 2015). Este subcriterio puede ser cuantitativo (Ling Zhang *et al.*, 2015), sin embargo, en la mayoría de estudios analizados es considerado como cualitativo (Beccali *et al.*, 2003; Buyukozka & Guleryuz, 2014; Erdogan & Kaya, 2015; Georgopoulou *et al.*, 1997; Kabak & Dağdeviren, 2014; Nigim *et al.*, 2004; Roth *et al.*, 2009; Terrados *et al.*, 2009).

4.2.4.2 Subcriterios cualitativos.

Debido a la falta de información para determinar algunos subcriterios se optó por una valoración cualitativa. En este caso se considera los criterios de expertos locales, que conozcan de la situación energética de la ciudad y tengan experiencia en energías renovables.

Una vez analizada la experticia de cada participante, se obtuvo para cada subcriterio una matriz de respuestas. La valoración de cada criterio se la efectúa utilizando una escala de Lickert (1-5). Para valorar la eficacia de la encuesta se aplica el coeficiente Alfa de Cronbach.

Experticia de los participantes

En el cuestionario se pide que valoren su experiencia teórica o experimental, conocimiento de literatura especializada e intuición según lo propuesto por Blasco *et al.* (2010).

A los colaboradores se les solicita que realicen la siguiente autoevaluación:

- 1) Se pide que valoren su conocimiento sobre el problema «Promoción de las energías renovables en la ciudad xxxx». Esto se mide utilizando el coeficiente Kc, que tiene un valor entre 1 y 10.
- 2) Se pide al colaborador que autoevalúe el grado de influencia de los subcriterios que valorará en función de su experiencia. De forma que se califica las respuestas según lo establecido en la Tabla 4-11.

Tabla 4-11. Puntajes para medir autoevaluación de los expertos

Fuentes de argumentación	Grado de influencia de cada una de las fuentes en sus criterios		
	ALTO (A)	MEDIO (M)	BAJO (B)
1. Investigaciones teóricas y/o experimentales relacionadas con el tema.	0,30	0,20	0,10
2. Experiencia obtenida en la actividad profesional (docencia de pregrado y posgrado recibida y/o impartida).	0,50	0,40	0,20
3. Análisis de la literatura especializada y publicaciones de autores nacionales.	0,05	0,05	0,05
4. Análisis de la literatura especializada y publicaciones de autores extranjeros.	0,05	0,05	0,05
5. Conocimiento del estado actual de la problemática en el país y en el extranjero.	0,05	0,05	0,05
6. Intuición	0,05	0,05	0,05
Total	1,00	0,80	0,50

Fuente: Blasco *et al.* (2010)

Con lo anterior se calcula el coeficiente de conocimiento (K_a):

$$K_a = \sum_i^6 k_i$$

En donde k_i , será el valor de la fuente de argumentación.

3) Se calcula el coeficiente de competencia K_{com} :

$$K_{com} = 0,5 * (0,1 * K_c + K_a)$$

En donde:

- Si $0,8 < K_{com} < 1,0$ alto
- Si $0,5 < K_{com} < 0,8$ medio
- Si $K_{com} < 0,5$ bajo

Se puede obtener un promedio general del coeficiente de competencia, sacando el promedio de todas las puntuaciones del grupo de expertos.

Se puede descartar a los colaboradores con un $K_{com} < 0,8$, si estos influyen en el promedio general.

- 4) A partir de lo anterior se elige un conjunto de expertos. Se debe tener más del mínimo de 15 pues puede haber deserción, en caso de requerirse otra ronda de evaluación.
- 5) Para validar la homogeneidad de las respuestas se puede utilizar el alfa de Cronbach. Si $\alpha \leq 0,7$, se puede hacer una segunda o tercera ronda. La influencia de los criterios en las respuestas también será un condicionante para aplicar sucesivas entrevistas.

4.2.5 Matriz de decisión.

Una vez que se tienen las alternativas y los criterios se realiza una matriz de decisión. Puesto que los usos de las tecnologías pueden variar, se propone emplear una matriz según la utilidad de las tecnologías. En la Figura 4-6 se esquematiza la estructura jerárquica para selección de las alternativas tecnologías propuestas y en la Tabla 4-12 se muestra el formato de la matriz de decisión.

Tabla 4-12. Presentación de la matriz de decisión

<div style="display: inline-block; border-left: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black; width: 10px; height: 10px; margin-right: 5px;"></div> a_i	$c_j(\cdot)$													
	Técnico				Económico				Ambiental				Sociopolítico	
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}
a_1														
a_2														
.....														
a_n														

Fuente: Elaboración propia

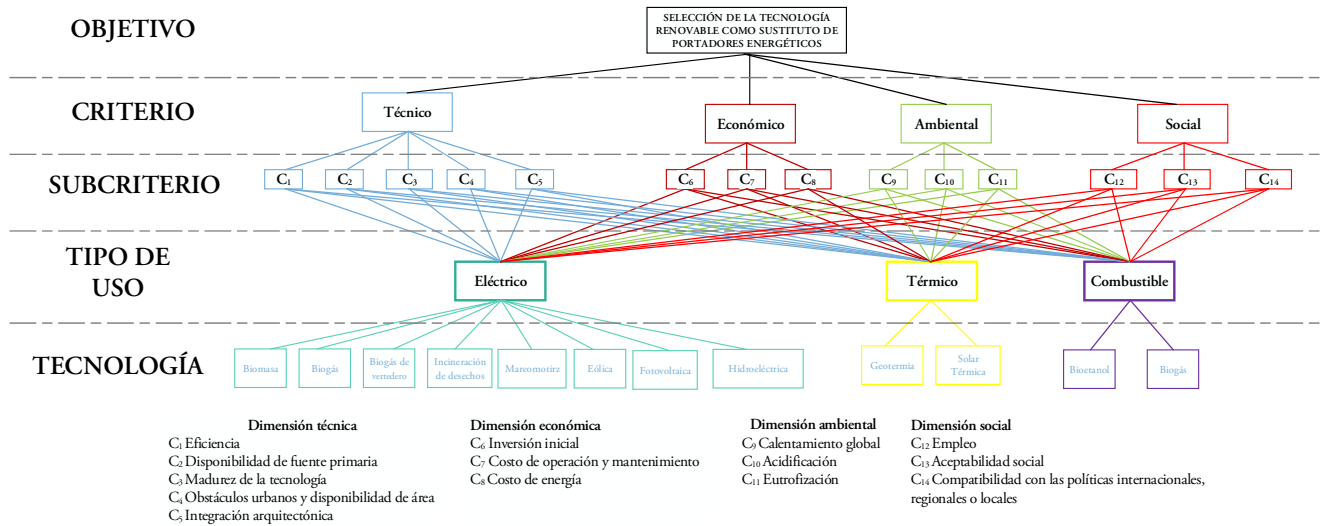


Figura 4-6. Estructura jerárquica para la selección de alternativas

Fuente: Elaboración propia

4.2.6 Asignación de pesos.

La forma más sencilla de asignar pesos es que todos sean iguales (EW, del inglés Equal Weights), sin embargo, en la práctica, hay subcriterios más importantes que otros. Cada criterio y subcriterio tienen un impacto diferente sobre las alternativas, por ello se les asigna un peso para indicar su importancia relativa (Wang *et al.*, 2009). Si se define un vector de pesos:

$$\omega_j = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\}$$

Ecuación 4-26

Donde k es el número de subcriterios, se tienen dos métodos para definir los pesos:

- **Método de los pesos iguales**, en este caso todos los criterios tienen pesos iguales, establecidos por:

$$\omega_j = \frac{1}{k}$$

Ecuación 4-27

- **Métodos de ponderación**, en este caso se ordenan los pesos, de manera que:

$$\omega_1 \geq \omega_2 \geq \dots \geq \omega_k \geq 0$$

Ecuación 4-28

Siendo:

$$\sum_j^k \omega_j = 1$$

Los métodos de ponderación se dividen en: 1) subjetivos, donde los pesos dependen de la preferencia del decisor, 2) objetivos, que utilizan modelos matemáticos que incluyen los datos propios del proyecto y 3) combinados, consideran los dos métodos anteriores.

Wang *et al.* (2009) y Zardari *et al.* (2015) presentan una clasificación de los métodos de ponderación. Wang *et al.* (2009) menciona que los métodos objetivos se utilizan marginalmente en sistemas de energía. Mientras los métodos subjetivos son ampliamente utilizados en este campo.

El método subjetivo AHP está dentro de los más empleados para definir los pesos de los criterios. Otro método de ponderación que se propone es el método de

valoración directa (DRM, del inglés Direct Rating Method). En este los participantes evalúan cada criterio utilizando una escala y luego se normalizan las valoraciones dividiendo cada una por la suma de todas ellas.

Hajkowicz y colaboradores (2010) analizan el comportamiento de diferentes métodos para la valoración de pesos, entre los cuales se incluye el método de valoración directa, clasificación ordinal y el AHP.

Con el fin de determinar pesos que puedan ser utilizados en diferentes locaciones, se utiliza el método de calificación directa, pues permite realizar las consultas a actores internacionales, procurando que el cuestionario utilizado no sea rechazado. Luego se realiza un análisis comparando los resultados que se tiene al dar pesos equitativos a los subcriterios y con los pesos obtenidos empleando el método de calificación ordinal (OR, del inglés Ordinal Ranking). La aplicación del método requiere la participación de expertos, quienes contestan un cuestionario que incluye preguntas que se evalúan en una escala de Likert. La evaluación depende de la accesibilidad de los participantes que aporten con la valoración.

4.2.6.1 Método de calificación directa.

En el método de calificación directa (DRM), se representa la importancia de cada criterio utilizando una escala que puede ser: 1-m, donde m, puede ser 5, 7 o 10. El peso de cada uno de los k subcriterios w_j , se establece:

$$\omega_j = \frac{\sum_{i=1}^m (P_{j,i} \times R_{j,i})}{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m (P_{j,i} \times R_{j,i})}$$

Ecuación 4-29

En donde:

ω_j , peso del subcriterio j.

P_{ji} , número de puntos i de calificación de la escala de Likert valorado por los participantes, para cada subcriterio j.

R_{ji} , fracción de la suma de cada calificación (P_{ji}), para la suma de todas las calificaciones para cada criterio.

k, cantidad de subcriterios.

4.2.6.2 Calificación ordinal.

El método de calificación ordinal requiere que los tomadores de decisión ordenen los criterios según la importancia. Luego se aplica el método del valor esperado (expected value method) (Hajkowicz *et al.*, 2010). Si se tiene k criterios ordenados en forma ascendente, los valores esperados, que corresponden a los pesos, están dados por la Ecuación 4-30 (Ghafghazi *et al.*, 2010).

$$\begin{aligned}\omega_1 &= \frac{1}{k^2} \\ \omega_2 &= \frac{1}{k^2} + \frac{1}{k \cdot (k-1)} \\ \omega_{k-1} &= \frac{1}{k^2} + \frac{1}{k \cdot (k-1)} + \dots + \frac{1}{k \cdot 2} \\ \omega_k &= \frac{1}{k^2} + \frac{1}{k \cdot (k-1)} + \dots + \frac{1}{k \cdot 2} + \frac{1}{k \cdot 1}\end{aligned}$$

Ecuación 4-30

4.2.7 Priorización de alternativas.

Para priorizar las alternativas, se utilizó el *software* PROMETHEE GAIA que permite realizar el proceso de decisión, así como la visualización gráfica de los resultados. Se analizan los resultados obtenidos al evaluar los flujos parciales ($\phi+$) y ($\phi-$) y netos. Mediante este análisis se puede conocer la preferencia (P), la indiferencia (I) y la incompatibilidad (R). Además, se visualiza las n alternativas proyectadas en un espacio k dimensional (plano GAIA), que puede ser proyectada en un plano \mathfrak{R}^k . El plano GAIA las alternativas se presentan por puntos y los subcriterios por vectores. Cada subcriterio está representado por un eje dibujado desde el centro del plano GAIA. Este análisis permite distinguir qué alternativas son mejores bajo un criterio particular, dado que las mismas se localizarán en la dirección del eje correspondiente sobre el plano GAIA.

Los diagramas de araña (GAIA webs), por otro lado, permiten analizar los diferentes criterios o subcriterios para cada alternativa. Los diagramas tienen una escala en donde: -1 está ubicada en el centro y +1 fuera en el exterior de un círculo. Los criterios que se encuentran fuertemente correlacionados se encuentran cerca entre sí, además, un polígono une los criterios, de forma que se observa que criterio es mejor o peor, respecto a una de las alternativas.

4.2.8 Toma de decisiones.

Con el propósito de analizar el impacto que tendrían las tecnologías en los flujos energéticos en la ciudad, a partir de la jerarquización se seleccionan las tecnologías que el decisor considera que se debe estimar el potencial. De esta manera, se tendrán tecnologías que contribuyan a la sustitución de combustibles, a la electricidad y al calentamiento de agua o calefacción.

4.3 Planificación energética urbana

El principal objetivo del planeamiento energético es procurar satisfacer la demanda de energía de un país, región o ciudad a corto, mediano o largo plazo, en forma continua, con determinados parámetros de calidad y a precios aceptables. En los años 70, la planificación en principio consideró exclusivamente criterios económicos para dimensionar la estructura energética que reúna las características anotadas. Los costos asociados a la implantación infraestructuras energéticas fueron los principales motivos para elegir diferentes alternativas, sin embargo, la preocupación por aspectos sociales y ambientales ha hecho que otros temas sean considerados. El requerimiento de que los sistemas energéticos incluyan una visión más holística propició que en la década de los 80, se desarrollen técnicas que permitan considerar varios criterios de selección (Løken, 2007).

Por lo general las municipalidades tienen autonomía en planificar el transporte, el suelo o vivienda, provisión de agua o manejo de desechos, pero tienen un bajo control sobre el abastecimiento de energía (IRENA, 2016b; Sveinbjörnsson, Ben Amer-Allam, Hansen, Algren, & Pedersen, 2017).

El desarrollo de nuevas tecnologías que permiten la producción descentralizada aprovechando recursos que dispone la ciudad, viabiliza que la ciudad no solo sea receptora de energía. Sin embargo, la sola existencia del recurso no garantiza que se aproveche, pues las condiciones técnicas, así como los temas económicos, ambientales o sociales se antepone al desarrollo de este tipo de proyectos (Nigim *et al.*, 2004).

Esto ha propiciado que el planeamiento energético comience a ser tomado en cuenta en algunas municipalidades en los recientes años (IEA, 2009; IRENA, 2016b; Sveinbjörnsson *et al.*, 2017). Este cambio de paradigma posibilita que la ciudad aproveche los recursos que dispone con fines de producción energética. Para

conseguir esto, se requiere que la planificación energética sea concebida no solo a nivel nacional o regional, sino a nivel urbano manteniendo un adecuado balance entre la dimensión técnica, social, económica y ambiental.

La posibilidad de producir energía no solo a escala regional viabiliza que la planificación se la haga a entornos locales. Al igual que en los entornos regionales, la aplicación de las energías renovables en la ciudad requiere especificar criterios que permitan seleccionar las mejores opciones. El método contabilidad de flujos de energía utilizado en otros niveles sirve también para inventariar el metabolismo urbano en la ciudad. El inconveniente principal para describir bajo este enfoque a la ciudad es la falta de información local que permita definir la situación energética actual y futura.

Zivkovic *et al.* (2016) mencionan que un modelo de sistema de energía urbana debe representar los procesos de adquisición y uso de energía para satisfacer la demanda de una determinada área urbana. En este sentido, la planificación energética urbana, tendría la misma finalidad que la planificación energética regional. Es decir, buscaría identificar estrategias que viabilicen la puesta en práctica de un modelo urbano sostenible (IRENA, 2016a). La planificación energética urbana debe partir de políticas energéticas que permitan incentivar el aprovechamiento de recursos locales (OLADE, 2014). Como política energética urbana se propone la disminución de la importación de energía a la ciudad. Para lograr esto se requiere estrategias de eficiencia energética, ahorro de energía, el uso intensivo de las energías renovables o el cambio de combustibles. Las estrategias propuestas, sin embargo, requieren desarrollarse en forma conjunta con políticas que abarquen la escala nacional o regional.

El uso intensivo de los recursos fósiles, las limitaciones tecnológicas, así como el comportamiento de los ciudadanos impedirá que el uso masivo de las tecnologías adecuadas para una localidad pueda expandirse a corto plazo. No obstante, la paulatina degradación del ambiente y la reducción de recursos condicionan a que el desarrollo local siga manteniendo el modelo energético actual basado únicamente en la importación de energía.

4.3.1 Paradigmas de planificación energética.

La literatura establece tres tipos de planificación: normativa, indicativa y estratégica. En la primera, el Estado es el actor principal para la consecución de objetivos, privilegiándose aspectos económicos sin prestar atención a la viabilidad de las

propuestas. En el segundo caso, los actores son entes públicos y privados, y se toma en cuenta aspectos globales y sectoriales (físicos y económicos), para formular un plan que conlleve a una situación deseada futura (OLADE, 2014). Por último, la planificación estratégica es vinculante y su aplicación debe ser verificable. El Estado como ente planificador crea entidades públicas para establecer actividades concretas. Para este caso, se requiere formular escenarios posibles que permitan evaluar si se pueden lograr los objetivos planteados (OLADE, 2014).

En este estudio, la planificación energética propuesta es del tipo indicativo. La intención no es cuantificar todas las interacciones que se presentan al incluir las ER en la ciudad, sino establecer si la inclusión de estas puede modificar la matriz energética urbana. Al evaluar esto, es posible que los entes de Gobierno municipal incluyan políticas que se concreten en una planificación energética local.

En lo referente a la evaluación de los flujos de energía urbanos, Haberl (2001a) advierte que la investigación a este nivel por mucho tiempo quedó excluida, a pesar de que existen muchos estudios regionales o nacionales. Se propone el uso de herramientas utilizadas a estos niveles para determinar los flujos energéticos urbanos que permitirían analizar la situación base y la construcción de escenarios.

La planificación no solo necesita conocer la situación actual o base, sino que requiere plantear escenarios que permitirían valorar las propuestas planteadas con la inicial. En este caso, el escenario base es comparado con escenarios que consideran la provisión de energía utilizando recursos que dispone la ciudad esto, sin embargo, no implica que pueden existir otros escenarios o medidas más adecuadas y aceptables desde el punto de vista técnico, económico, ambiental o social. Lo que se busca es cuantificar y analizar si los recursos energéticos disponibles pueden disminuir las entradas de energía que consume la ciudad. En este sentido, el estudio de casos puede proveer valiosas lecciones teóricas para contribuir a aplicaciones prácticas a mediano y largo plazo (Zivkovic *et al.*, 2016).

4.3.2 Instrumentos para la planificación energética.

La planificación energética se la realiza a través de modelos que describen el sistema energético desde la producción, transformación, suministro y consumo (OLADE, 2014). Como primer paso se necesita conocer cuál es la situación energética actual de la ciudad (balance energético). A partir de esto se puede establecer un escenario que reflejaría la tendencia actual (BAU, siglas en inglés de bussiness-as-usual). Luego, al

incorporar las tecnologías renovables seleccionadas se tiene escenarios que permitirán establecer el impacto en la matriz energética urbana.

Los modelos requieren de información, que como se advirtió puede ser escasa, más aún en las ciudades que no disponen de información desagregada o se encuentra dispersa. Como instrumentos para la planificación energética la OLADE (2014) plantea instrumentos energéticos que suelen utilizarse para la planificación, y que permiten la contabilización de los flujos de energía.

4.3.2.1 Balance de energía.

Haberl (2001a) considera que es esencial analizar la energía en la ciudad para conseguir un completo entendimiento del metabolismo social. Ya que se busca identificar los tipos de energías renovables que pueden utilizarse en las ciudades, para este trabajo se analiza la energía directa que requiere una urbe (Bennett & Newborough, 2001; Chen & Chen, 2015).

Esto se logra a partir del establecimiento del balance de energía, que es una manera de contabilizar los flujos energéticos que están disponibles y que son consumidos. Además, se describe la producción, importación, exportación, pérdidas o variaciones de reservas y el uso de los diferentes energéticos disponibles (Heaps, 2016). Generalmente se los realiza para países y regiones, y por un tiempo definido (un año). Además, puede ser utilizado con otras variables socioeconómicas para construir indicadores o formular escenarios futuros (OLADE, 2014).

La contabilización de flujos de energía como método para evaluar el metabolismo energético de la ciudad se basa en los principios de la primera Ley de la termodinámica (Pincetl *et al.*, 2012). Y este principio también es en el que se basan los balances de energía, por ello, se los utiliza para contabilizar los flujos de energía urbanos. De hecho, al ser la estructura de un balance del tipo general puede aplicarse a una parte de un país, ya sea región, provincia, departamento, áreas urbanas o rurales (Instituto de Economía Energética, IDEE, 2016a).

Partiendo de lo estipulado por IDEE (2016a) para los balances nacionales, un balance energético urbano permitirá:

- Conocer la estructura del sistema energético urbano.
- Analizar la evolución en el tiempo.
- Realizar un diagnóstico energético.
- Realizar una prospectiva energética.

- Aplicar indicadores energéticos.
- Organizar la información.

Un balance energético se lo presenta como una matriz, en donde las columnas corresponden a las fuentes de energía primaria y secundaria. Las filas a las actividades de oferta, transformación, ajuste, demanda o consumo final (García, F., Hernández & Luna, 2011; Heaps, 2016; IDEE, 2016a). La contabilidad de la energía en el balance se establece según las ecuaciones la Ecuación 4-31 y la Ecuación 4-32.

$$OT = P_L + I_E - E_X + V_I - N_A$$

Ecuación 4-31

$$OT + TR = A_J + D$$

Ecuación 4-32

En donde:

OT, oferta total de energía.

P_L, producción local de energía.

I_E, importaciones de energía.

E_X, exportaciones de energía.

V_I, variación de inventario de energía.

N_A, energía no aprovechada.

T_R, centros de transformación de energía.

A_J, ajuste de energía.

D, demanda de la energía.

El ajuste A_J es un indicador de calidad de la información y es la diferencia entre la oferta calculada entre el abastecimiento y el consumo. Y no debe ser menor al 5 %; si es muy bajo puede no considerarse en el balance (IDEE, 2016a). La variación de inventario se define como la diferencia de la existencia final menos la existencia final del año considerado como base (sirve cuando se realiza prospectiva energética).

Una manera gráfica de visualizar los flujos de la energía desde la transformación al consumo de energía es utilizando los diagramas de Sankey. Mediante esta representación de los flujos de energía, se identifica cuáles son los sectores que requieren determinado tipo de energía o a cuáles se puede aplicar medidas de uso eficiente de energía (Subramanyam, Paramshivan, Kumar, & Mondal, 2015).

4.3.2.2 Escenarios.

Los escenarios permiten describir visiones anticipadas de lo que pudiera ocurrir al establecer determinadas hipótesis. Lo que se busca es explorar situaciones posibles, y, por tanto, reducir la incertidumbre.

Los escenarios permiten vislumbrar situaciones hipotéticas, que se tendrían al aplicar determinadas acciones (OLADE, 2014; Lixiao Zhang, Feng, & Chen, 2011). En otras palabras, los resultados de los escenarios son situaciones posibles del sector energético contruidos según la hipótesis. Los escenarios responden a la pregunta «What if», es decir, posibilitan construir situaciones alternativas que responden a la pregunta: ¿Qué pasaría sí? (IDEE, 2016b; Zivkovic *et al.*, 2016) En este sentido, la construcción de escenarios facilita el análisis del impacto de las políticas energéticas y, por tanto, la toma de decisiones.

Para la construcción de escenarios se puede utilizar un enfoque poco detallado (más agregado), por ejemplo, con métodos econométricos. En este caso no se dispone de series históricas (información desagregada) de todas las demandas. Por otro lado, la cantidad limitada de información es un inconveniente pues impediría simular cambios estructurales importantes (IDEE, 2016c).

Por el contrario, los métodos analíticos evalúan cambios estructurales, con una desagregación importante al nivel de consumidor. Con ello se puede analizar que sucede cuando se realizan un proceso de penetración o sustitución de tecnologías. La perspectiva se logra conociendo la situación de un año base, sin embargo, para llegar a un nivel de desagregación que refleje el comportamiento de grupos de consumidores hace falta gran cantidad de información primaria (IDEE, 2016c).

4.3.3 Elección del modelo.

La OLADE (2014) destaca que no hay modelos que abarquen todas las aristas relacionadas a la planificación energética. La elección de un modelo estará condicionada a los objetivos del análisis o al problema que se quiera tratar. Existen varios modelos utilizados para la planificación energética, pero tienen en común que

permiten organizar la información y facilitar el entendimiento del sistema energético, tanto en las situaciones actuales como en los escenarios hipotéticos planteados (IDEE, 2016d; Subramanyam, Kumar, Talaei, & Hossain, 2017).

Pueden caracterizarse en función de tres enfoques:

- a) Sistema al que pretenden representar: i) Modelos energéticos, que describen el comportamiento de un sistema, ii) Modelos energía – economía, que relacionan los sistemas económicos y energéticos, y iii) Modelos de sistemas parciales, que permiten analizar subsectores energéticos.
- b) Según su enfoque resolutivo: i) Modelos de optimización, utilizados para configurar sistemas energéticos al mínimo costo que están sujetos a determinadas restricciones, ii) Modelos de simulación, que representan la conducta de los consumidores y productores con relación a la energía, iii) Modelos de coeficientes técnicos, utiliza los resultados de las simulaciones para analizar las implicaciones de un escenario, y iv) Modelos híbridos, combinan elementos de los enfoques anteriores.
- c) Según su enfoque metodológico: i) Modelos del tipo *top down*: utilizando información agregada y mediante simulaciones generalmente macroeconómicas se determinan las demandas sectoriales. Utilizando factores como el producto interno bruto, ingresos, precios o crecimiento poblacional se estima el consumo de energía futura (Subramanyam *et al.*, 2017). ii) Modelos del tipo *bottom up*, utilizando información en detalle de cada componente del sistema energético permiten configurarlo en su conjunto.

La OLADE (2014) propone un árbol de decisión (Figura VI.10, pg. 260), que facilita la elección del modelo en función de las siguientes necesidades:

- Escala geográfica, indica el nivel espacial al que se requiere la planificación: global, nacional, local.
- Escala temporal, indica cuál es el horizonte de planificación: corto, mediano o largo plazo.
- Procedimiento computacional, indica si el modelo es de simulación u optimización.

- Equilibrio, indica si la planificación energética requiere que los subsectores que consumen energía sean satisfechos por la oferta interna en forma general, parcial o sin equilibrio.
- Metodología, indica si es una herramienta *top down* o *bottom up*.

Para este estudio se requiere utilizar un modelo de planificación que permita su uso en la ciudad y que, por otro lado, permita analizar los flujos energéticos. Debe permitir que a partir de hipótesis se simulen escenarios. Asimismo, debe posibilitar la sectorización de la ciudad en función del tipo de consumidores.

El modelo que cumple con estas características y que ha sido utilizado en otras ciudades es el LEAP (Long Range Energy Alternatives Planning System).

4.3.3.1 Características del modelo LEAP.

El modelo LEAP fue desarrollado por el Instituto Ambiental de Estocolmo (SEI del inglés Stockholm Environment Institute) en 1980; se han mejorado sus versiones que posibilitan analizar los impactos de la actividad económica en el consumo de energía y las emisiones de contaminantes atmosféricos (J. Zhou *et al.*, 2016). Ha sido utilizado en investigaciones académicas, o por diversas instituciones gubernamentales y no gubernamentales que incluyen análisis de planeamiento, mitigación de cambio climático y estudios de escenarios entre otros, tanto a escala global, nacional y urbana (Heaps, 2016).

Es un modelo de simulación del tipo *bottom up* utilizado para planeamiento energético basado en escenarios (IDEE, 2016b), puede analizar cómo la energía es consumida, convertida y producida (Lixiao Zhang *et al.*, 2011). Es utilizado a escala global, nacional y local. También puede incluir modelamiento macroeconómico (*top down*), para estimar el consumo en los sectores analizados.

Se enmarca dentro de los modelos de «*Simulación con coeficientes técnicos que en lugar de simular decisiones que supondría representar la racionalidad de los consumidores y productores o buscar una solución óptima, usa explícitamente cálculos de salidas de dichas decisiones y examina las implicancias de un escenario*» (IDEE, 2016b; OLADE, 2014).

En la Tabla 4-13 se muestran varios estudios en donde el modelo se aplicó a diferentes escalas geográficas, o temporales (Subramanyam *et al.*, 2017). En el estudio de Sveinbjörnsson y colegas (2017) se modela el sistema energético de la municipalidad de Sønderborg (Dinamarca) y postulan varios escenarios que incluyen el uso de varias tecnologías de conversión de energía. Esto con el fin de

investigar cómo reducir drásticamente las emisiones de CO₂ para el 2029. En la ciudad de Urumqi (China) se utiliza el modelo LEAP, para simular los efectos que pueden producir la aplicación de políticas que incluyen aspectos económicos, ambientales o energéticos (J. Zhou *et al.*, 2016). Dentro de los escenarios se plantea la participación de la energía solar, eólica e hidroeléctrica. Zhang *et al.* (2011) aplican LEAP en Beijing (China), para construir escenarios basados en diferentes estrategias encaminadas a disminuir la emisión de CO₂ y el uso de energía. Dentro de las estrategias se incluyen fuentes de energía solar y eólica. Zivkovic y colegas (2016) utilizan LEAP, para explorar varios escenarios que podrían transformar el sistema energético de la ciudad de Niš en Serbia. Los escenarios incluyen la adopción de estándares de eficiencia energética, implementación de ER o construcciones sostenibles. Para la ciudad de Medellín (Colombia) se empleó el modelo LEAP para cuantificar las emisiones que podrían evitarse al aplicar un nuevo plan de transporte, que incluye medidas la promoción del transporte público, cambio de combustibles (gasolina y diésel por electricidad o gas natural) o el teletrabajo, con el fin de disminuir el número de viajes al utilizar el vehículo privado (Martínez-Jaramillo, Arango-Aramburo, Álvarez-Urbe, & Jaramillo-Álvarez, 2017).

Tabla 4-13. Aplicación del modelo LEAP en diferentes estudios

Escala geográfica	Lugar	Escala temporal	Referencia
Local	Ciudad de Urumqi (China)	Mediano plazo 15 años 2000 a 2015	(J. Zhou <i>et al.</i> , 2016)
Local	Ciudad de Beijing (China)	Mediano plazo 23 años 2007 a 2030	(Lixiao Zhang <i>et al.</i> , 2011)
Local	Ciudad de Beijing (China)	Mediano plazo 18 años 2012 a 2030	(Yu, Pan, Tang, & Mi, 2015)
Nacional	Bolivia	Mediano plazo 23 años 2012 a 2035	(Broad, Sevillano, Alejo, & Pe, 2017)

Escala geográfica	Lugar	Escala temporal	Referencia
Local	Ciudad de Niš (Serbia).	Mediano plazo 20 años 2010 a 2030	(Zivkovic <i>et al.</i> , 2016)
Regional	Provincia de Alberta (Canadá)	Largo plazo 25 años 2005 a 2030	(Subramanyam <i>et al.</i> , 2015)
Local	Ciudad de Medellín (Colombia)	Largo plazo 30 años 2010 a 2030	(Martínez-Jaramillo <i>et al.</i> , 2017)
Regional	Isla de Sumatra (Indonesia)	Mediano plazo 15 años 2010 a 2025	(Suhono & Sarjiya, 2015)
Regional	Áreas rurales (Nepal)	Mediano plazo 20 años 2012 a 2032	(Sapkota, Lu, Yang, & Wang, 2014)
Nacional	Grecia	Largo plazo 40 años 2010 a 2050	(Tsita & Pilavachi, 2017)
Regional	Provincia de Alberta (Canadá)	Mediano y largo plazo 17 años 2013 a 2030 37 años 2013 a 2050	(Subramanyam <i>et al.</i> , 2017)

Fuente: Elaboración propia

Estructura del modelo

El modelo describe al sistema energético sobre la base de su demanda, transformación, recursos energéticos, costos, medioambiente y balances energéticos (IDEE, 2016b).

La demanda de energía se puede subdividirse en sectores, por ejemplo: el sector residencial, comercial, industrial, transporte, alumbrado público u otros (ver Figura 4-7). Para describirlos se requiere un nivel de actividad e intensidades energéticas. El nivel de actividad en el sector residencial suele estar relacionado con el número de hogares, mientras que en las actividades productivas con el valor agregado (VA) (J. Zhou *et al.*, 2016). En el caso de la intensidad energética se relaciona con la energía desagregada por los diferentes usos propuestos.

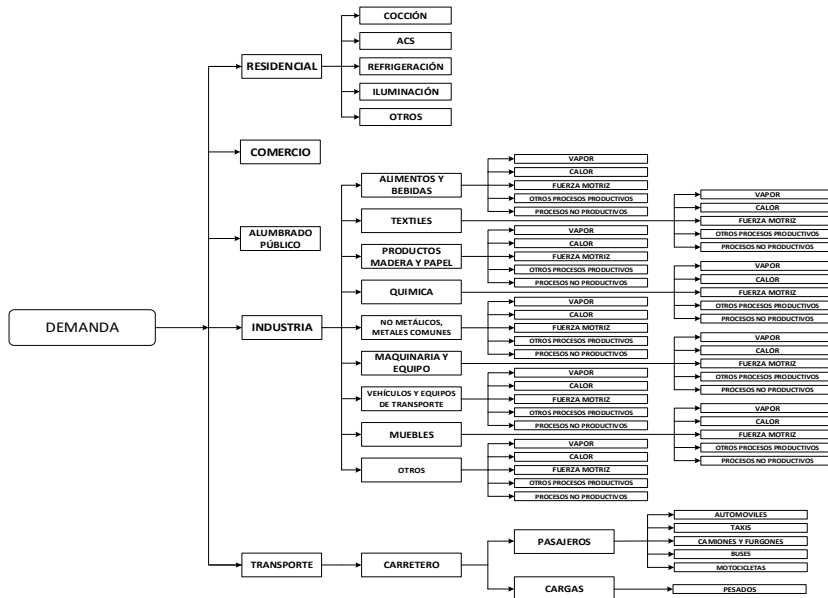


Figura 4-7. Estructura de la demanda en el modelo LEAP

Fuente: Elaboración propia

La demanda de energía es calculada para un año base (*current account*) y para los escenarios propuestos, como el producto del nivel de actividad (*activity level, AL*) y la intensidad de energía (*energy intensity, EI*). El nivel de actividad es una medida de la actividad social y económica, mientras la intensidad de energía es el consumo promedio energético del equipamiento por unidad de actividad (Zivkovic *et al.*, 2016). Cada sector y subsector es modelado en forma independiente y en función de los datos disponibles se utiliza una combinación de metodologías para modelar cada rama (Broad *et al.*, 2017). El consumo final total de energía es calculado con la siguiente ecuación (Heaps, 2016; Lixiao Zhang *et al.*, 2011):

$$EC_n = \sum_i \sum_j AL_{k,j,i} \times EI_{k,j,i}$$

Ecuación 4-33

Donde:

EC, consumo de energía agregado de un sector.

AL, nivel de actividad.

EI, intensidad energética.

k, tipo de combustible.

i, sector.

j, equipamiento.

Al lado de la transformación se puede incluir los productores de energía ya sean centrales de generación eléctrica, plantas de provisión de calor (calefacción) o refinерías. Las pérdidas de energía desde la transformación hasta la demanda también pueden ser modeladas (J. Zhou *et al.*, 2016). En caso de que la ciudad no disponga de este tipo de equipamiento, en el balance de energía se refleja que los requerimientos son importados. En la Figura 4-8 se muestran las energías renovables propuestas.

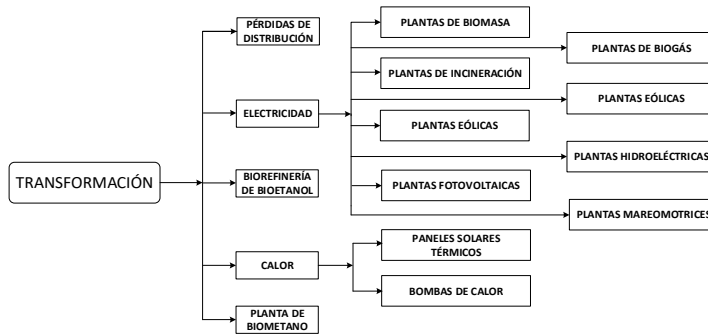


Figura 4-8. Estructura de la transformación en el modelo LEAP

Fuente: Elaboración propia

El consumo energético neto debido a la transformación ET (Heaps, 2016; Lixiao Zhang *et al.*, 2011), está dado por la Ecuación 4-34:

$$ET_s = \sum_m \sum_t ETP_{t,m} \times \left(\frac{1}{\eta_{t,m,s}} - 1 \right)$$

Ecuación 4-34

Donde:

ETP, energía luego de la transformación energética.

η , eficiencia de la transformación.

s, tipo de energía primaria.

m, tipo de equipamiento.

t, tipo de energía secundaria.

Los recursos requeridos pueden ser la energía primaria (biomasa, viento, solar, gas natural o geotérmica), energías secundarias como la electricidad o la proveniente de refinерías (ver Figura 4-9).

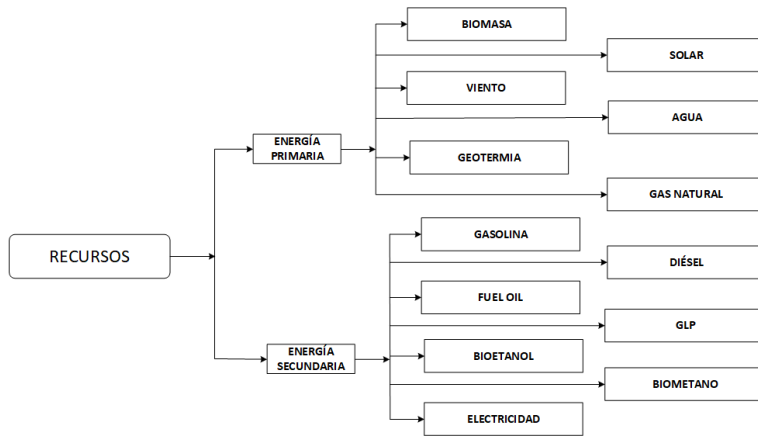


Figura 4-9. Estructura de los recursos en el modelo LEAP

Fuente: Elaboración propia

Para describir la ciudad en términos energéticos el modelo requiere información referente al consumo de energía, la estructura sectorial, tecnologías empleadas, variables poblacionales y macroeconómicas.

Además, se puede calcular las emisiones relacionadas a la demanda (CEC) y a la transformación (CET) (Heaps, 2016; Lixiao Zhang *et al.*, 2011):

$$CEC = \sum_i \sum_j \sum_n AL_{n,j,i} \times EI_{n,j,i} \times EF_{n,j,i}$$

$$CET = \sum_s \sum_m \sum_t ETP_{t,m} \times \frac{1}{\eta_{t,m,s}} \times EF_{t,m,s}$$

Ecuación 4-36

En donde:

$EF_{n,j,i}$, factor de emisión relacionado con el combustible tipo n, equipamiento j y sector i.

$EF_{t,m,s}$, factor de emisión relacionado al combustible primario tipo s, utilizado para producir energía secundaria tipo t usando el equipamiento tipo j.

Los factores de emisión son los sugeridos por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC). No se contabiliza las emisiones relacionadas al consumo eléctrico, pues esas son consideradas al inicio del proceso.

4.4 Potencial del recurso renovable

Las definiciones del potencial energético varían y dependen de los objetivos de los estudios. Fath y colegas (2015), definen los potenciales teórico, técnico y económico, mientras que Yeo y Yee (2014), a los anteriores añaden la definición de potencial de mercado: i) la potencia teórica está determinada por el recurso; ii) el potencial técnico está caracterizado por el rendimiento de la tecnología, topografía o la superficie del terreno; iii) el potencial económico, es el restringido por los precios de la tecnología o tiempo de vida útil; y iv) el potencial de mercado, está relacionado a las condiciones regulatorias y políticas de la localidad o por otras fuentes energéticas existentes.

Luego de definir las opciones más adecuadas para la ciudad de estudio y conociendo la línea base energética se propone: i) determinar el potencial técnico de cada tecnología, ii) determinar que cantidad de energía puede sustituirse con las tecnologías seleccionadas en el año base. El alcance de este capítulo no incluye consideraciones relacionadas a la configuración o estabilidad de la red eléctrica, la disponibilidad de la tecnología en la localidad o limitantes constructivos, más bien pretende ayudar a la toma de decisiones o formular políticas tendientes a la adopción de estas tecnologías en la urbe (Mavromatidis *et al.*, 2015).

En la Tabla 3-3 se anotan varias investigaciones que analizan el potencial de las tecnologías renovables. El uso de una u otra técnica dependerá de la información disponible en la localidad de estudio.

4.5 Indicadores energéticos de sostenibilidad

Para evaluar la incorporación el impacto del nuevo modelo energético los escenarios planteados se valoran con indicadores. Los indicadores utilizados podrían permitir la comparación en el tiempo, al construir, por ejemplo, políticas públicas destinadas a la promoción de las ER en la ciudad.

Los indicadores se utilizan o construyen en función de lo que se quiere medir. En este caso se propone emplear indicadores utilizados a escala nacional o regional (MEER, 2015; MICSE, 2015; OLADE, 2014). A partir del balance de energía del caso base se compara el balance del caso con ER a través de indicadores.

Los indicadores utilizados buscan evaluar la sostenibilidad al modificar la matriz energética urbana. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD) y la IEA (2014), describe 30 indicadores para analizar la situación de un país. A partir de estos la CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe), la OLADE (Organización Latinoamericana de Energía) y la GTZ (German Organisation for Technical Cooperation) (CEPAL/OLADE/GTZ, 2003), identifican 8 indicadores de sustentabilidad adecuados para América Latina.

En el caso de Ecuador por la disponibilidad de información se eligen 6 de estos indicadores para evaluar la sustentabilidad energética urbana (Guayanlema, Fernández, & Arias, 2017; MICSE, 2015).

En otro estudio se identifican 29 indicadores para el sector energético que contempla la dimensión energética, social, económica y ambiental (García, F., Hernández & Luna, 2011). En el caso de indicadores energéticos urbanos Ziebell y Singh (2018), establecen un conjunto de 6 indicadores que incluyen el consumo, recuperación, transformación y explotación de energía en cuatro infraestructuras urbanas.

Los indicadores que se utilizan igualmente deben formularse en función de la información disponible (OECD/IEA, 2014). Asimismo, se ha preferido aquellos que utilizan variables que no tiene sinergia con otras. Es decir, se prefieren indicadores cuyas variables no se modifican si se modifican otras variables que los componen. Por ejemplo, aunque la intensidad energética es un indicador comúnmente utilizado, (el consumo final de energía en relación con el producto interno bruto), se desconoce cuánto se alterará el PIB, si, por ejemplo, se dinamiza la colocación de sistemas energéticos renovables.

De la literatura revisada no se encontró indicadores que permiten valorar el cambio de paradigma del modelo urbano utilizando ER. No obstante, algunos de los indicadores que se plantean en varios reportes y que miden la estructura energética de los países son también aplicables al nuevo paradigma. En la Tabla 4-14 se muestran los indicadores que miden la sostenibilidad y que son aplicables en las ciudades. A más de ello se incluye la bibliografía en la cual se sustentan.

Tabla 4-14. Indicadores energéticos de sostenibilidad

Dimensión	Indicador	Unidad	Fuente
Económica	Autarquía	%	(CEPAL/OLADE/GTZ, 2003)
	Precio de la energía	USD/BEP	(García, F., Hernández & Luna, 2011)
	Precio medio de la energía	USD/BEP	(García, F., Hernández & Luna, 2011)
Ambiental	Uso de la energía renovable en la oferta de energía	%	(CEPAL/OLADE/GTZ, 2003)
	Uso de la energía renovable en la oferta de electricidad	%	(García, F., Hernández & Luna, 2011)
	Pureza de la energía	CO ₂ /BEP	(CEPAL/OLADE/GTZ, 2003)
Sociedad	Empleo	Empleos-año	(OECD/IEA, 2014)

Fuente: Elaboración propia

4.5.1 Indicadores económicos.

4.5.1.1 Autarquía energética.

Es un indicador que mide la participación de las importaciones en la oferta energética (CEPAL/OLADE/GTZ, 2003). También se define como el grado de dependencia energética, en este caso de la ciudad, puesto que relaciona las importaciones y la oferta bruta de energía (Energy Sector Management Assistance Program, ESMAP, 2003; MEER, 2015). Para calcular el peso de las importaciones de energía en la matriz energética urbana se utiliza la Ecuación 4-37.

$$AE = \frac{\sum_i^m IE_p + \sum_i^n IE_s}{O_E}$$

Ecuación 4-37

En donde:

AE, autarquía [%].

IE_p, importaciones de energía primaria [BEP].

IE_s, importaciones de energía secundaria [BEP].

n, número de energéticos primarios.

m, número de energéticos secundarios.

O_E, oferta bruta total de energía (Importaciones de energía primaria + Importaciones de energía secundaria – exportaciones de energía primaria – exportaciones de energía secundaria+ variación de inventario-energía primaria y secundaria no aprovechada – producción de energía secundaria) (IDEE, 2016a)[BEP].

4.5.1.2 Precio de la energía.

El precio de cada energético expresado en la Ecuación 4-38 se lo obtiene a partir de los costos de producción a más de utilidades (Ut) e impuestos (Im).

$$PE_j = Ce * (1 + Ut) * (1 + Im)$$

Ecuación 4-38

Donde:

PE_j, precio del energético j [USD/BE].

C_e, coste de producción de la energía (C_{pb} biocombustible, C_{el} electricidad o C_c, calor) durante su vida útil [USD/BEP].

Ut, utilidad empresarial [%].

Im, impuestos [%].

El costo de producir energía utilizando las energías renovables se calcula utilizando la Ecuación 4-22.

4.5.1.3 Precio medio de la energía al consumidor final.

Basado en García *et al.* (2011) se propone los precios medios de la energía; se calculan a través de la Ecuación 4-39.

$$PME = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n PE_{jk} * E_{jk}}{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m E_{jk}}$$

Ecuación 4-39

En donde:

PME, precio medio de la energía [USD/BEP].

PE_{jk}, precio del energético k en el sector j [USD/BEP].

E_{jk}, cantidad de energía del energético k en el sector j [BEP].

m, número de sectores de consumo.

n, número de energéticos requeridos en la ciudad.

4.5.2 Indicadores ambientales.

4.5.2.1 Uso de las energías renovables en la oferta total de energía.

Es la participación o aporte de las renovables en la matriz energética urbana. La Ecuación 4-40 permite encontrar este indicador (Guayanlema *et al.*, 2017).

$$UR = \frac{\sum_i^m ER_i}{OE}$$

Ecuación 4-40

Donde:

UR, participación de las energías renovables en la oferta total de energía [%].

ER_i, oferta de la energía renovable i [BE].

O_E, oferta bruta total de energía [BE].

m, número de tecnologías de producción de energía renovable.

4.5.2.2 Uso de las energías renovables en la oferta de energía eléctrica.

Este indicador valora la participación de las energías renovables en la producción de energía eléctrica (García, F., Hernández & Luna, 2011; MICSE, 2015). La Ecuación 4-41 detalla el cálculo utilizado.

$$URe = \frac{\sum_i^m ERe_i}{OEe}$$

Ecuación 4-41

Donde:

URe, participación de la energía renovable en producción de energía eléctrica [BE].

ERe, producción de electricidad utilizando energías renovables con la tecnología i [BE].

OEe, producción total de energía eléctrica en [BEP].

m, número de tecnologías de producción de energía eléctrica con tecnologías renovables.

4.5.2.3 Pureza relativa del uso de la energía.

Este indicador relaciona las emisiones de CO₂, con el consumo energético (ESMAP, 2003; MICSE, 2015). Mediante la Ecuación 4-42 se obtiene el indicador.

$$PRe = \frac{CEC}{\sum_i^m DE_i}$$

Ecuación 4-42

En donde:

PRe, pureza de la energía [ton CO₂/BEP].

CEC, emisiones de dióxido de carbono relacionadas con la demanda de energía (ver Ecuación 4-35) [ton CO₂].

DE, demanda total de energía [BEP].

m, energéticos requeridos en la ciudad.

4.5.3 Indicadores sociales.

4.5.3.1 Empleo.

Este indicador permite comparar la cantidad de empleos relacionados con la industria energética. La Ecuación 4-43 indica como calcular este indicador.

$$Em = \sum_i^m D_i * Ie_i$$

Ecuación 4-43

En donde:

Em, empleos-año que utiliza la industria energética.

Di, demanda del energético i [BEP o GWh].

Iei, factor de empleo del energético i [empleos-año/BEP o empleos-año/GWh].

4.5.4 Normalización de indicadores.

La normalización es utilizada para estandarizar los efectos de las distintas unidades que se derivan de los indicadores, además, permiten visualizarlos en conjunto. El método de normalización lineal de reescalamiento es el utilizado en varios estudios (ESMAP, 2003; Guayanlema *et al.*, 2017; MEER, 2015) y consiste en transformar las distintas unidades a un intervalo entre 0 y 1 (Schuschny & Soto, 2009). De esta manera, el mayor desempeño de sostenibilidad se tendrá cuando el indicador tenga el valor de 1.

Con la Ecuación 4-44 se obtiene el reescalamiento:

$$y = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

Ecuación 4-44

En donde:

y, índice normalizado.

x, valor actual del indicador.

x_{min}, valor mínimo de la escala propuesta.

x_{max}, valor máximo de la escala propuesta.

Las escalas propuestas se determinan a partir de criterios que pueden ser arbitrarios y están relacionados con los rangos que los indicadores puedan alcanzar (MEER, 2015). Para este trabajo se proponen las descritas en la Tabla 4-15.

Tabla 4-15. Parámetros de normalización de indicadores

Indicador	x _{max}	x _{min}	Unidades
Autarquía	0	1	
Precio de la energía	10	400	USD/BEP
Precio medio de la energía	40	70	USD/BEP
Uso de la energía renovable en la oferta de energía	1	0	
Uso de la energía renovable en la oferta de electricidad	1	0	
Pureza de la energía	0,1	0,5	t CO ₂ /BEP
Empleo	1000	300	Empleos-año

Fuente: Elaboración propia

5 EL CASO DE LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR

*Tú que exploras en torno y ves los signos, sabrás decirme
hacia cuál de estos futuros nos impulsan los vientos propicios.*

Ítalo Calvino

En este capítulo se aplica la metodología expuesta a la ciudad de Cuenca en Ecuador. Se describe en forma general a la ciudad, para luego hacer un análisis extenso de su situación en términos de la energía directa que requiere. Se aplica el método de contabilidad de flujos de energía utilizado para inventariar el metabolismo urbano de energía en la ciudad, para ello utiliza el *software* LEAP, para formular el balance de energía y diagrama de Sankey del caso base. Se desagregaron los principales sectores de consumo urbano (residencial, comercial, industrial y transporte) con un detalle que permite entender los principales usos energéticos. Se establecieron los portadores energéticos tanto la electricidad como los derivados de combustibles fósiles utilizados. El inconveniente principal para describir la ciudad bajo este enfoque es la falta de información, por lo que no solo se recurrió a reportes institucionales sino a solicitud directa de datos a entidades que manejan la energía, transporte o catastros.

Utilizando el método multicriterio PROMETHEE se seleccionaron tecnologías renovables que pueden sustituir a los energéticos empleados en el transporte, calentamiento de agua o pueden producir electricidad. Se requirió una consulta a

expertos internacionales para determinar los pesos de los criterios. Los criterios cuantitativos se especificaron a partir de una extensa revisión bibliográfica, mientras que los criterios cualitativos se definieron a través de la consulta a expertos locales de la ciudad. Se llegó a establecer, que para el transporte el biogás proveniente de aguas residuales podría ser aplicable. Para la generación de electricidad podría utilizarse sistemas solares fotovoltaicos, pequeñas centrales hidroeléctricas y el biogás proveniente de vertederos controlados. Para el calentamiento de agua los resultados indican que es atractivo la implementación de paneles solares térmicos.

Se investigaron los métodos adecuados que permiten valorar el potencial energético de las cinco tecnologías consideradas. El método escogido para la evaluación del potencial energético fue establecido en función de la disponibilidad de información existente a nivel local.

Por último, se plantearon escenarios que consideran el uso de las cinco tecnologías. Con ello, se cuantifica y analiza si los recursos energéticos disponibles pueden disminuir las entradas de energía que consume la ciudad. Bajo esa condición la ciudad deja de ser únicamente receptora de energía y en sus límites se tiene la posibilidad de producir energía. La evaluación del escenario base y de los escenarios propuestos se ejecuta a partir de balances de energía y diagramas de Sankey. Además, con los indicadores de sostenibilidad energética urbana sugeridos se valora la repercusión económica, social y ambiental de la incorporación de las energías urbanas bajo el metabolismo urbano.

En este sentido, el estudio de escenarios puede proveer valiosas lecciones teóricas para contribuir a aplicaciones prácticas a mediano y largo plazo (Zivkovic *et al.*, 2016).

5.1 Descripción de la ciudad de Cuenca

Cuenca se localiza en la cordillera de los Andes, cerca de la línea ecuatorial. Es la capital de la provincia del Azuay y núcleo económico y administrativo del cantón Cuenca, Ecuador. La ciudad se encuentra entre las coordenadas geográficas 2°30' a 3°10' de latitud sur y 78°51' a 79°40' de longitud oeste y su nivel altitudinal registra una cota promedio de 2600 m s. n. m. (GAD Cuenca, 2015). En la Figura 5-1. se encuentra la localización espacial de la ciudad de Cuenca.

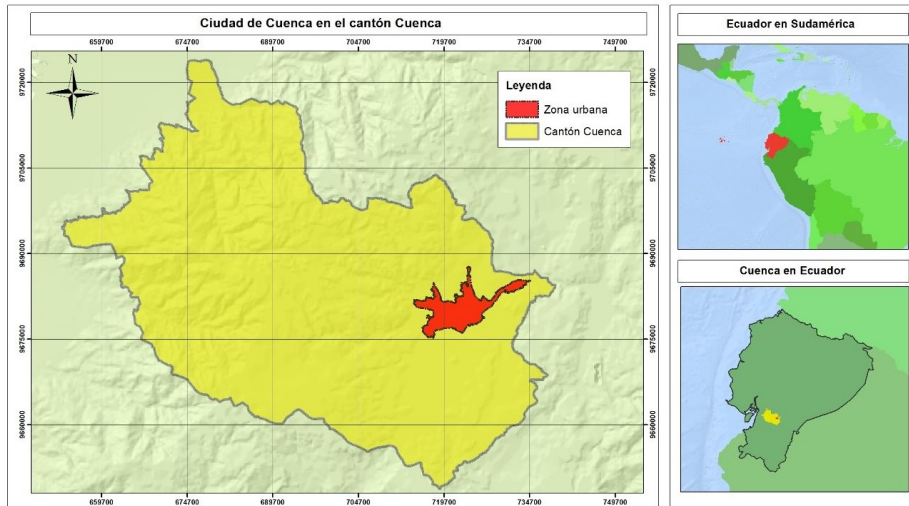


Figura 5-1. Localización espacial del cantón Cuenca, área urbana

Fuente: Elaborado según información de (INEC, 2012; Jaramillo, 2017)

Aproximadamente el 2,28 % (73 km²) del territorio cantonal (3190 km²), se encuentra urbanizado. De acuerdo con la División Política Administrativa (DPA)¹⁷, Cuenca está conformado por 21 parroquias rurales y 15 parroquias urbanas (GAD Cuenca, 2015), las cuales a su vez conforman distritos y circuitos según la planificación territorial realizada por la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo del Ecuador (Senplades). El cantón Cuenca está desconcentrado en dos distritos, el Norte dividido en 20 circuitos y el Sur conformado por 19 circuitos, cuya funcionalidad es proveer una mejor calidad de los servicios públicos como salud, educación y seguridad. Los circuitos corresponden a niveles administrativos de planificación más no a niveles de gobierno (Senplades, 2012).

La Municipalidad de Cuenca se encuentra descentralizada en direcciones o dependencias de ámbito político-administrativo, así como en empresas municipales que actúan directamente en la dotación de servicios básicos como agua, saneamiento, recolección de desechos sólidos, vivienda, desarrollo o brindan

¹⁷ Sistema de descentralización política-administrativa conformado por provincias, cantones y parroquias del Ecuador. La provincia representa el primer nivel de gobierno integrada por los cantones de segundo nivel y por último las parroquias que conforman el cantón y representan el nivel más bajo de gobernabilidad.

servicios sociales o de salud. La planificación estratégica nacional la realiza la Senplades. En función de la planificación se han establecido una serie de instituciones públicas, cuyo emplazamiento persigue una distribución equitativa y eficiente de servicios públicos (salud, educación y seguridad) por zonas, circuitos y distritos. La ciudad de Cuenca se encuentra en la Zona de Planificación 6 y es en donde se ubican la mayoría de las instituciones administrativas y de control de índole público. Asimismo, funcionan instituciones de rectoría zonal y otras que gestionan recursos de competencia regional (GAD Cuenca, 2015).

En la Tabla 5-1 se muestra algunas de las empresas municipales e instituciones públicas que ejercen sus funciones en la ciudad de Cuenca.

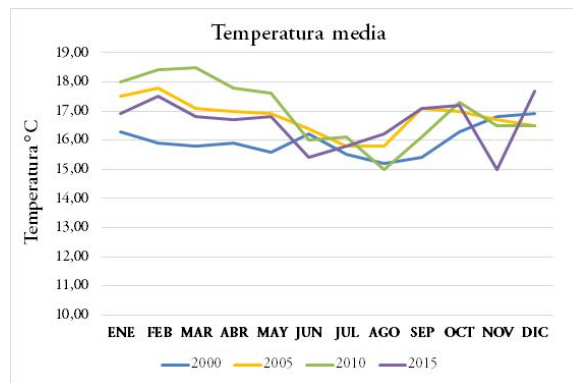
Tabla 5-1. Instituciones nacionales y locales

Competencia	Institución	Descripción
Nacional	Senplandes	Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo: administra y coordina el Sistema Nacional Descentralizado de Planificación Participativa para la planificación del desarrollo del país.
	ARCH	Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero: regula y controla las operaciones y actividades relacionadas con el aprovechamiento de recursos hidrocarburíferos.
	EERCS	Empresa Eléctrica Regional Centrosur: se encarga de la distribución y comercialización de energía eléctrica en la zona de planificación 6.
Local	GAD de Cuenca	Gobierno Autónomo Descentralizado de Cuenca, encargado de planificar el territorio cantonal.
	ETAPA	Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca: presta servicios de telecomunicaciones, agua potable, alcantarillado, saneamiento ambiental y afines.
	EMOV EP	Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte de Cuenca: organiza y controla actividades de gestión, ejecución y operación de la movilidad, tránsito, transporte terrestre y monitoreo de la calidad del aire.
	EMAC EP	Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca: presta servicios públicos de barrido, limpieza, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos sólidos.

Fuente: Elaboración propia

5.1.1 Caracterización del clima.

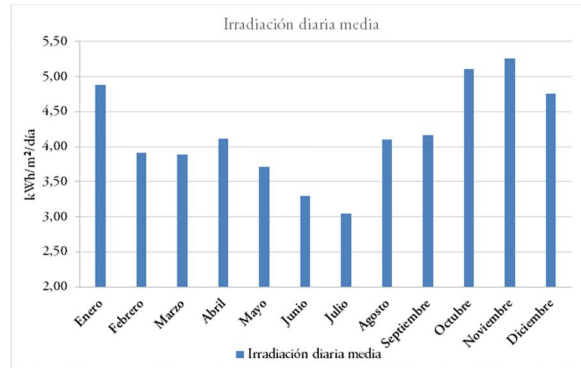
El área urbana de Cuenca se encuentra en un valle interandino que va desde los 2503 y 2710 m s. n. m. y está rodeada por una orografía compleja con elevaciones que llegan hasta los 4000 m s. n. m. (GAD Cuenca, 2015). Posee un clima templado debido a su altitud y latitud, lo que también resulta en las fluctuaciones diarias de temperatura, especialmente en días soleados. Sin embargo, no se observan estaciones debido a su latitud. La temperatura oscila entre 24 °C y un mínimo de 8 °C, aunque temperaturas del orden de los 30 °C son típicas en días soleados (ver Gráfica 5-1).



Gráfica 5-1. Temperatura en Cuenca

Fuente: Elaborado con información de la Estación meteorológica Aeropuerto Mariscal Lamar (2017)

La irradiación promedio en la zona urbana de Cuenca (National Renewable Energy Laboratory NREL, 2016) es de 4,19 kWh/m²/día, que corresponde a 1528,51 kWh/m²/año en superficie horizontal (ver Gráfica 5-2). Se presentan máximos en enero, octubre, noviembre y diciembre.



Gráfica 5-2. Irradiación diaria promedio (0° inclinación)

Fuente: Elaborado según NREL (2016)

En cuanto a la precipitación, se denota un régimen variable debido a una configuración orográfica compleja, lo cual origina cambios considerables en el clima a cortas distancias. La información histórica (1970-2005) de la estación meteorológica Ucubamba, situada al este de la zona urbana indica una precipitación acumulada promedio de 858 mm anuales (INAMHI, 2015). Se define una estación de mayor pluviosidad entre febrero y abril, y una estación seca entre junio y agosto. Por su parte, los registros de la estación automática de la EMOV ubicada en el centro histórico de la ciudad proporciona información actualizada desde 2013 a 2016. Durante este periodo se promedia una precipitación acumulada de 651 mm, con una mínima de 447 mm en 2014 y una máxima de 909 mm en 2016 (Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte, EMOV EP, 2016).

5.1.2 Ríos de Cuenca.

Los ríos Tomebamba, Tarqui, Machángara y Yanuncay atraviesan la ciudad de Cuenca y confluyen hacia la vertiente amazónica (Figura 5-2). El Tomebamba divide a la ciudad en dos partes y recibe las aguas del río Tarqui, del Yanuncay y finalmente del Machángara. Estos ríos atraviesan íntegramente la ciudad de oeste a este, exceptuando el río Machángara que nace al norte de la provincia del Azuay y se integra a la ciudad en dirección noroeste a sureste (GAD Cuenca, 2015).

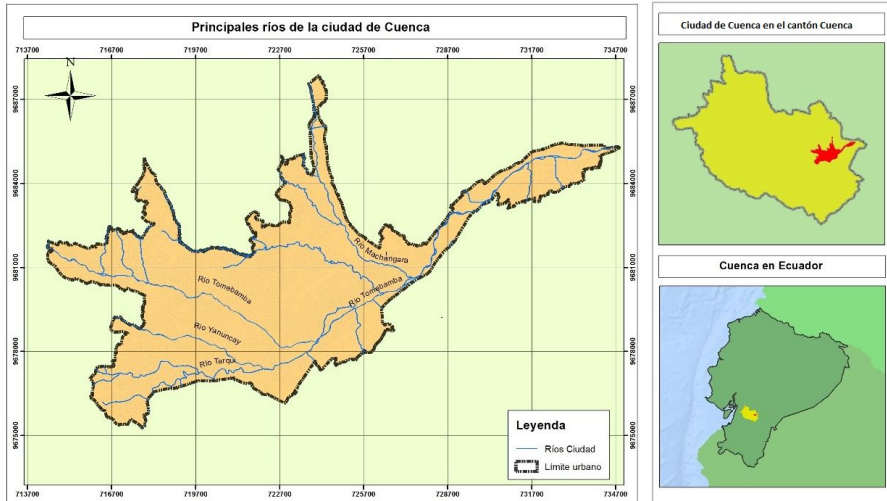


Figura 5-2. Ríos que atraviesan la ciudad de Cuenca.

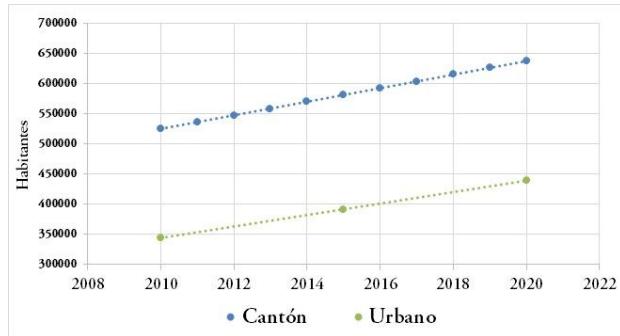
Fuente: Elaborado según (INEC, 2011b, 2012)

El caudal del río Tomebamba es aprovechado para la planta de potabilización del Cebollar, con capacidad de 1000 l/s y sirve para aproximadamente doscientas mil personas. El caudal medio del río es de 8,83 m³/s, en un año de aportación media. El caudal medio histórico presenta máximos caudales en marzo, abril y mayo (Malo-Larrea, 2014). El río Yanuncay es la fuente principal de la planta de potabilización Sústag (capacidad 400 l/s) y tiene un caudal medio de 5,17 m³/s. El ciclo anual similar al del Tomebamba (Malo-Larrea, 2014).

La planta de potabilización de Tixán (capacidad de 810 l/s) aprovecha las aguas del río Machángara que cruza parcialmente la ciudad y tiene un caudal medio de 5,95 m³/s. El río Tarqui tiene la menor aportación media entre los cuatro ríos, en un año medio es de 3,31 m³/s (Malo-Larrea, 2014).

5.1.3 Población.

Para el año 2010 el cantón Cuenca tenía una población de 505 585 habitantes, 329 928 residían en la zona urbana (65 %) y el 35 % restante en las cabeceras de las parroquias rurales y poblaciones dispersas dentro del territorio cantonal. En el último periodo censal (2001-2010), la población urbana ha presentado el 2,75 % de crecimiento anual.



Gráfica 5-3. Habitantes en el área urbana de la ciudad de Cuenca
Fuente: Elaboración propia

El Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) dispone de información referente a la población del cantón Cuenca (urbana y rural) para el periodo 2010-2020 (INEC, 2016b). En la Gráfica 5-3 se indica la distribución de la población en el cantón entre el año 1990 a 2010. Utilizando una aproximación lineal se establece que al año 2015 el 67 % de la población reside en el área urbana, esto corresponde a 391 657 habitantes.

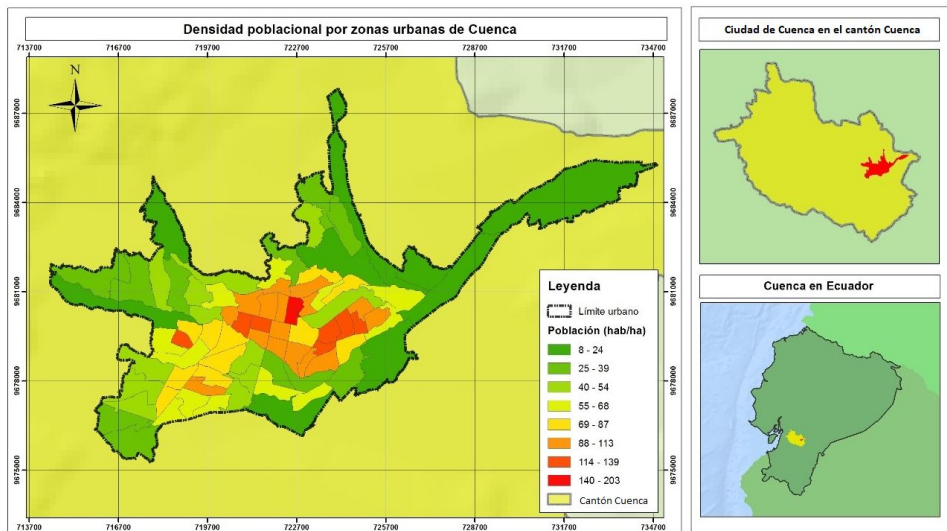


Figura 5-3. Densidad poblacional por zonas urbanas
Fuente: Elaborado según (INEC, 2011b, 2012)

Salvo datos del 2010 no se dispuso de información actualizada del número de habitantes por vivienda. Este valor se considera de 3,64 (INEC, 2010) por lo que el número de hogares para el 2015 se estimó en 107 598.

5.1.4 Economía.

El cantón Cuenca concentra gran parte de las actividades económicas que se desarrollan en la provincia del Azuay, representa casi el 90 % del valor agregado¹⁸ (VA) en la provincia y el 4,65 % del VA nacional. Las actividades económicas que mayor aportan al VA del cantón están: actividades manufactureras (20,2 %), construcción (16,8 %), actividades profesionales e inmobiliarias (14,4 %) y el comercio (11,2 %) (BCE, 2015b). Esta información no está disponible a nivel urbano, pero, la ciudad de Cuenca reúne la gran parte de establecimientos económicos, particularmente en la zona industrial donde se ubican la mayoría de las industrias manufactureras y se concentra la producción en la provincia (BCE, 2015a).

5.1.5 Usos del suelo.

En el cantón Cuenca el uso de suelo corresponde a bosques, arbustos, páramo y vegetación nativa ocupando el 60 % del territorio administrativo. Mientras que las áreas urbanas que comprenden la parte urbana y las cabeceras parroquiales ocupan cerca del 3 % (GAD Cuenca, 2015)

Dentro del límite urbano, se distinguen un área urbana continua con el 40 %, seguida del área forestal y agrícola con el 33 %, el área urbana discontinua con el 19 % y el restante 8 % corresponde a otras coberturas y usos como ríos, vías o lagunas artificiales.

La ciudad cuenta con 1,25 km² de áreas destinadas a recreación, protección y parterres. Si se incluyen espacios públicos como plazas, plazoletas y parques se tiene un total de 4,12 km², que representan el 5,64 % del territorio urbano (GAD Cuenca, 2015).

¹⁸ Según el Banco Central del Ecuador, el valor agregado es un componente del producto interno bruto. El PIB, entonces es la suma del valor agregado bruto de todas las fuentes de producción en un lapso de tiempo determinado, más las cargas tributarias a los productos y a las importaciones, subsidios a los productos, derechos arancelarios y el impuesto al valor agregado

5.1.6 Consumo de agua y producción de aguas residuales.

El consumo de agua potable en la ciudad se ha determinado en 193 l/hab/día para el año 2015. El consumo total se aproxima a los 33 millones de m³ si se considera el consumo de la zona urbana y periurbana de la ciudad. El mayor consumidor es el sector residencial con el 81 %, seguido del sector comercial con el 9 %, sector especial 6 %, el sector industrial y de la construcción con tan solo el 3 % (Jaramillo, 2017).

En la ciudad de Cuenca las actividades domésticas, comercios, industrias producen alrededor de 50 millones de m³ de aguas residuales. La cobertura de alcantarillado en la ciudad alcanza el 95 %, cuyas aguas residuales son tratadas en la planta de tratamiento de Ucubamba.

5.1.7 Emisiones.

A nivel cantonal el uso de combustibles fósiles generó 89 200 t de emisiones contaminantes (NO_x, CO, COV, SO₂, PM) para el año 2014. Mientras que las emisiones de CO₂ fueron de 1 372 434 t. Según información disponible del inventario de emisiones 2007, se estima que la ciudad es responsable del 74 % de estas emisiones (EMOV EP, 2015; Jaramillo, 2017).

El transporte es el sector con mayor representatividad en la emisión de contaminantes atmosféricos. El tráfico vehicular es el mayor emisor de CO₂ y N₂O, con el 58 % y 79 % respectivamente. La industria también tiene una importante participación en la emisión de CO₂ (27 %) (EMOV EP, 2015).

5.1.8 Producción de residuos sólidos.

La cobertura de recolección de residuos en la zona urbana llega al 100 %, los cuales son dispuestos en el vertedero controlado de Pichacay, en la parroquia de El Valle a 21 km de la ciudad (EMAC, 2017). En términos totales, la ciudad de Cuenca produce alrededor de 100,06 kT por año de residuos sólidos, que en unidades per cápita equivale a 0,7 kg/hab/día, una producción que está por debajo del promedio de ciudades intermedias de América Latina y El Caribe (Jaramillo, 2017).

Cerca del 72 % de los residuos generados provienen de domicilios, un 16 % es generado en comercios y grandes industrias, el 12 % restante proviene de diferentes generadores particulares y cantones aledaños (EMAC, 2017).

5.1.9 Indicadores del metabolismo urbano en la ciudad de Cuenca.

Los indicadores han sido obtenidos a partir del estudio de los flujos de materiales y energía de la ciudad bajo el enfoque de metabolismo urbano¹⁹. La Tabla 5-2 muestra la evolución de los flujos entrantes y salientes de la ciudad en un periodo de 8 años, demostrando el cambio en el consumo de recursos y contaminación ambiental por persona. Más adelante se hace un análisis detallado de los flujos de energía.

Tabla 5-2. Evolución del metabolismo urbano de la ciudad de Cuenca mediante indicadores per cápita

Periodo	2007	2015	Unidades	Variación (%)
Población urbana	313 450	391 657	habitantes	24,95
ENTRADAS				
Producción de agua	278,00	256,00	l/hab/día	-7,91
Consumo de agua	199,00	193,00	l/hab/día	-3,02
SALIDAS				
Aguas residuales	333,00	357,00	l/hab/día	7,21
Emisiones CO ₂ -eq	2,29	2,60*	t/hab/año	13,53
CO	85,42	108,54*	kg/hab/año	27,07
SO ₂	4,43	3,00*	kg/hab/año	-32,28
NOX	16,54	14,86*	kg/hab/año	-10,16
PM	2,79	2,55*	kg/hab/año	-8,60
Residuos sólidos (total)	0,65	0,7	kg/hab/día	7,69

*Dato del año 2014

Fuente: (Jaramillo, 2017)

En la Tabla 5-2 se advierte que el incremento de la población no ha producido necesariamente un incremento en el consumo y producción de agua. Esto se debe principalmente a campañas de ahorro de agua y reducción de pérdidas. Las necesidades de energía en el periodo analizado también se han incrementado con

¹⁹ El autor de esta tesis dirigió el proyecto de titulación de pregrado: Estudio de metabolismo urbano en la ciudad de Cuenca, de Jaramillo (2017), cuyo objetivo fue determinar los flujos de materiales, agua y energía de la ciudad.

variaciones según el tipo de combustible. La cantidad de aguas residuales aumentaron debido al mayor emplazamiento de la red de alcantarillado. En cuanto a las emisiones salvo el CO₂ y CO, los óxidos de azufre, material particulado y óxidos nitrosos tienen una disminución debido al cambio del parque automotor, así como la implantación en el control vehicular principalmente. En el caso de los residuos sólidos se tiene un ligero incremento atribuible al sector comercial e industrial puesto que a nivel doméstico estos no han variado (Jaramillo, 2017).

5.1.10 Cuenca como ciudad intermedia.

Se denominan ciudades intermedias aquellas que no superan el millón de habitantes, y desde el punto de vista administrativo se consideran como ciudades más gobernables en donde hay mayor capacidad de gestión administrativa, y a la vez ofrecen mayor calidad de vida para sus habitantes (GAD Municipal de Cuenca, 2015). Las ciudades intermedias son particularmente interesantes pues las experiencias relacionadas a la planificación y gestión pueden ser trasladadas a otras ciudades.

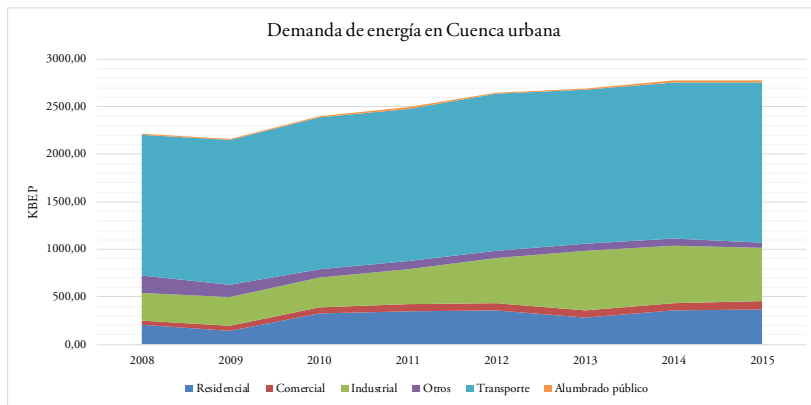
El diagnóstico de Cuenca elaborado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2014) establece que la ciudad tiene una cobertura ideal en cuanto a la provisión de servicios básicos como agua, saneamiento, gestión de residuos sólidos o cobertura de energía eléctrica (mayor a 80 %). En contraparte se evidencia un continuo crecimiento del parque automotor lo que provoca conflictos de tránsito y problemas de contaminación del aire. Asimismo, se destaca una expansión horizontal de la ciudad que a más de incrementar la movilidad, puede desencadenar dificultades en la provisión de servicios como agua, alcantarillado o energía (BID, 2014).

En el caso de Cuenca su condición de ser una ciudad intermedia hace que se pueda promover acciones encaminadas a gestionar sus recursos con valor energético. Sin embargo, no han existido acciones integrales que, a más de determinar los flujos energéticos, propongan el uso de alternativas energéticas con recursos autóctonos. En el año 2007 se elaboró el Plan Energético del cantón Cuenca, que incluía la parte urbana y rural (Comisión de Gestión Ambiental de Cuenca, CGA Cuenca, 2007). En este reporte se realizó una prospectiva energética para 10 años, y se advirtió que la falta de datos impedía que se realice una planificación energética integral. Dentro de los escenarios evaluados se analizó el uso de medidas de eficiencia energética y la adopción de las energías hidroeléctrica, solar fotovoltaica, térmica, eólica y biodigestores. Para el año 2015, sin embargo, el Plan de Ordenamiento del cantón

Cuenca (GAD Cuenca, 2015) no establece en forma completa la situación energética cantonal. Esto refleja tal como se indica en el reporte de IRENA (2016a) que no se integra la variable energética en la planificación municipal. Por otro lado, muestra la falta de seguimiento de las propuestas que la Municipalidad planteó en el Plan Energético del año 2007. En este mismo sentido, la información con respecto al 2007 sigue dispersa, no solo en información referente a la energía, sino a variables macroeconómicas como el PIB local.

5.2 Situación energética de la ciudad de Cuenca

En el año 2015 la ciudad de Cuenca requirió 2717,00 kBEP, esto representa un consumo per cápita de 40,33 GJ/habitante/año (6,93 BEP o 11205,49 kWh). Este consumo es mayor que el promedio ecuatoriano de 35,44 GJ/habitante/año. La Gráfica 5-4 muestra la evolución del consumo en los 7 años que se dispone de información. La tasa de incremento en el periodo de análisis fue de 3,6 %.

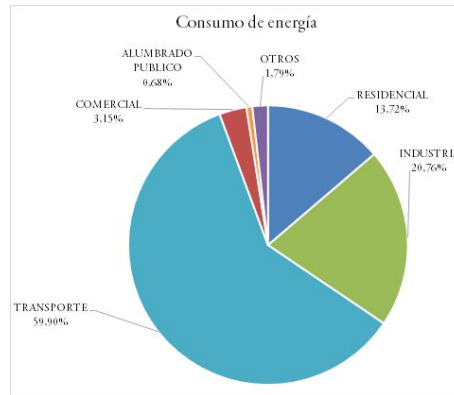


Gráfica 5-4. Demanda de energía en Cuenca urbana

Fuente: Elaborado basándose en la información de (Centrosur, ARCH-Azuay, & Centrosur, 2017)

Este consumo de energía está básicamente influenciado por el sector del transporte, que representa el 60 % del consumo total de energía, seguido por el 20,76 %, 13,72 % y 3,15 % de la industria, residencial y comercial, respectivamente (ver Gráfica 5-5). Las principales fuentes de energía son los combustibles fósiles (gasolina 36,25 %,

diésel 29,05 %, 14,81 % GLP, 8,04 % fueloil y 2,19 % GN), mientras que la electricidad aporta el 10 %. Esta estructura es similar al consumo del país (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, MICSE, 2015).



Gráfica 5-5. Participación en el consumo de energía

Fuente: Elaborado con la información de Centrosur *et al.* (2017)

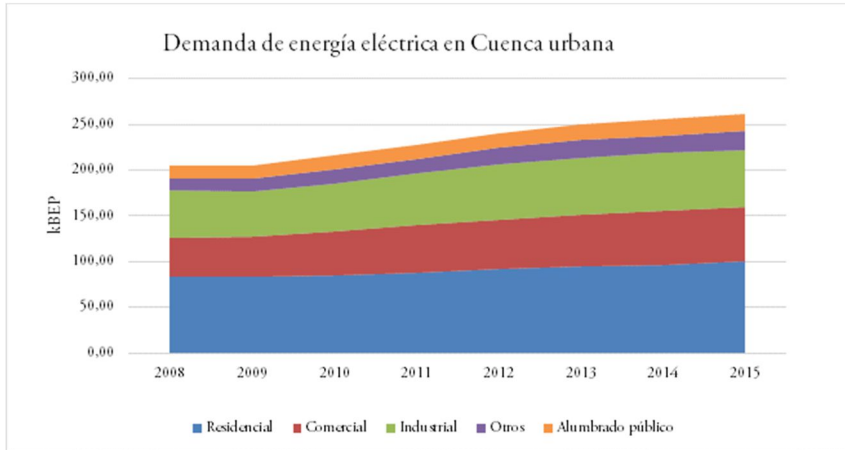
5.2.1 Energía eléctrica.

La Empresa Eléctrica Regional Centrosur provee el servicio de electricidad al área urbana de la ciudad (Centrosur, 2017)²⁰. Centrales hidroeléctricas y térmicas producen la electricidad que es distribuida a las diferentes empresas distribuidoras de energía en el Ecuador.

La combinación de energía eléctrica en Ecuador está compuesta por plantas hidroeléctricas (49 %), termoeléctricas (47 %) y el resto por tecnologías como el viento, la fotovoltaica y la biomasa (Ponce-Jara, Castro, Pelaez-Samaniego, Espinoza-Abad, & Ruiz, 2018). La energía eléctrica que se entrega en la ciudad proviene de plantas externas y no hay sistemas de generación distribuidos. Para el año 2017 entró en operación una planta de electricidad de 1 MW que utiliza el biogás del vertedero de Pichacay.

²⁰ Para la obtención de esta información se estableció un convenio específico de colaboración entre la Empresa Eléctrica Regional Centrosur y el proyecto de investigación: Abastecimiento energético renovable desde recursos endógenos, en ciudades de países en vías de desarrollo en el marco del metabolismo urbano, caso de estudio Cuenca, Ecuador, donde el autor de esta tesis es investigador.

En la Gráfica 5-6 se observa la evolución del consumo de electricidad correspondiente al sector residencial, comercial, industrial y alumbrado público. En la Tabla 5-3 se muestra la tasa de crecimiento de cada sector, en donde se destaca el consumo de actividades consideradas como otras (educación, salud), seguido del sector de alumbrado público, industrial, comercial y residencial.



Gráfica 5-6. Demanda de energía eléctrica en Cuenca urbana

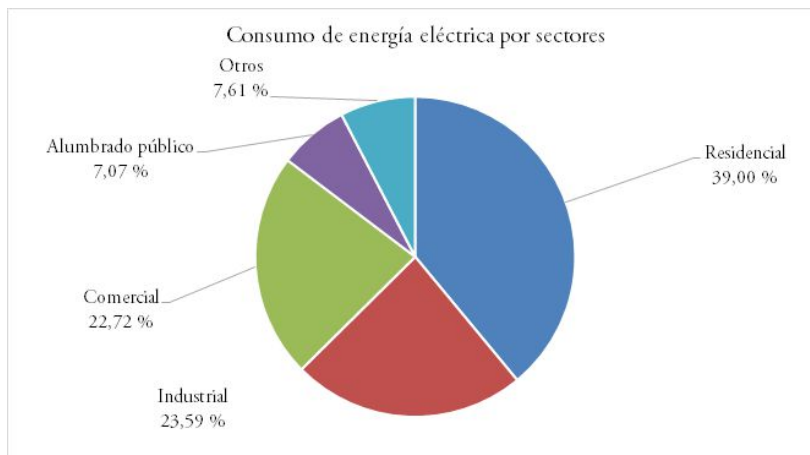
Fuente: Elaborado según la información de Centrosur (2017)

Tabla 5-3. Tasa de crecimiento de energía eléctrica 2008-2015

Sector	Tasa
Residencial	3,04 %
Comercial	5,33 %
Industrial	2,87 %
Otros	7,21 %
Alumbrado público	5,53 %
Total	3,92 %

Fuente: Elaborado de acuerdo con la información de Centrosur (2017)

Para el año 2015 el servicio de energía requerido fue 423,80 GWh (262,39 kBEP). El consumo promedio per cápita de electricidad es de alrededor de 3,89 GJ/hab/año (1082,11 kWh/hab/año). El sector residencial es el mayor consumidor de electricidad con 39 % de participación, seguido por el industrial (23,59 %) y luego el comercial (22,72 %) (ver en la Gráfica 5-7).



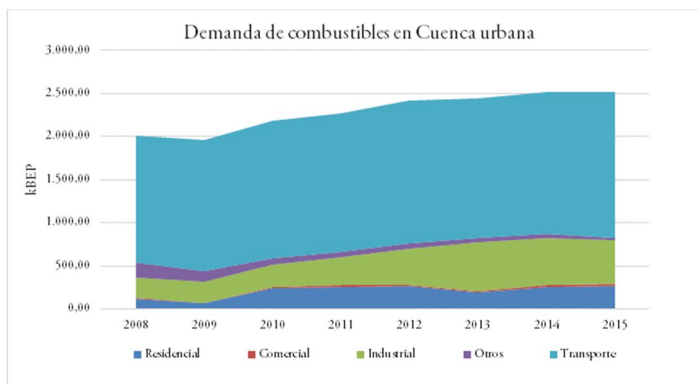
Gráfica 5-7. Participación en el consumo de energía eléctrica en Cuenca urbana

Fuente: Elaborado con la información de Centrosur (2017)

5.2.2 Combustibles.

Los datos referentes al consumo de combustibles fósiles fueron entregados por la Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero (ARCH-Azuay, 2017)²¹. Los sectores a los que se suministra combustibles son el residencial, comercial, industrial, transporte y otros con un total de 2454,62 kBEP (ver Gráfica 5-8). La tasa promedio de crecimiento de cada sector indica una variación considerable en el sector comercial, seguido por el residencial, industrial, transporte y otros. La tasa total de incremento en comparación con la energía eléctrica es muy similar (ver Tabla 5-4).

²¹ El autor de esta tesis dirigió el proyecto de titulación de posgrado: Desarrollo de un sistema de información energético en el consumo de combustibles derivados de hidrocarburos en la jurisdicción de la regional de control de hidrocarburos y combustibles AZUAY., de Vicente (2017), entre los objetivos planteados fue consolidar la información de combustibles fósiles utilizados en el cantón Cuenca.



Gráfica 5-8. Demanda de combustibles en Cuenca urbana

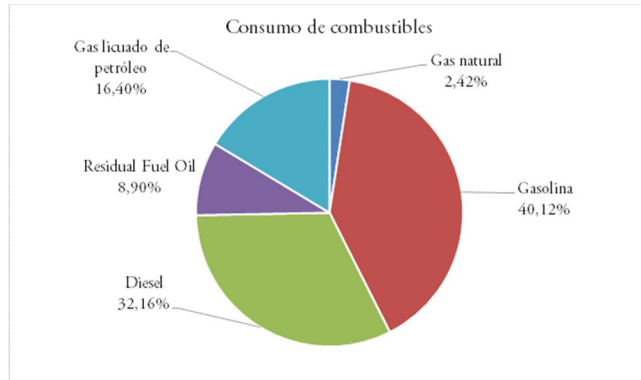
Fuente: Elaborado según la información de ARCH-Azuay (2017)

Tabla 5-4. Tasa de crecimiento promedio de combustibles 2009-2015

Sector	Tasa
Residencial	16,81 %
Comercial	129,87 %
Industrial	15,51 %
Otros	-11,82 %
Transporte	2,02 %
Total	3,56 %

Fuente: Elaboración propia

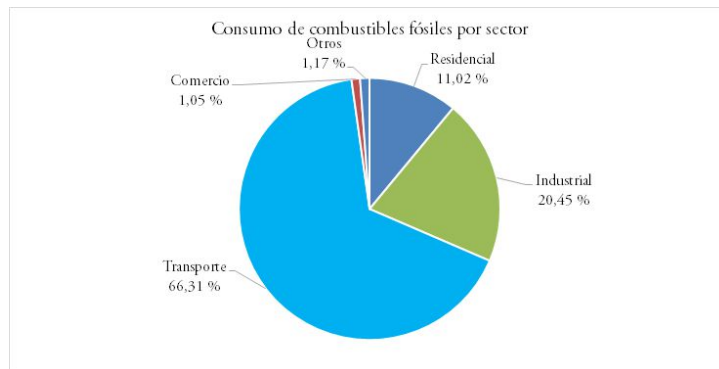
El consumo per cápita de los combustibles fue 36,44 GJ/hab/año (10122,84 kWh/hab/año). Para el año base el combustible más utilizado en términos energéticos fue la gasolina (40,12 %), seguida del diésel (32,16 %), principalmente para el sector transporte (ver Gráfica 5-9). El gas licuado de petróleo (GLP) utilizado mayoritariamente en el sector residencial tiene una proporción de 16,40 % de participación. El segmento residencial y comercial consume principalmente gas licuado de petróleo y el industrial gas natural, gas licuado, diésel y fueloil.



Gráfica 5-9. Participación en el consumo de combustibles fósiles en Cuenca urbana

Fuente: Elaborado con la información de ARCH-Azuay (2017)

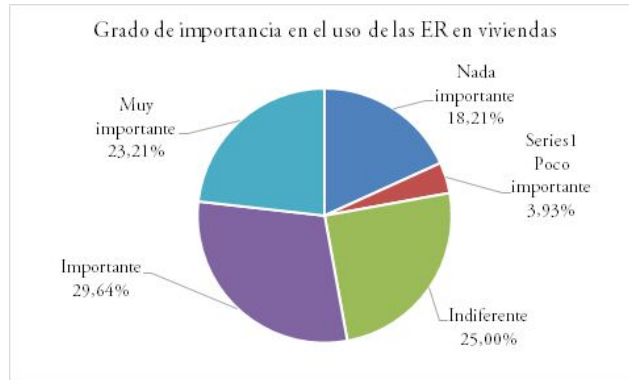
Como se muestra en la Gráfica 5-10, el transporte es el principal consumidor de combustible en términos energéticos (66,31 %). A este segmento le sigue la industria (20,45 %), luego el sector residencial y marginalmente se tiene en otras aplicaciones.



Gráfica 5-10. Participación del consumo de combustibles en Cuenca urbana

Fuente: Elaborado según información de ARCH-Azuay (2017)

Con respecto al uso de las energías renovables, el uso en la ciudad no es significativo. Una encuesta de la Universidad de Cuenca (2017) establece que un 53 % de la población urbana considera que muy importante o importante el uso de algún tipo de ER en la ciudad (ver Gráfica 5-11). El otro porcentaje no considera su uso como importante o le es indiferente.



Gráfica 5-11. Posibilidades de uso de las ER en Cuenca

Fuente: Elaborado según la información de la Universidad de Cuenca (2017)

5.3 Selección de tecnologías renovables para la ciudad de Cuenca

En la Figura 4-4. Usos de las energías renovables en la ciudad, se especifican los aportes de las once tecnologías que pueden incorporarse en la ciudad:

- (a₁) Bioetanol
- (a₂) Biomasa
- (a₃) Biogás
- (a₄) Biogás de vertederos controlados
- (a₅) Incineración
- (a₆) Energía mareomotriz
- (a₇) Energía eólica
- (a₈) Energía geotérmica
- (a₉) Energía hidroeléctrica
- (a₁₀) Energía solar fotovoltaico
- (a₁₁) Energía solar térmica

Como se anotó, no es conveniente analizar el potencial y el impacto de todas las tecnologías, por lo que se necesita hacer una selección. Para fortalecer la selección se utiliza el método multicriterio PROMETHEE, que a partir de las alternativas y un conjunto de criterios cualitativos y cuantitativos se identifican las opciones más adecuadas para la ciudad.

Antes de utilizar el método multicriterio PROMETHEE se establecen las siguientes restricciones dadas las condiciones de la ciudad de Cuenca:

- No se considera la energía mareomotriz, pues no existe este recurso.
- Dadas las condiciones climáticas el servicio de calefacción no es utilizado (Universidad de Cuenca, 2017).
- Se evita competición de tecnologías que utilizan el mismo recurso.
- En el caso de las tecnologías que pueden proporcionar usos térmicos y eléctricos o combustibles, se consideran la generación eléctrica para el análisis.

En la Figura 4-5 se muestra que la aplicación del método multicriterio se hará para tecnologías que produzcan biocombustible, generen electricidad o sirvan para la producción de calor. De esta forma, para la ciudad de Cuenca, se determinan las tecnologías según se indica en la Figura 5-4. Se tienen dos que se analizarán como sustitutos de combustibles fósiles para el transporte (bioetanol y biogás), seis tecnologías que servirían para la provisión de electricidad exclusivamente (biomasa, biogás de vertedero, incineración, eólica, hidroeléctrica y fotovoltaica), dos para el calentamiento de agua (geotérmica y solar térmica).

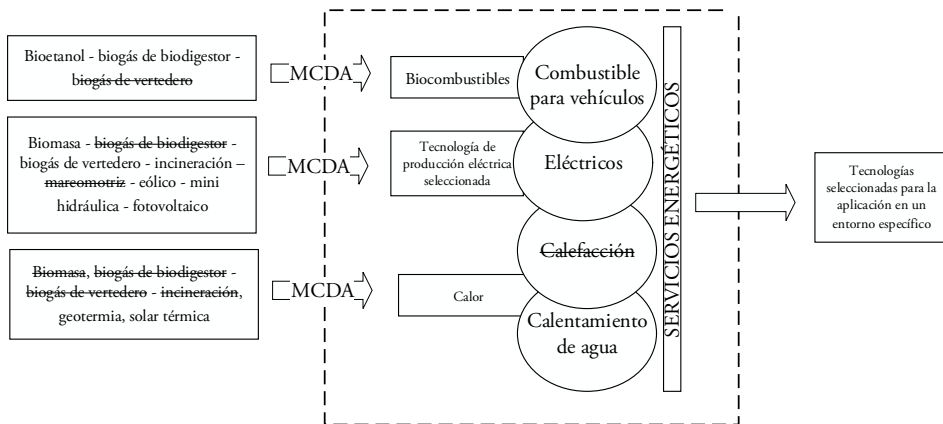


Figura 5-4. Alternativas tecnológicas para aplicarlas en la ciudad Cuenca.

Fuente: Elaboración propia

5.3.1 Pesos utilizados.

La aplicación del método multicriterio requiere el establecimiento de pesos de los subcriterios. Según la metodología propuesta se evalúan los pesos utilizando tres métodos (ver Sección 4.2.6): método de pesos iguales (EW), método de valoración directa (DRM) y calificación ordinal (OR).

Para aplicar el método de calificación directa, se planteó una encuesta utilizando formularios Google a 175 profesionales entre noviembre de 2016 a abril de 2017. Se recibieron 79 respuestas; se validaron 78. Los participantes pertenecen al sector académico (53 %), sector público (28 %), sector privado (11 %) y el resto a otras instituciones. El 33 % de los participantes son de España, el 27 % de Ecuador y una proporción de 40 % de otros países (Argentina, Chile, Honduras, Cuba). La encuesta incluyó la descripción del marco de estudio, seguida de la pregunta relacionada con la importancia de cada criterio para el establecimiento de las ER en ambientes urbanos. Se utilizó la escala de Lickert (1-10), donde 1 es menos importante y 10 el más importante (Ver Anexo 1).

En la Tabla 5-5 se especifican los valores obtenidos de las encuestas que son necesarios para aplicar la Ecuación 4-29. La Tabla permite observar que cantidad de veces P , el subcriterio C fue calificado con una de las escalas de Likert. También se indica los subcriterios C ordenados según su peso ω . Asimismo, se muestra la fracción R , que corresponde a la suma de cada calificación (P), para la suma de todas las calificaciones para cada criterio.

Con el coeficiente de Cronbach (α) se garantiza la fiabilidad del cuestionario; α es una medida cuantitativa del grado en que los ítems están relacionados entre sí; es decir, miden el grado de «homogeneidad» interna. Cuanto más se acerca a 1 se considera más adecuado, entre 0,8 a 0,9 es bueno, entre 0,7 a 0,8 aceptable, entre 0,6 y 0,7 es cuestionable. Se obtuvo un indicador de 0,88, lo que muestra que las respuestas de los participantes son homogéneas.

Con los resultados y con el fin de realizar un estudio comparativo, se aplica la Ecuación 4-30 para obtener los pesos según el método clasificación ordinal (OR). Este permite ordenar criterios según su importancia, de forma que cada subcriterio se organiza en orden ascendente y los valores esperados corresponden a los pesos.

Tabla 5-5. Principales criterios que influyen en la implantación de las ER en la ciudad

Dimensión*	i	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		Sum	ωj	
		Pi	Ri	Pi	Ri	Pi	Ri	Pi	Ri	Pi	Ri	Pi	Ri	Pi	Ri	Pi	Ri	Pi	Ri	Pi	Ri			
DT	C ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,01	7	0,09	8	0,1	9	0,12	19	0,24	34	0,44	0	78	8,42
DE	C ₈	0	0	0	0	2	0,03	0	0	1	0,01	3	0,04	6	0,08	15	0,19	22	0,28	29	0,37	0	78	8,33
DE	C ₆	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0,04	4	0,05	7	0,09	19	0,24	18	0,23	27	0,35	0	78	8,25
DT	C ₁	0	0	0	0	0	0	3	0,04	4	0,05	6	0,08	16	0,21	17	0,22	19	0,24	13	0,17	0	78	7,57
DE	C ₇	0	0	0	0	3	0,04	2	0,03	2	0,03	4	0,05	13	0,17	23	0,29	19	0,24	12	0,15	0	78	7,57
DS	C ₁₄	1	0,01	1	0,01	3	0,04	3	0,04	11	0,14	6	0,08	8	0,1	7	0,09	18	0,23	20	0,26	1	78	7,23
DT	C ₃	1	0,01	0	0	3	0,04	2	0,03	9	0,12	9	0,12	9	0,12	17	0,22	15	0,19	13	0,17	1	78	7,13
DA	C ₉	1	0,01	0	0	3	0,04	6	0,08	9	0,12	8	0,1	10	0,13	9	0,12	17	0,22	15	0,19	1	78	7,02
DS	C ₁₂	3	0,04	2	0,03	2	0,03	1	0,01	11	0,14	4	0,05	11	0,14	18	0,23	9	0,12	17	0,22	3	78	6,97
DT	C ₄	1	0,01	1	0,01	2	0,03	3	0,04	6	0,08	12	0,15	12	0,15	23	0,29	6	0,08	12	0,15	1	78	6,93
DA	C ₁₀	3	0,04	5	0,06	2	0,03	8	0,1	9	0,12	11	0,14	3	0,04	12	0,15	15	0,19	10	0,13	3	78	6,31
DS	C ₁₃	4	0,05	2	0,03	5	0,06	6	0,08	9	0,12	8	0,1	11	0,14	17	0,22	7	0,09	9	0,12	4	78	6,21
DA	C ₁₁	3	0,04	5	0,06	2	0,03	7	0,09	14	0,18	10	0,13	3	0,04	11	0,14	15	0,19	8	0,1	3	78	6,15
DT	C ₅	3	0,04	0	0	6	0,08	7	0,09	14	0,18	13	0,17	9	0,12	19	0,24	1	0,01	6	0,08	3	78	5,9

* DT, dimensión técnica; DE, dimensión económica; DS, dimensión social; DA, dimensión ambiental

** Ci, corresponde a:

Dimensión técnica	Dimensión económica	Dimensión ambiental	Dimensión social
C ₁ Eficiencia	C ₅ Inversión inicial	C ₇ Calentamiento global	C ₁₂ Empleo
C ₂ Disponibilidad de fuente primaria	C ₇ Costo de operación y mantenimiento	C ₁₀ Acidificación	C ₁₃ Aceptabilidad social
C ₃ Madurez de la tecnología	C ₈ Costo de energía	C ₁₁ Eutrofización	C ₁₄ Compatibilidad con las políticas internacionales, regionales o locales
C ₄ Obstáculos urbanos y disponibilidad de área			
C ₅ Integración arquitectónica			

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5-6 se muestran los resultados cuando los pesos son iguales (EW), cuando se aplica la clasificación directa (DRM) y la clasificación ordinal (OR). Los valores obtenidos serán luego aplicados para mostrar cómo estos influyen en el proceso de decisión.

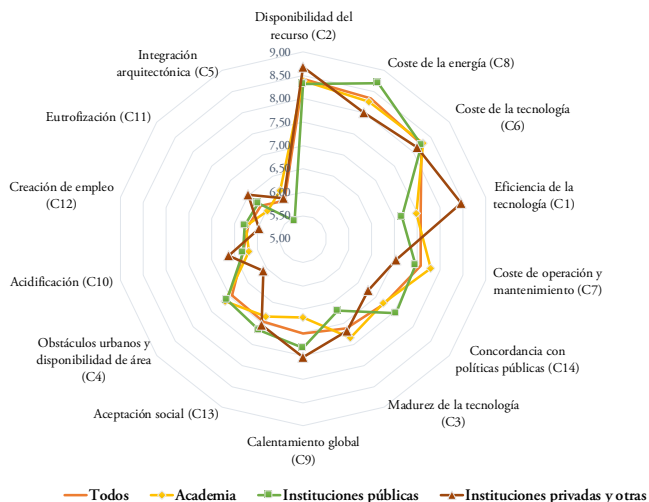
Tabla 5-6. Pesos utilizados

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄
EW	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14
DRM	7,57	8,42	7,13	6,93	5,90	8,25	7,57	8,33	7,02	6,31	6,15	6,97	6,21	7,23
OR	10,00	23,00	6,00	3,00	1,00	12,00	8,00	16,00	5,00	2,00	1,00	4,00	2,00	7,00

Fuente: Elaboración propia

5.3.1.1 Resultado de las encuestas.

En las encuestas se identificó características de los participantes, como la procedencia u ocupación. Al fraccionar la muestra por tipo de profesionales, se mantiene un alto grado de homogeneidad ($\alpha = 0,87$ para la academia, $\alpha = 0,89$ para el sector privado, $\alpha = 0,84$ otros), pero se advierte que la percepción de cada grupo difiere. Aún así, la existencia del recurso se mantiene en importancia, seguida de las cuestiones relacionadas con los costos del equipamiento y energía (ver Gráfica 5-12).

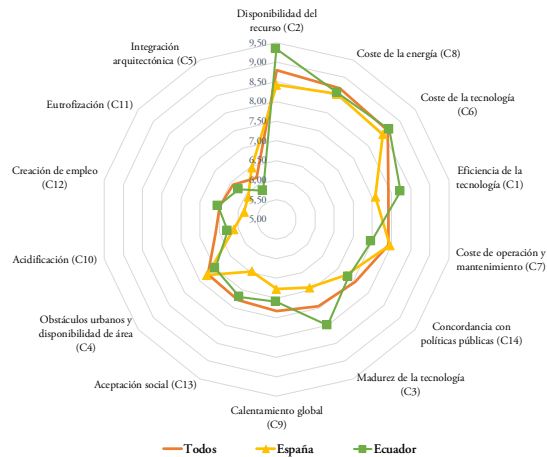


Gráfica 5-12. Resultados de las encuestas por grupos profesionales

Fuente: Elaboración propia

Para establecer las singularidades entre las opiniones de los participantes según su procedencia, se analizan los casos de España y Ecuador, que tienen la mayor participación. Según la clasificación del World Energy Council (2017), España se encuentra en la posición 13 en seguridad energética, equidad energética y sostenibilidad ambiental; mientras que Ecuador se encuentra en la posición 64. Puesto que la clasificación incluye el desarrollo del suministro de energía y otras fuentes energéticas bajas en carbono, los casos que se discuten representan a países que tienen disímiles condiciones económicas, sociales o tecnológicas.

El grado de homogeneidad según el estadístico utilizado es $\alpha = 0,80$ para España y $\alpha = 0,88$ para Ecuador. En la Gráfica 5-13 se observan diferencias en los resultados. Estas diferencias pueden estar dadas como resultado del uso e impulso de las tecnologías renovables en España frente a Ecuador, en donde se encuentran subsidiados los combustibles fósiles. Adicionalmente, el conocimiento de los encuestados respecto a los factores técnicos o disponibilidad de la tecnología en el mercado local hacen que las percepciones de estos aspectos difieran.



Gráfica 5-13. Resultados de las encuestas, Ecuador – España

Fuente: Elaboración propia

5.3.2 Subcriterios cualitativos.

Los criterios cualitativos fueron valorados mediante consulta a expertos. Según la metodología planteada (ver numeral 4.2.4.2, *Subcriterios cualitativos.*) se identificó a profesionales en la ciudad de Cuenca, cuyo perfil académico y laboral está acorde a los requerimientos de la investigación. Luego se tuvo un primer acercamiento para

explicar el estudio. A quienes accedieron se les pasó el cuestionario especificado en el Anexo 2. Se distribuyó a 30 profesionales de los cuales 16 cumplían con los requisitos previamente establecidos. En este caso, el 62 % de los encuestados pertenecen al sector académico, el 46 % al sector público y el restante al privado. En la Tabla 5-7 se indica los resultados obtenidos y la eficacia de la encuesta para los subcriterios: disponibilidad del recurso (C₂), obstáculos urbanos y disponibilidad de área (C₄), integración arquitectónica (C₅), aceptabilidad social (C₁₃) y compatibilidad con las políticas públicas (C₁₄). El criterio referente a la madurez de la tecnología (C₃) fue obtenido de referencias bibliográficas.

Tabla 5-7. Criterios cualitativos utilizados

ER	C ₂	C ₄	C ₅	C ₁₃	C ₁₄
Bioetanol	2,06	2,19	2,13	2,88	2,75
Biomasa	2,44	2,56	2,44	2,63	3,06
Biogás (aguas residuales)	2,75	2,63	2,13	2,69	2,88
Biogás (vertedero)	3,44	3,56	2,31	3,31	3,25
Incineración	2,81	2,63	2,75	2,06	2,31
Pequeña eólica	2,56	2,88	3,50	3,25	2,69
Geotérmica	2,00	1,94	2,81	2,44	2,63
Pequeña hidroeléctrica	3,56	3,31	3,50	3,56	3,88
Fotovoltaico en terrazas o fachadas	4,00	3,69	3,38	3,88	3,19
Solar térmica	4,19	3,63	3,25	4,00	3,56
α Cronbach	0,76	0,66	0,65	0,70	0,82

Fuente: Elaboración propia

A pesar de que los criterios C₄ y C₅ tienen un α menor a 0,7, se consideran adecuados para este estudio, puesto que estos criterios tienen menos peso en relación con los otros. Para mejorar este coeficiente se podría hacer una segunda ronda de encuestas.

5.3.3 Alternativas para biocombustibles para transporte.

El segmento de la transportación es el principal consumidor de combustibles en la ciudad de Cuenca y representa el 60 % de la energía. Los principales combustibles son la gasolina y el diésel con un 60,50 % y 39,50 % respectivamente (ARCH-Azuay,

2017). El consumo de combustible está relacionado al incremento del parque automotor que entre el año 2007 y el 2014 aumentó en un 50 %. De los inventarios de emisiones realizados en la ciudad se estima que más del 58 % de las emisiones de dióxido de carbono corresponden al parque automotor (EMOV EP, 2015).

Como alternativas se debe seleccionar como combustible para vehículos, el bioetanol (a_1) y biogás (a_3). Como delimitación de este trabajo, solo se analiza el biogás proveniente de biodigestores, alimentados con la materia orgánica de los residuos de las aguas residuales (Ver Figura 5-5).

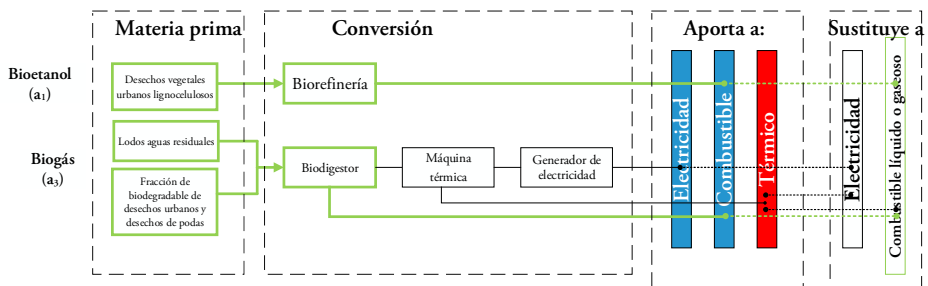


Figura 5-5. Selección de biocombustibles

Fuente: Elaboración propia

5.3.3.1 Criterios.

Subcriterios técnicos

Eficiencia (C_1)

Los recursos existentes en la ciudad son limitados, por ello la biomasa utilizada para la conversión debe ser utilizada de manera eficiente (Müller-Langer, Majer, & O'Keeffe, 2014). En este caso se considera la eficiencia de conversión energética global (overall energetic efficiencies) para la producción de los biocombustibles, que se define como la relación entre la cantidad total de energía de salida (biocombustible) para la cantidad total de energía de entrada (materia prima). De la Tabla 5-8 se concluye que la eficiencia al producir bioetanol es más alta que al producir biogás.

Tabla 5-8. Eficiencia (producción de biocombustibles)

Sistema	Eficiencia (%)	Fuente	Eficiencia promedio (%)
Bioetanol lignoceluloso	38-78	(Müller-Langer <i>et al.</i> , 2014)	56
	35	(Brown, 2007)	
	76	(Münster & Lund, 2010)	
Biogás biodigestores	44-62	(Müller-Langer <i>et al.</i> , 2014)	47
	41	(Münster & Lund, 2010)	

Fuente: Elaboración propia

Disponibilidad de fuente primaria (C₂)

La producción de los combustibles evaluados depende de la materia prima que se dispone en la ciudad. En el caso del bioetanol, la materia prima es la producida por las podas y desechos lignocelulosos. En el caso del biogás, los residuos orgánicos que se producen en la ciudad son principalmente de alimentos, no obstante, se puede obtener biogás de los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales. La valoración del potencial energético depende de la disponibilidad de información relativa a los desechos mencionados. En el caso del Ecuador, se han realizado pocos trabajos que permitan determinar la disponibilidad de estos recursos (Peláez Samaniego *et al.*, 2015). Puesto que esta información no siempre está disponible, este criterio se lo analiza en forma cualitativa. En la Tabla 5-9 se indica que el biogás como combustible resultaría más atractivo.

Tabla 5-9. Disponibilidad del recurso (producción de biocombustibles)

Sistema	Disponibilidad	Fuente
Bioetanol lignoceluloso	2,06	Entrevistas
Biogás biodigestores	2,75	Entrevistas

Fuente: Elaboración propia

Madurez de la tecnología (C₃)

Las biorefinerías de segunda generación para la obtención de combustibles líquidos para producir bioetanol se encuentran en etapa de investigación y desarrollo (EEA Report, 2013; Vargas, 2012), pero se espera que la tecnología sea comercial en los próximos años. En el caso de la producción de biogás a través de biodigestores, la tecnología está madura (Falde & Eklund, 2015). Se considera una escala cualitativa en la cual el 3 indica madurez comercial, 2 desarrollo, 1 investigación y desarrollo. Los resultados de la evaluación cualitativa se muestran en la Tabla 5-10.

Tabla 5-10. Madurez de la tecnología (producción de biocombustibles)

Sistema	I+D	D	C	Escala	Fuente
Bioetanol lignoceluloso	X	X		2	(Vargas, 2012), (EEA Report, 2013), (Jacquet <i>et al.</i> , 2015)
Biogás biodigestores			X	3	(Willis <i>et al.</i> , 2012) (Shen <i>et al.</i> , 2015) (Falde & Eklund, 2015)

Fuente: Elaboración propia

Obstáculos urbanos y disponibilidad de área (C₄)

A pesar de que las biorefinerías pueden ubicarse fuera del entorno urbano o en áreas industriales los resultados de la valoración cualitativa indican que las plantas de biogás son más atractivas en entornos urbanos que las de bioetanol (ver Tabla 5-11).

Tabla 5-11. Obstáculos urbanos y disponibilidad de área (producción de biocombustibles)

Sistema	Escala
Bioetanol lignoceluloso	2,19
Biogás biodigestores	2,63

Fuente: Elaboración propia

Integración arquitectónica (C₅)

La evaluación cualitativa indica que la implantación de las plantas de biogás y bioetanol en la ciudad de Cuenca, tienen una baja intromisión en la arquitectura de la urbe (ver Tabla 5-12). Esto se debe a que este tipo de plantas pueden ser colocadas fuera de la ciudad (cerca del vertedero controlado, plantas de aguas residuales o en ambientes industriales), por lo que se espera no afecten al entorno arquitectónico. Las dos tecnologías en este caso tienen la misma valoración, por lo que este criterio no es un factor decisivo al momento de elegir las.

Tabla 5-12. Integración arquitectónica (producción de biocombustibles)

Sistema	Escala
Bioetanol lignoceluloso	2,13
Biogás biodigestores	2,13

Fuente: Elaboración propia

Subcriterios económicos

Costo de inversión (C₆)

La implementación de plantas de producción de biocombustibles estará fuertemente condicionada a los costos de inversión. Para la comparación solo se toma en cuenta los costos de inversión de las plantas (*well to tank*), aunque un análisis más detallado debería incluir el costo de la infraestructura para el transporte, distribución y almacenamiento de los combustibles. Otro factor que exige un análisis más minucioso son los costos de los vehículos o las modificaciones que se deban realizar a los mismos para utilizar los biocombustibles estudiados (*well to wheels*).

Para evitar la influencia del escalamiento se utiliza la Ecuación 4-21. El factor de escalamiento para las plantas que producen biocombustibles varía entre 0,63 a 0,7 (Jack, 2009). Se usa $p = 0,63$, frecuentemente empleado en la literatura. En este caso el tamaño de la planta de referencia (S_2) se presenta en [GJ/año]; se calcula con la Ecuación 5-1.

$$S_2 = LHV * Cp$$

Ecuación 5-1

En donde:

LHV (poder calorífico inferior, Lower Heating Value), contenido calórico por unidad de volumen, galones en el caso del bioetanol [MJ/gal], o metros cúbicos en el caso del biogás [MJ/m³].

C_p, capacidad de producción de la planta de referencia en [gal] o [m³].

Si la planta trabaja con un factor de planta, F_p de 0,7, es posible calcular la inversión CI requerida en USD/kW, a partir de la Ecuación 5-2.

$$CI = \frac{C_{T1}}{S_1} * \frac{8760 * FP}{277,77}$$

Ecuación 5-2

En la Tabla 5-13 y

Tabla 5-14 se muestran los costos promedio de las dos opciones. La fracción entre C_{T1} y S₁ representa el costo de inversión por unidad de energía. En la Tabla 5-15 se indican los valores promedio utilizados. Se nota que el costo de las plantas de bioetanol es mayor que la de biogás, lo que está en concordancia con otras investigaciones (IEA, 2013; Müller-Langer, Gröngroft, Majer, O'Keeffe, & Klemm, 2013).

Tabla 5-13. Costos de inversión de plantas que producen bioetanol

C _p (Mi gl/año)	LHV (MJ/g)	S ₂ (10 ⁶ GJ año)	C _{T2} (Mi USD)	Referencia	S ₁ (10 ⁶ GJ año)	P	C _{T1} (Mi USD)	C _{T1} /S ₁ (USD año/GJ)	CI (USD/kW)
21,67	79,48	1,72	190,00	(Avelino Gonçalves <i>et al.</i> , 2015)	10,00	0,63	575,51	57,55	1270,45
10,57	79,48	0,84	100,00	(Avelino Gonçalves <i>et al.</i> , 2015)	10,00	0,63	476,16	47,62	1051,13
		12,00	582,00	(Schaidle, Moline, & Savage, 2010)	10,00	0,63	518,85	51,88	1145,37
52,83	79,48	4,20	309,00	(Gnansounou & Dauriat, 2011)	10,00	0,63	533,78	53,38	1178,32
52,83	79,48	4,20	290,00	(Gnansounou & Dauriat, 2011)	10,00	0,63	500,95	50,10	1105,87

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-14. Costos de inversión de plantas que producen biogás

C _p (Mi m ³ /año)	LHV (MJ/m ³)	S ₁₂ * (10 ⁶ GJ año)	C ₁₂ * (Mi USD)	Referencia**	S ₁ (10 ⁶ GJ año)	P	C _{T1} (Mi USD)	C _{T1} /S ₁ (USD año/GJ)	CI (USD/kW)
0,65	36,00**	0,02	3,48	(Ersahin, Gomec, Dereli, Arikan, & Ozturk, 2011)***	10,00	0,63	157,74	15,77	348,22
3,30	36,00	0,12	11,05	(Danielsson, 2011)	10,00	0,63	180,40	18,04	398,24
5,20	36,00	0,19	16,66	(De Clercq, Wen, & Fei, 2017)	10,00	0,63	204,26	20,43	450,91

* Los costos de producción utilizados en este documento consideran que el biogás ha pasado por un proceso de limpieza, por lo que el contenido calórico es el correspondiente al biometanol.

** 1 € = 1,12; 0,00877 USD = 1 ISK (Corona Islandesa); RMB (Renminbi) = 0,14489 USD

*** Según (Ersahin *et al.*, 2011), para biogás enriquecido. Si se utiliza 21 MJ/m³, para el biogás los costos seguirían siendo inferiores si se compara con las biorefinerías de bioetanol.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-15. Costo de inversión (producción de biocombustibles)

Sistema	USD/kW Promedio
Bioetanol lignoceluloso	1150
Biogás biodigestores	400

Fuente: Elaboración propia

Costo de operación y mantenimiento (C₇)

Dentro estos costos se pueden incluir la recolección, transporte y almacenamiento de materia prima, así como los insumos de agua, energía, pagos por supervisión, mantenimiento o el almacenamiento del biocombustible procesado. Los costos de operación y mantenimiento están en función de los costos de inversión. En la Tabla 5-16 se indican los costos de operación y mantenimiento. Se observa que el biogás utilizado como combustible tiene un costo inferior al bioetanol.

Tabla 5-16. Costo de operación y mantenimiento (producción de biocombustibles)

Sistema	% Inv.	Fuente	% Promedio	O&M USD/kW - año
Bioetanol lignoceluloso	10 5-9	(Münster & Lund, 2010) (IEA, 2013)	9,00	104,00
Biogás biodigestores	7 5-9 <15	(Münster & Lund, 2009) (IEA, 2013) (Danielsson, 2011)	7,00	28,00

Fuente: Elaboración propia

Costo de producción de energía (C₈)

Este criterio considera el valor monetario de producir una unidad de biocombustible. El costo del biocombustible se calcula según la Ecuación 4-22. Se considera como base de análisis 1 kW de potencia, con su correspondiente costo de operación y

mantenimiento, una tasa de descuento del 10 % que indica alto riesgo, propuesta por (IEA/NEA, 2015), tiempo de vida útil de cada tecnología y horas de operación. También se debería considerar el precio de la materia prima, pero se desprecia pues se utilizan desechos.

En la Tabla 5-17 se indican los resultados y los valores utilizados para el cálculo. Se advierte que el costo de producir biogás por unidad de energía es menor que en el caso del bioetanol. No obstante, como se discute más adelante, la gran variabilidad de tecnologías empleadas o los costos de la materia prima, hacen que esta relación no siempre se cumpla.

Tabla 5-17. Costos de energía (producción de biocombustibles)

Sistema	Tiempo de vida útil	Factor de planta (%)	C _{pb} USD/MWh	C _{pb} USD/(unit)
Bioetanol lignoceluloso	20	70	50,03	0,29 USD/l
Biogás biodigestores	20	70	12,22	0,12 USD/m ³

Fuente: Elaboración propia

En el caso del bioetanol, Gnansounou y Dauriat (2011) anotan que si la materia prima tuviera un valor comercial, el costo total de este biocombustible dependería entre un 50 % a 55 % de este rubro. Si no se consideran los costos asociados a la materia prima, entonces los costos de inversión representarían el rubro más importante (hasta un 75 %). En caso de que no considerarse los costos de la materia prima se tienen costos de 0,35 a 0,36 USD/l (Gnansounou & Dauriat, 2011). En el estudio de Frankó *et al.* (2016) se menciona que los costos pueden estar entre 0,77 USD/l a 1,52 USD/l dependiendo del tipo de materia prima utilizada en la producción.

En el caso del biogás, la literatura presenta diversos costos para su producción. Patterson *et al.* (2011) reportan costos conservadores que van desde los 0,14 USD/m³, hasta 0,24 USD/m³, sin embargo, afirman que los costos más realistas pueden alcanzar valores de 0,27 a 0,34 USD/m³. En otra investigación se tiene un costo de 0,25 USD/m³ (De Clercq *et al.*, 2017). Rotuna y colegas (2017) muestran la gran variabilidad de los diferentes costos del biogás antes de aplicarse métodos de

limpieza, los mismos que varían desde 0,1 USD/m³ hasta 0,43 USD/m³, debido principalmente a la materia prima o a la tecnología empleada. Con un costo promedio del biogás de 0,191 USD/m³ se calcula que para ser utilizado como combustible para transporte, luego de un proceso de limpieza podría llegar a costar 0,50 USD/m³ (Rotunno *et al.*, 2017). Al igual que en el caso del bioetanol se ha obviado el costo de la materia prima.

Subcriterios ambientales (C₉, C₁₀, C₁₁)

El sector de transporte a nivel mundial provoca el 25 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (Morales *et al.*, 2015). En la ciudad de Cuenca, es el principal uso energético. Por ello la sustitución de biocombustibles como el biogás y el bioetanol por combustibles fósiles crea expectativas por la posibilidad de reducir estas emisiones (Müller-Langer *et al.*, 2014). Siguiendo los criterios de elección se busca identificar qué tipo de combustible es el más adecuado para reducir las emisiones asociadas al calentamiento global, la eutrofización y la acidificación.

Para estimar las emisiones se utiliza el análisis de ciclo de vida, que incluye diversas etapas del proceso productivo: la producción de los biocombustibles, uso de sistemas auxiliares (electricidad, combustibles) gestión, rendimiento, o pérdidas. El análisis de ciclo de vida puede hacerse considerando la extracción de la materia prima, su transformación, distribución y uso final (*well to wheels*). También puede analizarse solo la producción de la materia prima y el proceso productivo para obtener el biocombustible (*well to tank*) (Morales *et al.*, 2015). Para este trabajo solo se analiza el segundo caso, quedando por evaluar el impacto que produciría al ser utilizado en los vehículos.

Dadas las diversas incertidumbres que se puede tener al utilizar el análisis de ciclo de vida, los resultados pueden ser únicos para la producción de un determinado combustible (Müller-Langer *et al.*, 2014). Esto hace que la comparación entre diferentes estudios que analizan un mismo biocombustible sea dificultosa y mucho más riesgoso si se requiere hacer una comparación entre diferentes tipos de biocombustibles. Letti (2016), por ejemplo, indica que los indicadores de eutrofización y acidificación para el bioetanol de segunda generación no son concluyentes. De la Tabla 5-18 a la Tabla 5-20 se incluyen las emisiones para asociadas a los subcriterios evaluados.

Tabla 5-18. Emisiones de CO₂ (producción de biocombustibles)

Sistema	g CO ₂ /GJ	Referencia	g CO ₂ /GJ promedio
Bioetanol lignoceluloso	23 000	(Schaidle <i>et al.</i> , 2010)	27 000
	-5000 a 23 000	(Parajuli <i>et al.</i> , 2015)	
	23 000 a 72 000	(Morales <i>et al.</i> , 2015)	
Biogás biodigestores	48 650	(Börjesson & Berglund, 2006)	29 000
	22 000	(Uusitalo, Havukainen, Kapustina, Soukka, & Horttanainen, 2014)	
	15 100	(Letti <i>et al.</i> , 2016)	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-19. Emisiones de SO₂ (producción de biocombustibles)

Sistema	g SO ₂ /GJ	Referencia	g SO ₂ /GJ promedio
Bioetanol lignoceluloso	14	(Schaidle <i>et al.</i> , 2010)	138
	14-510	(Parajuli <i>et al.</i> , 2015)	
Biogás biodigestores	8	(Börjesson & Berglund, 2006)	8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-20. Emisiones de NO_x (producción de biocombustibles)

Sistema	g NO _x /GJ	Referencia	g NO _x /GJ promedio
Bioetanol lignoceluloso	150	(Schaidle <i>et al.</i> , 2010)	250
	50-650	(Parajuli <i>et al.</i> , 2015)	
Biogás biodigestores	260	(Börjesson & Berglund, 2006)	260

Fuente: Elaboración propia

Subcriterios sociopolíticos**Creación de empleo (C₁₂)**

La información referente a la cantidad de empleos para el tipo de plantas analizadas es escasa. Para determinar el número de empleos en las diferentes etapas del proyecto se asumió algunas consideraciones. Puesto que la materia prima en los dos casos analizados proviene de desechos, se supone que la recolección no incrementará empleos. La capacidad de las plantas de procesamiento de biocombustible está dada en GJ año. Se asume en cada caso una vida útil de las instalaciones de 20 años, con un factor de planta $FP = 0,7$. De la Tabla 5-21 a la Tabla 5-23 se incluyen los valores obtenidos al emplear la Ecuación 4-23 a la Ecuación 4-25.

Tabla 5-21. Plantas de referencia para la producción de bioetanol

Capacidad de la planta (Mi gl/año)	LHV (MJ/gl)	Capacidad de la planta (10 ⁶ GJ año)	CIM _i (personas año)	N _i (años)	P _i (MW)	OM _i (Empleos-año)	Referencia
62,00	79,48	4,93	2944,00	3,00	223,23	58,00	(NREL, 2017)
2,64	79,48	0,21	200,00	2,00	9,51	12,00	(Morán, 2015)
50,00	79,48	3,97	2300,00*	3,00	180,02	70,00	(Swenson, 2008)

* Estimado en función de los datos anteriores asumiendo interpolación lineal.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-22. Plantas de referencia para la producción de biometano

Capacidad de la planta (Mi m ³ año)	LHV (MJ/m ³)	Capacidad de la planta (10 ⁶ GJ año)	CIM _i (personas-año)	N _i (años)	P _i (MW)	OM _i (Empleos-año)	Referencia
3,58	36,00	0,13	30,00*	1	5,83	10,00	(Fierro & Murphy, 2014)
3,00	36,00	0,11	30,00*	1	4,89	9,00	(Kovács, 2016)
3,06	36,00	0,11	30,00	1	5,00	3,00	Biogest ®

* Comunicación personal con Biogest ®.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-23 Indicador de empleo (producción de biocombustibles)

Sistema	CIM personas- año/MW	OM empleos/MW	Ie (Total de empleos-año/GWh)	
Bioetanol lignoceluloso	39,57	0,26	0,28	
	42,05	1,26	0,43	0,43
	38,33	0,39	0,29	
Biogás biodigestores	5,15	1,72	0,25	
	6,13	1,84	0,27	0,27
	6,00	0,60	0,11	

Fuente: Elaboración propia

Aceptación social de la tecnología (C₁₃)

Los resultados de las entrevistas indican que el bioetanol tiene mejor aprobación que el biogás (ver Tabla 5-24).

Tabla 5-24. Aceptación social (producción de biocombustibles)

Sistema	Escala	Fuente
Bioetanol lignoceluloso	2,88	Entrevista
Biogás biodigestores	2,69	Entrevista

Fuente: Elaboración propia

Compatibilidad con las políticas públicas (C₁₄)

En el Ecuador a pesar de que se ha realizado un importante trabajo para fomentar el uso de la biomasa, todavía su participación es marginal en la matriz energética nacional (Barragán & Espinoza, 2015). En el año 2013, el 3 % de la energía consumida provenía de leña o derivados de la caña de azúcar. En el Ecuador existen experiencias en el uso de biodigestores de bajo costo; muy pocos utilizan tecnologías tecnificadas, especialmente en la agroindustria. En el caso de residuos lignocelulosos se han

identificado varios materiales (agroindustria de maíz, hierba elefante, bambú, lechuguín), pero no hay propuestas concretas para la utilización de residuos de podas urbanas con fines energéticos (Peláez Samaniego *et al.*, 2015; Ponce-Jara *et al.*, 2018). Lo anterior está en concordancia con la evaluación cualitativa, que indica que las políticas públicas están mayor alineadas con la producción de biogás que con el bioetanol (ver Tabla 5-25).

Tabla 5-25. Compatibilidad de políticas públicas (producción de biocombustibles)

Sistema	Escala	Fuente
Bioetanol lignoceluloso	2,75	Entrevista
Biogás biodigestores	2,88	Entrevista

Fuente: Elaboración propia

5.3.3.2 Matriz de decision.

La Tabla 5-26 reúne los criterios cualitativos y cuantitativos que se utilizan para realizar la selección aplicando el método multicriterio.

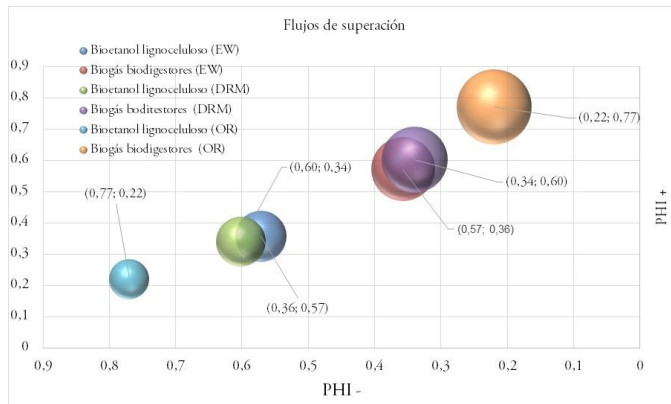
Tabla 5-26 Matriz de decisión para la producción de biocombustibles

ai	Técnico		Económico				Ambiental			Sociopolítico				
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
a1	56	2,06	2	2,19	2,13	1150	104	50	27000	250	138	0,43	2,88	2,75
a3	47	2,75	3	2,63	2,13	400	28	12	29000	260	8	0,27	2,69	2,88

Fuente: Elaboración propia

5.3.3.3 Priorización.

En la Gráfica 5-14 se presenta el diagrama de flujos correspondiente a los resultados obtenidos utilizando el *software* PROMETHEE GAIA, utilizando los diferentes pesos de los subcriterios.



Gráfica 5-14. Flujos de superación (biocombustibles)

Fuente: Elaboración propia

Los flujos netos considerando los diferentes pesos, se muestran en la Figura 5-6. Donde a₁ corresponde al bioetanol y a₃ al bioetanol. En todos los casos el biocombustible proveniente de biodigestores domina en las valoraciones.

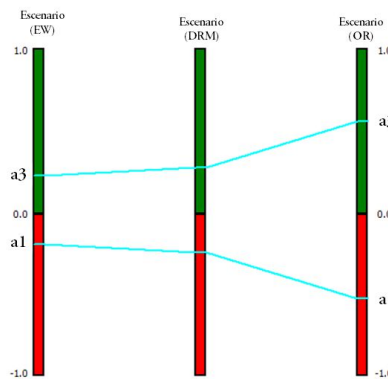


Figura 5-6. Resultados PROMETHEE, considerando diferentes pesos (biocombustibles)

Fuente: Elaboración propia

Para mejorar el porcentaje de información en el plano GAIA, se agrupan los subcriterios en criterios técnico, económico, ambiental y social. En la Figura 5-7 se presenta el diagrama de GAIA y el eje de decisión PROMETHEE, que permite ver el ordenamiento en función de los flujos netos.

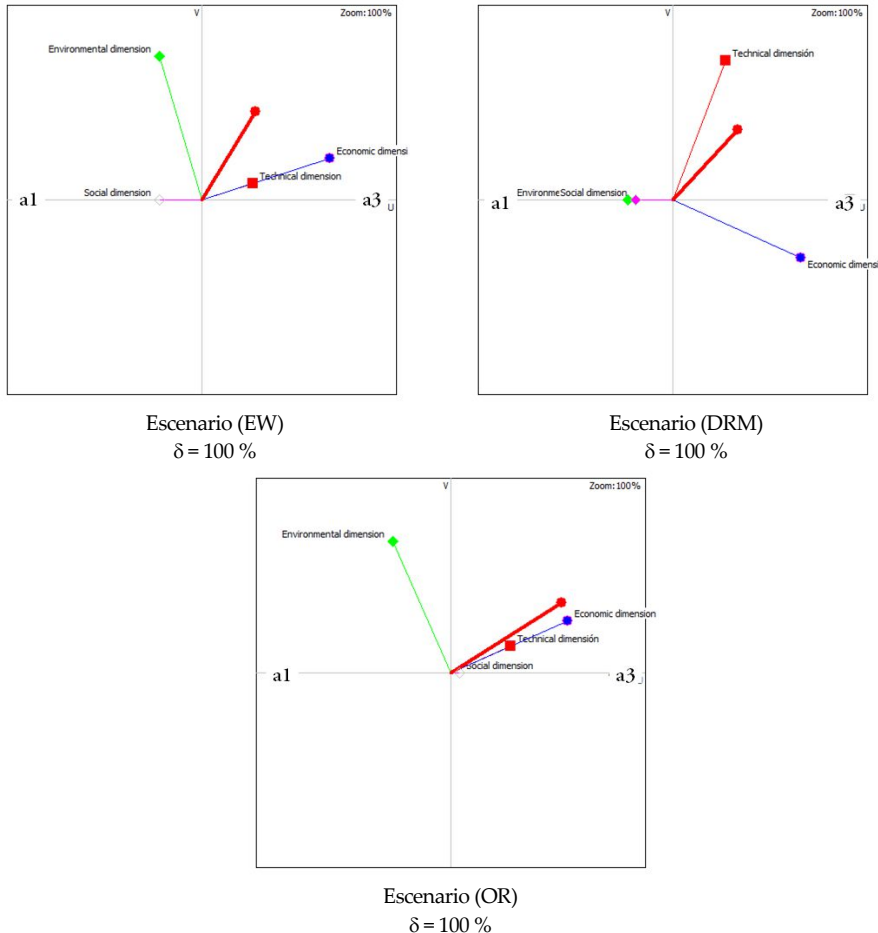


Figura 5-7. Diagramas de GAIA (biocombustibles)

Fuente: Elaboración propia

Los criterios técnico, económico y ambiental tienen igual comportamiento en el Escenario I y III. En el Escenario II, los vectores que representan a las dimensiones

económica, técnica y ambiental tienen diferentes direcciones. A pesar de ello en cada caso evaluado el biogás (a₃) tiene mejor preferencia al bioetanol (a₁).

Cuando los pesos son iguales (caso EW), el biogás de biodigestores tiene mejor valoración para la dimensión técnica y económica, mientras que el bioetanol está completamente alineado con la dimensión social y es preferible en la dimensión ambiental. Si los criterios se valoran utilizando la valoración directa (caso DRM) el biogás es preferible para la dimensión técnica y económica, y el bioetanol es preferible para la dimensión ambiental y social. Por último, utilizando la calificación ordinal se mantiene las preferencias para las dimensiones económica, técnica y social para la alternativa de biogás; para el bioetanol la preferencia es para la dimensión ambiental.

En la Tabla 5-27 se establecen las preferencias para cada criterio. El ordenamiento en este caso es menos sensible en las dimensiones técnica, económica y ambiental cuando se varían los pesos, mientras que el ordenamiento es más sensible considerando la dimensión social.

Tabla 5-27. Ordenamiento de las alternativas para cada dimensión de análisis (producción de biocombustibles)

Orden	Técnica			Económica			Ambiental			Social		
	EW	DRM	OR	EW	DRM	OR	EW	DRM	OR	EW	DRM	OR
1	a ₃	a ₃	a ₃	a ₃	a ₃	a ₃	a ₁	a ₁	a ₁	a ₁	a ₁	a ₃
2	a ₁	a ₁	a ₁	a ₁	a ₁	a ₁	a ₃	a ₃	a ₃	a ₃	a ₃	a ₁

Fuente: Elaboración propia

5.3.3.4 Toma de decisiones.

De lo analizado se concluye que el biogás proveniente de biodigestores de aguas residuales podría ser una alternativa adecuada para la sustitución de combustibles fósiles utilizados en la transportación. Como ejemplo del comportamiento de los flujos de los criterios, a continuación, se presenta los resultados al aplicar el método de valoración directa de los pesos (caso DRM).

Se advierte en el diagrama de araña que las dimensiones técnica y económica tienen flujos positivos (ver Figura 5-8). Para el biogás de biodigestores se presentan los perfiles de los subcriterios, lo que permite identificar cuáles son los que influyen en

los flujos netos de cada criterio (ver Figura 5-9). En el caso de los subcriterios técnicos solo la eficiencia tiene flujo negativo. En el criterio económico todos los subcriterios son positivos. En la dimensión ambiental el indicador que representa al calentamiento global y SO₂ son negativos. Los subcriterios relacionados con el empleo y aceptación de la tecnología tienen flujos negativos.

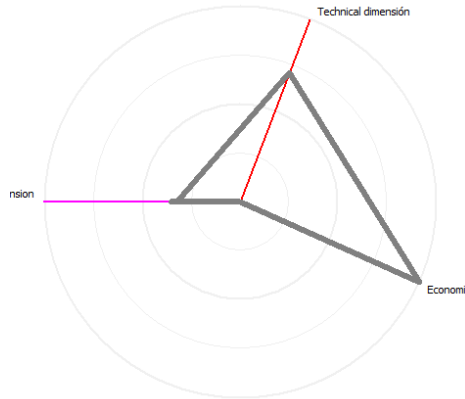


Figura 5-8. Diagrama de araña del biogás proveniente de biodigestores

Fuente: Elaboración propia

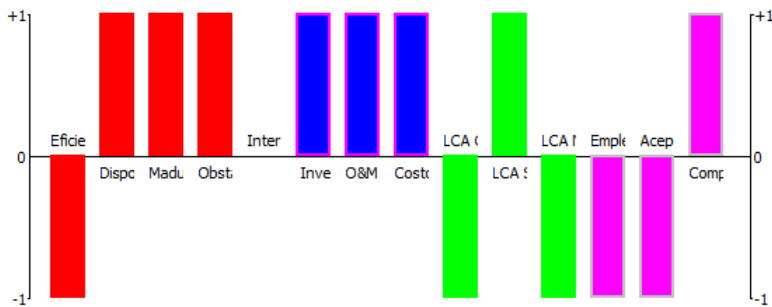


Figura 5-9. Perfil de los del biogás proveniente de biodigestores

Fuente: Elaboración propia

5.3.4 Alternativas para la producción de energía eléctrica.

La cobertura de electrificación en la ciudad de Cuenca urbana es superior al 99 %, el consumo de electricidad por habitante está cerca de los 1000 kWh anuales

(incluyendo todos los segmentos de consumo). El 39 % de la energía eléctrica es consumida por el sector residencial, seguido por el sector industrial (23,59 %), comercial con 22,72 %. El resto se reparte por igual entre el alumbrado público y otros consumos. La energía eléctrica que se distribuye en el área urbana viene de plantas de generación eléctrica ubicadas fuera.

En la Figura 5-10 se indican los recursos y seis tecnologías. Para las valoraciones, la energía mareomotriz no se considera pues la ciudad de Cuenca está alejada de mares o lagos. Asimismo, el biogás producido en biodigestores no se analiza pues este recurso se planteó para el uso como biocombustible.

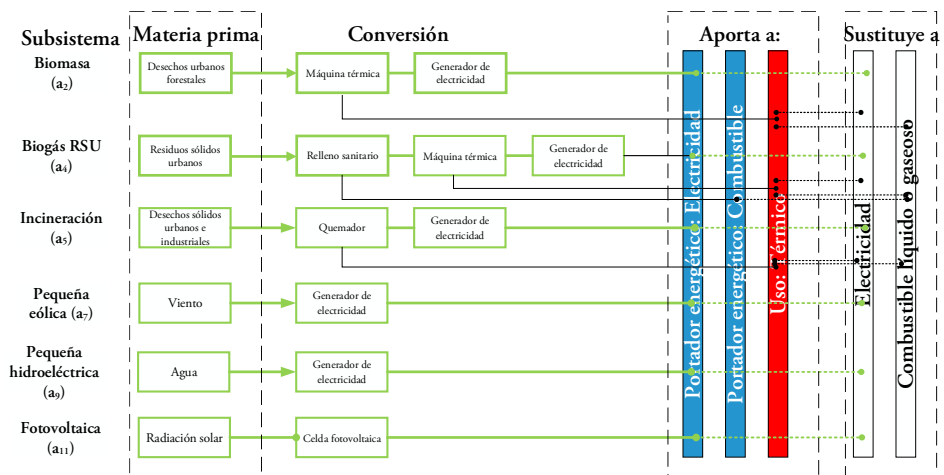


Figura 5-10. Selección de tecnologías de producción de energía eléctrica

Fuente: Elaboración propia

En el caso de las tecnologías de producción de electricidad pueden ser utilizadas en forma descentralizada (una vivienda), descentralizada compacta (varias viviendas) (J. C. Rojas, 2012), o puede ser centralizada contribuyendo con el portador energético. En este caso el consumidor es responsable de su suministro eléctrico, no obstante, dada la intermitencia del recurso la provisión de energía no es constante y se requiere dispositivos de almacenamiento. Por ello se prefiere cuando es posible que la empresa de suministro eléctrico sirva como respaldo en caso de falla o indisponibilidad del recurso (Jamal *et al.*, 2014).

5.3.4.1 Criterios.

Subcriterios técnicos:

Eficiencia (C₁)

Los datos utilizados son el promedio de las referencias citadas en la Tabla 5-28. La energía hidroeléctrica presenta alta eficiencia, luego están las tecnologías en las que hay procesos térmicos de por medio (biomasa, biogás, incineración), mientras que la eólica y fotovoltaica son las que tienen más bajas eficiencias.

Tabla 5-28. Eficiencia (producción de electricidad)

Sistema	Eficiencia (%)	Fuente	Eficiencia promedio (%)
Biomasa	21	(Shi <i>et al.</i> , 2013)	23
	25	(Panepinto <i>et al.</i> , 2014)	
Biogás de vertedero controlado	25	(de Souza <i>et al.</i> , 2014)	28
	28	(Harish K. Jeswani <i>et al.</i> , 2013)	
	33	(Zubizarreta <i>et al.</i> , 2010)	
Incineración	23	(Tan <i>et al.</i> , 2014)	23
	18	(de Souza <i>et al.</i> , 2014)	
Hidroeléctrica	29	(Zubizarreta <i>et al.</i> , 2010)	85
	90	(Xu <i>et al.</i> , 2015)	
Eólica	80	(Kilama, 2013)	20
	15	(Bukala, Damaziak, Kroszczyński, Krzeszowiec, & Malachowski, 2015)	
Solar fotovoltaica	25		18
	12	(Khan & Arsalan, 2016)	
	23	(Orehounig <i>et al.</i> , 2014)	

Fuente: Elaboración propia

Disponibilidad de fuente primaria (C₂)

Según la valoración cualitativa (ver Tabla 5-29) los recursos que tienen mayor preferencia son para la energía solar fotovoltaica, hidroeléctrica y biogás de vertedero, mientras que la biomasa e incineración tendrían menor preferencia.

Tabla 5-29. Disponibilidad del recurso (producción de electricidad)

Sistema	Valoración	Fuente
Biomasa	2,44	Entrevistas
Biogás de vertedero controlado	3,44	Entrevistas
Incineración	2,81	Entrevistas
Hidroeléctrica	3,56	Entrevistas
Eólica	2,56	Entrevistas
Solar fotovoltaica	4,00	Entrevistas

Fuente: Elaboración propia

Madurez de la tecnología (C₃)

Salvo la tecnología eólica, el resto de las tecnologías están en etapa comercial (ver Tabla 5-30). La tecnología eólica ha llegado a nivel comercial, que la hace aplicable en entornos rurales, sin embargo, para su masificación requiere mayor progreso tecnológico para su aplicación en ambientes urbanos.

Tabla 5-30. Madurez de la tecnología (producción de electricidad)

Sistema	I + D	D	C	Escala	Fuente
Biomasa			X	3	(Roberts <i>et al.</i> , 2015)
Biogás de vertedero controlado			X	3	(de Souza <i>et al.</i> , 2014)
Incineración			X	3	(de Souza <i>et al.</i> , 2014)
Hidroeléctrica			X	3	(Gsänger & Pitteloud, 2015)
Eólica	X	X		2	(Xu <i>et al.</i> , 2015)
Solar fotovoltaica			X	3	(IDAE, 2011)

Fuente: Elaboración propia

Obstáculos urbanos y disponibilidad de área (C4)

Según la valoración cualitativa (ver Tabla 5-31), las tecnologías más adecuadas para este subcriterio son la fotovoltaica, biogás de vertedero e hidroeléctrica. Las menos favorables son la biomasa e incineración.

Tabla 5-31. Obstáculos urbanos y disponibilidad de área (producción de electricidad)

Sistema	Valoración	Fuente
Biomasa	2,56	Entrevistas
Biogás de vertedero controlado	3,56	Entrevistas
Incineración	2,63	Entrevistas
Hidroeléctrica	3,31	Entrevistas
Eólica	2,88	Entrevistas
Solar fotovoltaica	3,69	Entrevistas

Fuente: Elaboración propia

Integración arquitectónica (C5)

Plantas que se podrían instalar en áreas industriales como el biogás, biomasa o incineración tienen mejores valoraciones que otras tecnologías como la fotovoltaica o hidroeléctrica que podrían afectar el aspecto urbano o la arquitectura (ver Tabla 5-32).

Tabla 5-32. Integración arquitectónica (producción de electricidad)

Sistema	Valoración	Fuente
Biomasa	2,44	Entrevistas
Biogás de vertedero controlado	2,31	Entrevistas

Sistema	Valoración	Fuente
Incineración	2,75	Entrevistas
Hidroeléctrica	3,50	Entrevistas
Eólica	3,50	Entrevistas
Solar fotovoltaica	3,38	Entrevistas

Fuente: Elaboración propia

Subcriterios económicos

Costo de inversión (C₆)

Para determinar el costo de inversión se utiliza la Ecuación 4-21, con un factor de escalamiento $p = 0,75$, según Energinet (2012). En la Tabla 5-33 se muestran los resultados si se referencia a todas las plantas para 1 MW. La producción de electricidad a partir de la incineración tiene un mayor costo por kW instalado, seguida de la biomasa, hidroeléctrica, biogás de vertedero, eólica y fotovoltaica. El coste por kW está influenciado por el tamaño de la planta de referencia, así para altas potencias se tiene costos menores que para sistemas pequeños. Mientras menor es el coste, la preferencia es mayor, por cuanto se invertirá menos por kW. No obstante, al valorarse solo tecnologías, este criterio puede ser insuficiente pues hay tecnologías como la fotovoltaica que podrían expandirse a lo largo de la ciudad y exigir mayor inversión, mientras que la hidroeléctrica, biomasa o biogás su implantación estaría condicionada a una o muy pocas plantas, por lo que se requiere menos inversión total.

Tabla 5-33. Costo de inversión (producción de electricidad)

Sistema	Costo base (USD/kW)	S ₂ (MW)	C ₁₂ (Mi USD)	Referencia	S ₁ (MW)	P	CI (USD/kW)	CI PROMEDIO (USD/kW)
Biomasa	4460,00	10,00	44,60	(IEA/NEA, 2015)	1,00	0,75	7931,13	7931,13
Biogás vertedero	RSU 1792,00*	5,00	8,96	(Lacal-Arantegui <i>et al.</i> , 2013)	1,00	0,75	2679,67	2359,37
	1400,00*	4,50	6,30	(Energy Styrelsen, 2012)			2039,07	
Incineración	11 200,00*	110,00	1232,00	(Energy Styrelsen, 2012)	1,00	0,75	36 271,56	36 271,56
Pequeña hidroeléctrica	5127,00	3,10	15,89	(IEA/NEA, 2015)	1,00	0,75	6803,05	6803,05
	7000,00	0,01	0,07	(Gsänger & Pitteloud, 2015)			2185,39	
Pequeña eólica	6940,00	0,001	0,01	(DWEA, 2015)	1,00	0,75	1342,43	1574,59
	4212,00*	0,007	0,03	(IDAE, 2011)			1195,96	
Fotovoltaico	2240,00	0,90	2,02	(IEA/NEA, 2015)	1,00	0,75	2181,77	1433,79
	2371,00*	0,01	0,02	(Energy Styrelsen, 2012)			685,81	

* Costo original en euros, se considera 1,12 dólares para cada euro (2016).

Fuente: Elaboración propia

Costo de operación y mantenimiento (C₇)

El criterio utilizado es cuantitativo y se lo obtiene a partir de los costos de inversión empleados (Tabla 5-34). La tecnología solar fotovoltaica tiene mayor preferencia, mientras que la incineración y biogás son las menos preferidas al utilizar exclusivamente este criterio.

Tabla 5-34. Costo de operación y mantenimiento (producción de electricidad)

Sistema	% Inv.	Fuente	O&M USD/kW*-año
Biomasa	3,3	(Connolly, Lund, & Mathiesen, 2016)	261,72
Biogás de vertedero controlado	7,4	(Connolly <i>et al.</i> , 2016)	174,59
Incineración	4	(Zubizarreta <i>et al.</i> , 2010)	1450,88
Hidroeléctrica	2	(Connolly <i>et al.</i> , 2016)	136,06
Eólica	3,2	(Connolly <i>et al.</i> , 2016)	50,38
Solar fotovoltaica	1,2	(Connolly <i>et al.</i> , 2016)	17,20

*Calculado en función de los costos de inversión promedio propuestos.

Fuente: Elaboración propia

Costo de producción de energía (C₈)

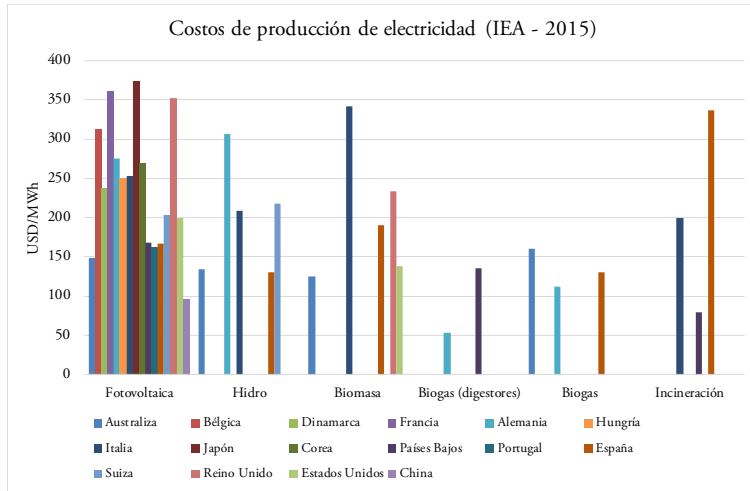
Aplicando la Ecuación 4-22 se obtienen los costos que se muestran en la Tabla 5-35. Las plantas se refieren a un 1 kW de potencia, con su correspondiente costo de operación y mantenimiento, una tasa de descuento del 10 % que indica alto riesgo (IEA/NEA, 2015), tiempo de vida útil de cada tecnología y horas de operación (LCOE, del inglés levelised costs of electricity). En este caso, más atractivo resulta generar electricidad a partir del biogás de vertedero, seguido por la fotovoltaica o hidroeléctrica.

Tabla 5-35. Costo de la energía (producción de electricidad)

Sistema	Tiempo de vida útil	Factor de planta	Horas de operación	Fuente	Cel (USD/MWh)
Biomasa	40	(Connolly <i>et al.</i> , 2016)	7000	(IEA/NEA, 2015)	153,24
Biogás de vertedero controlado	22	(Energy Styrelsen, 2012)	8000	(Zubizarreta <i>et al.</i> , 2010)	55,92
Incineración	20	(Energy Styrelsen, 2012)	8000	(Zubizarreta <i>et al.</i> , 2010)	713,92
Hidroeléctrica	70	(Xu <i>et al.</i> , 2015)	6132	(Fujiia <i>et al.</i> , 2015)	133,27
Eólica	20	(Karthikeya <i>et al.</i> , 2016)	1533	(DWEA, 2015)	153,51
Solar fotovoltaica	25	(Byrne, Taminiau, Kim, <i>et al.</i> , 2015)	1450	(IDAE, 2011)	120,80

Fuente: Elaboración propia

La diversidad de tecnologías, condiciones financieras o contextos locales, a más de la variabilidad en los costos de operación y mantenimiento, impiden generalizar los resultados. Un compendio de los costos de energía obtenidos del reporte de IEA/NEA, 2015 (tasa de descuento 10 %) para algunos países y de algunas de las tecnologías analizadas se los puede visualizar en la Gráfica 5-15.



Gráfica 5-15. Costos de producción de electricidad

Fuente: Elaboración propia

Subcriterios ambientales

Calentamiento global (C₉)

El interés en este caso es preferir las tecnologías que durante su ciclo de vida tienen menores emisiones por unidad de energía. En la Tabla 5-36 se detalla el promedio de los valores utilizados. De la información recabada en la bibliografía se destaca que la preferencia es para la generación de electricidad con plantas hidroeléctricas. El biogás de vertedero, incineración y solar fotovoltaica son las menos preferidas si se considera únicamente este subcriterio.

Tabla 5-36. Emisiones de CO₂ (producción de electricidad)

Sistema	CO ₂ (kg/TJ)	Fuente	CO ₂ (kg/TJ) Promedio
Biomasa	6232*	(University of the Aegean, 2003)	9979
	5835	(Akella, Saini, & Sharma, 2009)	
	19236	(Turconi, Boldrin, & Astrup, 2013)	
	8611	(Pehnt, 2006)	

Sistema	CO ₂ (kg/TJ)	Fuente	CO ₂ (kg/TJ) Promedio
Biogás de vertedero controlado	305 555	(H K Jeswani & Azapagic, 2016)	209 490
	17 361	(Dawoud, Amer, & Gross, 2012)	
	305 555	(Nixon <i>et al.</i> , 2013)	
Incineración	138 889	(H K Jeswani & Azapagic, 2016)	100 000
	61 111	(Nixon <i>et al.</i> , 2013)	
Hidroeléctrica	2400	(University of the Aegean, 2003)	3002
	6667	(Dawoud <i>et al.</i> , 2012)	
	1111	(De Jong, Kiperstok, & Torres, 2015)	
	2500	(Akella <i>et al.</i> , 2009)	
	3056	(Turconi <i>et al.</i> , 2013)	
	3195	(Pehnt, 2006)	
	2083	(Masanet <i>et al.</i> , 2013)	
Eólica	1794	(University of the Aegean, 2003)	4332
	2499	(Dawoud <i>et al.</i> , 2012)	
	3333	(De Jong <i>et al.</i> , 2015)	
	2222	(Akella <i>et al.</i> , 2009)	
	6111	(Turconi <i>et al.</i> , 2013)	
	2833	(Pehnt, 2006)	
	11 528	(Masanet <i>et al.</i> , 2013)	
Solar fotovoltaica	12 000	(University of the Aegean, 2003)	23 143
	13 888	(Dawoud <i>et al.</i> , 2012)	
	12 778	(De Jong <i>et al.</i> , 2015)	
	36 806	(Akella <i>et al.</i> , 2009)	
	28 195	(Turconi <i>et al.</i> , 2013)	
	27 500	(Pehnt, 2006)	
30 834	(Masanet <i>et al.</i> , 2013)		

* En la referencia se establece construcción y operación por separado.

Fuente: Elaboración propia

Acidificación (C₁₀)

En la Tabla 5-37 se indica que la energía hidroeléctrica seguida de la eólica y biomasa tiene mayor preferencia, mientras que la incineración y el biogás de vertedero tienen la menor valorización.

Tabla 5-37. Emisiones de SO₂ (producción de electricidad)

Sistema	SO ₂ (kg/TJ)	Fuente	SO ₂ (kg/TJ) Promedio
Biomasa	30,00*	(University of the Aegean, 2003)	42
	32,00	(Akella <i>et al.</i> , 2009)	
	17,00	(Turconi <i>et al.</i> , 2013)	
	87,00	(Pehnt, 2006)	
Biogás de vertedero controlado	1583,00	(H K Jeswani & Azapagic, 2016)	854
	124,00	(Dawoud <i>et al.</i> , 2012)	
Incineración	444,00	(H K Jeswani & Azapagic, 2016)	444
	7,00	(University of the Aegean, 2003)	
Hidroeléctrica	8,00	(Dawoud <i>et al.</i> , 2012)	6
	8,00	(Turconi <i>et al.</i> , 2013)	
	5,00	(Pehnt, 2006)	
	2,00	(Masanet <i>et al.</i> , 2013)	
	4,00	(University of the Aegean, 2003)	
Eólica	16,00	(Dawoud <i>et al.</i> , 2012)	12
	16,00	(Turconi <i>et al.</i> , 2013)	
	11,00	(Pehnt, 2006)	
	13,00	(Masanet <i>et al.</i> , 2013)	
	85,00	(University of the Aegean, 2003)	
Solar fotovoltaica	75,00	(Dawoud <i>et al.</i> , 2012)	80
	60,00	(Turconi <i>et al.</i> , 2013)	
	80,00	(Pehnt, 2006)	
	83,00	(Masanet <i>et al.</i> , 2013)	
	83,00	(Masanet <i>et al.</i> , 2013)	

* En la referencia se establece construcción y operación por separado.

Fuente: Elaboración propia

Eutrofización (C₁₁)

En la Tabla 5-38 se presentan los valores promedios utilizados para el análisis. La hidroeléctrica y eólica tienen mayor preferencia, seguidas de la fotovoltaica. Las tecnologías que en su operación producen emisiones por la quema de biogás, biomasa o residuos se encuentran al final del ordenamiento.

Tabla 5-38. Emisiones de NO_x (producción de electricidad)

Sistema	NO _x (kg/TJ)	Fuente	NO _x (kg/TJ) promedio
Biomasa	499,00	(University of the Aegean, 2003)	403
	500,00	(Akella <i>et al.</i> , 2009)	
	247,00	(Turconi <i>et al.</i> , 2013)	
	367,00	(Pehnt, 2006)	
Biogás de vertedero controlado	756,00	(Dawoud <i>et al.</i> , 2012)	756
Incineración**	---	---	---
Hidroeléctrica	19,00	(University of the Aegean, 2003)	12
	19,00	(Dawoud <i>et al.</i> , 2012)	
	9,00	(Turconi <i>et al.</i> , 2013)	
	12,00	(Pehnt, 2006)	
	1,00	(Masanet <i>et al.</i> , 2013)	
Eólica	6,00	(University of the Aegean, 2003)	12
	12,00	(Dawoud <i>et al.</i> , 2012)	
	21,00	(Turconi <i>et al.</i> , 2013)	
	9,00	(Pehnt, 2006)	
	12,00	(Masanet <i>et al.</i> , 2013)	
Solar fotovoltaica	72,00	(University of the Aegean, 2003)	64
	67,00	(Dawoud <i>et al.</i> , 2012)	
	27,00	(Turconi <i>et al.</i> , 2013)	
	94,00	(Pehnt, 2006)	
	59,00	(Masanet <i>et al.</i> , 2013)	

* En la fuente se establece construcción y operación por separado.

** Bajo contenido orgánico.

Fuente: Elaboración propia

Subcriterios sociopolíticos**Creación de empleo (C₁₂)**

En la Tabla 5-39 se presentan los indicadores de empleo promedio obtenidos al aplicar desde la Ecuación 4-23 a la Ecuación 4-25. La preferencia en este caso es para la fotovoltaica e incineración. La biomasa e hidroeléctrica tienen menor preferencia.

Tabla 5-39. Indicador de empleo (producción de electricidad)

Subsistema	CIM personas – año/MW	OM empleos /MW	Referencia	Fp	Ie (Total de empleos- año/GWh)	
Biomasa	4,29	1,53	(Wei <i>et al.</i> , 2010)	0,8	0,23	
	8,50	0,24	(Wei <i>et al.</i> , 2010)		0,06	
	4,00	0,14	(Moreno & López, 2008)		0,03	
	2,00	0,95	(Pembina Institute, 2004)		0,14	
	16,90	1,5	(Jay Rutovitz, Dominish, & Downes, 2015)		0,27	
Biogás de vertedero controlado	21,30	7,8	(Wei <i>et al.</i> , 2010)	0,91	1,04	
	3,71	2,28	(Wei <i>et al.</i> , 2010)		0,30	
Incineración	101,16	1,41	(IDAE & ISTAS, 2011)	0,81	0,81	
	5,71	1,14	(Wei <i>et al.</i> , 2010)		0,20	
	18,60	1,4	(Moreno & López, 2008)		0,27	
Hidroeléctrica	26,70	4,9	(J Rutovitz & Atherton, 2009; Jay Rutovitz <i>et al.</i> , 2015)	0,70	0,35	
	11,30	0,22	(Pembina Institute, 2004)		0,06	

Subsistema	CIM personas – año/MW	OM empleos /MW	Referencia	Fp	Ie (Total de empleos- año/GWh)	
Eólica	10,10	0,40	(Wei <i>et al.</i> , 2010)		0,59	
	3,80	0,14	(Wei <i>et al.</i> , 2010)		0,22	
	10,96	0,18	(Wei <i>et al.</i> , 2010)		0,47	
	7,40	0,20	(Wei <i>et al.</i> , 2010)		0,37	
	2,57	0,290	(Wei <i>et al.</i> , 2010)		0,27	
	13,00	0,20	(Moreno & López, 2008)	0,18	0,55	0,39
	3,92	0,10	(Pembina Institute, 2004)		0,19	
Solar fotovoltaica	7,9	0,30	(J Rutovitz & Atherton, 2009; Jay Rutovitz <i>et al.</i> , 2015)		0,45	
	37,00	1,00	(Wei <i>et al.</i> , 2010)		1,71	
	32,34	0,37	(Wei <i>et al.</i> , 2010)		1,15	
	7,14	0,12	(Wei <i>et al.</i> , 2010)		0,28	
	34,6	2,70	(Moreno & López, 2008)	0,17	2,82	1,29
	19,7	0,70	(J Rutovitz & Atherton, 2009; Jay Rutovitz <i>et al.</i> , 2015)		1,03	
	25,9	0,10	(Pembina Institute, 2004)		0,78	

Fuente: Elaboración propia

Aceptación social de la tecnología (C₁₃)

Revisando la Tabla 5-40, la energía solar fotovoltaica seguida de la energía hidroeléctrica y biogás tienen mayor aceptación; la energía producida en plantas de biomasa e incineración son las que tienen menor valoración.

Tabla 5-40. Aceptabilidad social (producción de electricidad)

Sistema	Disponibilidad	Fuente
Biomasa	2,63	Entrevistas
Biogás de vertedero controlado	3,31	Entrevistas
Incineración	2,06	Entrevistas
Hidroeléctrica	3,56	Entrevistas
Eólica	3,25	Entrevistas
Solar fotovoltaica	3,88	Entrevistas

Fuente: Elaboración propia

Compatibilidad con las políticas públicas (C₁₄)

En el caso del Ecuador, Barragán y Espinoza (2015) presentan un estudio que indica que desde el año 1996, se han establecido leyes, reglamentos, regulaciones o decretos en donde se articulan una serie de disposiciones referentes a las ER. En la Figura 5-11 se muestran las diferentes políticas establecidas hasta el año 2016. A lo largo del tiempo las normas han ido variando, sin embargo, se destaca su existencia, pues posibilitaría la implementación de las tecnologías renovables. A más de estas políticas, se han instituido criterios técnicos relacionados con la operación de las centrales no convencionales tanto a nivel de distribución y transmisión. Particularmente se consideran criterios para la energía solar fotovoltaica y solar termoeléctrica, eólica, pequeñas centrales hidroeléctricas (≤ 10 MW), geotérmica, biomasa, biogás y mareomotriz. A nivel urbano, no obstante, no hay disposiciones referentes al uso de estas tecnologías, lo que refleja la falta de un horizonte que prevea un cambio del modelo energético basado en generación centralizada (Ponce-Jara *et al.*, 2018).

Los resultados de la valoración cualitativa se muestran en Tabla 5-41. Mientras la energía hidroeléctrica, biogás y fotovoltaica tiene más preferencia la energía la incineración y eólica serían las que tienen menos preferencia según los criterios de los participantes de las encuestas.

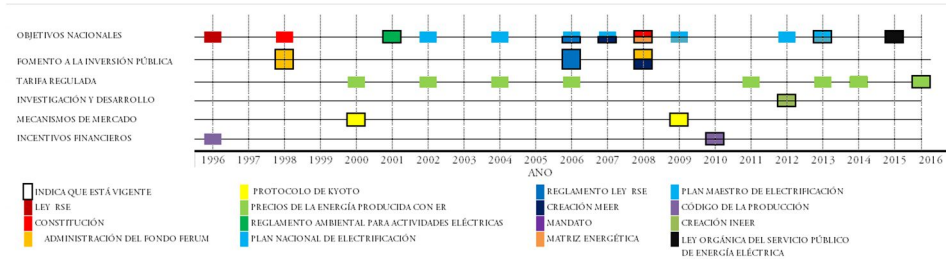


Figura 5-11. Hitos de los mecanismos de promoción de las ER en el Ecuador

Fuente: (Barragán & Espinoza, 2015)

Tabla 5-41. Compatibilidad con las políticas públicas (producción de electricidad)

Sistema	Disponibilidad	Fuente
Biomasa	3,06	Entrevistas
Biogás de vertedero controlado	3,25	Entrevistas
Incineración	2,31	Entrevistas
Hidroeléctrica	3,88	Entrevistas
Eólica	2,69	Entrevistas
Solar fotovoltaica	3,19	Entrevistas

Fuente: Elaboración propia

5.3.4.2 Elaboración de la matriz de decisión.

En la matriz de decisión (Tabla 5-42) se presentan en cada fila las alternativas y su correspondiente valoración según los criterios establecidos.

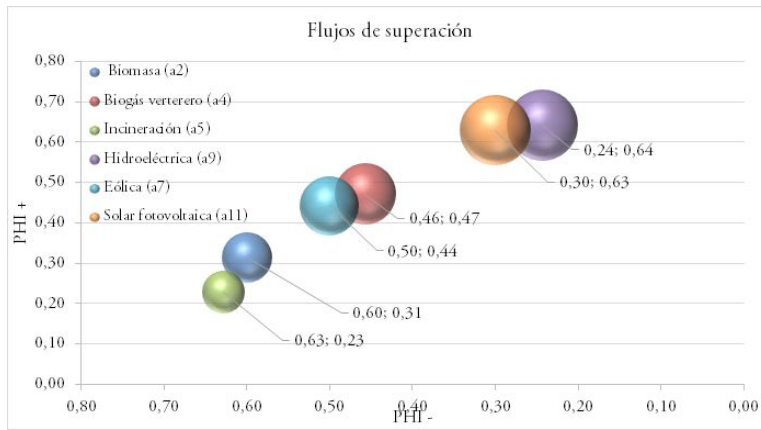
Tabla 5-42. Matriz de decisión de tecnologías de producción de energía eléctrica

ai \ cj(·)	Técnico				Económico				Ambiental		Sociopolítico			
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
a2	23,00	2,44	3,00	2,44	2,64	7931,00	262,00	153,00	9979,00	42,00	403,00	0,15	2,63	3,06
a4	38,00	3,44	3,00	2,31	2,36	2359,00	175,00	56,00	209490,00	854,00	756,00	0,67	3,31	3,25
a5	23,00	2,81	3,00	2,75	2,91	36272,00	1451,00	714,00	100000,00	444,00	n/a	0,81	2,06	2,31
a7	20,00	2,56	2,00	3,50	3,55	1575,00	50,00	154,00	4332,00	12	12	0,39	3,25	2,69
a9	85,00	3,56	3,00	3,50	3,55	6803,00	136,00	133,00	3002,00	6	12	0,35	3,56	3,88
a10	18,00	4,00	3,00	3,38	3,27	1434,00	17,00	121,00	23143,00	80	64	1,29	3,88	3,19

Fuente: Elaboración propia

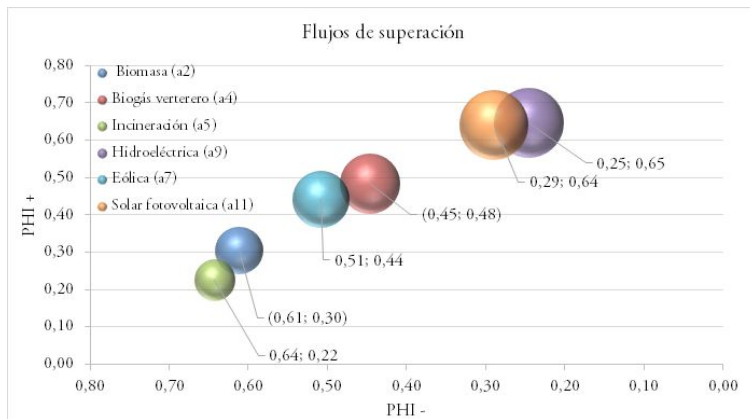
5.3.4.3 Priorización.

Desde la Gráfica 5-16 a la Gráfica 5-18 se muestran los flujos correspondientes a los resultados obtenidos utilizando el *software* PROMETHEE GAIA. Se observan los resultados al variar los pesos según la metodología propuesta: pesos iguales (EW), calificación directa (DRM) y calificación ordinal (OR).



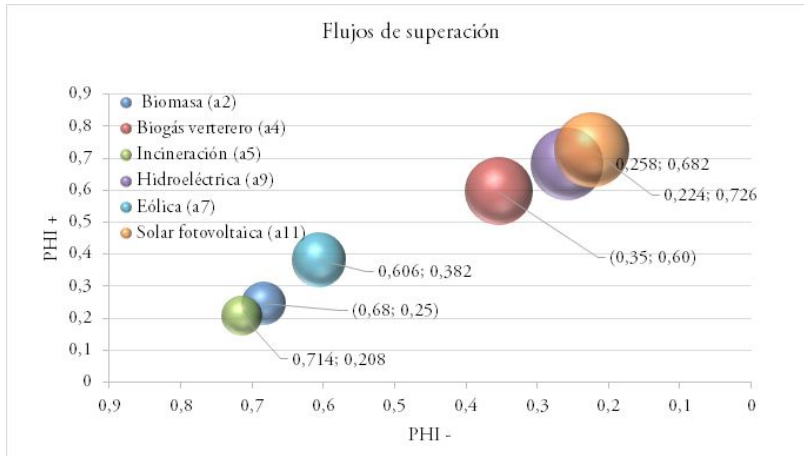
Gráfica 5-16. Flujos de superación caso EW (producción de electricidad)

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 5-17. Flujos de superación caso DRM (producción de electricidad)

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 5-18. Flujos de superación caso OR (producción de electricidad)

Las gráficas anteriores junto con la Figura 5-12 reflejan los flujos netos. Se observa que la tecnología hidroeléctrica (a9), solar fotovoltaica (a11) y biogás de vertedero (a4), tienen mejor preferencia. Le siguen la eólica (a7), biomasa (a2) e incineración (a5).

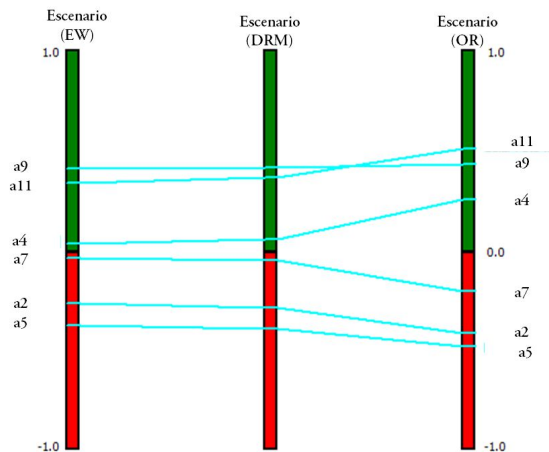


Figura 5-12. Resultados PROMETHEE, considerando diferentes pesos (producción de electricidad)

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-13 se indica el diagrama de GAIA. Se observa que al variar los pesos el criterio ambiental y económico son los menos sensibles.

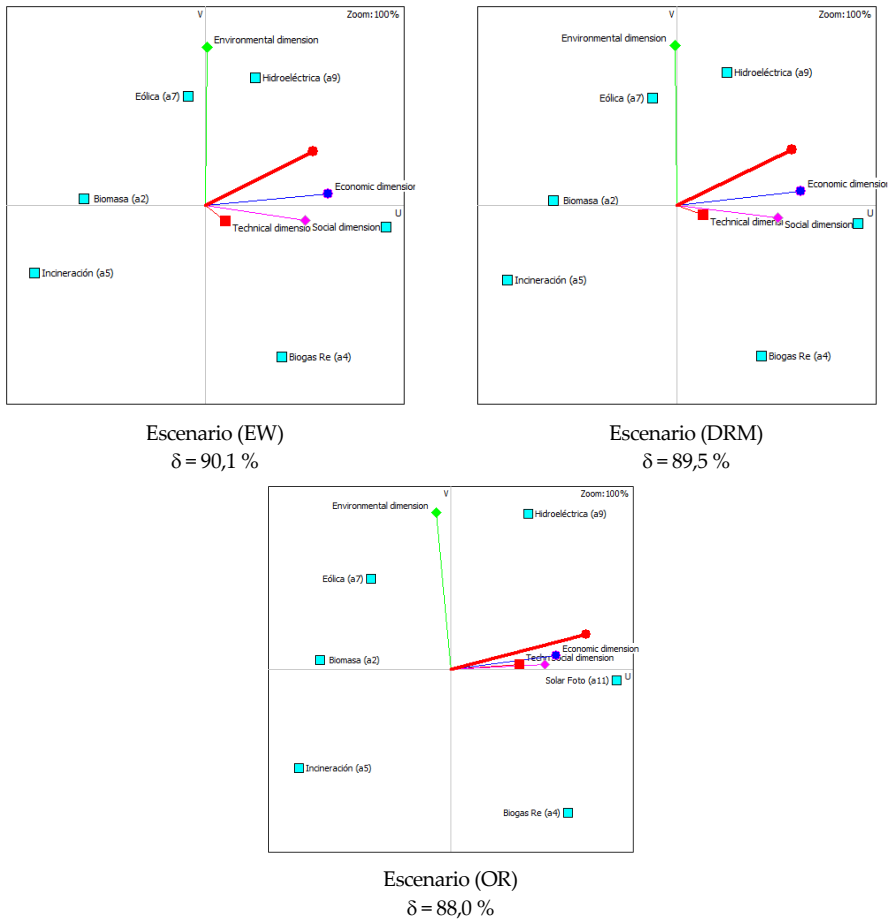


Figura 5-13. Diagramas de GAIA (producción de electricidad)

Fuente: Elaboración propia

El criterio social y técnico tienen variaciones, pero no son significativas. En el caso EW y DRM, la producción de electricidad con biogás de vertedero (a4) tiene más preferencia en la dimensión técnica y social, pero la preferencia disminuye en el caso OR. La solar fotovoltaica (a11) tiene mejor preferencia bajo las dimensiones

económica, social y técnica en el caso EW y DRM. En el caso EW y DRM, la energía hidroeléctrica es adecuada desde los puntos de vista económico y ambiental. En el caso ER también lo es en las dimensiones técnica y social.

La energía eólica (a7) es en todos los casos favorable al valorarse en la dimensión ambiental, pero no es atractiva para las otras dimensiones. El resto de las tecnologías como la biomasa (a2) e incineración (a5) no son adecuadas para las dimensiones analizadas.

El plano GAIA evalúa las alternativas con respecto a cada uno de los subcriterios (Mareschal, 2013) y para cada escenario (ver Tabla 5-43). Con respecto a la dimensión técnica, la tecnología de biogás de vertedero y la fotovoltaica son las más preferidas, mientras que la incineración y biomasa son las menos preferidas. En la dimensión económica la tecnología fotovoltaica, hidroeléctrica y biogás se encuentran mejor ranqueadas. La incineración y biomasa son las menos preferidas. En la dimensión ambiental, la tecnología, hidroeléctrica, eólica y biomasa son preferidas, mientras que la de biogás de vertedero e incineración son las que se encuentran peor ubicadas. En la dimensión social hay variaciones en la jerarquía, pero la hidroeléctrica permanece en los primeros puestos.

Tabla 5-43 Ordenamiento de las alternativas para cada dimensión de análisis (producción de electricidad)

Orden	Técnica			Económica			Ambiental			Social		
	EW	DRM	OR	EW	DRM	OR	EW	DRM	OR	EW	DRM	OR
1	a4	a11	a11	a11	a11	a11	a9	a9	a9	a11	a11	a11
2	a11	a4	a4	a4	a4	a4	a7	a7	a7	a4	a4	a4
3	a9	a9	a9	a9	a9	a9	a2	a2	a2	a9	a9	a9
4	a7	a7	a7	a7	a7	a7	a11	a11	a11	a7	a7	a7
5	a5	a2	a2	a2	a2	a2	a5	a5	a5	a2	a2	a2
6	a2	a5	a5	a5	a5	a5	a4	a4	a4	a5	a5	a5

Fuente: Elaboración propia

5.3.4.4 Toma de decisiones.

Con el fin de analizar el impacto que tendrían las tecnologías en los flujos energéticos en la ciudad de Cuenca, se estudiarán la energía hidroeléctrica, solar fotovoltaica y el biogás que proviene de vertedero (caso DRM). Con los diagramas de araña (GAIA webs), se analiza los diferentes criterios o subcriterios para cada alternativa, además, se revisa el comportamiento de los flujos individuales de cada subcriterio.

Para la tecnología hidroeléctrica los flujos para cada dimensión son positivos (ver Figura 5-14). Sin embargo, los subcriterios referentes a la intervención urbana, inversión, empleo son negativos (Figura 5-15).

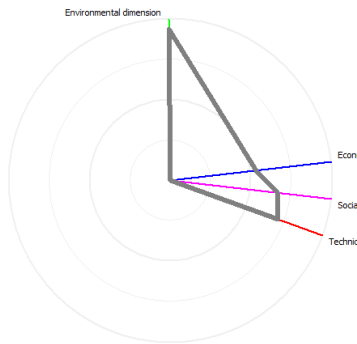


Figura 5-14. Diagrama de araña de la tecnología hidroeléctrica (Caso DRM)

Fuente: Elaboración propia

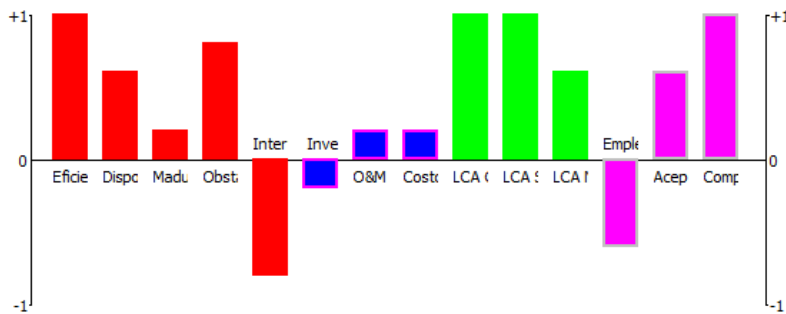


Figura 5-15. Perfil de los subcriterios de la tecnología hidroeléctrica (Caso DRM)

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la energía solar fotovoltaica en el diagrama de araña se observan los flujos netos de los criterios técnico, económico y social positivos (Figura 5-16). Al analizar individualmente los subcriterios, la eficiencia, intervención arquitectónica, emisiones de CO₂, SO₂ son negativos, el resto de los flujos son positivos (Figura 5-17).

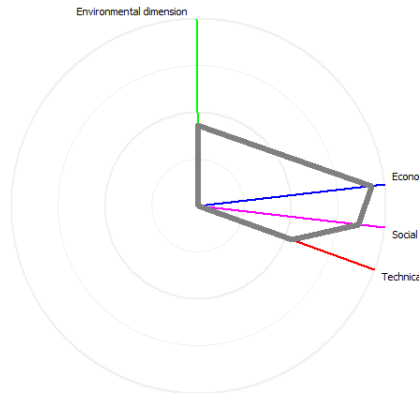


Figura 5-16. Diagrama de araña de la tecnología fotovoltaica (Caso DRM)

Fuente: Elaboración propia

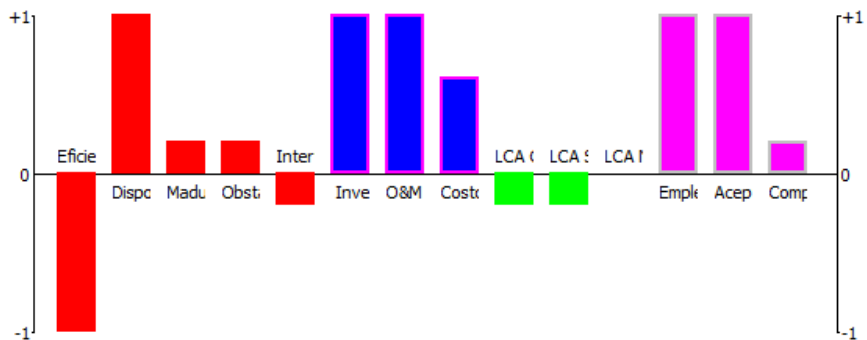


Figura 5-17. Perfil de los subcriterios de la tecnología solar fotovoltaica (Caso DRM)

Fuente: Elaboración propia

Para la energía producida por el biogás de vertedero el diagrama de araña indica que los criterios técnicos, económicos y sociales tienen flujos positivos (Figura 5-18).

Los subcriterios correspondientes a obstáculos urbanos, operación y mantenimiento, emisiones de CO₂, NO_x, SO₂ son negativos (Figura 5-19).

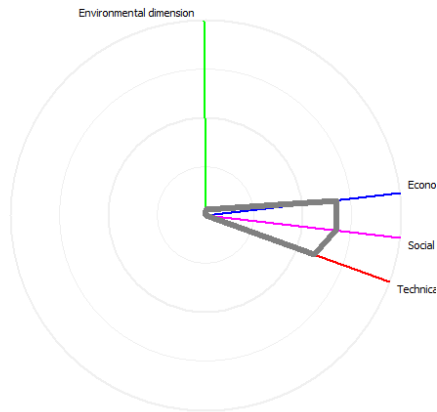


Figura 5-18. Diagrama de araña de la tecnología biogás de vertedero (Caso DRM)

Fuente: Elaboración propia

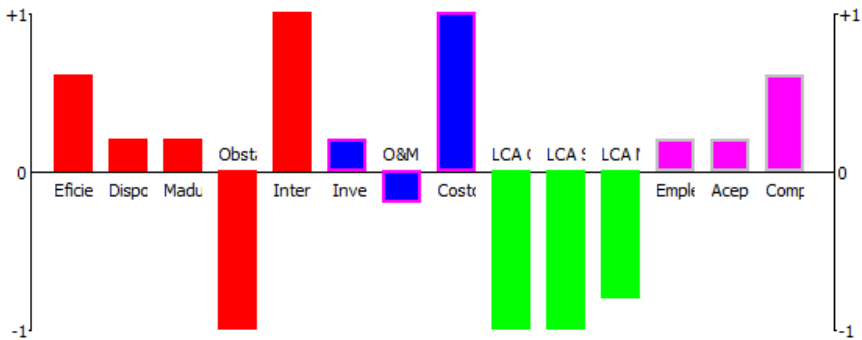


Figura 5-19. Perfil de los subcriterios de la tecnología biogás de vertedero (Caso DRM)

Fuente: Elaboración propia

5.3.5 Alternativas para el calentamiento de agua sanitaria.

En el área urbana de Cuenca, el 59 % de la población utiliza el gas licuado de petróleo para el calentamiento de agua sanitaria, mientras que el 35 % lo hace utilizando la electricidad (duchas y calentadores) (Universidad de Cuenca, 2017). El uso de calentadores solares térmicos es marginal por lo que no se lo contabiliza. El GLP es distribuido a los usuarios mediante cilindros de 15 kg, con fines de cocción principalmente. El gas natural es empleado para procesos industriales, mientras que a nivel residencial no se lo utiliza por la falta de gasoductos o redes domiciliarias. Otro elemento que condiciona su uso, es que el gas natural para ser transportado a los centros de consumo, debe ser en primera instancia licuado y almacenado, luego transportado hasta los centros de consumo donde debe pasar por un proceso previo de regasificación (Lopez Lozano, 2014).

Tecnologías de producción de electricidad y calor combinados (CHP, por sus siglas en inglés Combined Heat & Power), son opciones que permiten aprovechar el calor generado por las máquinas térmicas que producen energía eléctrica. En este caso la materia prima puede ser el biometanol, biomasa o desechos sólidos urbanos. El calor generado se envía a través de las redes de calefacción urbana, cuyas pérdidas pueden estar entre 10 % a 32 %, si están a 5 km. Lo que indica que las redes no pueden extenderse a muy grandes distancias (Pöschl, Ward, & Owende, 2010). Si se utilizan los desechos urbanos (biogás o incineración), la distancia puede ser un impedimento pues las plantas suelen estar cerca de los depósitos de residuos (en el caso de Cuenca el vertedero está a una distancia de 21 km). Si se aprovechara el calor producido por plantas de biogás de la planta de tratamiento de agua, su uso se restringiría para el consumo interno o para usuarios establecidos cerca de las instalaciones. En el caso del uso de la biomasa, la situación sería similar, quedando restringido su uso a los alrededores de donde se ubique la planta. La opción de utilizar sistemas CHP que requieran biomasa con fines de calentamiento de agua no está desarrollada para aplicarlas en edificaciones (Diczfalusy, B., Taylor, 2011). A partir de lo anterior, no se considera como parte del análisis el aprovechamiento de calor de estas plantas para calentar agua.

De esta manera, la selección se realizará entre la energía geotérmica (a₈) y la energía solar térmica (a₁₁) (ver Figura 5-20).

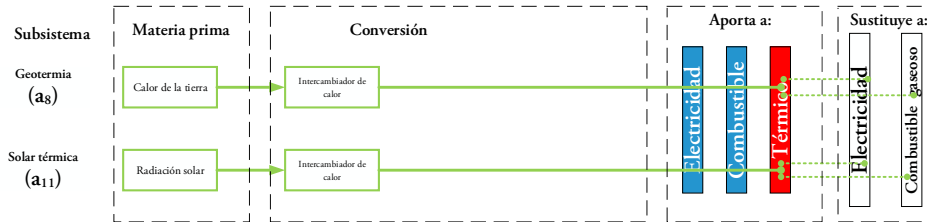


Figura 5-20. Selección de tecnologías de producción de ACS

Fuente: Elaboración propia

5.3.5.1 Criterios.

Subcriterios técnicos

Eficiencia (C_1)

Hay múltiples sistemas que permiten el calentamiento de agua para uso doméstico, que operan de diferente manera. En el reporte de Malenković (2012) se reúnen varios indicadores de rendimiento para diferentes tecnologías. En las bombas de calor se utiliza el coeficiente de rendimiento (COP), el mismo que expresa la razón entre la capacidad de calentamiento de la bomba y el consumo de energía eléctrica. En el caso de los colectores solares la eficiencia se define como la razón entre la energía removida por la transferencia de calor del fluido (en un periodo específico de tiempo), sobre el producto del área del colector y la radiación solar incidente en el colector en el mismo periodo. Para permitir la comparación entre tecnologías, se utiliza la definición sugerida por Diczfalusy y Taylor (2011), en donde la eficiencia de las bombas de calor supera el 100 % (ver Tabla 5-44). Se puede asumir, por ejemplo, que un COP de tres unidades es equivalente a una eficiencia de 300 % (Diczfalusy, B., Taylor, 2011).

Tabla 5-44. Eficiencia (producción de ACS)

Sistema	Eficiencia (%)	Fuente	Eficiencia promedio (%)
Solar térmica	70	(Jaisankar, Ananth, Thulasi, Jayasuthakar, & Sheeba, 2011)	65
	80	(Izquierdo <i>et al.</i> , 2011)	

Sistema	Eficiencia (%)	Fuente	Eficiencia promedio (%)
	35	(Greening & Azapagic, 2014)	
	65 a 70	(IDAE, 2011)	
	Captador plano		
	70 a 75	(IDAE, 2011)	
	Captador de tubo de vacío		
	300 a 400	(Yi Zhang <i>et al.</i> , 2015)	
	300 a 400	(IDAE, 2011)	
Geotérmico	320*	(Schiel <i>et al.</i> , 2016)	355
	200 a 600	(Diczfalusy, B., Taylor, 2011)	

Fuente: Elaboración propia

Disponibilidad de fuente primaria (C₂)

Del análisis cualitativo se desprende que la energía solar térmica tiene una mejor evaluación que los sistemas de calentamiento basados en la energía geotérmica (ver Tabla 5-45).

Tabla 5-45. Disponibilidad del recurso (producción de ACS)

Sistema	Valoración	Fuente
Solar térmica	4,19	Entrevistas
Geotérmica	2,00	Entrevistas

Fuente: Elaboración propia

Madurez de la tecnología (C₃)

De la revisión bibliográfica se advierte que las energías solar térmica y geotérmica son consideradas tecnologías maduras, por lo que las dos tienen la misma valoración, Tabla 5-46.

Tabla 5-46 Madurez de la tecnología (producción de ACS)

Sistema	I+D	D	C	Escala	Fuente
Calentadores solares de agua			X	3	(Benli, 2016) (Chang, Lin, Lee, & Chung, 2011) (IRENA, 2015)
			X	3	(IDAE, 2011) (Schiel <i>et al.</i> , 2016) (Diczfalusy, B., Taylor, 2011)
			X	3	

Fuente: Elaboración propia

Obstáculos urbanos y disponibilidad de área (C₄)

Los paneles solares térmicos se los coloca en los techos de las viviendas. La operación de este tipo de tecnología no es afectada drásticamente por la presencia de sombras, por lo que puede disponer de más área útil, si se compara con los sistemas solares fotovoltaicos. En el caso de los sistemas geotérmicos el área disponible para la colocación de los pozos, es uno de los principales inconvenientes (Schiel *et al.*, 2016). Para la instalación de los sistemas geotérmicos en el área urbana la topología vertical es la más recomendable, se necesita un área mínima como zona de amortiguamiento y espaciamiento entre pozos para evitar agotamiento térmico. Este es un limitante considerando una estructura urbana consolidada y construida. Según la valoración cualitativa, los captadores solares tienen mayor disponibilidad de área que los sistemas geotérmicos (ver Tabla 5-47).

Tabla 5-47. Obstáculos y disponibilidad de área (producción de ACS)

Sistema	Valoración	Fuente
Solar térmica	3,63	Entrevistas
Geotérmica	1,94	Entrevistas

Fuente: Elaboración propia

Integración arquitectónica (C₅)

La disposición de los colectores en los techos puede ser un inconveniente si su uso se masifica, pues podrían afectar al paisaje urbano, más aún en ciudades como

Cuenca consideradas de interés patrimonial. Las instalaciones para los sistemas geotérmicos al no ser visibles se prevé que no ocasionarán impactos visuales o afectación al entorno de la ciudad. Esto se corrobora con los resultados del análisis cualitativo que indica que el uso de la geotermia tiene mayor preferencia que los sistemas solares térmicos (ver Tabla 5-48). Es de anotar que este subcriterio se minimiza, por ello en la escala los sistemas geotérmicos tienen menor valoración.

Tabla 5-48. Integración arquitectónica (producción de ACS)

Sistema	Valoración	Fuente
Solar térmica	3,25	Entrevistas
Geotérmico	2,81	Entrevistas

Fuente: Elaboración propia

Subcriterios económicos

Costo de inversión (C₆)

Se calcula el costo de inversión a partir de la Ecuación 4-21. En este caso los costos no se escalan puesto que la diferencia entre potencias no es considerable, es decir, el factor de escalamiento es $p = 1$ (Sveinbjörnsson *et al.*, 2017). En el caso de la energía solar térmica, para aplicaciones en viviendas se puede requerir un sistema termosifón directo, más barato que sistemas indirectos con controladores electrónicos o sistemas que requieren bombas. Esta variada disponibilidad en tecnologías hace que los costos tengan un amplio rango (IRENA, 2015). Aplicaciones que requieren potencias pequeñas están comprendidas entre 1,4 kW a 3,4 kW, tamaños medios están entre los 14 kW a 140 kW. Mientras que sistemas considerados de gran escala (district heating) están entre 0,5 a 2 MW (Islam, Sumathy, & Ullah, 2013). En el caso de los sistemas geotérmicos el rango de potencias es también amplio. Para viviendas unifamiliares las potencias pueden estar entre 1,5 kW y 15 kW.

Para este estudio, se hace la comparación entre los sistemas termosifón y los sistemas geotérmicos. Es de notar, sin embargo, que si se evalúa entre sistema solar térmicos indirectos, con bombas, los costos pueden ser similares a los costos de los sistemas geotérmicos (Diczfalusy, B., Taylor, 2011). Los costos de las instalaciones se muestran en la Tabla 5-49.

Tabla 5-49. Costos de inversión (producción de ACS)

Sistema	Costos de inversión	Referencia	Promedio (USD/kW)
Calentadores solares de agua	546 USD/kW Termosifón captador plano 1,4 kW* – 2 m ²)	(Benli, 2016)	504,42
	502 USD/kW Directo sin bomba 1,3 kW – 1,85 m ²	(Benli, 2016)	
	440 USD/kW Termosifón directo 2,48 kW – 3,55 m ²	(Rosas-Flores <i>et al.</i> , 2016)	
	671 USD/kW Termosifón captador plano 1,4 kW – 2 m ²	(Islam <i>et al.</i> , 2013)	
	300 USD/kW** Termosifón tubos de vacío 1,05 kW – 1,05 m ²	(IRENA, 2015)	
	786 USD/kW Termosifón directo de tubos de vacío 1,4 kW – 2 m ²	(Hazami, Naili, Attar, & Farhat, 2013)	
	2309 USD/kW Indirecto con bomba 3,24 kW*	(Ma, Song, Smardon, & Chen, 2014)	
Calentadores solares de agua	2150 USD/kW Indirecto con bomba 3,85 kW	(Hazami <i>et al.</i> , 2013)	790,00
	790 USD/kW Directo con bomba 2,3 kW	(Islam <i>et al.</i> , 2013)	

Sistema	Costos de inversión	Referencia	Promedio (USD/kW)
	1120 USD/kW Captador plano 10 kW	(IRENA, 2015)	
	854 USD/kW Captador plano menos de 20 kW****	(IRENA, 2015)	874,33
	649 Captador plano menos de 40 kW ****	(IDAE, 2011)	
	1322 USD/kW Captador con tubos de vacío 10 kW	(SHIP, 2017)	
	960 USD/kW captador con tubos de vacío menos de 20 kW ****	(SHIP, 2017)	1141,00
	1120 USD/kW *** 2464 USD/kW	(IDAE, 2011)	
	571 USD/kW 1566 USD/kW	(Beerepoot, 2011)	1738
Geotérmico	2733 USD/kW	(Fang & Wang, 2014)	
	439 USD/kW 2267 USD/kW	(Diczfalusy, B., Taylor, 2011)	

*Calculado considerando que 1 m² de captador solar equivale a 0,7 kW/m² (IRENA, 2015).

** 1 CNY (Yuan Chino) = 0,14 USD

***1 € = 1,12 USD

**** Valores promedio de los presentados en la clasificación S, de la base de datos Solar Heat for Industrial Processes (SHIP, 2017).

Fuente: Elaboración propia

Costo de operación y mantenimiento (C₇)

Los sistemas solares térmicos simples del tipo termosifón no requieren costos de operación relacionados con el consumo de electricidad, a diferencia de aquellos que utilizan bombas y sistemas electrónicos. El mantenimiento en estos equipos es determinante para incrementar su tiempo de vida útil. Un sistema sometido a un mantenimiento adecuado y periódico puede superar los 30 años de vida útil (IRENA, 2015). Los sistemas geotérmicos requieren de energía eléctrica para su funcionamiento, por lo que el costo de la energía es incluido en su operación. En la Tabla 5-50 se muestran los costos utilizados para la comparación, los mismos que están relacionados con la inversión de equipamiento.

Tabla 5-50. Costo de operación y mantenimiento (producción de ACS)

Sistema	Inv. (%)	Fuente	Promedio (%)	USD/kW
	1			
Calentadores solares de agua	4,25	(Ma <i>et al.</i> , 2014)		
	Placas paralelas		3,56	17,95
	5,45	(Hazami <i>et al.</i> , 2013)		
	Tubos al vacío			
Geotérmico	2,50	(Fang & Wang, 2014)		
	2,00	(Beerepoot, 2011)	2,25	39,10

Fuente: Elaboración propia

Costo de producción de energía (C₈)

Este criterio considera el valor monetario de producir una unidad de kWh de calor producido durante la vida útil de los sistemas (LCOH, del inglés Levelised Costs of Heat). El costo se calcula según la Ecuación 4-22. Como base de análisis se toma 1 kW de potencia térmica, con su correspondiente costo de operación y mantenimiento, una tasa de descuento del 5 % en concordancia con (Joubert *et al.*, 2016; Ma *et al.*, 2014) tiempo de vida útil de cada tecnología y un estimado de horas de operación.

La demanda energética para el calentamiento del agua se calcula mediante (Han *et al.*, 2010):

$$Eth = Q \cdot \rho_a \cdot C_e \cdot (T_{uso} - T_{red}) \cdot n$$

Ecuación 5-3

Donde:

E_{th} , demanda de energía calórica para calentar agua (kJ/año).

Q , agua caliente sanitaria consumida (l/día).

ρ_a , densidad del agua (kg/l).

C_a , calor específico del agua (4,18 kJ/°C kg).

T_{uso} , temperatura a la que se desea suministrar el agua (°C).

T_{red} , temperatura de la red de agua (°C).

n , número de días al año (días).

Para la ciudad de Cuenca se consideran la información expuesta en la Tabla 5-51.

Tabla 5-51. Demanda de ACS para la ciudad de Cuenca y equipamiento requerido

Parámetro	Valor	Fuente
Q (l)	160 4 usuarios	(Mogrovejo & Sarmiento, 2011)
ρ_a (kg/l)	1,00	
C_a (kJ/°C kg)	4,18	(Mogrovejo & Sarmiento, 2011)
T_{uso} (°C)	55,00	(Mogrovejo & Sarmiento, 2011)
T_{red} (°C)	16,00	(Mogrovejo & Sarmiento, 2011). La temperatura media de Cuenca es de 15 °C. La temperatura de la red se considera 1 °C mayor.
n	365	
E_{th} (MJ/año)	9534,03	
DE (kWh/año)	2648,34	

Parámetro	Valor	Fuente
COLECTORES SOLARES TÉRMICOS		
Fracción Solar (%)	78,00*	(Mogrovejo & Sarmiento, 2011)
Aporte energético del sistema (kWh/año)	2065,70	
Área del sistema colector (m ²)	2,40	(Mogrovejo & Sarmiento, 2011)
Potencia del sistema colector (kW)	1,68*	
Factor de planta (%)	14,04	
SISTEMAS GEOTÉRMICOS		
Fracción geotérmica (%)	100	Puede aportar todo el requerimiento de calor.
Aporte energético del sistema (kWh/año)	2648,34	
Potencia del sistema (kW)	1,68***	Se asume igual que el sistema colector
Factor de planta (%)	18,00	

* El cálculo de este parámetro incluye el rendimiento del panel solar.

** Calculado considerando que 1 m² de captador solar equivale a 0,7 kW/m² (IRENA, 2015).

*** Los rangos de las bombas de calor para viviendas unifamiliares 1,2 hasta 15 kW.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5-52 se indica el tiempo de vida útil establecido en las fuentes bibliográficas consultadas. Puesto que la diferencia no es significativa, se toma un valor de 20 años para cada caso. En la Tabla 5-53, además, se muestran los costos de operación anual.

Tabla 5-52. Datos utilizados para el cálculo de costo de la energía para ACS

Sistema	Tiempo de vida útil (años)	Referencia	Tiempo de vida útil utilizado	Costos (USD kW año)
Calentadores solares de agua	13	(Han <i>et al.</i> , 2010)	20	17,95
	15	(IRENA, 2015)		
	20	(Hazami <i>et al.</i> , 2013)		
	25	(Greening & Azapagic, 2014)		
Geotérmico	25	(Beerepoot, 2011)	20	39,10
	20	(Saner <i>et al.</i> , 2010)		
	17	(Diczfalusy, B., Taylor, 2011)		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-53. Costos de energía (producción de ACS)

Sistema	Tiempo de vida útil	Factor de planta	Cc (USD/MWh)
Calentadores solares de agua	20	14	47,60
Geotérmico	20	18	113,24

Fuente: Elaboración propia

En el caso de sistemas termosifón directos (sin bomba) los costos de la energía dependen del tiempo de uso de la instalación, el tamaño del sistema o el aporte solar. Bajo los supuestos establecidos, si los captadores tienen un área de 2,4 m² (1,68 kW) se tiene un costo de la energía de 0,047 USD/kWh. Si la instalación tiene 3 m² de captadores el costo de la energía es de 0,06 USD/kWh (2,1 kW), mientras que, si es de 1,5 m², (1,05 kW) el costo disminuye a 0,03 USD/kWh. Si el sistema es indirecto con bomba, los costos pueden triplicarse en cada caso. Estos datos están en concordancia con lo anotado por Islam (2013), en este caso los costos pueden ir desde los 0,02 hasta los 0,2 USD/kWh dependiendo del tamaño de la instalación.

Si el costo de producir ACS es 0,11 USD/kWh con sistemas geotérmicos, se tendrían que el costo de la energía es superior a los sistemas solares con termosifón. El rango de los costos de la producción de calor utilizando la energía geotérmica es de 0,038 a 0,075 USD/kWh (Beerepoot, 2011). Estos costos son razonables comparados con los obtenidos, puesto que Beerepoot (2011) asume costos de inversión inferiores o mayor

tiempo de vida útil. En este sentido, el costo de producir energía con sistema indirecto podría ser superior si se compara con los sistemas geotérmicos.

Subcriterios ambientales (C₉, C₁₀, C₁₁)

A pesar de que el análisis del ciclo de vida es una poderosa herramienta que permite identificar los impactos ambientales, los resultados de las investigaciones analizadas son diferentes. Esto se debe al contexto regional en donde se aplican (demanda energética, recurso), la configuración del sistema (Greening & Azapagic, 2014) o las herramientas utilizadas para la evaluación.

Para los sistemas solares las emisiones de CO₂ son inferiores a las producidas por los sistemas geotérmicos (ver Tabla 5-54).

Tabla 5-54. Emisiones de CO₂ (producción de ACS)

Sistema	kg CO ₂ /TJ	Referencia	kg CO ₂ /TJ Promedio
Calentadores solares de agua	9444	(Greening & Azapagic, 2014)	7821
	Placas planas		
	8150*	(Masruroh, Li, & Klemeš, 2006)	
	3880*	(Lamnatou, Chemisana, Mateus, Almeida, & Silva, 2015)	
	Placas planas		
	6800	(Lamnatou <i>et al.</i> , 2015)	
Tubos de vacío			
Geotérmico	10833,33	(Greening & Azapagic, 2014)	45833
	Tubos de vacío		
	45833,33	(Greening & Azapagic, 2014)	
	GSHP**		
45833,33	(Greening & Azapagic, 2014)		
WSHP***			

* Es el valor promedio de lo presentado en el estudio de referencia.

** GSHP, Ground Source Heat Pump.

*** WSHP, Water Source Heat Pump.

Fuente: Elaboración propia

Los estudios muestran que las emisiones de SO₂ de los sistemas geotérmicos son mayores que la de los calentadores solares (ver Tabla 5-55).

Tabla 5-55. Emisiones de SO₂ (producción de ACS)

Sistema	kg SO ₂ /TJ	Referencia	kg SO ₂ /TJ Promedio
Calentadores solares de agua	56,94	(Greening & Azapagic, 2014)	51,60
	Colectores planos		
	58,30*	(Masruroh <i>et al.</i> , 2006)	
	45,16*	(Lamnatou <i>et al.</i> , 2015)	
	42,1	(Lamnatou <i>et al.</i> , 2015)	
	Tubos de vacío		
	57,49	(Greening & Azapagic, 2014)	
	Tubos de vacío		
Geotérmico	142,50	(Greening & Azapagic, 2014)	141,80
	GSHP		
	141,11	(Greening & Azapagic, 2014)	
	WSHP		

* Es el valor promedio de lo presentado en el estudio de referencia.

Fuente: Elaboración propia

No se puede concluir qué tecnología produce mayor cantidad de emisiones de NO_x (Tabla 5-56). Esto se debe principalmente a que las emisiones dependen del mix energético utilizado en la producción de electricidad. Si se aplican los promedios se tiene que a lo largo del ciclo de vida de los calentadores térmicos producen emisiones mayores que los sistemas geotérmicos.

Tabla 5-56. Emisiones de NO_x (producción de ACS)

Sistema	kg NO _x /TJ*	Referencia	kg NO _x /TJ promedio
Calentadores solares de agua	81,20	(Greening & Azapagic, 2014)	134,63
	Colectores planos		
	20**	(Masruroh <i>et al.</i> , 2006)	
	238,20**	(Lamnatou <i>et al.</i> , 2015)	
	Colectores planos		
Tubos de vacío	246,15	(Lamnatou <i>et al.</i> , 2015)	
	Tubos de vacío		
	87,6	(Greening & Azapagic, 2014)	
Geotérmico	106,84	(Greening & Azapagic, 2014)	104,7
	GSHP		
	102,56	(Greening & Azapagic, 2014)	
	WSHP		

*Los valores originales están en fosfato (PO₄). Se utiliza la conversión 1 g NO_x = 0,13 g PO₄ (GHK & BIOIS, 2006).

** Es el valor promedio de lo presentado en el estudio de referencia.

Fuente: Elaboración propia

Subcriterios sociopolíticos

Creación de empleo (C₁₂)

Para el cálculo del Ie (Ecuación 4-23 a Ecuación 4-25), se utilizó 20 años como tiempo de vida útil de las instalaciones y el factor de planta establecido en Tabla 5-51. En este caso la tecnología solar térmica tiene mayor preferencia que la geotérmica (ver Tabla 5-57). Estos datos, sin embargo, pueden variar como se advierte en los estudios de Jay Rutovitz (2015) y Jay Rutovitz (2010), pues mientras el primer estudio presenta indicadores globales de empleo, el segundo se realizó para Sudáfrica y asume que la construcción no está completamente tecnificada y, por tanto, se requiere mayor mano de obra.

Tabla 5-57. Indicador de empleo (producción de ACS)

Sistema	CIM (personas-año/MW)	OM (empleos/MW)	Referencias	Ie (Total de empleos-año/GWh)	
Calentadores solares de agua	8,40		(Jay Rutovitz <i>et al.</i> , 2015)	0,34	
	22,40	*	(Jay Rutovitz, 2010)	0,91	0,52
	7,40		(Ren21, 2014)	0,30	
Geotérmico	6,90	*	(Jay Rutovitz <i>et al.</i> , 2015)	0,22	0,22
	6,90		(Greenpeace, 2015)		

* Se ha utilizado un factor global para los puestos de trabajo por MW instalado, ya que se trata de los únicos datos disponibles a gran escala. Esto puede subestimar los trabajos, por lo que no se incluye la OM (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Ren21, 2014).

Fuente: Elaboración propia

Aceptación social de la tecnología (C₁₃)

Este criterio cualitativo indica que hay una notable preferencia por el uso de la tecnología solar térmica (ver Tabla 5-58), frente a la geotérmica.

Tabla 5-58. Aceptación social (producción de ACS)

Sistema	Valoración	Fuente
Solar térmica	4,00	Entrevistas
Geotérmica	2,44	Entrevistas

Fuente: Elaboración propia

Compatibilidad con las políticas públicas (C₁₄)

La energía solar con fines térmicos es una opción que se ha planteado como sustitución de la matriz energética relacionada a los usos térmicos. Varios reportes gubernamentales recomiendan como sustituto del GLP para calentamiento de agua la electricidad (Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, INER, 2016). Hay otros que indican como sustituto los calentadores solares (Empresa Eléctrica Quito, EEQ, 2012, Ministerio de Electricidad y Energías Renovables, MEER, 2008). Existen proyectos pilotos o aplicaciones particulares,

pero no hay una política pública que incentive su uso. El principal problema es el costo inicial de la inversión, el mismo que no es competitivo con el costo del GLP subsidiado por el Estado (EEQ, 2012; Mogrovejo & Sarmiento, 2011). En el caso de la energía geotérmica para calentamiento de agua o calefacción, hay investigaciones iniciales, pero no se ha identificado la posibilidad de extender su uso en el Ecuador. Lo anterior se advierte en los resultados del análisis cualitativo (ver Tabla 5-59) que indica que los sistemas solares tienen mayor preferencia que el geotérmico de baja temperatura.

Tabla 5-59. Compatibilidad de políticas públicas (producción de ACS)

Sistema	Valoración	Fuente
Solar térmica	3,56	Entrevistas
Geotérmica	2,63	Entrevistas

Fuente: Elaboración propia

5.3.5.2 Elaboración de la matriz de decisión.

Los subcriterios cualitativos y cuantitativos se indican en la Tabla 5-60.

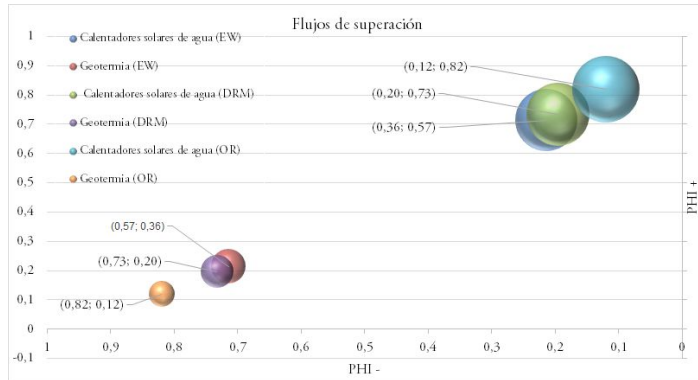
Tabla 5-60. Matriz de decisión para la producción de ACS

ai \ cj(·)	Técnico					Económico			Ambiental		Sociopolítico			
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
as	355,00	2,00	3,00	1,94	2,81	1738,00	39,10	113,24	45 833,00	141,80	104,70	0,22	2,44	2,63
a11	65	4,19	3,00	3,63	3,25	504,42	17,95	46,60	7821,00	51,60	134,63	0,52	4,00	3,56

Fuente: Elaboración propia

5.3.5.3 Priorización.

Los flujos de superación de la Gráfica 5-19 corresponden a los resultados obtenidos utilizando el *software* PROMETHEE GAIA. En todos los casos analizados la energía solar térmica es más atractiva para ACS.



Gráfica 5-19. Flujos de superación (agua caliente sanitaria)

Fuente: Elaboración propia

Los flujos netos se muestran en la Figura 5-21, donde a_{11} corresponde a sistemas colectores solares, mientras a_8 a sistemas geotérmicos. Los escenarios se refieren a los pesos asignados según la metodología propuesta.

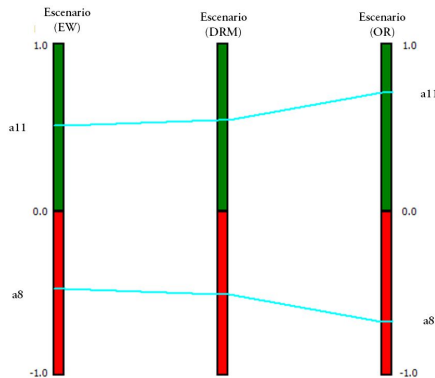
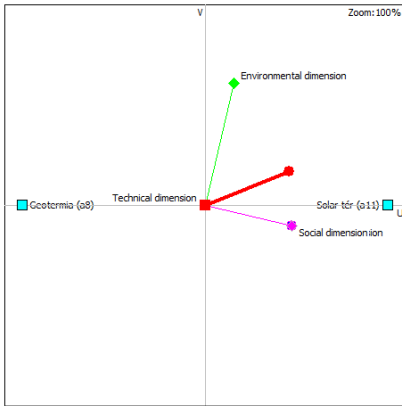


Figura 5-21. Resultados PROMETHEE, considerando diferentes pesos (agua caliente sanitaria)

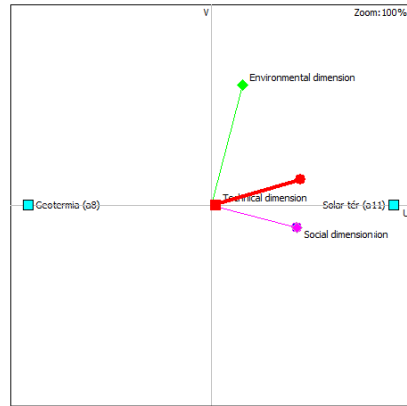
Fuente: Elaboración propia

Los sistemas solares tienen mejor preferencia en todos los casos si se evalúan todos los criterios en conjunto (Figura 5-22). Al analizar los pesos en el caso EW y DRM, los vectores que representan los criterios tienen un comportamiento muy parecido. Sin embargo, en el caso OR, salvo la dimensión ambiental, el resto tienen diferente

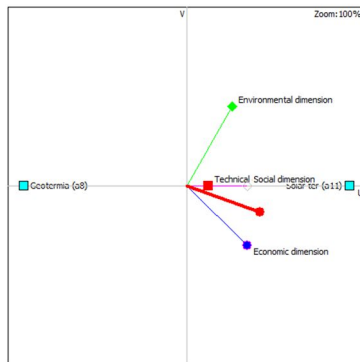
comportamiento. En todos los casos en el ordenamiento la tecnología solar supera a la geotérmica.



Escenario (EW)
 $\delta = 100$



Escenario (DRM)
 $\delta = 100$



Escenario (OR)
 $\delta = 100$

Figura 5-22. Diagramas de GAIA (agua caliente sanitaria)

Fuente: Elaboración propia

Si se analiza el comportamiento de las alternativas frente a los criterios se mantiene la preferencia en todos los casos (Ver Tabla 5-61).

Tabla 5-61. Ordenamiento de las alternativas para cada dimensión de análisis (producción de ACS)

Orden	Técnica			Económica			Ambiental			Social		
	EW	DRM	OR	EW	DRM	OR	EW	DRM	OR	EW	DRM	OR
1	a11	a11	a11	a11	a11	a11	a11	a11	a11	a11	a11	a11
2	a8	a8	a8	a8	a8	a8	a8	a8	a8	a8	a8	a8

Fuente: Elaboración propia

5.3.5.4 Toma de decisiones.

De las tecnologías analizadas los calentadores solares son una alternativa para el calentamiento de ACS. Como ejemplo del comportamiento de los flujos de los criterios, a continuación, se presenta, los resultados al aplicar el método de valoración directa de los pesos (DRM). Los criterios económicos y sociales están completamente correlacionados, mientras que el ambiental y técnico se aleja, aunque no están completamente divergentes (ver Figura 5-23). Todos los criterios tienen flujos positivos, mientras que con respecto a los subcriterios la mayoría son positivos (ver Figura 5-24), salvo la eficiencia, integración arquitectónica y emisiones de NOx.

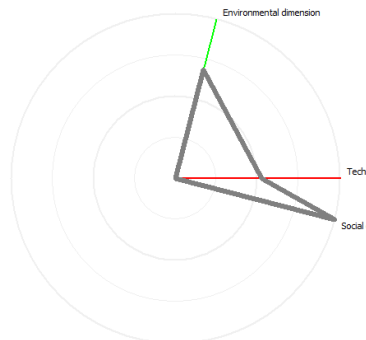


Figura 5-23. Diagrama de araña para los sistemas solares térmicos (Caso DRM).

Fuente: Elaboración propia

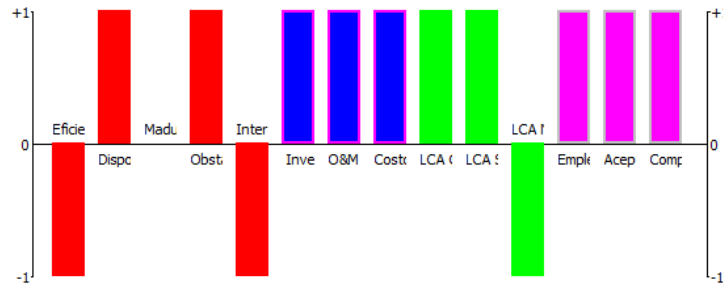


Figura 5-24. Perfil de los subcriterios de los sistemas solares térmicos (Caso DRM)

Fuente: Elaboración propia

5.4 El modelo LEAP de Cuenca urbana

La planificación energética urbana es determinada por la demanda de energía que requiere la ciudad para dinamizar sus procesos internos, ya sea en el sector residencial, industrial o transporte. En el caso analizado se busca identificar qué portadores energéticos permiten mantener ese dinamismo. Se estudia entonces la energía directa (ingresos energéticos que proviene de la electricidad, gas natural, carbón u otros recursos fósiles) (Lixiao Zhang *et al.*, 2014). En términos de metabolismo urbano, este diagnóstico establecerá el tipo y cantidad de energía directa que la ciudad requiere. Con ello se establecerá la «situación problema» o el metabolismo lineal de la ciudad.

Basado en la información de instituciones que controlan y regulan la energía en la ciudad se integró la información para construir la matriz energética del cantón Cuenca, particularmente de la parte urbana.

El diagnóstico abarca todo el sistema energético, desde los recursos, transformación y consumo final. Asimismo, se identifica la producción, importación y exportación de la energía. Una vez constatada la disponibilidad de información de las diferentes fuentes se eligió año base al 2015.

5.4.1 Energía en el sector residencial.

El sector residencial, fue modelado utilizando una metodología *bottom up*, de acuerdo con lo establecido en varios estudios (Broad *et al.*, 2017; MEER, 2015; OLADE, 2014).

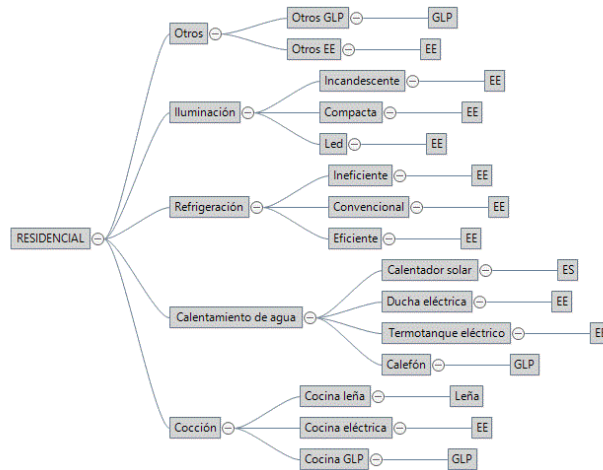
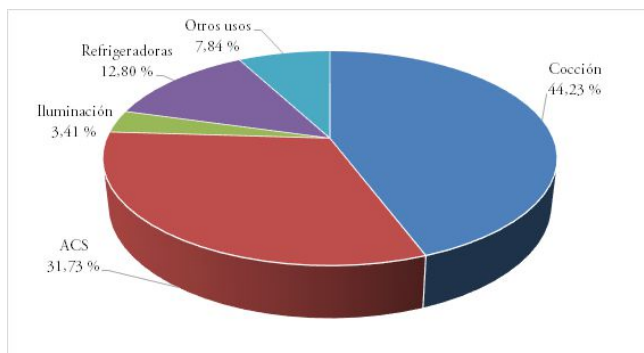


Figura 5-25. Árbol de demanda del sector residencial en Cuenca urbana
Fuente: Elaboración propia

Para construir la demanda de la energía siguiendo la Ecuación 4-33, el sector residencial se subdividió en 5 ramas: cocción, calentamiento de agua, iluminación, refrigeración y otros usos. El nivel de actividad (AL) se expresa en el número de hogares y la intensidad energética (EI) en kWh/hogar. El equipamiento j se clasifica de acuerdo los usos: cocción, calentamiento de agua, refrigeración, iluminación y otros. Los energéticos k utilizados en este sector son el gas licuado de petróleo (GLP) y la electricidad (EE). En la Figura 5-25 se indica el árbol compuesto por los usos, el equipamiento y energéticos.

Los datos que requiere LEAP, para la construcción del árbol se indican más adelante en la descripción de los usos residenciales. En cuanto al uso del GLP en el sector residencial, varía dependiendo de la fuente de información. Según el INEC (2006) para el área urbana el 73 % de GLP se utilizó para cocción. En el reporte del MEER (2015) a nivel nacional se tiene un 79 % y en el reporte de EEQ (2012) para la ciudad de Quito, está cerca del 50 %. Por ello se considera que el GLP es utilizado para cocción (60 %) y calentamiento de agua (40 %). El total de energía empleada en el sector urbano es de 372,73 kBEP (ARCH-Azuay, 2017; Centrosur, 2017). El 73 % corresponde a GLP y el 27 % a electricidad. El mayor uso de la energía es para la cocción, seguido del calentamiento de agua caliente sanitaria, refrigeración e iluminación (ver Gráfica 5-20).



Gráfica 5-20. Usos de la energía en el sector residencial
Fuente: Elaboración propia

5.4.1.1 Cocción.

Para la cocción se usa principalmente GLP y electricidad (INEC, 2016a). La información adicional que requiere el modelo y la IE utilizada está dada en la Tabla 5-62.

Tabla 5-62. Información requerida para el modelo LEAP Cuenca, residencial, cocción

Electrificación: 99,6 % (Centrosur, 2017)

Saturación*: 97,73 (INEC, 2016a)

AL: 107598 hogares

Tipo	Eficiencia (%)	Referencia	AL (%)	Referencia	IE (kWh/hogar)
Cocina GLP	45	(IDEE, 2016a)	97	(INEC, 2016a)	1159,22
EE	80	(IDEE, 2016a)	3	(INEC, 2016a)	

* Indica el porcentaje de penetración de una actividad particular (IDEE, 2016b).

Fuente: Elaboración propia

5.4.1.2 Calentamiento de agua.

Según la encuesta Vivienda Sustentable y Segura realizada por la Universidad de Cuenca (2017) se aprovecha la electricidad y GLP para el calentamiento de agua. Con la información de Martínez (2010), que define que el 13 % de electricidad se utiliza con fines de calentamiento, y con el supuesto de que el 40 % de GLP se utiliza con

este fin, se calcula la intensidad energética IE. En la Tabla 5-63 se muestran los datos utilizados para el modelo.

Tabla 5-63. Información requerida para el modelo LEAP Cuenca, residencial, ACS

Saturación: 94 % (Universidad de Cuenca, 2017)

AL: 107 598 hogares

Tipo	Eficiencia (%)	Referencia	AL (%)	EI (kWh/hogar)
Calefón GLP	45	(IDEE, 2016a)	89,00	
Calentador EE	90	(IDEE, 2016a)	1,00	878,49
Ducha EE	90	(IDEE, 2016a)	10,00	

Fuente: Elaboración propia

5.4.1.3 Iluminación.

Esta rama utiliza exclusivamente electricidad. En el caso de Cuenca el 12 % de la energía eléctrica es demandada para este servicio (Martinez, 2010). Las subramas corresponden a diferentes tecnologías empleadas. En la Tabla 5-64 se muestran los valores utilizados en el modelo.

Tabla 5-64. Información requerida para el modelo LEAP Cuenca, residencial, iluminación

Electrificación: 99,6 % (Centrosur, 2017)

Saturación: 100 %; (Universidad de Cuenca, 2017)

AL: 107 598 hogares

Tipo	Eficiencia (%)	Referencia	AL (%)	Referencia	EI (kWh/hogar)
Incandescente	5	(IDEE, 2016a)	6,79	(Universidad de Cuenca, 2017)	
Compacta	20	(IDEE, 2016a; MEER, 2015)	93,21	(Universidad de Cuenca, 2017)	38,20
LED	40	(MEER, 2015)	0	(Universidad de Cuenca, 2017)	

Fuente: Elaboración propia

5.4.1.4 Refrigeradoras.

El equipamiento destinado a la refrigeración utiliza electricidad que representa el 46 % (Martínez, 2010) de la demanda de energía en este sector. Las subramas se consideran en función de la edad de las refrigeradoras eficiente (menos de 2 años), convencional (2 a 4 años) e ineficientes (más de 5 años). En la Tabla 5-65 se presentan los valores utilizados.

Tabla 5-65. Información requerida para el modelo LEAP Cuenca, residencial, refrigeración

Electrificación: 99,6 % (Centrosur, 2017)
 Saturación: 93 %; (Universidad de Cuenca, 2017)
 AL: 107 598 hogares

Tipo	AL (%)	Referencia	EI (kWh/hogar)
Eficiente	18,46	(Universidad de Cuenca, 2017)	353,77
Convencional	18,46	(Universidad de Cuenca, 2017)	609,43
Ineficiente	63,08	(Universidad de Cuenca, 2017)	943,38

Fuente: Elaboración propia

5.4.1.5 Otros usos residenciales.

El 29 % de la demanda de energía eléctrica es utilizado para otros usos (limpieza, electrodomésticos) (Martínez, 2010). En el caso del GLP, no se tiene información referente a otros usos, por lo que no se consideran (ver Tabla 5-66).

Tabla 5-66. Información requerida para el modelo LEAP Cuenca, residencial, otros usos

Tipo	AL (%)	EI (kWh/hogar)
EE	100	440,25
GLP	0	

Fuente: Elaboración propia

5.4.2 Energía en el sector industrial.

Mediante la metodología *bottom up* se modeló el sector industrial (Broad *et al.*, 2017; MEER, 2015; OLADE, 2014). Para construir la demanda siguiendo la Ecuación 4-33, se subdividió en 9 ramas de acuerdo con el tipo de industria. En este caso el nivel de actividad (*AL*) se expresa como el valor agregado de cada industria en USD y la intensidad energética (*IE*) en BEP/USD. El equipamiento *j* se clasifica de acuerdo con 5 usos (OLADE, 2014): vapor, calor, fuerza motriz, otros procesos productivos y procesos no productivos. Los energéticos *k* utilizados en este sector son la electricidad (EE), el gas licuado de petróleo (GLP), gas natural (GN), diésel (DI) y fueloil (FO). La Figura 5-26 representa el detalle del árbol de demanda de la industria, equipamiento y energéticos.

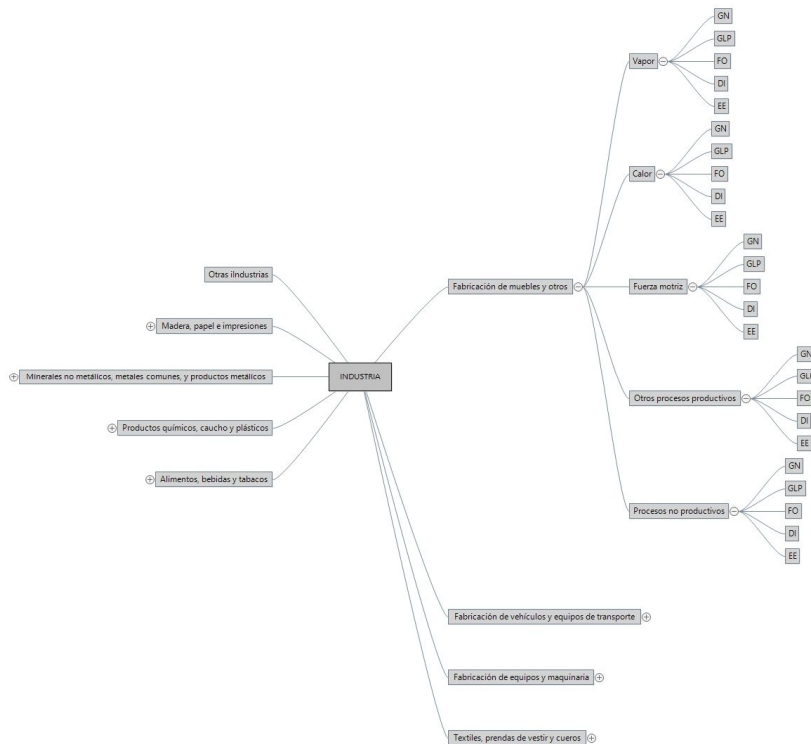
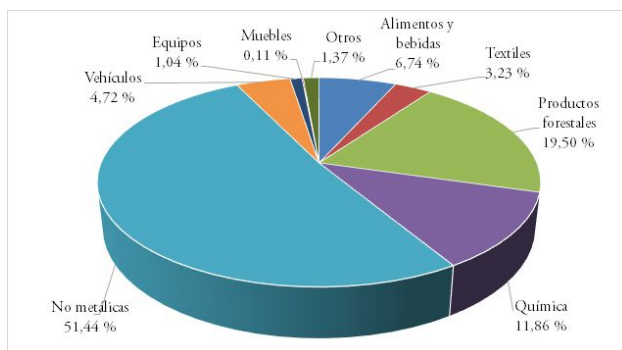


Figura 5-26. Árbol de demanda del sector industrial en Cuenca urbana

Fuente: Elaboración propia

El sector industrial requirió alrededor de 563,92 kBEP en el año base (ARCH-Azuay, 2017; Centrosur, 2017). El 78,48 % correspondió a derivados del petróleo (fueloil, diésel, GLP), seguido del gas natural con (10,55 %) y la energía eléctrica con 10,97 %. La industria de minerales no metálicos consume alrededor del 51 % de la energía del sector industrial, seguida de la de productos forestales y papel (19,50 %), la química (11,86 %) y en menor proporción el resto (ver Gráfica 5-21).



Gráfica 5-21. Participación energética de la industria

Fuente: Elaboración propia

El consumo de energía eléctrica por sector industrial se estimó a partir del valor agregado nacional industrial (VASIN) de Ecuador (BCE, 2015b) y del Balance Energético Nacional 2013 (MICSE, 2013), que incluye la desagregación del consumo en el sector industrial del Ecuador (CSIN). A partir de la relación consumo de energía (GWh)/VA (USD) y el valor agregado provincial del Azuay (VASIP) establecido en la Encuesta Exhaustiva del año 2011 sobre la industria ecuatoriana (INEC, 2011a), se estimó la participación energética eléctrica de las diferentes industrias (PEIP). De la información disponible de la Empresa Eléctrica Centrosur, se calcula el total de energía eléctrica consumida por la industria, con lo que se puede determinar el consumo de energía eléctrica por tipo de industria (ver Tabla 5-67). Con la estimación del PEIP de la Tabla 5-67 y el valor total de la energía eléctrica (61,89 kBEP) consumida por la industria en Cuenca, se tiene el consumo de electricidad por cada industria (PEIC).

En el caso de otras industrias se establece el consumo de energético total, esto por cuanto no se ha identificado a qué tipo de industria se distribuye el 1,9 % de combustibles.

Tabla 5-67. Valor agregado y energía eléctrica en la industria en el cantón Cuenca

CLASIFICACIÓN	VASIN	CSIN	CSIN/VASIN GWh/USD	VASIP	VASIP	PEIP	PEIP	VATIC	VASIC
	Miles USD	GWh		Miles USD	%	GWh	%	Miles USD	Miles USD
Alimentos, bebidas y tabaco	2 810 178,00	2556,49	0,91	65 395,58	15,96%	59,49	12,65%	871408,17	139 059,64
Textiles, prendas de vestir y cueros	615 846,00	529,77	0,86	30 558,92	7,46%	26,29	5,59%		64 981,64
Madera, papel e impresiones	920 577,00	757,93	0,82	45 011,59	10,98%	37,06	7,88%		95 714,34
Productos químicos, caucho y plásticos	2 051 142,00	1239,20	0,60	90 657,63	22,12%	54,77	11,65%		192 777,82
Minerales no metálicos, metales comunes y productos metálicos	1 001 410,00	2399,31	2,40	114 746,46	28,00%	274,93	58,47%		244 001,22
Fabricación de vehículos y equipos de transporte	178 002,00	80,95	0,45	4540,12	1,11%	2,06	0,44%		9654,29
Fabricación de equipos y maquinaria	300 951,00	122,81	0,41	31 519,64	7,69%	12,86	2,74%		67 024,55
Fabricación de muebles y otros	395 421,00	39,55	0,10	27 367,20	6,68%	2,74	0,58%		58 194,66
CSIN	Consumo Sectorizado de la Industria Nacional								
VASIN	Valor Agregado Sectorizado de la Industria Nacional								
VASIP	Valor Agregado Sectorizado de la Industria Provincial								
PEIP	Participación Energética Industrial Provincial								
PEIC	Participación Energética Industrial Cantonal								
VATIC	Valor Agregado Total de la Industria Cantonal								
VASIC	Valor Agregado Sectorizado Industrial Cantonal								

Fuente: Elaboración propia

A nivel del cantón Cuenca se dispone del total del valor agregado de la industria (VATIC) (BCE, 2015a) y con el porcentaje del valor agregado provincial (INEC, 2011a) se calcula la producción (USD) de cada industria en el área urbana de la ciudad (VASIC). Se debe anotar que el 99 % del VA de la industria de la provincia del Azuay se concentra en el cantón Cuenca, por lo que esta estimación se considera razonable (BCE, 2015a). En la Figura 5-27 se esquematiza el procedimiento para obtener la participación del VAD y la energía eléctrica.

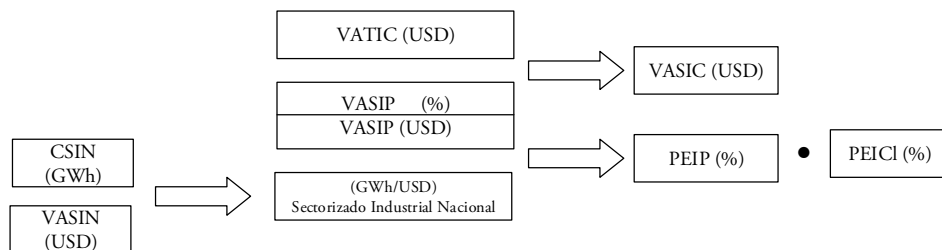


Figura 5-27. Esquema de obtención participación industrial (VAD y energía eléctrica)

Fuente: Elaboración propia

El consumo de combustibles se obtuvo de las bases de datos entregadas por la ARCH-Azuay (2017). La Tabla 5-68 muestra los energéticos consumidos por el sector industrial en el año base.

Tabla 5-68. Energéticos consumidos por la industria en el cantón Cuenca

CLASIFICACIÓN	EE	DI	FO	GLP	GN	TOTAL	%
	kBEP	kBEP	kBEP	kBEP	kBEP	kBEP	
Alimentos, bebidas y tabaco	7,86	24,06	4,84	1,25	0,00	38,00	6,74 %
Textiles, prendas de vestir y cueros	3,47	1,94	10,38	2,42	0,00	18,21	3,23 %
Madera, papel e impresiones	4,89	0,00	104,75	0,31	0,00	109,95	19,51 %
Productos químicos, caucho y plásticos	7,23	5,12	52,98	0,63	0,92	66,88	11,87 %
Minerales no metálicos, metales	36,31	68,13	43,56	83,31	58,50	289,82	51,43 %

CLASIFICACIÓN	EE kBEP	DI kBEP	FO kBEP	GLP kBEP	GN kBEP	TOTAL kBEP	%
comunes y productos metálicos							
Fabricación de vehículos y equipos de transporte	0,27	26,35	0,00	0,00	0,00	26,62	4,72 %
Fabricación de equipos y maquinaria	1,70	1,66	0,00	2,50	0,00	5,86	1,04 %
Fabricación de muebles y otros	0,36	0,00	0,00	0,12	0,00	0,48	0,09 %
Otros	0,00	0,00	0,00	7,71	0,00	7,71	1,37 %
Total	62,10	127,26	216,52	98,25	59,42	563,54	100,00

Fuente: Elaboración propia

Puesto que no existen estudios específicos a nivel local sobre el destino de la energía en cada industria, se utilizó la información de Office of Energy Efficiency and Renewable Energy-US (2015), en donde se establece los destinos de la energía en los diferentes procesos industriales (MEER, 2015). En la Tabla 5-69 se muestra la participación de los combustibles y electricidad en las industrias.

Tabla 5-69. Participación de los energéticos en la industria

PROCESO	Alimentos, bebidas y tabaco		Textiles, prendas de vestir y cueros		Madera, papel e impresiones		Productos químicos, caucho y plásticos		Minerales no metálicos, metales comunes y productos metálicos		Fabricación de vehículos y equipos de transporte		Fabricación de equipos y maquinaria		Fabricación de muebles y otros	
	EE (%)	COM (%)	EE (%)	COM (%)	EE (%)	COM (%)	EE (%)	COM (%)	EE (%)	COM (%)	EE (%)	COM (%)	EE (%)	COM (%)	EE (%)	COM (%)
Vapor	0,68	68,59	1,75	50,00	6,32	86,47	1,54	72,91	0,00	22,25	0,76	27,97	1,45	11,54	0,00	14,94
Calor	5,82	22,93	7,02	30,30	4,65	9,95	7,71	19,74	39,52	73,33	10,61	30,77	11,59	35,90	22,83	59,77
Fuerza motriz	46,58	1,60	54,39	3,03	72,12	0,97	55,63	2,63	44,76	0,56	37,12	2,10	40,58	2,56	44,09	0,57
Otros procesos	27,74	1,69	10,53	9,09	7,25	0,44	21,71	2,48	7,26	1,41	11,36	5,59	5,80	3,85	8,66	0,57
Procesos no productivos	19,18	5,18	26,32	7,58	9,67	2,17	13,40	2,25	8,47	2,54	40,15	33,57	40,58	46,15	24,41	24,14
TOTAL	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,09	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fuente: Elaboración propia

5.4.3 Energía en el sector transporte.

Utilizando la información proporcionada por la ARCH-Azuay (2017) y los reportes técnicos de la EMOV (CGA, 2009; EMOV EP, 2011, 2012, 2015), mediante la metodología *bottom up*, se estructuró el sector transporte. El modo de transporte carretero como ramal principal está subdividido en vehículos para transporte y carga. No se considera el transporte aéreo por falta de datos y porque se considera no relevante para el análisis (se ha calculado que representan el 0,44 % de las emisiones de CO₂) (EMOV EP, 2015). Se estima que cerca de 128 072 vehículos circulan en el área urbana de la ciudad. Esto es cerca del 80 % de los vehículos registrados en el cantón. El 89,32 % de unidades utilizan gasolina y el resto diésel. El 95,53 % de unidades es utilizado para el transporte de pasajeros (CGA, 2009; EMOV EP, 2011, 2012, 2015).

Para construir la demanda siguiendo la Ecuación 4-33, el nivel de actividad (*AL*) expresa el parque automotor en vehículos y la intensidad energética (*IE*) en BEP/vehículo. El equipamiento *j* se clasifica de acuerdo con cinco subsectores (automóviles, taxis, camionetas y furgones, buses y motocicletas) y un subsector en el caso de carga (pesados). Los energéticos *k* utilizados en este sector son la gasolina (GA) y diésel (DI). En la Figura 5-28 se visualiza el diagrama de árbol que esquematiza la rama de transporte.

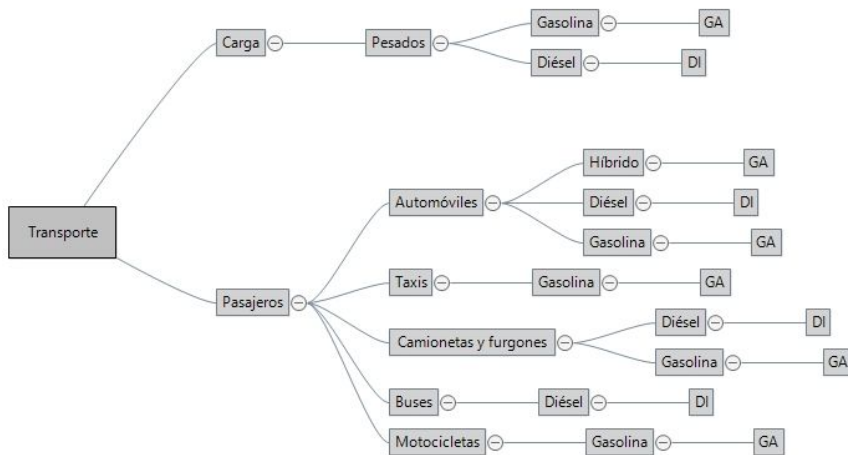
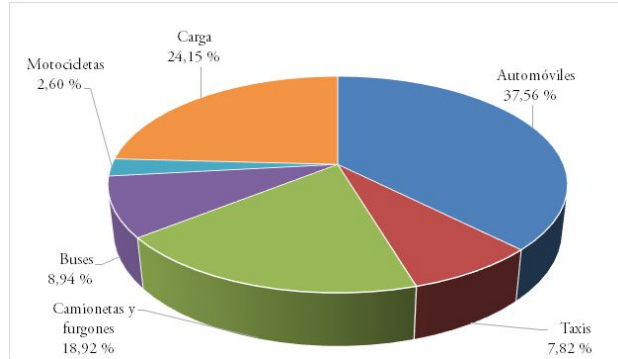


Figura 5-28. Árbol de demanda del sector transporte en Cuenca urbana
Fuente: Elaboración propia

Para el año base la energía requerida para el transporte interno en la ciudad fue de 1627,56 kBEP. El 60,51 % de la energía es utilizada por vehículos que utilizan gasolina y el 39,49 % vehículos que utilizan diésel. El 75,85 % de la energía es consumida por el transporte de pasajeros y el 24,15 % para el transporte de carga (ver Gráfica 5-22).



Gráfica 5-22. Participación energética del transporte

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de la intensidad energética de este sector se empleó el método VKR (vehículo, kilómetro, recorrido) (Broad *et al.*, 2017; IDEE, 2016a; OLADE, 2014). De forma que el consumo de energía es el producto del número de vehículos, el recorrido medio año por vehículo (km/año) y el consumo energético de los vehículos por año (BEP/km). En la Tabla 5-70 se muestra la información utilizada para el cálculo de IE obtenidos de la EMOV (CGA, 2009; EMOV EP, 2011, 2012, 2015).

Tabla 5-70. Intensidades energéticas del transporte por carretera en el cantón Cuenca

Vehículo	Combustible	Parque Vehículos/vehículos	Recorrido km/año	Consumo específico l/100 km	BEP/miles l	Consumo específico BEP/1000 km	Consumo específico kBEP Total	IE BEP/vehículo
Automóviles	DO	510	14 923,08	10,70	6,49	0,69	5,28	10,36
Automóviles	GA	77 428	12 807,69	10,64	5,71	0,61	602,10	7,78
Automóviles	GA	804	16 000,00	4,96	5,71	0,28	3,64	4,53
Buses	DO	1866	68 653,85	17,51	6,49	1,14	145,57	78,01
Camiones	DO	5542	60 576,92	17,96	6,49	1,17	391,21	70,59
Camiones	GA	175	10 538,46	17,48	5,71	1,00	1,84	10,51
Camionetas y Furgonetas	DO	5036	27 076,92	11,38	6,49	0,74	100,67	19,99
Camionetas y Furgonetas	GA	23 377	13 115,38	11,85	5,71	0,68	207,34	8,87
Motocicleta	GA	9114	10 000,00	8,13	5,71	0,46	42,30	4,64
Taxis	GA	4220	50 000,00	10,58	5,71	0,60	127,33	30,17

Fuente: Elaboración propia

5.4.4 Energía en el sector comercial.

Para el sector comercial no se utilizó desagregación por usos. Se empleó la totalidad de la energía requerida. En este caso el nivel de actividad (*AL*) se expresa como el valor agregado comercial en USD y la intensidad energética (*IE*) en BEP/USD. Los energéticos *k* utilizados en este sector son la electricidad (EE) y el GLP.

En el año base este sector requirió de 85,51 kBEP, de los cuales alrededor del 69,72 % corresponden a la electricidad y el resto GLP. En la Tabla 5-71 se muestra el valor agregado (BCE, 2015a), energía eléctrica (Centrosur, 2017) y gas licuado de petróleo (ARCH-Azuay, 2017) del año base.

Tabla 5-71. Valor agregado y energía en el sector comercial en el cantón Cuenca

VA	EE	GLP
Miles USD*	kBEP	kBEP
482 338	59,62	25,89

*Valor agregado sectorial comercial

Fuente: Elaboración propia

5.4.5 Energía en el sector alumbrado público.

El alumbrado público utiliza electricidad y el nivel de actividad (*AL*) se expresa como el valor agregado del cantón Cuenca en USD. La intensidad energética (*IE*) en BEP/USD. En la Tabla 5-72 se muestran la cantidad de energía (Centrosur, 2017) y el valor agregado (BCE, 2015a), requerido para modelar el alumbrado público.

Tabla 5-72 Valor agregado y energía requerida para el alumbrado público en el cantón Cuenca

VA	EE
Miles USD*	kBEP
4 309 226	18,56

*Valor agregado cantonal

Fuente: Elaboración propia

5.4.6 Energía en otros sectores.

El sector otros se refieren a actividades que no se encuentran completamente identificadas en los registros de las bases de datos consultadas o que corresponden actividades de educación, salud o públicas en el caso de la electricidad. El nivel de actividad (*AL*) se expresa como el valor agregado del cantón Cuenca en USD. La intensidad energética (*IE*) en BEP/USD. En la Tabla 5-72 se muestra la cantidad de energía (ARCH-Azuay, 2017; Centrosur, 2017) y el valor agregado (BCE, 2015a), requerido para modelar este sector. El 40,01 % de la energía corresponde a la electricidad seguida por el diésel y GLP con el 39,60 % y 15,38 % respectivamente. En menor proporción se encuentra el fueloil y gasolina.

Tabla 5-73. Valor agregado y energía requerida para otros sectores

VA Miles USD	EE kBEP
4 309 226	48,72

*Valor agregado cantonal

Fuente: Elaboración propia

5.4.7 Balance de energía.

En el cantón Cuenca, al año base se necesitó 2717,00 kBEP. Los flujos de energía son representados en forma gráfica con el diagrama de Sankey en donde se exhiben los diferentes energéticos de la ciudad (Figura 5-29). Se observa la alta dependencia de los recursos fósiles que tiene la localidad de estudio (alrededor del 90 %). La repartición del consumo de energía en Cuenca es similar al consumo nacional (MICSE, 2015). El transporte es el principal consumidor de energía (59,90 %), luego le sigue la industria (20,76 %), el sector residencial (13,72 %), el comercial (3,15 %), otros (1,79 %), alumbrado público (0,68 %). El sector residencial, con un 39,00 % de la participación, es el principal consumidor de electricidad, seguido por la industria con un 23,59 %, comercio con 22,72 %, el alumbrado público con 7,07 % y otros servicios (7,64 %). El GN es utilizado únicamente por el sector industrial y el 99 % del fueloil es utilizado por este sector. De los registros disponibles se tiene que prácticamente la totalidad de la gasolina es utilizada con fines de transporte. El diésel es demandado por el transporte (81,42 %), la industria (16,13 %) y otros usos (2,44 %). Mientras que el GLP lo emplea el sector residencial (67,19 %), seguido por la industria (24,52 %) y en menor proporción por el sector comercial y otros servicios (8,30 %).

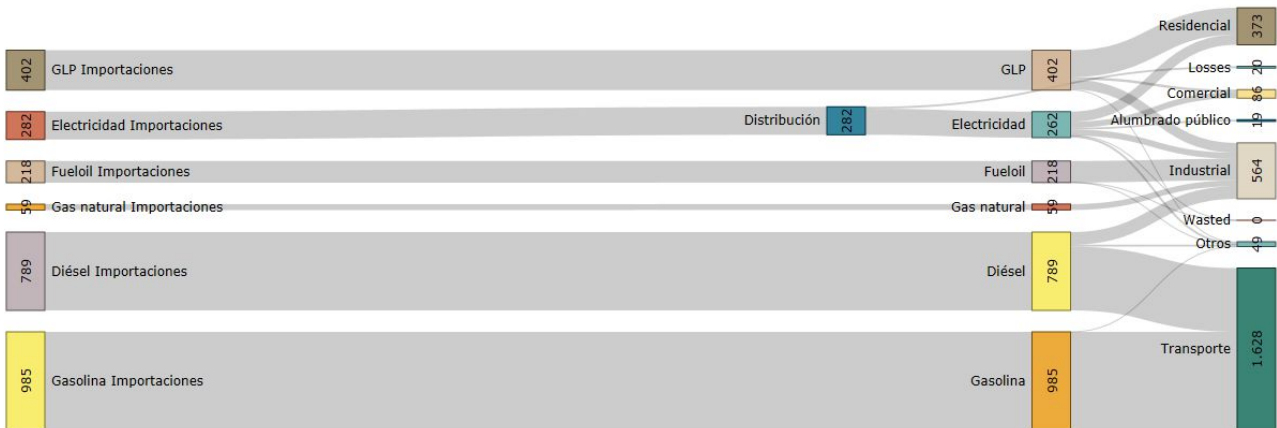


Figura 5-29. Diagrama de Sankey de Cuenca urbana (kBEP)

Fuente: Elaboración propia

El Balance de Energía Cantonal (BEC) se detalla en la Tabla 5-74. Puesto que no se dispone de instalaciones de producción y procesamiento de energía, toda la energía que requiere el cantón es importada desde el exterior. En el caso de las pérdidas de electricidad son del 7 % (Centrosur *et al.*, 2017) y no se asumen pérdidas por distribución de los combustibles (MICSE, 2015).

Tabla 5-74. Balance de energía de la ciudad del cantón Cuenca (kBEP)

	EE	GN	GA	DI	FO	GLP	Total
Producción							
Importación	282,13	59,47	984,85	789,35	218,49	402,46	2.736,75
Exportación							
Oferta total	282,13	59,47	984,85	789,35	218,49	402,46	2736,75
Distribución							
Distribución	-19,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-19,67
Transformación total							
Residencial	102,34					270,39	372,73
Industria	61,89	59,47		127,33	216,55	98,68	563,92
Transporte			984,83	642,73			1627,56
Comercial	59,62	0	0	0	0	25,89	85,51
Alumbrado público	18,56	0	0	0	0	0	18,56
Otros	19,98		0,02	19,29	1,93	7,49	48,72
Demanda total	262,39	59,47	984,85	789,35	218,49	402,46	2717,00

Fuente: Elaboración propia

5.4.8 Ajuste.

Tanto en el IDEE (2016a) como la OLADE (2014) asumen que un ajuste de un $\pm 5\%$ como máximo es adecuado y es sinónimo de la calidad de la información. Pero estos valores pueden variar dependiendo de la disponibilidad y la fuente de información. En la Tabla 5-75 se indican los valores de ajuste entre las bases de datos y la construcción del balance realizado con el LEAP. Se advierte que, salvo el combustible diésel, el resto están bajo el ajuste recomendado. En cuanto al diésel, el transporte es el factor que hace que el ajuste varíe hasta cerca de 6%. Esto se debe a que los datos para construir la Tabla 5-70 no fueron establecidos con fines energéticos, sin embargo, la aproximación es adecuada para los fines de la investigación.

Tabla 5-75. Ajuste entre las bases de datos y el modelo LEAP

	EE	GN	GA	DI	FO	GLP	Total
Bases de datos	260,97	59,42	995,61	838,41	218,45	402,98	2775,84
Resultados LEAP	262,39	59,47	984,85	789,35	218,49	402,46	2717,00
Ajuste	0,54 %	0,09 %	-1,08 %	-5,85 %	0,02 %	-0,13 %	-2,12 %

Fuente: Elaboración propia

5.5 Potencial energético de las energías renovables en la ciudad de Cuenca

Luego de definir las opciones más adecuadas para la ciudad de estudio y conociendo la línea base energética se propone: i) determinar el potencial técnico de cada tecnología, ii) determinar qué cantidad de energía puede sustituirse con las tecnologías seleccionadas en el año base. El alcance no incluye el análisis de la configuración o estabilidad de la red o la disponibilidad de la tecnología en la localidad o limitantes constructivos. Se busca ayudar a la toma de decisiones o formular políticas tendientes a la adopción de estas tecnologías en la urbe.

Se incluye el análisis del potencial del biogás proveniente de aguas residuales (para transporte), potencial de la energía fotovoltaica, hidroeléctrica y biogás de vertedero (para la producción de electricidad) y solar térmica (ACS).

5.5.1 Transporte.

5.5.1.1 Potencial de energía del biogás de aguas residuales.

La producción de metano proveniente de digestión anaeróbica de aguas residuales domésticas es calculada siguiendo la metodología recomendada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambios Climáticos (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change). Concretamente en las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero y el Capítulo relacionado al Tratamiento y Eliminación de Aguas residuales (IPCC, 1996, 2006c). El-Fadel y Massoud (2001) demuestran que con otras metodologías se puede tener valores distintos, debido a la falta de exactitud de los datos utilizados, por ello los cálculos teóricos permiten dimensionar en este caso la cantidad de producción de CH₄, pero pueden variar si se tendría de información local específica.

La cantidad de CH₄, producto del tratamiento de aguas servidas utilizando procesos anaeróbicos, depende de la temperatura. Pues a mayor temperatura se incrementa la producción de metano. La literatura reporta que a temperaturas inferiores a los 15 °C los procesos de producción de metano son improbables (IPCC, 2006c). Según Petropoulos *et al.* (2017) y McKeown *et al.* (2012) plantas de tratamiento a gran escala operan a temperaturas superiores a 18-20 °C. Por ello este tipo de sistemas se prefiere en zonas de climas tropicales (IPCC, 2006c). En regiones templadas (< 20 °C), este factor está limitado pues se requiere un gasto para calentar el sistema dentro del rango óptimo de temperatura (McKeown *et al.*, 2012).

La ciudad de Cuenca tiene una temperatura variable en el año pudiendo llegar a promedios picos de 27 °C o mínimos de 9 °C (ver Gráfica 5-1). La temperatura que se utilizó para el análisis fue de 15 °C. Esto indica que el tratamiento anaeróbico requerirá de energía extra para mantener el proceso del sistema.

En la metodología del IPCC, son de interés para este trabajo tres vías de realizar el tratamiento que involucran el proceso anaerobio: i) Tratamiento anaeróbico de los lodos, producto de plantas de tratamiento aeróbico de aguas; ii) lagunas anaeróbicas y iii) reactores anaeróbicos. El CH₄ producido se calcula mediante la Ecuación 5-4.

$$CH_4 \text{ de aguas residuales} = (U_P \times G_T \times B_o \times F_C) \times (POB \times DBO * I_{DBO} - S)$$

Ecuación 5-4

En donde:

CH₄, cantidad anual de metano proveniente de las aguas residuales en kg CH₄/año.

U_P, fracción de la población según el grado de ingresos.

G_T, grado de utilización del sistema de tratamiento y/o eliminación.

B_o, máxima capacidad de producir metano, en kg CH₄/kg DBO.

F_C, factor corrector para el CH₄.

POB, población en habitantes.

DBO, demanda bioquímica per cápita de oxígeno en kg DBO/hab/año.

I_{DBO}, factor de corrección para el DBO industrial que se envía al sistema de tratamiento.

S_L, componente orgánico separado como lodo en kg DBO/año.

Para las condiciones de la ciudad de Cuenca en la Tabla 5-76 se especifican los valores utilizados para el cálculo.

Tabla 5-76. Valores adoptados para el cálculo de emisiones de CH₄ anuales en Cuenca (biogás de aguas residuales)

Parámetro	Valor	Fuente	Justificación
Población (hab)	391 657,00	(INEC, 2016b)	Población urbana de Cuenca
DBO (kg DBO/hab/año)	14,60	(IPCC, 2006c)	Valor recomendado para América Latina
I _{DBO}	1,25	(IPCC, 2006c)	Para descargas industriales recolectadas.
S _L	0,00	(IPCC, 2006c)	Se recomienda si no existen datos disponibles
U _P (%)	1,00	Se supone que toda la población del área urbana independiente del grado de ingresos accede al servicio de tratamiento de aguas residuales en un 95 %. Este valor es el porcentaje del servicio de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad. Considerando esto el valor de U _P × G _T = 0,95.	
G _T (%)	0,95		
Bo (kg CH ₄ /kg DBO)	0,6	(Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2015; IPCC, 1996, 2006c)	Valor por defecto del reporte de 2006 y el reporte de 1996.
F _C (kg CH ₄ /kg DBO)	0,80	(IPCC, 1996, 2006c)	Para: reactor anaeróbico, digestor anaeróbico para lodos o laguna anaeróbica
Emisiones de CH ₄ = 3 259 369,55 kg CH ₄ /año			
LHV CH ₄ = 36 MJ/m ³			
Densidad CH ₄ = 0,656 kg/m ³			

Fuente: Elaboración propia

El metano que se podría disponer en la ciudad de Cuenca (año 2015), es de 3259,37 ton CH₄/año (13 612,47 m³ diarios), que equivale a 30,76 kBEP/año (178 867,841 GJ). Esto es el 1,13 % del total de energía requerida en la ciudad. Si se compara en términos de los requerimientos del transporte se tiene un 1,89 %.

La potencia de la planta de biogás, sin considerar pérdidas, con un factor de planta de 0,7 sería de 8,10 MW. Se considera, además, una eficiencia del proceso de 47 % (ver Tabla 5-8).

Para determinar el consumo energético del transporte en Cuenca se establece la sustitución de buses que utilizan diésel por gas natural. El recorrido medio de un bus diésel es de 68 654 km/año (188,09 km/día) (EMOV EP, 2015). El consumo específico medio es 17,51 l/100 km (21,61 km/gal). El total de galones requeridos en un día es 8,70 gal/día. Si la energía contenida en un galón es 0,02 BEP/gal, el total de energía para un bus que utiliza diesel en Cuenca es de 0,21 BEP día (1242,05 MJ/día).

Con un poder calorífico (LHV) del CH₄ de 6,20 BEP/m³ (36 MJ/m³), se requieren 34,5 m³ de metano para el recorrido medio diario de un bus a diésel. Utilizando el volumen diario esperado de producción del metano, se podría sustituir el combustible a 394 buses (21,14 % de la flota de buses existentes).

Estos valores disminuyen si se considera las pérdidas y el requerimiento energético del sistema anaeróbico. Según (Nolasco, 2010) las pérdidas en el sistema de captura, ruteo y utilización están entre el 5 al 10 %, se asume 5 %. Asimismo, Cordero (2017)²² determina que, para el caso de Cuenca, la energía necesaria para mantener la temperatura adecuada del proceso es de alrededor del 15 % del potencial energético del metano. En este caso, la energía disponible será 24,80 kBEP y bajo las mismas condiciones expuestas se podría sustituir a 318 buses (17,04 % de la flota de buses existentes). Esta cantidad representa el 1,53 % de la energía total requerida para el parque automotor o 0,91 % del total de energía que requirió la parte urbana de Cuenca.

5.5.2 Electricidad.

5.5.2.1 Potencia de energía de hidroeléctrica.

Los principales ríos que atraviesan la ciudad de Cuenca son cuatro. El potencial hidroeléctrico de cada río está definido por un caudal y una diferencia de altura. Para cada río se determinan los caudales de diseño apropiados y se establece el diferencial de altura máxima hipotética dentro del límite urbano. Como información de partida

²² El autor de esta tesis dirigió el proyecto de titulación de posgrado: Evaluación del potencial energético de las aguas residuales urbanas generadas en ciudades de altura, de Cordero (2017), entre los objetivos planteados fue establecer condiciones para el aprovechamiento energético de las aguas residuales en ciudades que tienen temperaturas bajo 20 °C.

se ha utilizado las mediciones de aforo de las estaciones hidrometeorológicas ubicadas dentro del perímetro urbano (ver Figura 5-30). Está claro, que en el exterior (aguas arriba o abajo) de los límites urbanos se pueden presentar mejores condiciones para la colocación de este tipo de instalaciones. No se considera en este análisis turbinas hidrocinéticas (bajas o nulas alturas) o turbinas de ultra baja altura (0 a 3 m), debido a la falta de confiabilidad y desarrollo (D. Zhou & Deng, 2017).

Se advierte que los ríos tienen una trayectoria con variaciones de altura poco pronunciadas, lo que implica que se requiera grandes distancias para tener alturas importantes.

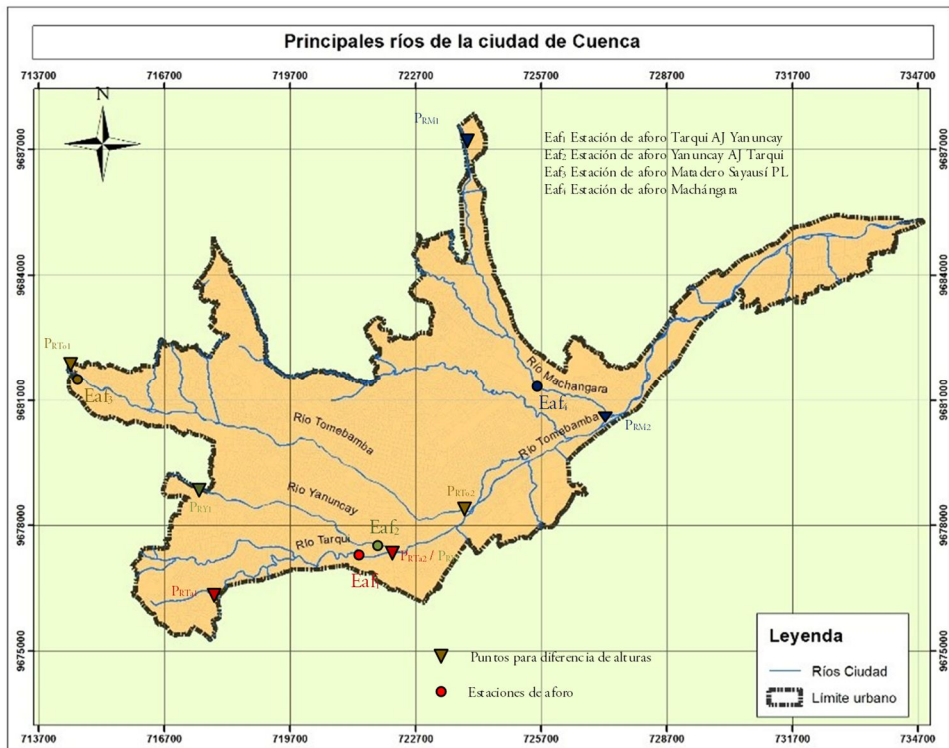


Figura 5-30. Recursos hídricos que atraviesan la ciudad de Cuenca urbana

Fuente: Elaboración propia

Se estima el potencial energético para la colocación de pequeñas hidroeléctricas a partir de la Ecuación 5-5 (Kilama, 2013; Orehounig *et al.*, 2014):

$$P = \eta_{hi} \times \rho_a \times g \times Q_e \times H_n$$

Ecuación 5-5

En donde:

P , potencia hidroeléctrica en kW.

η_{hi} , eficiencia de los equipos mecánicos y eléctricos en %.

ρ_a , densidad del agua en 1000 kg/m³.

g , aceleración debido a la gravedad en m/s².

Q_{eq} , caudal de equipamiento que pasa a través de la turbina en m³/s.

H_n , altura neta en metros.

La eficiencia de los equipos mecánicos y eléctricos incluye la eficiencia de la turbina ($\eta_{turbina} = 0,9$), generador ($\eta_{generador} = 0,95$) y transformador ($\eta_{transformador} = 0,99$) y es $\eta_{hi} = 85$ %. Mientras que el producto de la densidad y aceleración de la gravedad es $\rho_a * g = 9800$ kg·m⁻²·s⁻².

El salto natural o la altura bruta (H_b) es la distancia vertical entre la toma de agua y la descarga. Si se restan las pérdidas de conducción en las tuberías, canales o cámaras, se obtiene la altura neta (H_n). Las pérdidas pueden valorarse en metros pudiendo estar entre el 5 al 10 % de la altura bruta (Castro, 2006). Para cada río, se considera el salto como la diferencia de altura en el cual el río ingresa a los límites urbanos hasta donde sale o forma parte de otra corriente. En la Tabla 5-77 se presentan los puntos de interés para el cálculo del salto especificadas en la Figura 5-30.

Tabla 5-77. Localización de puntos de interés para el caudal de equipamiento

Río	Punto	Altura máxima	Coordenadas 17M (X; Y)
Tarqui	P_{RTa1}	2574,00	717850,00; 9675735,00
	P_{RTa2}	2516,00	722049,00; 9677398,00

Río	Punto	Altura máxima	Coordenadas 17M (X; Y)
Yanuncay	E _{af1}	2528,00	721248,00; 9677414,00
	P _{RY1}	2588,00	717717,00; 9678784,00
	P _{RY2}	2516,00	722049,00; 9677398,00
	E _{af2}	2520,00	721831,00; 9677508,00
Tomebamba	P _{RT01}	2701,00	714514,00; 9681726,000
	P _{RT02}	2485,00	723985,00; 9678354,00
	E _{af3}	2693,00	714623,00; 9681641,00
Machángara	P _{RM1}	2621,00	723806,00; 9687317,00
	P _{RM2}	2431,00	727329,00; 9680633,00
	E _{af4}	2475,00	725473,00; 9681509,00

Fuente: Elaboración propia

Para evitar las pérdidas, Kosa *et al.* (2011) propone una distancia entre la toma de agua y la casa de máquinas que no supere 3000 m. Rojanamon (2009) asume en otro estudio que una distancia razonable sería de 5000 m. Por otro lado, la distancia mínima entre dos consecutivos sistemas no debería superar los 500 m, según Kusre *et al.* (2010). La relación entre la distancia de la toma y casa de máquinas y el gradiente para varios estudios se muestra en la Tabla 5-78. Aunque los estudios citados admiten que se puede aprovechar la potencia hidroeléctrica para gradientes menores a 2 %, los costos y las dificultades constructivas pueden incrementarse para aumentar el salto bruto.

Tabla 5-78. Mínimo gradiente para la producción de energía hidroeléctrica

Altura (m)	Recorrido del río (km)	Gradiente (%)	Fuente
20	3	$\geq 0,66$	(Kosa <i>et al.</i> , 2011)
3; 4,2; 6; 8,4	5; 7; 10; 14	$\geq 0,06$	(Operacz, 2017)
50,6; 13,8	22; 6	$\geq 0,23$	(Operacz, 2017)

Altura (m)	Recorrido del río (km)	Gradiente (%)	Fuente
10	0,50	≥ 2	(Kusre <i>et al.</i> , 2010)
		≥ 4	(Beleño, 2014)

Fuente: Elaboración propia

Los caudales inferiores a 10 m³/s se consideran pequeños, mientras que caudales entre 10 m³/s a 100 m³/s, son medios. Por otro lado, alturas menores a 30 m son bajas, entre 30 a 100 m son medias y entre 100 a 1000 m, altas (Carapellucci, Giordano, & Pierguidi, 2015).

El caudal de equipamiento (Q_{eq}) es aquel que permite el funcionamiento de la central la mayor parte del año. Para definirlo se requiere información de estaciones de aforo de más de 25 años ubicados en el recorrido de los ríos. A partir de estas series se determinan un año medio representativo, con el cual se establecerá una curva de caudales clasificados. En el caso de los ríos analizados, la información disponible es de menos de 20 años, pero para los fines de esta investigación se considera como información adecuada.

Los caudales de aforo se registran en secuencias variables en minutos. A partir de esta información se establece la aportación anual (López, 2006). Luego se determina la mayor frecuencia de caudales medios. Y a partir de esta información se elige al año hidrológico medio. Para cada río se muestra la curva de caudales clasificados, la misma que permite caracterizar al río con los siguientes caudales:

Q_m , caudal medio anual en m³/s.

Q_{max} , caudal máximo absoluto en m³/s.

Q_{min} , caudal mínimo absoluto en m³/s.

Q_{90} , caudal igualado o superado en 90 días en m³/s.

Q_{270} , caudal igualado o superado en 270 días en m³/s.

Q_e , caudal ecológico (10 % del caudal medio) en m³/s.

Q_{eq} , caudal de diseño en m³/s.

Con la Ecuación 5-6 se define el caudal de equipamiento (S. Rojas, Miranda, & Montero, 2010):

$$Q_{eq} = \frac{Q_{90} - Q_m}{2} - Q_e$$

Ecuación 5-6

Río Tarqui

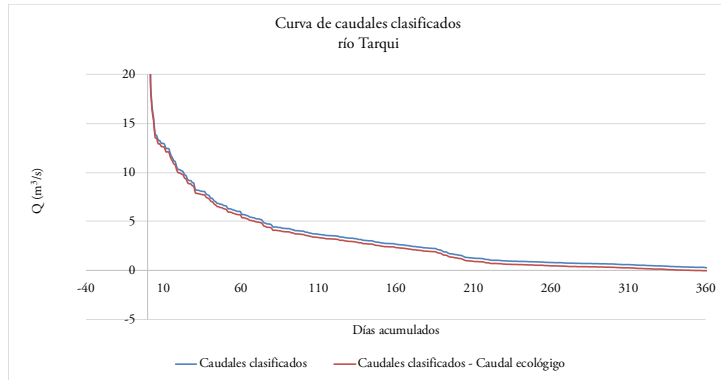
El salto natural de este aprovechamiento es de 58,00 m (Ver Tabla 5-77). Los caudales de aforo se obtuvieron estación de aforo Tarqui AJ Yanuncay (ETAPA EP, 2017c). A partir de esta información se estableció la aportación anual (Tabla 5-79), (López, 2006).

Tabla 5-79. Aportaciones anuales en el río Tarqui

Año	Aportación hm ³	Aportaciones anuales
2000	466,92	
1999	309,90	
2008	276,25	
2011	197,63	
2007	171,61	
2001	151,06	
2009	143,75	
2006	141,65	
2010	107,81	
2002	86,39	
2003	76,29	

Fuente: Elaboración propia

Se nota que la mayor frecuencia de caudales medios corresponde a los años 2001, 2007 y 2011, así como a los datos 2006, 2010 y 2009. Para el análisis se toma como año medio al año 2009. En la Gráfica 5-23 se muestra la curva de caudales clasificados, que permite definir el caudal de equipamiento.



Gráfica 5-23. Curva de caudales clasificados, río Tarqui

Fuente: Elaboración propia

Río Yanuncay

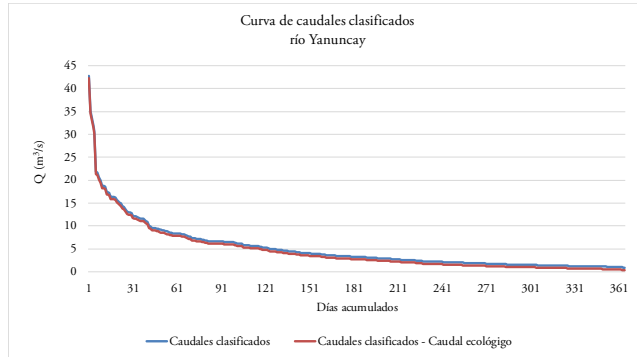
El salto natural de este aprovechamiento es de 72,00 m (Tabla 5-77). Los caudales de aforo se obtuvieron de la estación Yanuncay AJ Tarqui (ETAPA EP, 2017d). En la Tabla 5-80 se indica la aportación anual (López, 2006).

Tabla 5-80. Aportaciones anuales en el río Yanuncay

Año	Aportación hm ³	Aportaciones anuales
1999	628,636	
2000	595,846	
1998	563,401	
2011	372,036	
2009	331,215	
2012	270,564	
2001	269,216	
2010	258,851	
2013	211,928	

Fuente: Elaboración propia

La mayor frecuencia de caudales medios corresponde a los años 2012, 2001, 2010. Para el análisis se toma como año medio al año 2010. En la Gráfica 5-24 se muestra la curva de caudales clasificados, que permite definir el caudal de equipamiento.



Gráfica 5-24. Curva de caudales clasificados, río Yanuncay
Fuente: Elaboración propia

Río Tomebamba

El salto natural de este aprovechamiento es de 216,00 m (Ver Tabla 5-77). La información de los caudales se obtuvo de la estación de aforo Matadero en Sayausí (ETAPA EP, 2017b). A partir de esta información se estableció la aportación anual (Tabla 5-81) (López, 2006).

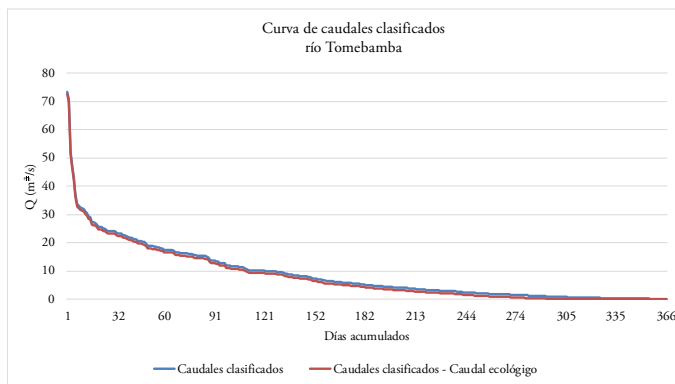
Tabla 5-81. Aportaciones anuales, en el río Tomebamba

Año	Aportación hm ³	Aportaciones anuales
2011	466,92	
2008	309,90	
1999	276,25	
2007	197,63	
1998	171,61	
2000	151,06	
2012	143,75	
2010	141,65	
2009		
2006		
2004		
2005		
2003		
2001		
2013		
2002		

Año	Aportación hm ³	Aportaciones anuales
2009	107,81	
2006	86,39	
2004	76,29	
2005	466,92	
2003	309,90	
2001	276,25	
2013	197,63	
2002	171,61	

Fuente: Elaboración propia

La mayor frecuencia de caudales medios corresponde a los años 2011, 2008, 1999, 2007, 1998, así como a los datos 2000, 2012, 2010, 2009. Para el análisis se toma como año medio al año 2012. La Gráfica 5-25 muestra la curva de caudales clasificados, que permite definir el caudal de equipamiento.



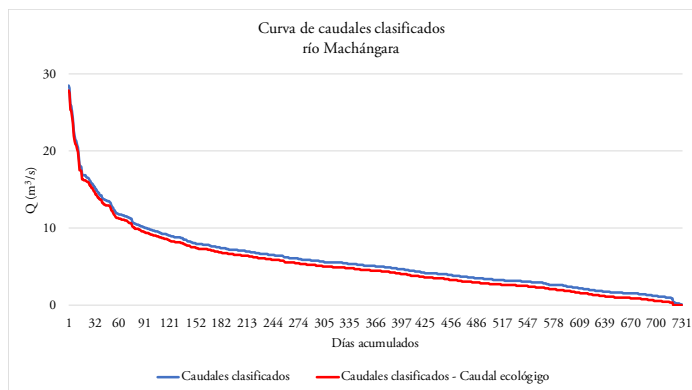
Gráfica 5-25. Curva de caudales clasificados, río Tomebamba

Fuente: Elaboración propia

Río Machángara

El salto aprovechable según la Tabla 5-77 es de 190,00 m. La información de la estación de aforo Machángara (Llantera) (ETAPA EP, 2017a) no permitió determinar la aportación anual para varios años (se dispuso de información del año 2015 y 2016).

Se utilizó en aporte del año 2015 (más bajo) para hacer el cálculo energético.



Gráfica 5-26. Curva de caudales clasificados, río Machángara

Fuente: Elaboración propia

Potencial de energía hidroeléctrica

La Tabla 5-82 muestra los caudales característicos de los ríos analizados, así como la estimación del potencial y la energía.

Tabla 5-82. Potencial de energía hidroeléctrica

Parámetro	Unidad	Río Tarqui	Río Yanuncay	Río Tomebamba	Río Machángara
Hb	m	58,00	72,00	216,00	190,00
Recorrido	m	6400,00	4900,00	10 900,00	8650,00
Gradiente	%	0,91	1,47	1,98	2,20
Q _m	m ³ /s	3,31	5,17	8,83	5,95
Q _{max}	m ³ /s	47,59	42,75	73,50	28,47
Q _{min}	m ³ /s	0,24	1,11	0,16	1,08
Q ₉₀	m ³ /s	4,30	6,66	13,72	7,54
Q ₂₇₀	m ³ /s	0,79	1,82	1,64	3,13
Q _e	m ³ /s	0,33	0,52	0,88	0,59

Parámetro	Unidad	Río Tarqui	Río Yanuncay	Río Tomebamba	Río Machángara
Q _{eq}	m ³ /s	3,48	5,92	11,28	6,75
P	MW	1,51	3,19	18,26	9,61
F _p	%	0,53	0,54	0,47	0,63
Energía	GWh	7,03	15,15	75,51	52,84

Fuente: Elaboración propia

Se observa que la disponibilidad de operación está por debajo del 65 %, lo que indica que se podría disminuir la potencia calculada de 32,59 MW. La energía total que se podría obtener es de 151,78 GWh.

Si se aplican las restricciones expuestas de 5000 m entre toma de agua y casa de máquinas, así como distancias entre centrales de 500 m, para cada río se tendrá la estimación expuesta en la Tabla 5-83. El total de potencia disponible será 26,69 MW y 120,28 GWh de energía anual.

Tabla 5-83. Potencial de energía hidroeléctrica con restricciones

Parámetro	Unidad	R.	R.	R.	R.
		Tarqui	Yanuncay	Tomebamba	Machángara
Recorrido	m	5000,00	4900,00	5000,00	5000,00
Hb	m	45,31	72,00	99,08	109,83
Nc*	u	1,00	1,00	2,00	1,00
P	MW	1,18	3,19	16,76	5,56
Energía	GW	5,49	15,12	69,00	30,67

*Número de centrales

Fuente: Elaboración propia

5.5.2.2 Potencial de la energía solar fotovoltaica en Cuenca urbana.

La superficie disponible para la captación solar pueden ser techos o fachadas. Para la evaluación en la ciudad se analiza la captación en techos, debido a que el emplazamiento en una latitud ecuatorial para ángulos muy inclinados la captación es desfavorable (la latitud de la ciudad es 2°54'). La complejidad de la forma urbana impide evaluar con exactitud la superficie disponible. Las superficies de tejados homogéneas y su orientación pueden favorecer la recolección solar, sin embargo, la

existencia de chimeneas, ductos, ventanas, antenas o escaleras, ocasionan obstrucciones que pueden ser factores que condicionen la operación de los sistemas fotovoltaicos (Mavromatidis *et al.*, 2015).

El potencial técnico de la energía solar anual se establece utilizando la Ecuación 5-7 (Bergamasco & Asinari, 2011; IDEE, 2016a; OLADE, 2014; Romero, Duminil, mero Sánchez Ramos, & Eicker, 2017):

$$P = A_{FV} \cdot I \cdot Fr \cdot \eta_r$$

Ecuación 5-7

Donde:

P, potencial técnico en kWh/año.

A_{FV} , área disponible para la colocación de techos en m².

I, irradiación global anual promedio en kWh/m².

F_r , factores de reducción debido a la disponibilidad arquitectónica.

η_r , factores de reducción del potencial solar.

El área disponible se calcula una vez determinada el área de techos que tiene la ciudad. Luego aplicando factores reducción se estima el área que puede utilizarse para la instalación de paneles fotovoltaicos. F_r es el factor de reducción que indica restricciones para la colocación de paneles ya sea por disponibilidad arquitectónica o del recurso. Mientras que los factores de reducción η_r se deben a que no toda la energía disponible es convertida en energía eléctrica ya sea por la eficiencia del sistema fotovoltaico o por condiciones ambientales.

Área disponible

Existen varias metodologías para evaluar el área de techos según la información disponible. Estas dependen de la exactitud perseguida así como de la existencia de datos (Byrne, Taminiu, Kurdgelashvili, & Kim, 2015). Si se dispone del área de la planta baja se puede estimar el área de los techos. Varios estudios utilizan la relación área techo/área de planta baja como 1,2 (IEA, 2002; Peng & Lu, 2013) debido a la existencia de faldones o a la inclinación de los tejados. De los datos catastrales de la ciudad de Cuenca se definió un total de 13,79 km² (GAD Cuenca, 2017), de área de plantas bajas, correspondiente a 166 630 de las unidades catastrales registradas en la parte urbana de la ciudad de Cuenca. Con esto se tiene un área estimada de techos

de 16,55 km², que corresponde al 22,66 % de la superficie de urbana de la ciudad de Cuenca.

Factores de reducción de área

El área disponible para los paneles fotovoltaicos se calcula a partir del conocimiento del área de los techos. Wiginton y colegas (2010) sostienen que hay cuatro factores que reducen el área útil de los techos: i) sombras ocasionadas por elementos del propio techo o de edificaciones vecinas, ii) otros elementos que ocupan el techo (chimeneas, ductos, ventanas, antenas o escaleras), iii) orientación de las cubiertas. En ese mismo sentido, estos autores consideran que la indisponibilidad de información (m² de techos) impide conocer el máximo potencial solar en áreas urbanas.

Romero y colaboradores (2017) establecen un conjunto de factores de reducción del área potencial de techos. Estos factores son el resultado de una extensa revisión bibliográfica y son los utilizados en este estudio (ver Ecuación 5-8):

$$F_r = C_{con} \times C_{prot} \times C_{so} \times C_{or} \times C_{in} \times (C_{GCR} - C_{as}) \times C_{FV} \times C_{ST}$$

Ecuación 5-8

En donde:

C_{con} , restricciones constructivas.

C_{prot} , restricciones debido a que las edificaciones son históricas o patrimoniales.

C_{so} , restricciones debido al efecto de las sombras.

C_{or} , restricciones debido a la orientación de la superficie.

C_{in} , restricciones debido a la inclinación de la superficie.

C_{GCR} , restricciones debido a la separación de paneles.

C_{as} , restricciones debido al área para acceso y mantenimiento requerida.

C_{FV} , disponibilidad para la colocación de paneles solares fotovoltaicos.

C_{ST} , disponibilidad para la colocación de paneles solares térmicos.

En la Tabla 5-84 se especifican los factores de reducción utilizados para el cálculo de la superficie útil en la Ciudad de Cuenca.

Tabla 5-84. Factores de utilización utilizados para el cálculo de la superficie disponible de techos

Factor de reducción	Valor	Fuente	Justificación
Ccon	0,85 todos los techos, a partir de: 0,8 techos planos 0,9 techos inclinados	(Romero <i>et al.</i> , 2017)	Se utiliza 0,85, promedio de los datos propuestos.
Cprot	(1-2,14/73) =0,97	(El Telégrafo, 2013)	El centro histórico de Cuenca es considerado de interés patrimonial. Ocupa 2,14 km ² del área urbana de Cuenca.
Cso	0,75 todos los techos, a partir de: 0,8 techos inclinados 0,7 techos planos	(Romero <i>et al.</i> , 2017)	Se utiliza 0,75, promedio propuesto debido a la baja densidad de construcciones.
Cor	0,96	Evaluación con <i>software</i> SAM para diferentes orientaciones.	Según la orientación hay una reducción máxima de irradiación del 4 % (ver sección Restricciones debido a la inclinación y orientación de los paneles). Se utiliza este dato como valor extremo.
Cin	0,90	Evaluación con <i>software</i> SAM para diferentes inclinaciones.	Según la inclinación hay una reducción máxima de irradiación del 10 % (ver sección: Restricciones debido a la inclinación y orientación de los paneles). Se utiliza este dato como valor extremo.
CGCR y Cas	0,81 todos los techos, a partir de:	(Byrne, Taminiau, Kurdgelashvili, <i>et al.</i> , 2015; Whitaker,	Se considera el promedio. 0,62 se obtiene de lo indicado en la sección Coeficiente de

Factor de reducción	Valor	Fuente	Justificación
	1 techos inclinados 0,62 techos planos	Townsend, Razon, Hudson, & Vallvé, 2011)	cobertura del suelo. Para regiones de baja altitud relación 2:1 y a 10° de inclinación.
CFV	1		No hay restricciones adicionales para la colocación de paneles solares fotovoltaicos.
CST	$(1-0,27/16,55) = 0,98$	Calculado en función de la demanda de ACS	Se considera el área requerida para cubrir la demanda de ACS con paneles solares térmicos (ver numeral 5.5.3.1).
Fr	0,426		Ecuación 5-8

Fuente: Elaboración propia

Coefficiente de cobertura del suelo

Las distancias para evitar los efectos de las sombras y requerimientos de áreas destinadas a servicio y mantenimiento se calculan siguiendo la metodología de Byrne *et al.* (2015) aplicada en las ciudades de Ámsterdam, Londres, Múnich, Nueva York, Seúl y Tokio. Se calcula el coeficiente de cobertura del suelo (GCR, Ground Coverage Ratio), utilizando la Ecuación 5-9:

$$GCR = \frac{c}{d} = \left(\cos(\beta) + \frac{b}{a} * \text{sen}(\beta) \right)^{-1}$$

Ecuación 5-9

En donde (ver Figura 5-31):

- c, es el ancho del panel fotovoltaico.
- d, distancia entre filas.
- b, espacio entre filas.
- a, distancia vertical.
- β , es el ángulo de inclinación del panel.

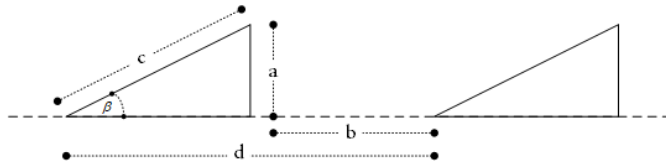


Figura 5-31. Coeficiente de cobertura del suelo para instalaciones solares fotovoltaicas

En la práctica se busca que la relación b/a sea 2:1 en regiones de baja latitud y 3:1 en latitudes medias (Whitaker *et al.*, 2011). En la Tabla 5-85 se muestran diferentes coeficientes de cobertura del suelo para diferentes ángulos, asimismo, se establece un área de servicio requerida para el acceso y mantenimiento (AS). Para ángulos pequeños se debe contar con un área de espaciamiento específica, mientras que para mayores ángulos el espaciamiento requerido para evitar las pérdidas puede ser utilizado como área servicio. Byrne *et al.* (2015) proponen un espaciamiento de 20 % cuando el ángulo de inclinación es mínimo y una reducción lineal hasta 0 % para una inclinación de 30° .

Tabla 5-85. Coeficiente de cobertura del suelo y área de servicio

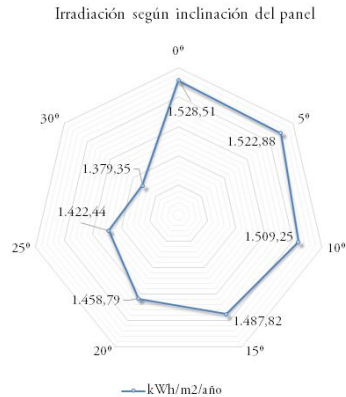
Beta	b/a =2:1			b/a=3:1		
	GCR (%)	AS (%)	Espaciamiento disponible (%)	GCR (%)	AS (%)	Espaciamiento disponible (%)
0	100 %	20 %	80 %	100 %	20 %	80 %
5	85 %	17 %	69 %	80 %	17 %	63 %
10	75 %	13 %	62 %	66 %	13 %	53 %
15	67 %	10 %	57 %	57 %	10 %	47 %
20	62 %	7 %	55 %	51 %	7 %	44 %
25	57 %	3 %	54 %	46 %	3 %	43 %
30	54 %	0 %	54 %	42 %	0 %	42 %

Fuente: Elaboración propia

Restricciones debido a la inclinación y orientación de los paneles solares fotovoltaicos

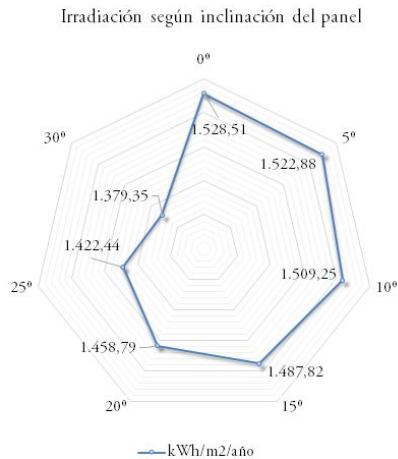
Con la información del área de estudio y utilizando el *software* System Advisor Model (SAM) (NREL, 2016) se identifica la variación de la radiación incidente a

diferentes ángulos de inclinación y a diferente orientación con respecto al azimut. Se obtiene la irradiación media anual para cada azimut (0-315°), a partir de los valores de irradiación media diaria mensual (ver Gráfica 5-27). En la Gráfica 5-28 se muestran los valores de irradiación media anual para diferentes ángulos de inclinación de los paneles (0-30°).



Gráfica 5-27. Irradiación media para diferentes orientaciones

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 5-28. Irradiación media anual para diferentes inclinaciones

Fuente: Elaboración propia

El valor medio anual de la irradiación sobre una superficie horizontal en el área de estudio es 1528,51 kWh/m². Comparado con la mínima y máxima irradiación al variar la orientación se tiene 3 a 4 % de variación respectivamente. Al analizar la inclinación se tiene una diferencia entre 0 a 10 % comparada con la irradiación máxima y mínima respectivamente.

Factores de reducción del potencial solar

Romero y colegas (2017) anotan que el cálculo del potencial solar debe considerar factores que intervienen en la captación y conversión de la energía de los paneles fotovoltaicos. La Ecuación 5-10 permite calcular el factor de reducción del potencial solar:

$$\eta_r = \eta_{ef} \times \eta_{te} \times \eta_{or} \times \eta_{in}$$

Ecuación 5-10

En donde:

η_r , factor de reducción del potencial solar.

η_{ef} , eficiencia de los módulos fotovoltaicos.

η_{te} , pérdidas por condiciones climatológicas (temperatura e irradiación).

η_{or} , pérdidas por el ángulo de incidencia de los rayos solares.

η_{in} , pérdidas debido a la instalación eléctrica y suciedad.

En la Tabla 5-86 se presentan los factores mencionados para el cálculo del factor de reducción del potencial η_r .

Tabla 5-86. Factores de reducción del potencial de energía solar fotovoltaica

Factor de reducción	Valor	Fuente	Justificación
η_{ef}	0,18	(Khan & Arsalan, 2016; Orehounig <i>et al.</i> , 2014)	Se utiliza el promedio de las fuentes consultadas.
η_{te}	0,90	(Bergamasco & Asinari, 2011; Romero <i>et al.</i> , 2017)	Se utiliza el promedio propuesto debido en la bibliografía.

Factor de reducción	Valor	Fuente	Justificación
η_{or}	0,975 todas las orientaciones	(Romero <i>et al.</i> , 2017)	Se considera el promedio al no determinar las orientaciones de los paneles.
	0,95 no orientados		
	1 bien orientados		
η_{in}	0,84	(Bergamasco & Asinari, 2011)	Considera las pérdidas por reflexión del arreglo fotovoltaico, polvo o suciedad, conexiones y del inversor.
η_r	0,13	Ecuación 5-10	

Fuente: Elaboración propia

Potencial de energía solar fotovoltaica

Con la Ecuación 5-7 se calcula el potencial solar para Cuenca urbana. La Tabla 5-87 resume los resultados al asumir el área de techos estimada y los factores de reducción descritos.

Tabla 5-87. Potencial de la energía solar fotovoltaica de Cuenca urbana

Parámetro	Valor	Unidad
Área de pisos	13,79	km ²
Área de techos/Área de planta baja	1,20	
Área de techos	16,55	km ²
Fr	0,43	
η_r	0,13	
Irradiación media anual	1528,51	kWh/m ²
Potencial de energía solar en Cuenca urbana	1454,90	GWh
Demanda de energía eléctrica en la ciudad de Cuenca	423,80	GWh

Parámetro	Valor	Unidad
Pérdidas por distribución	31,89	GWh
Capacidad de provisión de energía eléctrica por fotovoltaica	319,27	%

Fuente: Elaboración propia

La energía eléctrica requerida para abastecer la demanda en el año 2015 por la parte urbana en el cantón Cuenca fue de 455,70 GWh (282,13 kBEP), incluidas las pérdidas. Es decir, la energía solar fotovoltaica pudiera abastecer 3,19 veces lo demandado para el año base de energía eléctrica. La potencia total de la planta fotovoltaica para abastecer la demanda de energía sería de 314,27 MW, con un factor de planta del 16,55 % (1450 horas). Esto permitiría abastecer todo el consumo eléctrico de la ciudad.

5.5.2.3 Potencia de energía del biogás del vertedero controlado.

El potencial energético del metano se obtiene de calcular las emisiones del vertedero. Se emplea las directrices establecidas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambios Climáticos (IPCC, 2006a), referidas a la eliminación de desechos.

La producción de metano es provocada por la descomposición de la materia orgánica de los desechos formando metano y dióxido de carbono. Las emisiones dependen de la descomposición del material a lo largo de varios años y no son constantes, siendo al inicio las más significativas y a medida que el carbono es consumido en condiciones anaerobias con el tiempo decaen (IPCC, 2006a). Una estimación detallada requiere información histórica de varios años (50 años).

Mediante la Ecuación 5-11 y Ecuación 5-12 se puede estimar las emisiones de metano para un año. Esta metodología es utilizada por varios autores para determinar el potencial energético del biogás con fines de producción de electricidad (de Souza *et al.*, 2014; Salomon & Silva Lora, 2009; Tan *et al.*, 2014).

$$\text{CH}_4 \text{ de vertedero controlado} = \text{POB} \times \text{Des} \times \text{COD} \times \text{COD}_f \times F_C \times F_{\text{CH}_4} \times C_{pm} \times (1 - \text{OX})$$

Ecuación 5-11

$$\text{COD} = \sum_i (\text{COD}_i \times W_i)$$

Ecuación 5-12

En donde:

CH_4 , cantidad anual de metano proveniente de los desechos sólidos urbanos en kg CH_4 /año.

POB, población en habitantes.

Des, cantidad per cápita de desechos en kg/hab.

COD, fracción del carbono orgánico degradable contenido en los desechos brutos, en kg C/kg desecho.

COD_i , fracción de carbono orgánico degradable que se descompone.

F_c , factor de corrección de CH_4 para la descomposición aeróbica durante el año de deposición.

F_{CH_4} , fracción de CH_4 en el gas de vertedero generado.

C_{pm} , cociente de pesos moleculares CH_4/C .

OX, factor de oxidación.

COD_i , fracción de carbono orgánico degradable en el desecho tipo i.

W_i , fracción del tipo de desechos i por categoría de desecho.

Para las condiciones de la ciudad de Cuenca en la Tabla 5-88 se especifican los valores utilizados para el cálculo.

Tabla 5-88. Valores adoptados para el cálculo de emisiones de CH_4 anuales en Cuenca (biogás de vertedero)

Parámetro	Valor	Fuente	Justificación
Población (hab)	391 657,00	(INEC, 2016b)	Población urbana de Cuenca.
De (kg/hab/año)	255,5	(EMAC, 2017)	Reporte de la Empresa Municipal de Aseo de Calles de Cuenca.
CODf	0,5	(IPCC, 2006a)	Recomendado por el IPCC.
F_c	1	(IPCC, 2006a)	Recomendado por el IPCC.

Parámetro	Valor	Fuente	Justificación
F_{CH_4}	0,5	(IPCC, 2006a)	Se considera que el 50 % del biogás es CH_4 .
C_{pm}	16/12	(IPCC, 2006a)	Cociente de pesos moleculares entre el metano y el carbono.
OX	0	(IPCC, 2006a)	Para sitios para eliminación controlados.
Wi	Alimentos: 64,4 % Papel: 6,3 % Madera: 0,3 % Textiles 1,9 % Desechos higiénicos: 9,6 % Plásticos y otros materiales: 17,5 %	(EMAC, 2017)	Reporte de la Empresa Municipal de Aseo de Calles de Cuenca.
CODi	Alimentos: 15 % Papel: 40 % Madera: 43 % Textiles 24 % Desechos higiénicos: 24 % Plásticos y otros materiales: 0 %	(IPCC, 2006b)	Recomendado por el IPCC.
Emisiones de CH_4 = 5 027 125,66 kg CH_4 /año			
LHV CH_4 = 36 MJ/m ³			
Densidad CH_4 = 0,656 kg/m ³			

Fuente: Elaboración propia

Al asumir que la totalidad de los desechos son depositados y manejados, la cantidad total de emisiones de biogás es de 10 054,25 t/año. Las emisiones cuantificadas contienen alrededor de la mitad de metano (Salomon & Silva Lora, 2009; Tan *et al.*, 2014), es decir, 5027,13 t CH_4 /año u 874,80 m³/h.

Si el sistema de extracción puede extraer el 50 % de las emisiones (UNFCC, 2014), el potencial de energía del CH₄ al año es de 137 939,42 GJ (38,31 GWh/año o 23,72 kBEP). Con una eficiencia de conversión eléctrica 38 % (Zubizarreta *et al.*, 2010) y empleando generadores térmicos que utilizan metano y con un factor de planta de 85 %, se podría instalar una potencia de 1,96 MW. Con esto la energía disponible en un año es de 14,56 GWh/año.

5.5.3 Calentamiento de agua

5.5.3.1 Potencial de energía solar térmica.

En este caso se utiliza la demanda de energía térmica requerida para proveer agua caliente sanitaria. El valor utilizado en el modelo LEAP de la energía útil corresponde a 878,49 kWh/año (Tabla 5-63). De los hogares que utilizan ACS el 89,00 % utiliza calefón que emplea GLP, con una eficiencia del 45 %. Puesto que, del total de hogares, 94 % tienen agua caliente se tiene un requerimiento energético de 1633,22 kWh/año por hogar para este servicio. En la Tabla 5-51 se establece que la energía requerida para una familia de cuatro personas en la ciudad de Cuenca es de 2648,70 kWh/año. Sin embargo, para analizar una posible sustitución de tecnología se considera el uso de energía por hogar empleado en el modelo LEAP. Esta diferencia se debe a que el cálculo de la Tabla 5-51 es para condiciones fijas, que se verán afectadas por las costumbres y cantidad de miembros de una familia.

El total de energía que requirió el sector residencial en el año 2015 fue de 372,73 kBEP (27,54 % electricidad, 72,54 % GLP). De los cuales el 31,73 % fue utilizado para producir ACS. En un hipotético caso, si se llegara a sustituir el 100 % de requerimientos de agua caliente con paneles solares térmicos la energía requerida en el sector residencial sería de 254,45 kBEP, lo que representa una disminución del 31,73 % del consumo de energía de los portadores energéticos en el sector residencial.

Sin embargo, las experiencias en ciudades chinas (Han *et al.*, 2010), con un mercado consolidado indican que no más del 95 % de la demanda podría ser cubierta por esta tecnología. Además, en Cuenca la fracción solar no superaría el 78 % (Mogrovejo & Sarmiento, 2011) de abastecimiento con esta fuente, por lo que para cubrir la demanda se requeriría un aporte de otras fuentes como la electricidad o el GLP.

Con esto, un escenario la sustitución del GLP podría ser de 74 %. El requerimiento energético del sector residencial sería 282,06 kBEP (39,91 % electricidad, 71,33 % GLP).

El área requerida por hogar para instalar estas instalaciones se calcula utilizando la Ecuación 5-13 (Marique & Reiter, 2014; Rosas-Flores *et al.*, 2016):

$$E_{th} = A_{st} \times I \times \eta_{th}$$

Ecuación 5-13

En donde:

E_{th} , energía requerida para el calentamiento de agua en kWh/año.

A_{st} , superficie en m².

I , irradiación media en kWh/m²/año.

η_{th} , eficiencia del panel térmico.

Si E_{th} corresponde a 878,49 kWh/año por hogar para ACS (Tabla 5-63), con una irradiación media en Cuenca de 1472,72 kWh/m²/año, una eficiencia 65 %. La cantidad de superficie requerida corresponde a 0,92 m²/hogar. Si se considera un 20 % de área adicional para mantenimiento la cantidad total de área requerida para los 107 598 hogares será 0,12 km² (0,16 % del área de Cuenca). Esto representa una potencia de 76,91 MW de potencia que con un factor de planta de 14 %, suministrarían 94,33 GWh.

Al emplear los resultados de la Tabla 5-51, 2065,70 kWh/año, que corresponden a un hogar de 4 habitantes. Se requiere 2,16 m²/hogar o un área de 0,39 % (0,27 km²) de la superficie de Cuenca.

5.6 Escenarios

Se establecen seis escenarios para analizar la inclusión de las ER en la ciudad. Cinco escenarios consideran la inclusión individual de cada energía renovable (E_{S1} , E_{S2} , E_{S3} , E_{S4} , E_{S5}); en el E_{S6} se incluyen todas las tecnologías. En cada caso se presentan los flujos de energía y más adelante los resultados al aplicar los indicadores propuestos.

La producción de energía en el modelo LEAP, en el módulo de transformación se lo hace a partir de la Ecuación 4-34. En la Tabla 5-89 se muestra la energía luego de la transformación energética (ETP), el consumo debido a la transformación (ET), la eficiencia (η), la energía primaria, secundaria y el equipamiento. Además, se incluye información de la potencia del equipamiento y el factor de planta (FP).

Tabla 5-89. Datos incluidos en la transformación en el modelo LEAP

	Es1	Es2	Es3	Es4	Es5
ET (kBEP)	34,63	13,14	1285,28	14,70	33,59
ETP (kBEP)	30,72	74,46	282,13	9,01	62,38
η (%)	47	85	18	38	65
FP (%)	70,00	54,25	16,55	85,00	14,00
Potencia (MW)	8,10	26,69	314,27	1,96	76,91
Energía primaria	Lodos de aguas residuales	Agua	Radiación solar	RSU	Radiación solar
Energía secundaria	Biometano		Electricidad		Calor
Equipamiento	Biodigestor	Central hidroeléctrica	Sistemas fotovoltaicos	Central térmica	Sistemas solares térmicos

Fuente: Elaboración propia

5.6.1 Escenarios descritos mediante los balances de energía.

5.6.1.1 E_{S1} , uso de biogás para transporte.

La Tabla 5-90 muestra el balance energético en el escenario que considera la inclusión del biogás como combustible.

Se advierte que en la rama de transformación está incluida la producción de biogás que aprovecha como materia prima las aguas residuales (A_r) de la ciudad (ver Figura 5-32). En este caso la producción sirve para cubrir las pérdidas y requerimientos energéticos. El uso influye en la rama de transformación (transporte). En este caso se deja de importar cerca del 0,90 % de la demanda de energía (sin incluir las pérdidas señaladas) si se compara con el caso base.

Tabla 5-90. Balance energético Es1 (kBEP)

	EE	GN	GA	DI	FO	GLP	Bio	Ar	Total
Producción	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	65,36	65,36
Importación	282,13	59,47	984,85	764,54	218,49	402,46	0,00	0,00	2711,95
Exportación	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Oferta total	282,13	59,47	984,85	764,54	218,49	402,46	0,00	65,36	2777,30
Biogás aguas residuales	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,72	-65,36	-34,64
Distribución	-19,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-5,91	0,00	-25,66
Transformación total	-19,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,80	-65,36	-60,30
Residencial	102,34	0,00	0,00	0,00	0,00	270,39	0,00	0,00	372,73
Industria	61,89	59,47	0,00	127,33	216,55	98,68	0,00	0,00	563,92
Transporte	0,00	0,00	984,83	617,92	0,00	0,00	24,80	0,00	1627,56
Comercial	59,62	0,00	0,00	0,00	0,00	25,89	0,00	0,00	85,51
Alumbrado público	18,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,56
Otros	19,98	0,00	0,02	19,29	1,93	7,49	0,00	0,00	48,72
Demanda total	262,39	59,47	984,85	764,54	218,49	402,46	24,80	0,00	2717,00

Fuente: Elaboración propia

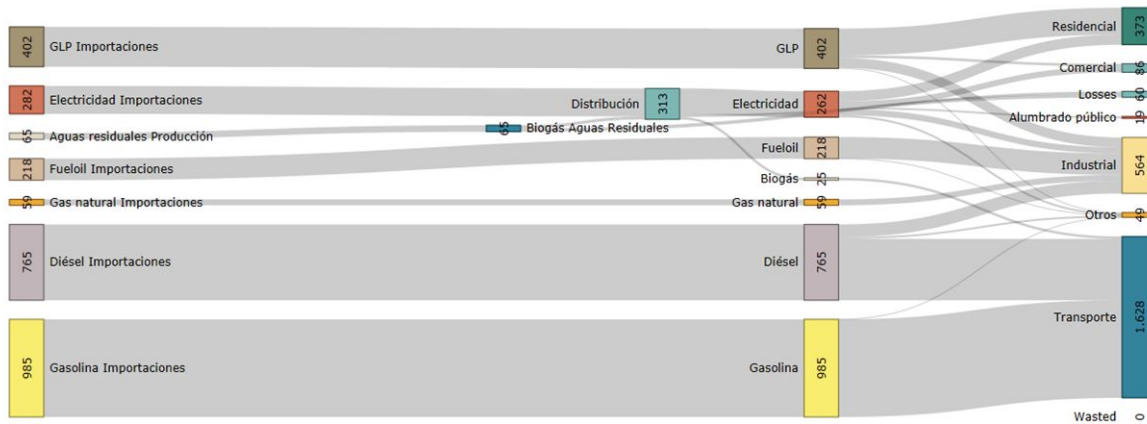


Figura 5-32. Diagrama de Sankey (ES₁)

Fuente: Elaboración propia

5.6.1.2 *Es₂, uso de pequeña hidroeléctrica.*

En la Tabla 5-88 se muestra el balance energético con la generación hidroeléctrica.

Tabla 5-91. Balance energético *Es₂* (kBEP)

	EE	GN	GA	DI	FO	GLP	Hidro	Total
Producción	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	87,60	87,60
Importación	207,67	59,47	984,85	789,35	218,49	402,46	0,00	2662,29
Exportación	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Oferta total	207,67	59,47	984,85	789,35	218,49	402,46	87,60	2749,89
Centrales eléctricas (hidro)	74,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-87,60	-13,14
Distribución	-19,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-19,75
Transformación total	54,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-87,60	-13,14
Residencial	102,34	0,00	0,00	0,00	0,00	270,39	0,00	372,73
Industria	61,89	59,47	0,00	127,33	216,55	98,68	0,00	563,92
Transporte	0,00	0,00	984,83	642,73	0,00	0,00	0,00	1627,56
Comercial	59,62	0,00	0,00	0,00	0,00	25,89	0,00	85,51
Alumbrado público	18,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,56
Otros	19,98	0,00	0,02	19,29	1,93	7,49	0,00	48,72
Demanda total	262,39	59,47	984,85	789,35	218,49	402,46	0,00	2717,00

Fuente: Elaboración propia

Con la producción estimada de hidroelectricidad se cubre un 28,38 % de los requerimientos de electricidad. Con respecto a la energía total la producción de electricidad con esta tecnología cubre el 2,74 % de la demanda (ver Figura 5-33).

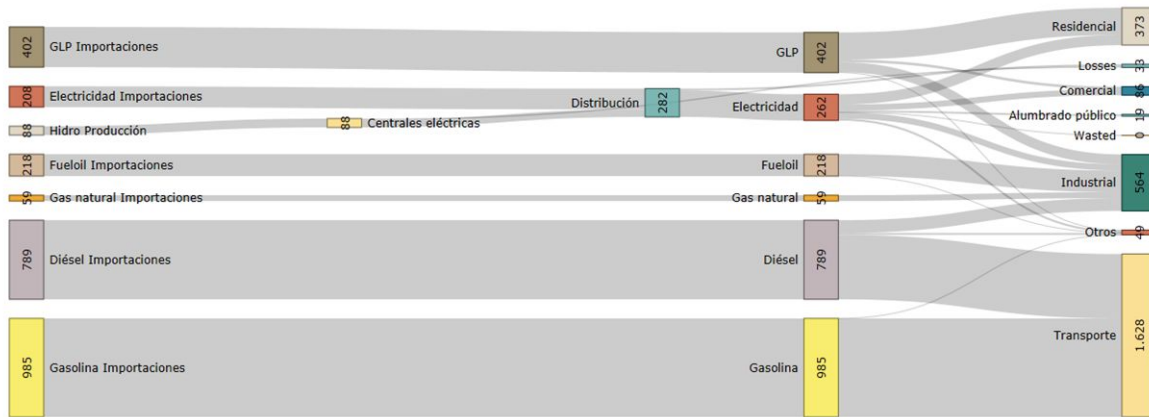


Figura 5-33. Diagrama de Sankey (ES₂)

Fuente: Elaboración propia

5.6.1.3 Es3, uso de paneles fotovoltaicos para generar electricidad.

En la Tabla 5-92 se presenta el balance energético al incluir la generación fotovoltaica.

Tabla 5-92. Balance energético Es3 (kBEP)

	EE	GN	GA	DI	FO	GLP	Solar	Total
Producción	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1567,41	1567,41
Importación	0,00	59,47	984,85	789,35	218,49	402,46	0,00	2454,62
Exportación	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Oferta total	0,00	59,47	984,85	789,35	218,49	402,46	1567,41	4022,03
Centrales eléctricas (FV)	282,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1567,41	-1285,28
Distribución	-19,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-19,75
Transformación total	262,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1567,41	-1305,03
Residencial	102,34	0,00	0,00	0,00	0,00	270,39	0,00	372,73
Industria	61,89	59,47	0,00	127,33	216,55	98,68	0,00	563,92
Transporte	0,00	0,00	984,83	642,73	0,00	0,00	0,00	1627,56
Comercial	59,62	0,00	0,00	0,00	0,00	25,89	0,00	85,51
Alumbrado público	18,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,56
Otros	19,98	0,00	0,02	19,29	1,93	7,49	0,00	48,72
Demanda total	262,39	59,47	984,85	789,35	218,49	402,46	0,00	2717,00

Fuente: Elaboración propia

En este caso la importación de energía eléctrica sería nula. Esto corresponde a disminuir un 10,38 % del total de energía. La demanda de energía se mantiene igual comparada con el caso base, pero la rama de transformación se modifica (ver Figura 5-34). En el balance, la energía solar aparece como materia prima, la misma que es aprovechada por los sistemas fotovoltaicos.

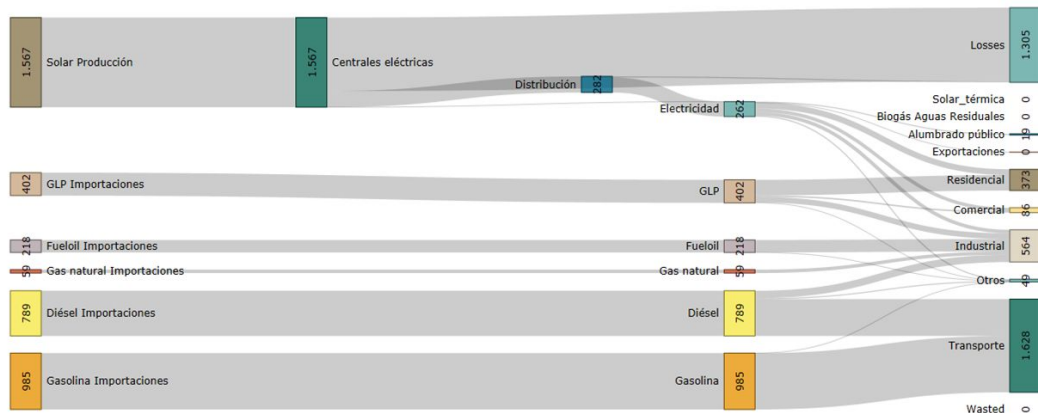


Figura 5-34. Diagrama de Sankey (ES₃)

Fuente: Elaboración propia

5.6.1.4 *E_{S4}, uso de biogás para generar electricidad.*

El balance de energía para el escenario se observa en la Tabla 5-93.

Tabla 5-93. Balance energético *E_{S4}* (kBEP)

	EE	GN	GA	DI	FO	GLP	MSW	Total
Producción	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23,72	23,72
Importación	273,12	59,47	984,85	789,35	218,49	402,46	0,00	2727,74
Exportación	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Oferta total	273,15	59,47	984,85	789,35	218,49	402,46	8,99	2736,75
Centrales eléctricas	9,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-23,72	-14,70
Distribución	-19,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-19,75
Transformación total	-10,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-23,72	-34,45
Residencial	102,34	0,00	0,00	0,00	0,00	270,39	0,00	372,73
Industria	61,89	59,47	0,00	127,33	216,55	98,68	0,00	563,92
Transporte	0,00	0,00	984,83	642,73	0,00	0,00	0,00	1627,56
Comercial	59,62	0,00	0,00	0,00	0,00	25,89	0,00	85,51
Alumbrado público	18,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,56
Otros	19,98	0,00	0,02	19,29	1,93	7,49	0,00	48,72
Demanda total	262,39	59,47	984,85	789,35	218,49	402,46	0,00	2717,00

Fuente: Elaboración propia

La energía eléctrica disponible con esta fuente equivale a 9,01 kBEP, que representa el 3,43 % de la energía eléctrica que requirió el área urbana de Cuenca en el año 2015. Si se relaciona con el requerimiento total de energía se tiene un autoabastecimiento del 0,33 %. En la rama de transformación se incluye la producción de electricidad a partir del biogás proveniente de la descomposición de los desechos sólidos (Figura 5-35).

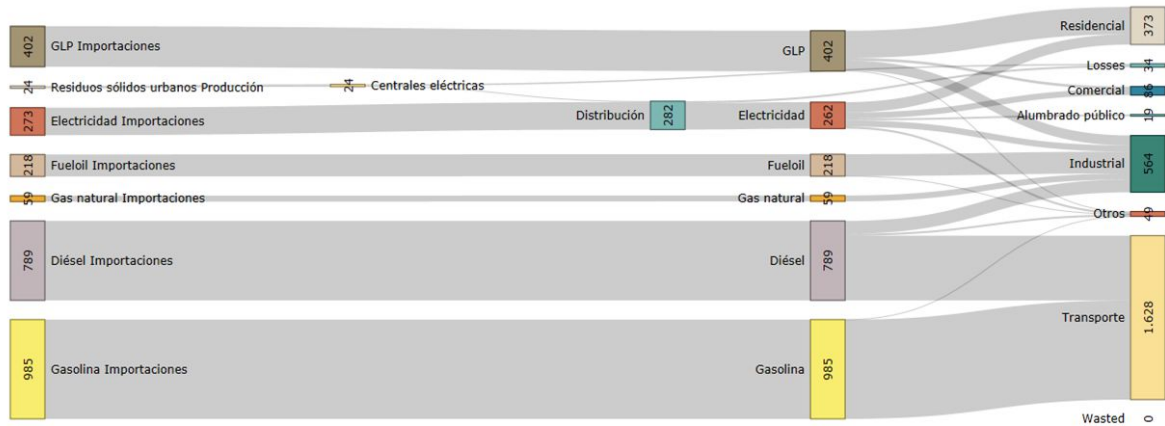


Figura 5-35. Diagrama de Sankey (ES₄)

Fuente: Elaboración propia

5.6.1.5 E_{SS}, uso de paneles solares térmicos.

En la Tabla 5-94 se indica el balance energético en el escenario de producción de ACS con paneles térmicos.

Tabla 5-94. Balance energético E_{SS} (kBEP)

	EE	GN	GA	DI	FO	GLP	Solar	Calor	Total
Producción	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	95,97	0,00	95,97
Importación	281,29	59,47	984,85	789,35	218,49	313,58	0,00	0,00	2647,03
Exportación	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Oferta total	281,29	59,47	984,85	789,35	218,49	313,58	89,82	0,00	2709,40
Solar térmica	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-95,97	62,38	0,00
Distribución	-19,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-19,69
Transformación total	-19,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-95,97	62,38	-19,69
Residencial	101,55	0,00	0,00	0,00	0,00	181,51	0,00	62,38	345,44
Industria	61,89	59,47	0,00	127,33	216,55	98,68	0,00	0,00	563,92
Transporte	0,00	0,00	984,83	642,73	0,00	0,00	0,00	0,00	1627,56
Comercial	59,62	0,00	0,00	0,00	0,00	25,89	0,00	0,00	85,51
Alumbrado público	18,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,56
Otros	19,98	0,00	0,02	19,29	1,93	7,49	0,00	0,00	48,72
Demanda total	261,60	59,47	984,85	789,35	218,49	313,58	0,00	62,38	2689,71

Fuente: Elaboración propia

En este caso, el lado de la transformación y se modifica con el fin de representar el aporte de energía solar térmica. Además, en el lado de la demanda en el sector residencial se reduce el consumo tanto eléctrico como de GLP (ver Figura 5-36). Con respecto al sector residencial, hay una reducción del consumo de electricidad del 0,77 % y de GLP de 32,87 %. La reducción del consumo de energía total en el sector residencial es de 24,06 %. Los flujos totales de energía disminuyen en 27,29 kBEP, lo que corresponde el 1,00 %, si se compara con el escenario base.

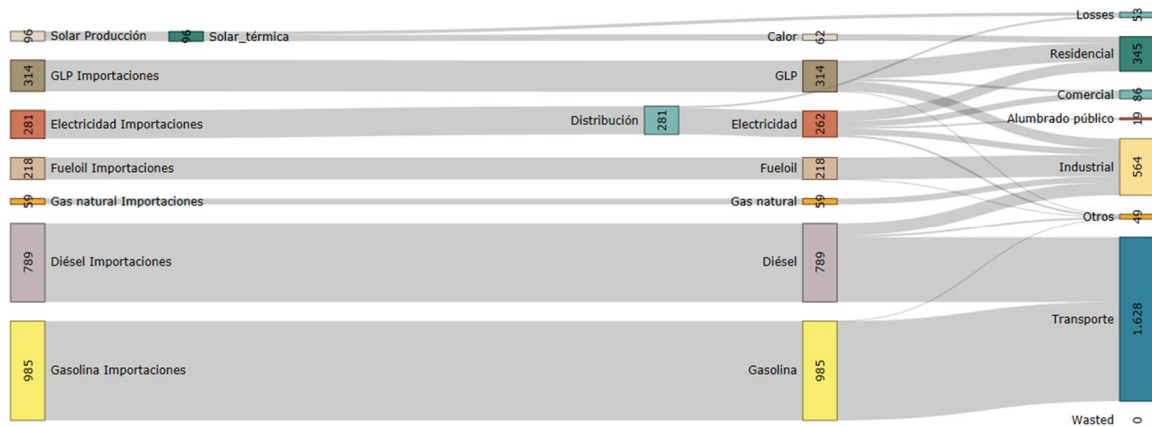


Figura 5-36. Diagrama de Sankey (E55)

Fuente: Elaboración propia

5.6.1.6 *E_{S6}, todas las energías renovables.*

En este escenario se asume que todas las ER suministran energía. En el caso de la electricidad se considera que las centrales entregan energía en forma proporcional a su capacidad. La Tabla 5-95 muestra el balance energético bajo este escenario.

En este escenario el 100 % de la energía eléctrica es suministrado por fuentes renovables. Mientras que estas fuentes suministran el 13,92 % de los requerimientos energéticos de toda la ciudad. Los flujos de energía se pueden observar en la Figura 5-37.

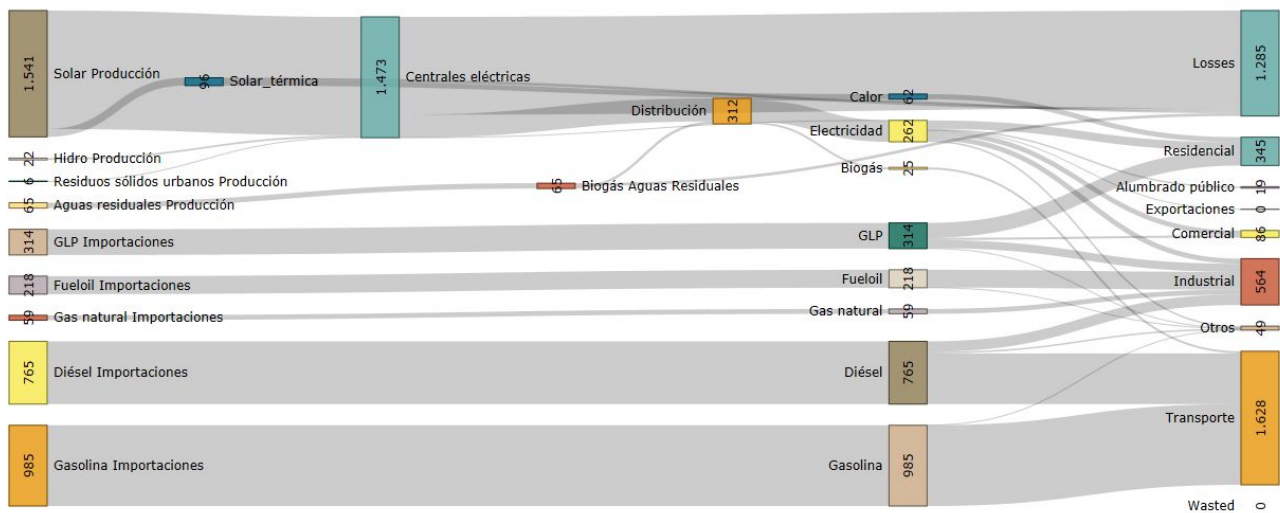


Figura 5-37. Diagrama de Sankey (E_{s6})

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-95. Balance energético Es₆ (kBEP)

	EE	GN	GA	DI	FO	GLP	Bio	Solar	Hidro.	Calor	MSW	Ar	Total
Producción	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1540,53	22,32	0,00	6,04	65,36	1634,26
Importación	0,00	59,47	984,85	764,54	218,49	313,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2340,93
Exportación	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Oferta total	0,00	59,47	984,85	764,54	218,49	313,58	0,00	1540,53	22,32	0,00	6,04	65,36	3975,18
Solar térmico	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-95,97	0,00	62,38	0,00	0,00	-33,59
Centrales eléctricas	281,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1444,57	-22,32	0,00	-6,04	0,00	-1191,64
Biogás aguas residuales	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,72	0,00	0,00	0,00	0,00	-65,36	-34,64
Distribución	-19,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-5,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-25,60
Transformación total	261,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,80	-1540,53	-22,32	62,38	-6,04	-65,36	-1285,47
Residencial	101,55	0,00	0,00	0,00	0,00	181,51	0,00	0,00	0,00	62,38	0,00	0,00	345,44
Industria	61,89	59,47	0,00	127,33	216,55	98,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	563,92
Transporte	0,00	0,00	984,83	617,92	0,00	0,00	24,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1627,56
Comercial	59,62	0,00	0,00	0,00	0,00	25,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	85,51
Alumbrado público	18,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,56
Otros	19,98	0,00	0,02	19,29	1,93	7,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	48,72
Demanda total	261,60	59,47	984,85	764,54	218,49	313,58	24,80	0,00	0,00	62,38	0,00	0,00	2689,71

Fuente: Elaboración propia

5.6.2 Escenarios descritos mediante los indicadores energéticos de sostenibilidad.

5.6.2.1 Autarquía energética.

Con la autarquía energética (AE), se valora el grado de dependencia de energía en la ciudad. Para aplicar la Ecuación 4-37 de los balances de energía se obtiene las importaciones de energía primaria (IE_p), la energía secundaria (IE_s) y la oferta bruta total de energía (OE). En la Tabla 5-96 se indican la información requerida para el cálculo del indicador, así como la autarquía normalizada AEn (ver numeral 4.5.4). De los escenarios que consideran la inclusión de una de las tecnologías, el Es_3 es el que más impacta en el nuevo modelo urbano. En este caso el uso intensivo de paneles fotovoltaicos permite tener una autosuficiencia energética del 100 % en el requerimiento de electricidad y una autarquía normalizada de 10,28 %. El Es_2 es el siguiente escenario de importancia, sin embargo, se mantiene la dependencia de recursos exógenos. El escenario Es_6 , en el que se aplican todas las tecnologías, la autarquía normalizada no es alta (13,79 %), lo que indica que la ciudad bajo estos supuestos requerirá altos requerimientos principalmente de recursos fósiles.

Tabla 5-96. Autarquía energética en los diferentes escenarios

Escenario	$IE_p + IE_s$ (kBEP)	OE (kBEP)	AE	AEn (%)
Es_0	2736,75	2736,75	1,00	0,00 %
Es_1	2711,95	2742,66	0,99	1,12 %
Es_2	2662,66	2736,75	0,97	2,72 %
Es_3	2455,83	2736,75	0,90	10,28 %
Es_4	2728,11	2736,75	1,00	0,32 %
Es_5	2647,03	2709,40	0,97	3,28 %
Es_6	2.340,93	2.715,32	0,86	13,79 %

Fuente: Elaboración propia

5.6.2.2 Precio de la energía.

Este indicador permite medir el precio de los energéticos en forma individual. La Tabla 5-97 presenta los costos (C_e) de la energía proveniente de las fuentes

renovables calculados a partir de la Ecuación 4-22. Salvo el factor de planta y la potencia que se obtiene de la estimación del potencial de cada tecnología (ver Numeral 5.5, Potencial energético de las energías renovables en la ciudad de Cuenca). El resto de información se obtiene de los subcriterios cuantitativos definidos en este capítulo (inversión, operación y mantenimiento, tiempo de vida útil, tasa de descuento).

Tabla 5-97. Datos para el cálculo de precios de las ER

Escenario	Inv. (USD/kW)	O&M (USD/kW)	r (%)	Tiempo de vida útil (años)	Potencia (MW)	Factor de planta (%)	Ce (USD/kWh)
Es1	400,00	28	10	20	8,1	70,00	0,012
Es2	6803,05	136,06	10	70	26,69	54,00	0,17
Es3	1433,79	17,2	10	25	314,27	16,55	0,12
Es4	2359,37	174,59	10	22	1,96	85,00	0,059
Es5	504,00	17,95	5	20	76,91	14,00	0,047

Inversión (Inv), ver Tabla 5-15, Tabla 5-33, Tabla 5-49.

Operación y mantenimiento (O&M), ver Tabla 5-16, Tabla 5-34, Tabla 5-50.

Tasa de descuento (r), ver cálculo de los costos de producción de cada tecnología.

Tiempo de vida útil, ver Tabla 5-17, Tabla 5-35, Tabla 5-52.

Potencia y factor de planta, ver Tabla 5-89.

Fuente: Elaboración propia

El precio de cada energético (PE) y el indicador normalizado calculado (PEn) a partir de la Ecuación 4-38 y la Ecuación 4-44, se muestra en la Tabla 5-98. Para todos los energéticos se incrementa un 15 % de utilidad (Ut). Para los combustibles fósiles un 12 % debido al impuesto al valor agregado (es el valor del IVA en el Ecuador). En el caso de la electricidad el IVA es 0 %.

Tabla 5-98. Precios de los energéticos provenientes de las ER

Escenario	Ce (USD/kWh)	Ce (USD/BEP)	IVA (%)	Utilidad (%)	PE (USD/BEP)	PEn (%)
Es1	0,012	19,91	0,12	0,15	25,64	95,99 %
Es2	0,17	281,29	0,00	0,15	323,48	19,62 %
Es3	0,12	196,72	0,00	0,15	226,23	44,56 %
Es4	0,059	97,00	0,00	0,15	111,54	73,96 %
Es5	0,047	77,60	0,00	0,00	77,60	82,67 %

Fuente: Elaboración propia

Los precios de los energéticos de los combustibles fósiles y electricidad en el Ecuador están identificados en la Tabla 5-99 (Escenario base E_{s0}). Si se comparara la Tabla 5-98 y la Tabla 5-99, se advierten que el sustituto del diésel (E_{s0} diésel residencial) por el biometano para transporte (E_{s1}), tendría una ligera ventaja. Mientras que la energía proveniente de paneles solares térmicos (E_{s5}) para calentamiento de agua tiene un precio mayor que al utilizar GLP (E_{s0} GLP residencial). Por otro lado, el precio de la electricidad es menor en el escenario base si se compara con la energía eléctrica producida por hidroelectricidad o paneles solares fotovoltaicos. La energía eléctrica proveniente de la planta de biogás tiene un menor costo frente al escenario base.

Tabla 5-99. Precios de los energéticos en el Ecuador

Energético	Precio	Unidad	Fuente	Pe (USD/BEP)	Pen (%)
E_{s0} Elec	0,0933	USD/kWh	(Araujo, 2014; Ponce-Jara <i>et al.</i> , 2018)	150,71	63,92%
E_{s0} GLP residencial	0,1066	USD/kg	(Petroecuador EP, 2016; Ponce-Jara <i>et al.</i> , 2018)	13,10	99,20%
E_{s0} GLP industrial	0,638	USD/kg	(Petroecuador EP, 2016)	78,42	82,46%
E_{s0} Gas natural industria	8,39	USD/MMBtu	(Lopez Lozano, 2014)	46,29	90,70%
E_{s0} Gasolina residencial	1,30	USD/galón	(Petroecuador EP, 2016)	60,24	87,12%

Energético	Precio	Unidad	Fuente		Pe (USD/BEP)	Pen (%)
Es ₀ Gasolina industrial	1,49	USD/galón	(Petroecuador 2016)	EP,	69,04	84,86%
Es ₀ Diésel residencial	0,90	USD/galón	(Petroecuador 2016)	EP,	36,68	93,16%
Es ₀ Diésel industrial	1,32	USD/galón	(Petroecuador 2016)	EP,	52,58	89,08%
Es ₀ Gas Fueloil	0,80	USD/galón	(Petroecuador 2016)	EP,	32,19	94,31%

Fuente: Elaboración propia

5.6.2.3 Precio medio de la energía al consumidor final.

El precio medio de la energía es calculado con la Ecuación 4-39. En la Tabla 5-100 se indican los precios ($\sum P_{e_j} * E_j$), la energía (E_j) de cada escenario, el precio medio (PME) y precio medio normalizado (PMEn). El indicador muestra que en los escenarios Es₁ y Es₄ se tiene una ligera mejoría si se compara con el escenario base (Es₀). Mientras que el resto de los escenarios se tendría un crecimiento del precio medio de la energía, a pesar de que la sustitución de energía es parcial. La colocación de paneles solares fotovoltaicos (Es₃) afecta al indicador en la mitad con respecto a Es₀. El decremento en el indicador también es notable en Es₆.

Tabla 5-100. Precio medio de la energía

Escenario	$\sum P_{e_j} * E_j$ (M USD)	$\sum E_j$ (k BEP)	PME (USD/BEP)	PMEn (%)
Es ₀	150 846,74	2717,00	55,52	48,27 %
Es ₁	150 573,13	2717,00	55,42	48,60 %
Es ₂	156 308,00	2717,00	57,53	41,57 %
Es ₃	170 662,80	2717,00	62,81	23,96 %
Es ₄	150 395,99	2717,00	55,35	48,82 %
Es ₅	154 407,44	2689,71	57,41	41,98 %
Es ₆	174 698,30	2689,71	64,95	16,83 %

Fuente: Elaboración propia

5.6.2.4 *Uso de la energía renovable en la oferta de energía.*

Con este indicador calculado con la Ecuación 4-40 se mide el impacto de la inclusión de los energéticos provenientes de las fuentes renovables en la matriz energética urbana. En la Tabla 5-101 se observa el uso de las energías renovables (ER), así como la oferta bruta de energía (OE) en los distintos escenarios considerados. La aplicación de la energía solar (E_{s3}) tiene mayor incidencia en forma individual. El resto de los escenarios en donde se consideran las tecnologías en forma individual no superan el 3%. En el escenario E_{s6} , se llega a un 13,79 % de autosuficiencia.

Tabla 5-101. Uso de las ER en la oferta de energía

Escenario	ER (kBEP)	OE* (kBEP)	UR	URn (%)
E_{s0}	0,00	2736,75	0,00	0,00 %
E_{s1}	30,72	2742,66	0,01	1,12 %
E_{s2}	74,46	2736,75	0,03	2,72 %
E_{s3}	282,13	2736,75	0,10	10,31 %
E_{s4}	9,01	2736,75	0,00	0,33 %
E_{s5}	62,38	2709,40	0,02	2,30 %
E_{s6}	374,39	2715,32	0,14	13,79 %

* La oferta de energía es la demanda más las pérdidas.

Fuente: Elaboración propia

5.6.2.5 *Uso de las energías renovables en la oferta de energía eléctrica.*

Tres de las cinco tecnologías seleccionadas sirven para producir electricidad, por lo que con este indicador se puede analizar la influencia de estas tecnologías en la autosuficiencia eléctrica. El indicador es calculado con la Ecuación 4-41; en la Tabla 5-102 se muestran la producción de electricidad con energías renovables (ERe), la oferta de energía eléctrica (OEe) y la participación de la energía renovable en la participación de energía eléctrica (URe), así como el indicador normalizado (URen). Al analizar este indicador se advierte que la producción de energía eléctrica tendría

un aporte significativo en la matriz de electricidad. La energía eléctrica con pequeñas hidroeléctricas podría abastecer un 26,39 % de la oferta (Es_2). Mientras que en el caso del biogás está alrededor del 3,19 % (Es_4). En Es_3 , con el uso intensivo de la energía fotovoltaica los requerimientos de energía eléctrica quedarían cubiertos.

Tabla 5-102. Uso de las ER en la oferta de energía eléctrica

Escenario	ERe (kBEP)	OYe (kBEP)	URe	URen (%)
Es_0	0,00	282,13	0,00	0,00 %
Es_1	0,00	282,13	0,00	0,00 %
Es_2	74,46	282,13	0,26	26,39 %
Es_3	282,13	282,13	1,00	100,00 %
Es_4	9,01	282,13	0,03	3,19 %
Es_5	0,00	281,29	0,00	0,00 %
Es_6	281,29	281,29	1,00	100,00 %

Fuente: Elaboración propia

5.6.2.6 Pureza de la energía.

En la Tabla 5-103 se muestran el indicador de pureza de la energía (PRE) y el indicador normalizado (PREn), calculado con la Ecuación 4-42 y Ecuación 4-44 respectivamente. En la tabla se indican las emisiones de dióxido de carbono (CEC), derivadas de la Ecuación 4-35 y la demanda de energía (DE) obtenidas de los balances de cada escenario. Se nota que este indicador presenta una leve mejoría frente al caso base, en el escenario Es_1 (sustitución del diésel), Es_5 (sustitución del GLP) y el escenario global Es_6 . Esto se da puesto que estos escenarios están relacionados con la sustitución de combustibles fósiles.

Tabla 5-103. Pureza de la energía

Escenario	CEC (kT CO ₂)	DE (kBEP)	Pre (t CO ₂ /BEP)	PRen (%)
Es ₀	987,61	2717,00	0,363	34,16 %
Es ₁	977,04	2717,00	0,359	35,13 %
Es ₂	987,52	2717,00	0,363	34,16 %
Es ₃	987,29	2717,00	0,363	34,16 %
Es ₄	987,60	2717,00	0,363	34,16 %
Es ₅	949,93	2689,71	0,353	36,74 %
Es ₆	939,04	2689,71	0,349	37,72 %

Fuente: Elaboración propia

Para evaluar las emisiones producidas por la generación de electricidad, se toma en cuenta el factor de emisión del sector eléctrico ecuatoriano (0,6945 t CO₂/MWh = 1,12 t CO₂/BEP) (Haro & Oscullo, 2016). En el caso base (Es₀) se tendría una producción de 0,317 kT CO₂, del sector eléctrico, esto es el 0,03 % del total de emisiones. Con ello se advierte que las emisiones provenientes de la generación eléctrica, no son incidentes al evaluar el indicador de pureza energética.

5.6.2.7 Empleo.

Para el cálculo de la cantidad de empleos producidos por las distintas tecnologías, se utiliza los factores de empleo I_e, de la Tabla 5-23, Tabla 5-39 y Tabla 5-57. El empleo de las fuentes convencionales se considera según la Tabla 5-104. En la Tabla 5-105 se indican las estimaciones de la cantidad de empleos (E_m) y el indicador normalizado (E_{mn}) calculados con la Ecuación 4-43 y la Ecuación 4-44 respectivamente para los escenarios analizados. El uso de la energía fotovoltaica incrementaría significativamente el indicador (Es₃), esto también tiene influencia en el escenario Es₆. En el resto de los escenarios el indicador no se incrementa de forma notable si se compara con el escenario base.

Tabla 5-104. Empleo de los energéticos tradicionales de energía

Sistema	Ie (Total de empleos- año/GWh)	Fuente	Ie (Total de empleos- año/GWh)
Hydroelectricidad*	0,05	(Jay Rutovitz <i>et al.</i> , 2015)	0,05
Electricidad combustible fósiles*	0,11	(Wei <i>et al.</i> , 2010)	0,11
Combustibles fósiles*	0,05	(Jay Rutovitz <i>et al.</i> , 2015)	0,07
	0,09	(Wei <i>et al.</i> , 2010)	

* Se considera el promedio de empleos para la electricidad que viene fuera de la ciudad.

** Para los combustibles fósiles, Rutovitz *et al.* (2015) sugieren utilizar el mismo factor que para el gas natural.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-105. Empleo

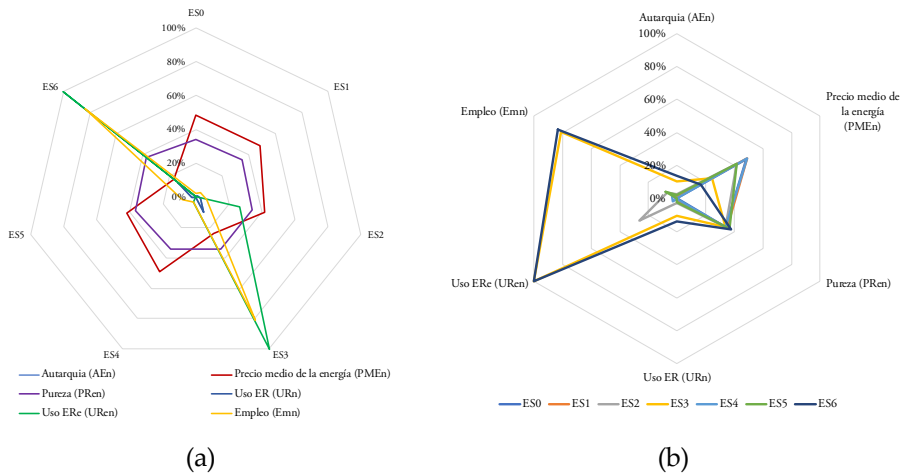
Escenario	Em (Empleos-año)	Emn (%)
Eso	315,00	2,14 %
Es1	325,51	3,64 %
Es2	347,47	6,78 %
Es3	866,40	80,91 %
Es4	323,59	3,37 %
Es5	356,94	8,13 %
Es6	886,10	83,73 %

Fuente: Elaboración propia

5.6.2.8 Comparación de los indicadores energéticos para Cuenca.

Una vez aplicada la normalización de cada uno de los indicadores, se agrupó aquellos que evalúan la situación global de cada escenario. La Gráfica 5-29 muestra

un resumen de los resultados presentados previamente. Según la Gráfica 5-29 (a) en todos los escenarios planteados la autarquía (AEn) se incrementa, pero en los escenarios que se incluye la solar fotovoltaica (ES_3 y ES_6) el incremento es más notorio. Igual comportamiento se tiene en el caso del uso de las energías renovables (URn) en el total de la energía. Puesto que tres de las ER seleccionadas producen electricidad, el comportamiento del indicador que mide solo este energético (URen) tiene un comportamiento que incluso llega al 100 %. En el escenario base (ES_0) el indicador relacionado al precio medio de la energía (PMEn) sobresalen ligeramente frente al resto de escenarios, salvo el escenario ES_3 y ES_6 , donde el precio de la energía media se incrementa a pesar de que solo la electricidad es incidente. Las emisiones en los distintos escenarios se mantienen uniformes (PRen), ya que el uso de los combustibles fósiles no se altera significativamente al utilizar las tecnologías propuestas. En el caso del empleo (Emn), nuevamente a la energía fotovoltaica tiene un impacto significativo, a pesar de que su producción sustituye únicamente a la electricidad.



Gráfica 5-29. Comparación de indicadores energéticos de sostenibilidad

Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 5-29 (b) se muestra que en general se tiene que los precios medios de la energía (PMEn) no se alteran significativamente en los escenarios ES_1 , ES_2 , ES_4 y ES_5 , frente al escenario base ES_0 . Sin embargo, en el escenario ES_3 y ES_6 , el precio aumenta considerablemente, a pesar de que no se disminuye significativamente la

importación de energía, medido con la autarquía (AE). Las emisiones dentro de la ciudad no se alterarán por la alta dependencia de recursos fósiles, principalmente en la transportación. Las energías renovables que sustituyen al uso de combustibles fósiles (diésel en el E_{S1} y GLP en el E_{S5}) no modifican el indicador que mide la pureza (PRen). La producción de electricidad es el energético que influye en la mayoría de los indicadores, principalmente en los que miden el uso de las renovables (URn, URe). El incremento es más notorio en los escenarios que involucran el uso de la energía fotovoltaica (E_{S3} y E_{S6}). La influencia de esta tecnología también se refleja en los empleos que pudiera generar (EMn) a pesar de que influye solo en la producción de electricidad.

6 DISCUSIÓN, CONCLUSIONES, FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Nadie cuestiona que una sociedad opulenta pueda permitirse gastar su dinero sin una contabilidad estricta de los beneficios recibidos.

Abel Wolman

A partir de la revisión bibliográfica, el planteamiento de la metodología y el análisis del caso de estudio, en este capítulo se discuten en forma secuencial los resultados de la investigación. Se argumenta cómo el uso de las energías renovables contribuirían al modelo metabólico circular. Además, se analiza las razones por las que se debe hacer una selección, antes de analizar el potencial energético renovable. Se destaca que la dimensión económica es la más influyente entre los factores que se requieren analizar al momento de optar por una u otra tecnología. La inclusión de las energías renovables en la matriz energética urbana es examinada a partir de los resultados presentados en los balances de energía, los diagramas de Sankey y los indicadores de sostenibilidad propuestos. De acuerdo con esto, las tecnologías que producen electricidad tendrían una incidencia notable en este portador energético, pero no así en la totalidad de la matriz energética urbana. Esto por cuanto los combustibles fósiles dominan en los requerimientos energéticos. En consecuencia, se necesitan otras medidas que contribuyan a optimizar el uso y manejo de energía en la ciudad, pero como requisito ineludible se requiere cambiar los modos de consumo de los ciudadanos.

6.1 Discusión

Alrededor del 3 % de la superficie terrestre está ocupada por asentamientos urbanos en donde viven más del 50 % de la población, que requieren por un lado enormes cantidades de recursos y por otro producen una serie de desechos que contaminan el aire, agua o suelo. Huang y colaboradores (2005) manifiestan que la intensiva urbanización desembocará en un «futuro poco prometedor para la vida», si no se toman medidas que permitan valorar las necesidades de las poblaciones frente al agotamiento de los recursos finitos.

El conocimiento científico a lo largo de la historia ha posibilitado dar pautas para resolver problemas producidos por la alta conglomeración humana. De allí que han surgido diversas herramientas para entender las interacciones existentes en las ciudades, y a partir de ello, se puede establecer políticas y una planificación organizada que reduzca los requerimientos de recursos que ingresan a las urbes.

El MU ayuda a recopilar y organizar información útil que facilita el entendimiento de los procesos que se desarrollan en la ciudad. Bajo este enfoque, las investigaciones revisadas demuestran que el modelo urbano actual es lineal pues no relaciona el requerimiento de recursos, con los desechos, emisiones o efluentes que se producen. A través de este diagnóstico surge la necesidad de un cambio de paradigma, de forma que se optimice el uso de materiales, agua, energía y nutrientes, ya sea reduciendo su consumo, aumentando la eficiencia en los procesos o aprovechando los recursos existentes en la urbe. De esta manera, se plantea un modelo urbano circular, que implica varios retos, pues requiere un cambio en los patrones de consumo de energía y materiales.

Wolman (1965), que inició con el concepto de metabolismo urbano, manifestaba su preocupación sobre tres problemas que enfrentaban las ciudades (abastecimiento de agua, tratamiento de aguas residuales y contaminación atmosférica). A pesar de que estas preocupaciones siguen siendo tratadas de diferente modo, en las investigaciones actuales se ha añadido al estudio del metabolismo urbano otros temas críticos relacionados con el manejo de los requerimientos de los asentamientos humanos (Bristow & Kennedy, 2013b; Christopher Kennedy *et al.*, 2007).

Dentro de los requerimientos energéticos, la ciudad precisa de energía directa e indirecta. En esta tesis se analiza la energía directa (electricidad o combustibles), la misma que es determinada por la demanda necesaria para dinamizar los procesos internos, ya sea en el sector residencial, industrial o transporte (Lixiao Zhang *et al.*,

2014). Puesto que, a nivel mundial los requerimientos energéticos en un periodo de 40 años se han duplicado, sin que se haya modificado la dependencia de más del 80 % de la energía primaria proveniente de recursos fósiles (IEA, 2016), este trabajo contribuye a debatir si las propuestas tecnológicas existentes permiten cambiar el modelo urbano actual.

A diferencia de los recursos materiales, la energía tiene un comportamiento que difiere pues no es reversible y luego de ser utilizada se disipa. En consecuencia, podría suponerse que su manejo no contribuye al modelo metabólico circular, en cuanto la energía no puede ser «reciclada». No obstante, es posible convertir la energía primaria renovable que dispone la ciudad en sustitutos de combustibles o electricidad, disminuyendo el ingreso de energéticos y la vez asegurando mayor resiliencia e independencia de las ciudades.

Los municipios por lo general se preocupan en planificar las ciudades desde la estética, así como en gestionar el agua, alcantarillado, vivienda, desechos o tráfico, pero muy poco control tienen sobre la energía (IRENA, 2016b; Sveinbjörnsson *et al.*, 2017). La tecnología actual propicia que la energía no provenga exclusivamente de fuentes que se encuentran fuera de los límites urbanos, pese a ello, en la planificación de las ciudades no se consideran estas tecnologías como mecanismos para disminuir la importación energética.

Las investigaciones estudiadas analizan la capacidad de los centros urbanos para abastecerse parcial o totalmente de energía, sin embargo, no identifican los recursos y las tecnologías que pueden ser usadas para promover el metabolismo urbano circular. En esta tesis se demuestra que hay al menos once tecnologías con diferente grado de madurez que pueden contribuir a disminuir los flujos energéticos urbanos utilizando los recursos que dispone o provienen de la ciudad. Dependiendo del consumo energético, se puede llegar a un abastecimiento de hasta el 100 % de una demanda específica (ver Tabla 3-3. Potencial energético técnico para diferentes ciudades). Entre otras ventajas relacionadas con el uso de las ER que aprovechan recursos que dispone la ciudad se tiene: i) pueden producir economías de escala (Moles *et al.*, 2008), ii) reducen las externalidades por la producción de energía que se obtiene fuera de los centros urbanos (Conke & Ferreira, 2015), iii) disminuyen las pérdidas en el transporte y distribución de energía, iv) crean empleo (Eleftheriadis & Anagnostopoulou, 2015), v) merman las emisiones y, vi) hacen ciudades menos dependientes de condiciones geopolíticas externas.

En ese sentido, a diferencia de las energías renovables de gran potencia (plantas

solares fotovoltaicas o parques eólicos que ocupan 45 km²/GWh y 72 km²/GWh, respectivamente) (Shmelev & Van Den Bergh, 2016), la inclusión de tecnologías en la ciudad requiere menos área de ocupación pues usan espacios intervenidos. En contraparte, aunque las ER pueden reducir los problemas asociados con el acceso y la disponibilidad de energía, las nuevas tecnologías no necesariamente pueden eliminar los problemas (Barragán & Espinoza, 2015). Dada la intermitencia de algunos recursos renovables, es necesario mantener el suministro de energía o mejorar su capacidad de almacenamiento. No obstante, y a pesar de los inconvenientes citados, como advirtió en su momento Georgescu-Roegen (1975), es necesario continuar con el desarrollo de las tecnologías para propiciar un cambio en la forma de como es manejada la energía en la ciudad.

Al ser el uso de las ER en la ciudad un planteamiento relativamente nuevo requiere también planteamientos nuevos para identificar su impacto, previo a proponer políticas que incentiven su uso. Cada ciudad presenta características diferentes en cuanto a clima, extensión, forma o densidad urbana. Estas y otras condiciones son concretas para cada ciudad, pues debe analizarse tanto el potencial del recurso, como la demanda y uso de la energía. Para procurar este análisis se desarrolló una metodología que puede ser aplicable a entornos en donde puede ser difícil obtener información. La metodología está en concordancia con propuestas recientes que buscan el cambio del modelo energético de las ciudades (Energycities, 2014; IRENA, 2016a; ONU, 2016).

La metodología se aplicó a una ciudad intermedia de un país en desarrollo. La ciudad de Cuenca tiene particularidades en cuanto a su crecimiento horizontal, así como un sistema institucional que permite recabar información para construir una situación base del consumo de energía. La existencia de ríos que atraviesan la ciudad, la estabilidad de su recurso solar, la gestión de desechos sólidos y aguas residuales son características que no necesariamente se presentan en otras urbes (BID, 2014). A pesar de ello, las lecciones aprendidas tanto en lo referente a la aplicación de la metodología como a los resultados dan pautas para contestar si las ciudades pueden ser autosuficientes utilizando las tecnologías que utilizan recursos renovables.

Factores que influyen en la selección de energías renovables en la ciudad.

La ejecución de estudios que valoren el potencial da una certeza de la aplicación de las tecnologías, sin embargo, en las ciudades de los países en desarrollo, es preferible

enfocar el análisis en aquellas tecnologías que se consideran más apropiadas. No es conveniente analizar el potencial de todas las energías, por ello la propuesta de esta tesis, es que se identifique previamente aquellas que podrían ser aptas para una determinada localidad.

La metodología sugerida postula que se analice de manera holística (dimensión técnica, económica, ambiental y social) los elementos más adecuados al momento de seleccionar tecnologías. Es así que se identificaron y valoraron catorce factores o subcriterios, a través de una revisión bibliográfica y una consulta a expertos internacionales. La encuesta internacional tuvo respuestas consistentes (coeficiente de Cronbach, $\alpha = 0,84$) y arrojó resultados interesantes.

Los resultados expuestos en la Tabla 5-5. Principales criterios que influyen en la implantación de las ER en la ciudad, indican que sin considerar una ciudad específica, la aplicación de las tecnologías depende de la existencia de los recursos renovables (C_2). Cada ciudad tiene condiciones particulares en materia de recursos, por lo que es indispensable hacer un estudio que permita la valoración de ellos.

Se advierte, además, que la inversión (C_6) y el costo de energía (C_8) son factores decisivos para promover las ER a nivel urbano. Sin rentabilidad difícilmente se alcanzará la masificación, sobre todo de aquellas ER consideradas distribuidas, a pesar de pueden abastecer la demanda en forma limpia.

La disponibilidad del recurso (C_2), la eficiencia tecnológica (C_1) y madurez (C_3) son los criterios técnicos de mayor importancia. Los factores que analizan aspectos arquitectónicos (C_5), así como la disponibilidad de espacio (C_4) son considerados menos influyentes. Hay tecnologías que no necesariamente requieren implantarse en áreas habitacionales y que pueden instalarse en zonas industriales (biomasa, biogás, incineración, mareomotriz), mientras que la masificación de otras puede afectar la estética de la ciudad o demandar espacio (fotovoltaica o eólica).

El factor sociopolítico de mayor interés es el relacionado con la existencia de políticas públicas (C_{14}). Las municipalidades, en este sentido, deben promover el desarrollo de estos proyectos con legislación y normativa técnica o con incentivos. En el caso de los factores sociales, como creación de empleo (C_{12}) o aceptación ciudadana (C_{13}), la valoración es menor a los anteriormente expuestos. Se observa que la ciudadanía considera atractivas estas tecnologías y, por tanto, si los precios son manejables, se prevé mínima oposición. Aun cuando el empleo suele ser un atractivo para la implantación de una actividad o industria, la apreciación es que este factor tiene

menor valoración. Ello puede deberse a una percepción de mínima influencia en los índices de empleo, más aún si los países no son fabricantes sino importadores de tecnologías y equipos. La dimensión ambiental es el componente menos influyente (C_9 , C_{10} , C_{11}). Esto porque los habitantes de las ciudades no se relacionan con impactos lejanos relacionados con la construcción y operación de grandes centrales eléctricas, refinерías u otros equipamientos de transporte de energético y la afectación a la naturaleza no se percibe.

Al fraccionar la muestra por tipo de profesionales, se mantiene un alto grado de homogeneidad ($\alpha = 0,87$ para la academia, $\alpha = 0,89$ para el sector privado, $\alpha = 0,84$ otros); a pesar de ello, se advierte que la percepción de cada grupo difiere (Gráfica 5-12. Resultados de las encuestas por grupos profesionales). La existencia del recurso se mantiene en importancia (C_2), seguida de las cuestiones relacionadas con los costos del equipamiento (C_6) y energía (C_8). También se advierte que factores como la madurez de la tecnología (C_3), acidificación (C_{10}), creación de empleo (C_{12}), eutrofización (C_{11}) e integración arquitectónica (C_5), guardan una estrecha similitud en las respuestas. El resto de los factores se ubican en posiciones diferentes en importancia. Esto refleja que los aspectos económicos son los que mantienen la principal preocupación, mientras que, según este fraccionamiento, la percepción respecto a temas ambientales no es común.

En el análisis entre España y Ecuador, el grado de homogeneidad según el estadístico utilizado es $\alpha = 0,80$ y $\alpha = 0,88$ respectivamente. Según la Gráfica 5-13 (Resultados de las encuestas, Ecuador – España), el costo de la energía (C_8), disponibilidad del recurso (C_2) y el costo de la tecnología (C_6), son los tres factores más puntuados en los dos casos. Aspectos como la eficiencia tecnológica (C_1), concordancias con las políticas públicas (C_{14}), calentamiento global (C_9), aceptación social (C_{13}), acidificación (C_{10}), eutrofización (C_{11}) mantienen un similar interés. Esto indica que los aspectos económicos y ambientales son comunes. En lo que se refiere a la dimensión técnica y sociopolítica, la madurez de la tecnología (C_3), obstáculos urbanos (C_4), arquitectura (C_5) y empleo (C_{13}) difieren. Estas diferencias pueden estar dadas como resultado del uso e impulso de las tecnologías renovables en España, frente a Ecuador, en donde se encuentran subsidiados los combustibles fósiles. Adicionalmente, el conocimiento de los encuestados respecto a los factores técnicos o disponibilidad de la tecnología en el mercado local lleva a que las percepciones de estos aspectos difieran.

Como se advierte, la percepción varía de acuerdo con el perfil laboral, así como de la localidad de los participantes. El análisis de los resultados confirma que se requiere estudiar las diferentes posibilidades en cada localidad, pues no existen recetas únicas.

Selección de tecnologías de producción de energía.

La estimación del potencial energético de cada una de las once tecnologías (alternativas) no es pertinente, pues como se indicó su uso depende de varios factores. Con el método PROMETHEE se obtuvo resultados a partir de valoraciones del entorno local (a través de encuestas) y características de las tecnologías (revisión bibliográfica). Esta combinación de fuentes de información da una certeza de que los resultados reflejen los requerimientos específicos del medio en donde se les aplique.

En el caso de estudio, previo a la aplicación del método multicriterio se establecieron restricciones referentes al uso de la energía y los sustitutos a los que las tecnologías podrían influir (ver Figura 4-4. Usos de las energías renovables en la ciudad y Figura 4-5. Aplicación del método multicriterio para diferentes usos energéticos). Esto llevó a analizar tres usos: transporte, electricidad, calentamiento de agua.

La consulta a expertos internacionales sirvió para definir los pesos de los catorce subcriterios a partir del método de calificación directa (DRM). Para contrastar estos resultados, se consideraron pesos iguales (EW) y la calificación ordinal (OR). Estos métodos fueron aplicados para definir el comportamiento de las alternativas energéticas frente a los criterios y subcriterios. Los resultados indicaron que el comportamiento de las alternativas frente a los criterios o dimensiones puede diferir (ver diagramas de GAIA de la Figura 5-7, Figura 5-13 y Figura 5-22). Pese a ello, en las valoraciones que abarcan todas las dimensiones, las posiciones de las alternativas se mantienen como mejores opciones (ver resultados PROMETHEE de la Figura 5-6, Figura 5-12 y Figura 5-21). Estos resultados favorecen al proceso de decisión y dan validez a la selección.

La consulta a expertos locales resolvió el problema de la disponibilidad de datos para los subcriterios referentes a: disponibilidad del recurso (C_2), obstáculos urbanos y disponibilidad de área (C_4), integración arquitectónica (C_5), aceptabilidad social (C_{13}) y compatibilidad con las políticas públicas (C_{14}). Para validar el cuestionario, se analizaron las experiencias de los participantes. De un número inicial de 30, se concluyó que 16 tenían los perfiles adecuados y la experiencia requerida. Esto se refleja en la confiabilidad dada por el coeficiente de Cronbach. Los resultados

podrían mejorarse mediante la realización de una segunda ronda de entrevistas que presentaría algunos datos de la primera encuesta como punto de partida. Sin embargo, dado que los pesos de los subcriterios c_4 (obstáculos y disponibilidad de área) y c_5 (integración arquitectónica) no son influyentes se descartó esta opción (ver Tabla 5-7. Criterios cualitativos utilizados).

El potencial estimado a pesar de que se hace utilizando información de la zona de estudio requiere un análisis más profundo que incluya aspectos técnicos, ambientales, o económicos, los mismos que podrían ser limitantes para la implantación masiva de cada tecnología. No obstante, los resultados son un adecuado punto de partida para propiciar la construcción de políticas públicas locales tendientes a cambiar el modelo energético de la ciudad.

Flujos metabólicos de energía en la ciudad.

Agudelo-Vera *et al.* (2012) exponen que para promover una ciudad autosuficiente se requiere en principio de un conocimiento pleno de los recursos que posee y esto puede ser un inconveniente pues la mayoría de ciudades desconoce sus recursos potenciales. Esto es evidente, aún en ciudades europeas, que persiguen el cambio del modelo energético de la ciudad (Energycities, 2014). Por tanto, para determinar el impacto de las renovables a nivel urbano es indispensable conocer con detalle los flujos de energía y su destino. Siguiendo lo propuesto por Bennett y Newborough (2001) se dividió a la ciudad en sectores (residencial, comercial, industrial o transporte). Se recabó información que permitió desagregar a la ciudad en los diferentes sectores de consumo. Los datos recolectados provinieron de fuentes que no necesariamente manejan tópicos relacionados a la energía, pero fueron pertinentes para establecer la situación base de energía de la ciudad de Cuenca.

Se hizo una analogía con la planificación energética nacional o regional, de allí que el uso de herramientas utilizadas a esas escalas posibilitó describir el metabolismo urbano de la ciudad a través de los flujos de energía. Tanto los balances de energía como los diagramas de Sankey describen el estado de la situación base, permitiendo visualizar la estructura energética del sistema desde las entradas hasta los usos finales, con suficiente detalle como para emprender acciones que modifiquen la estructura energética urbana convencional.

Sustitutos de combustibles fósiles para el transporte.

En este caso la energía destinada a la movilidad fue la que provendría del bioetanol de segunda generación (a_1) y del biogás proveniente de aguas residuales urbanas (a_3). Al evaluar los pesos de los subcriterios, en todas las valoraciones, la dimensión técnica y económica la alternativa a_3 tiene preferencia, mientras que la a_1 es preferida en la dimensión ambiental y social. En el *ranking* general, el biogás proveniente de las aguas residuales fue el elegido (Tabla 5-27). Puesto que las instalaciones para la obtención de este biocombustible se prefieren en zonas de temperaturas superiores a 18 °C, el potencial se estimó incluyendo energía para el calentamiento del proceso.

El análisis del caso en el que el biometano se emplea como sustituto del diésel en la transportación pública, se hizo a través de la comparación del balance de energía y diagrama de Sankey del caso base (E_{s0} , Tabla 5-74 y Figura 5-29) con el balance del escenario E_{s1} (Tabla 5-90 y Figura 5-32). Bajo este enfoque, se estimó una disminución del 3,9 % de los requerimientos de este combustible. En relación con el requerimiento total de energía esta disminución no supera el 1 %.

En los estudios hechos en Tartu (Estonia) o ciudades brasileñas (Nadaletti *et al.*, 2015; Raud *et al.*, 2017) el biogás puede sustituir entre el 54,5 al 100 % los combustibles para transporte urbano respectivamente. A pesar de que los resultados no son comparables con el 3,9 % obtenido en Cuenca, se consideran como aceptable toda vez que en Tartu y Brasil se evaluó el biogás proveniente de vertederos, mucho mayor al que provendría de aguas residuales.

En cuanto a la autarquía, no existe un impacto importante ($AEn = 1$ %, según la Tabla 5-96) en la reducción de importaciones energéticas, esto también se manifiesta en el indicador que mide el uso de las energías renovables ($URn = 1,12$ % según la Tabla 5-101). Como sustituto, el biometano tendría un precio ($Pe = 25,64$ USD/BEP, según la Tabla 5-98) inferior al diésel para transporte ($Pe = 36,68$ USD/BEP, según la Tabla 5-99). Esto se refleja, además, en la reducción de los precios medios de energía (PME), pero no significativamente (ver Tabla 5-100). Las emisiones representadas por la pureza de la energía (PRen) se reducen en alrededor de 1 % con respecto al escenario base (ver Tabla 5-103). En una proporción parecida el indicador de empleo, Emn , muestra un ligero incremento en la creación de nuevos trabajos (Tabla 5-105). En definitiva, la inclusión de esta energía no sería representativa en el cambio del modelo energético, aun cuando se espera una disminución en los precios de la energía, emisiones y un incremento de empleo marginal.

Aunque el uso de este recurso puede ser interesante, los reportes técnicos indican que se podría incrementar si se adiciona al tratamiento de desechos sólidos orgánicos. Pero esto disminuiría la colocación de residuos en el vertedero y, por tanto, reduciría la producción de electricidad por esta vía. Por otro lado, a más de la baja incidencia en la disminución de importación de energía, se requeriría reacondicionar los motores de los vehículos. La producción de biogás por este medio se ve limitada no solo por la falta de incentivos en el Ecuador, sino por la escasa experiencia en este tipo de proyectos (Peláez Samaniego *et al.*, 2015). En la ciudad de Cuenca el tratamiento de aguas residuales se lo realiza con procesos aeróbicos, precisamente por las condiciones climatológicas de la zona (Cordero, 2017).

En cuanto a la producción de bioetanol proveniente de podas urbanas, las experiencias en el Ecuador son nulas, al igual que los biocarburantes provenientes de aceites residuales domiciliarios, como sustitutos de combustibles fósiles. En este sentido, el estado de madurez de estas opciones tecnológicas no llega a la fase comercial como para ser opción a tomar en cuenta en el cambio del modelo energético urbano (Song *et al.*, 2016).

Sustitutos de la producción de electricidad con tecnologías convencionales.

Las tecnologías de generación de electricidad más adecuadas para la implementación en la ciudad de Cuenca son las tecnologías de energía hidroeléctrica (a_9), fotovoltaica (a_{11}) y biogás de vertedero (a_4). Estos resultados coinciden con los recursos disponibles en la ciudad y con la ejecución de proyectos en curso. Al evaluar los pesos, los subcriterios que componen la dimensión técnica, económica y social la alternativa a_4 , a_{11} y a_9 , son las más favorables. En el caso de la dimensión ambiental la alternativa a_9 , se posiciona favorablemente, mientras que la a_{11} y a_4 tienen valoraciones inferiores (Tabla 5-43).

Se evaluaron las vertientes de importancia que atraviesan la ciudad. Ecuador tiene excelentes recursos hídricos y experiencia en la construcción y operación de centrales hidroeléctricas (MEER, 2015). A pesar de que los resultados indican el atractivo de esa tecnología, los caudales y topografía de los ríos de la ciudad no han sido evaluados con fines energéticos. Es pertinente anotar, que a principios del siglo XX se emplazaron proyectos hidroeléctricos en lo que en la actualidad es el área urbana de Cuenca. Asimismo, existen centrales que en conjunto tienen alrededor de 52,4 MW (Complejo Hidroeléctrico Machángara), proyectos en estudio con una potencia de 22 MW (Proyecto Múltiple Soldados Yanuncay) o estudios de prefactibilidad

preliminares indican que se puede construir al menos una central eléctrica de 6 MW (río Tomebamba), pero en sitios fuera de la parte urbana (CGA Cuenca, 2007).

El recurso solar sobresale por la ausencia de estaciones que repercuten en la estabilidad de la radiación solar, además, se presenta estabilidad de la demanda de energía durante todo el año. Otra característica es la mínima influencia con respecto a la orientación e inclinación de los paneles (ver Gráfica 5-27 y Gráfica 5-28). A esto se suma el crecimiento horizontal de la ciudad y la preferencia de los residentes a vivir en viviendas unifamiliares (GAD Cuenca, 2015). Esto sin duda es una característica que difiere en ciudades en donde hay más concentración de habitantes. El potencial indica que se podría cubrir más de tres veces la demanda de electricidad de la ciudad. A pesar de estas posibilidades de participación de la energía fotovoltaica, se requiere un escenario de redes inteligentes (Smart Grid) para controlar los desajustes de producción horaria (Ponce-Jara *et al.*, 2018).

En cuanto a la elección del aprovechamiento del biogás, a partir del año 2017, está en operación una planta de energía eléctrica de 1 MW que utiliza biogás del vertedero de la ciudad. Analizando el balance energético y el diagrama de Sankey de la línea base (E_{s0} , Tabla 5-74 y Figura 5-29) y el balance de los escenarios en donde se incluye el potencial de la energía hidroeléctrica (E_{s2} , Tabla 5-91 y Figura 5-33), fotovoltaica (E_{s3} , Tabla 5-92 y Figura 5-34) y biogás de vertedero (E_{s4} , Tabla 5-93 y Figura 5-35), se destaca que el uso de la energía renovable en la producción de electricidad, URen, es del 26,39 %, 100 % y 3,19 % respectivamente. Mientras que el aporte a los requerimientos globales medidos con el indicador URn, en el mismo orden serían 2,72 %, 10,31 % y 0,33 %.

En el escenario E_{s2} con los 120 GWh, se podría dar servicio al 52 % de hogares de la ciudad de Cuenca, esto es inferior al escenario propuesto por (Fujii *et al.*, 2015) en Beppu (Japón) al utilizar hidroeléctricas. En el caso de la energía fotovoltaica el abastecimiento es variable, pero está relacionado con lo valorado en el E_{s3} . En Daca (Bangladés), Jamal *et al.* (2014) estima un 15 %, en Zernez (Suiza), Mavromatidis *et al.* (2015) un 64 % y en el escenario considerado por Eicker *et al.* (2015) en Múnich (Alemania) se llega hasta el 100 %. Los estudios que valoran el biogás de vertedero también están en los rangos definidos en E_{s4} , en Mexicali (México), por ejemplo, se calcula que es posible abastecer 6 % de energía eléctrica (Aguilar-Virgen *et al.*, 2014), mientras que en San Pablo y Río de Janeiro (Brasil) se llega a un 7,30 % y 6,73 % respectivamente (de Souza *et al.*, 2014).

En Cuenca, la energía fotovoltaica tendría mayor incidencia en la disminución de los flujos de energía, por tanto, el indicador de autarquía llega al AEn=10,28 %. En el caso de las otras tecnologías no superan el 3 % (Tabla 5-96). Esto tiene un impacto en el precio medio de la energía, al compararse con el escenario base (PMEn = 48,27 %), pues se incrementan principalmente con la energía hidroeléctrica y más con la fotovoltaica, lo que se manifiesta en la reducción del indicador a 41,57 % y 23,96 %, respectivamente (Tabla 5-100). La sustitución no afecta a las emisiones en la ciudad, pues P_{Ren}, se mantiene inalterable, con respecto al escenario E_{so} (Tabla 5-103). En cuanto al indicador EM_n, que mide el empleo, la tecnología solar fotovoltaica incrementaría el empleo significativamente (sobre el 78 % con respecto al caso base, según la Tabla 5-105), a pesar de que desciende parcialmente la importación total de energía de la ciudad. De las otras tecnologías la que le sigue con menos repercusión es la hidroeléctrica y seguida muy lejos de la producción de biogás.

En Ecuador, el costo real de producción y distribución de electricidad es de Pe = USD 0,09 y se reduce a USD 0,04 luego del subsidio público (Ponce-Jara *et al.*, 2018). Sin embargo, los precios calculados de la electricidad para las tecnologías fotovoltaica, de vertedero e hidroeléctricas serían de USD 0,12, 0,17 y 0,059 respectivamente (Tabla 5-98). Los costos de inversión y energía son factores decisivos; si estas tecnologías no son financieramente atractivas para implementar, es muy difícil establecerlas, especialmente cuando se considera que las ER son pequeñas fuentes distribuidas (Barragán & Espinoza, 2015). Los ciudadanos asumirán que es preferible pagar una tarifa de electricidad en lugar de pagar sus propias instalaciones y mantenerlas, con respecto a la energía recibida de la red.

Como consecuencia, es necesario subsidios focalizados que permitan ventas de microgeneración a la red. Asimismo, se requiere políticas para que en las infraestructuras y los edificios urbanos se incorporen tecnologías como la solar fotovoltaica, así como un escenario de redes inteligentes. La altísima disponibilidad de energía hidroeléctrica a nivel de país puede seguir condicionando la implantación de estas tecnologías a pequeña e incluso a gran escala (MEER, 2008).

Con respecto, a las tecnologías no seleccionadas, es de anotar que, la tecnología eólica es principalmente aplicable en entornos rurales, pero para su despliegue masivo, requiere más progreso tecnológico para su uso en entornos urbanos (Millward-Hopkins *et al.*, 2013). En el caso de la biomasa e incineración, a pesar de ser tecnologías maduras, la valoración cualitativa indica escepticismo para su aceptación, especialmente cuando no hay proyectos locales y el potencial del recurso

de la ciudad es aún desconocido. Debido a que los desechos urbanos tienen un alto contenido de humedad, la incineración no se considera una tecnología apropiada a nivel local (EMAC, 2017).

Sustitutos al calentamiento de agua con combustibles fósiles y electricidad.

De las tecnologías apropiadas para el calentamiento de agua (solar térmica y geotérmica) se optó por el uso de paneles térmicos (a_{11}), dada la preferencia general de la evaluación por criterios y subcriterios (ver Tabla 5-61).

El éxito en la aplicación de esta energía difiere. En México, y a pesar de que puede ser una opción adecuada como sustituto al uso de gas licuado de petróleo o gas natural (Rosas-Flores *et al.*, 2016), no se ha llegado a un posicionamiento a lo largo de ese país. Mientras en algunas ciudades chinas se tiene una alta irrupción que puede superar el 90 % (Han *et al.*, 2010).

Al comparar el balance de energía y el diagrama de Sankey del escenario base (E_{50} , Tabla 5-74 y Figura 5-29), con el escenario E_{55} (Tabla 5-94 y Figura 5-36), que representa la inclusión masiva de calentadores solares térmicos, se disminuiría principalmente el consumo de GLP en 32,87 % en el sector residencial. Con respecto al consumo residencial, la reducción de los requerimientos energéticos es del orden del 24 %. Empero, su impacto en la matriz energética no supera el 1 %.

La reducción del 32,87 % del E_{55} , es comparable con el cálculo de Rosas-Flores y colaboradores (2016), que estiman que en las áreas urbanas de México se puede llegar a un 45,6 %, mientras que en España puede ser de un 68 % (Izquierdo *et al.*, 2011). En Concepción (Chile), Zalamea y García Alvarado (2014) estiman un 75 %. Esta variabilidad también se atribuye al detalle de la estimación, así como al comportamiento de los consumidores y situación climática de cada zona de estudio.

Esto se ve reflejado en los indicadores de autarquía ($A_{En} = 3,28$ %, Tabla 5-96) y uso de las renovables ($UR_n = 2,30$ %, Tabla 5-101). Por otro lado, el precio de la energía indica que el costo de producir calor ($P_e = 77,60$ USD/BEP, según la Tabla 5-98) es mayor que si se utiliza GLP ($P_e = 13,10$ USD/BEP, según la Tabla 5-99). Por ello, se incrementa el precio medio de la energía, lo que se manifiesta en la reducción del indicador PM_{En} , en alrededor de siete puntos porcentuales (Tabla 5-100). No se tiene una reducción importante en las emisiones, no solo por la incidencia en el cambio de la matriz energética urbana, sino debido a que el GLP es considerado un combustible limpio (ver Tabla 5-103). El indicador que mide el empleo, sin embargo, se incrementa, comparado con el caso base y los escenarios en donde se utiliza el biogás

de aguas residuales o la producción de electricidad con energía hidroeléctrica o biogás de vertedero (ver Tabla 5-105).

El impacto de esta tecnología repercute principalmente en el sector residencial, sin embargo, tres podrían ser los factores que impiden su uso masivo en el Ecuador, a pesar de ser una opción para disminuir el uso de GLP: i) el precio subsidiado del combustible, ii) falta de incentivos para su uso y iii) desconocimiento de la tecnología. El inconveniente para la sustitución puede ser que los costos de inversión inicial son altos y no atractivos si se los quiere incorporar con los dispositivos que se tienen actualmente en las viviendas.

Integración de las energías renovables en la ciudad.

Los recursos renovables antes de la transformación energética a energía útil son comparables a los de la energía proveniente de los combustibles fósiles, pero la tecnología actual impide aprovecharlas para las actividades humanas (ver Figura 5-37. Diagrama de Sankey (E_{s6})).

Si se comparan los balances energéticos del escenario base (E_{s0} , Tabla 5-74 y Figura 5-29) y el escenario en donde se aplican todas las energías (E_{s6} , Tabla 5-95 y Figura 5-37) se llega a un uso de renovables que podrían abastecer todos los requerimientos de energía eléctrica ($URen = 100 \%$) (Tabla 5-102), pero solo parcialmente los requerimientos de energía de toda la ciudad ($URn = 13,79 \%$) (Tabla 5-101). Se establece una alta dependencia de los recursos energéticos externos pues la autarquía llega alrededor del 14 % (Tabla 5-96). Para conseguir esto, el precio medio de la energía se incrementaría a tal punto que el indicador disminuye 30 puntos porcentuales con respecto al escenario base (Tabla 5-100). Es decir, a pesar de las altas inversiones, no se modificaría la matriz energética urbana considerablemente. En este mismo sentido, la pureza energética varía en forma reducida toda vez que no se ha influido en el consumo de combustibles fósiles destinados principalmente al transporte (Tabla 5-103). De manera favorable, el indicador de empleo se altera significativamente, incrementándose cerca del 80 % respecto al escenario base (Tabla 5-104).

Se advierte que los indicadores relacionados con el empleo y el uso de las energías que producen electricidad tienen una mejora notable frente al caso base, empero, provocan un incremento de los precios medios de electricidad, sin producirse una disminución considerable de emisiones y sin alterar significativamente la matriz energética urbana. Si bien no se analizaron otras medidas, con el diagnóstico

desagregado de la demanda se puede determinar en qué sectores es factible aplicar medidas de eficiencia energética. Siendo el sector transporte el gran consumidor de energía, se establece que es indispensable focalizar políticas que disminuyan el uso del vehículo particular. La opción de transporte público adecuado, así como el cambio de combustible (gasolina o diésel por gas natural o electricidad), son factores que podrían ser considerados a mediano o largo plazo. Políticas que cambian el paradigma convencional como el teletrabajo son otros puntos que se deberían discutir para minimizar el uso del vehículo.

Visión general.

Grubler y colegas (2012) sostienen que las megaciudades se podrían abastecerse con aproximadamente el 1 % de su energía requerida desde fuentes renovables distribuidas dentro de los límites urbanos. Cumo y colaboradores (2012) establecen la imposibilidad de mantener un equilibrio energético entre los requerimientos de energía y la energía renovable con las tecnologías existentes. Bristow & Kennedy (2013b) consideran que debido a la densidad de la energía demandada dentro de una ciudad, la energía renovable puede reunir solo un pequeño porcentaje de la demanda total. Adicionalmente, Leduc y Rovers (2008) asumen que para que la demanda y oferta se acoplen se necesitará más esfuerzo para conseguir el objetivo de comunidades con cero energía exógena.

Con lo anterior parecería que la posibilidad de crear áreas urbanas autosostenibles es inviable, sin embargo, hay planteamientos serios que apuntan a que el modelo energético cambie (Energycities, 2014). Estas propuestas han surgido precisamente por el desarrollo tecnológico que permitiría aprovechar los recursos que dispone la ciudad. Dado el impacto que las ciudades intermedias tendrán en el futuro se hace indispensable que para ellas se planteen propuestas encaminadas a modificar el modelo energético urbano como condición ineludible para garantizar el suministro de energía a mediano plazo.

La energía no es el único aspecto de la sostenibilidad urbana; una visión más política de la gestión local corresponde al concepto de ciudad inteligente (Smart City). Esta visión tiene como objetivo mejorar la calidad de vida de los habitantes de la ciudad a través de la gestión de redes y tecnologías de la información y comunicación (TIC) que mejoran la eficiencia de la movilidad, proporcionan mayor seguridad y fomentan el consumo racional de recursos o formas urbanas compactas y accesibles (Creutzig, Baiocchi, Bierkandt, Pichler, & Seto, 2015).

Dentro de esta concepción se encuentra el concepto de redes inteligentes (Smart Grid), que se basa en la adopción de energías renovables en edificios y despliegues urbanos, utilizando equipos eficientes y redes que permitan el flujo de energía en diferentes direcciones (Dixon *et al.*, 2014). En el futuro, se espera que el desarrollo de redes eléctricas inteligentes facilite las tecnologías de acoplamiento y tenga en cuenta la inestabilidad de la fuente de energía. Si bien es cierto que el almacenamiento de energía eléctrica puede ser una solución, se necesita más investigación para que sea una opción técnica y económica viable (Falldé & Eklund, 2015). En cuanto a los sustitutos de combustibles, el cambio radica en suplantarse las tecnologías que den los mismos servicios, pero que utilicen electricidad. El uso de biocombustibles a partir de los recursos que tiene la ciudad requiere más investigación y su impacto en la matriz energética al parecer no es incidente. En cuanto a las tecnologías que producen calor, el almacenamiento térmico, que tiene un costo menor, es una opción madura y ampliamente utilizada (Han *et al.*, 2010; Hazami *et al.*, 2013).

En los nuevos emplazamientos los planificadores pueden desde un principio establecer condiciones para promover edificaciones que acojan principios bioclimáticos, eficiencia en el uso de la energía o la incorporación de tecnologías renovables (Eicker *et al.*, 2015; Energycities, 2014).

La tecnología ayudaría a cubrir la demanda de energía; sin embargo, requiere un cambio de comportamiento orientado a evitar el consumo innecesario de materiales y energía (Georgescu-Roegen, 1975). Sin la adopción de medidas concernientes a políticas urbanas tempranas, no es posible promover efectivamente el aprovechamiento energético urbano, menos aún a gran escala. Asimismo, se desprende que esta transición «sociotecnológica» requiere un tiempo que no necesariamente es inmediato y cuya metamorfosis demandará innovación tanto en aspectos económicos o sociales (Dixon *et al.*, 2014).

Para poner en práctica lo anterior se requiere establecer estrategias que apunten a un sistema energético sostenible y basado en recursos autóctonos (Terrados *et al.*, 2009). En este sentido, Haberl (2001a) expone que el conocimiento de los análisis derivados de estudios de flujos de materiales y energía es uno de los primeros pasos para incrementar la eficiencia de los recursos utilizados, promoviendo que las ciudades dejen de ser receptoras de energía y alcancen cierta independencia y democratización energética (IEA, 2009; IRENA, 2016b; Sveinbjörnsson *et al.*, 2017). Del mismo modo, Carlisle *et al.* (2009) sugieren que los planificadores deben

determinar los usos de energía, para luego proponer hitos con el fin de propiciar que las comunidades sean autónomas.

La decisión política es esencial, las tecnologías son inicialmente costosas respecto a las tradicionales, por ello, para su difusión y proliferación se requiere una etapa inicial que impulse su promoción mediante subsidios o créditos, hasta que la industria se desarrolle por sí sola. El costo por kW está influenciado por la difusión y la madurez de la tecnología, por lo que los mayores costos de energía normalmente corresponden a sistemas pequeños. No obstante, existen tecnologías, como la fotovoltaica o la solar térmica, que podrían expandirse por toda la ciudad en sistemas domésticos, mientras que los sistemas hidroeléctricos, de marea, de biomasa o de biogás se limitarían a una o algunas plantas dispersas. Dado que no hay expectativa que la energía en la ciudad se produzca en grandes plantas de energía, no se espera una economía de escala relacionada con grandes centros de producción, de hecho, esta es una ventaja de los proyectos multiMW (Rosenbloom & Meadowcroft, 2014). Se entiende en este caso que se puede lograr una economía de escala con la posibilidad de ampliar la fabricación y el montaje de los dispositivos de energías renovables, lo que a la larga provocará una disminución en el costo del equipo (Moscovici *et al.*, 2015) fomentando su uso y conveniencia económica.

6.2 Conclusiones de la investigación

Una de las propuestas para disminuir el flujo de energía en la ciudad es el uso de energías renovables; sin embargo, en la planificación de las ciudades, estas no se consideran como mecanismos para reducir la importación de energía. Puesto que las ciudades intermedias tendrán un rol primordial en el futuro, es en ellas que se deberán diseñar y aplicar nuevas políticas y procesos de planificación para promover el uso de energías renovables en áreas urbanas, aprovechando los recursos locales. Se propone que la planificación energética se expanda al nivel de la ciudad y no permanezca solo a nivel nacional o regional. La intención es que la planificación urbana incluya medidas para asegurar que estas tecnologías sean gradualmente aceptadas e integradas, de acuerdo con los recursos y condiciones autóctonas.

Dado que la sociedad inevitablemente ocasiona cambios en el medioambiente, es necesario anticiparse a los efectos adversos que podrían ocasionarse. En ese sentido, el metabolismo urbano es una herramienta que permite monitorear y definir

estrategias para garantizar una calidad de vida humana adecuada mientras se realizan estos cambios. Sin embargo, no hay recetas únicas, pues existen posibilidades y tecnologías que se deben evaluar para que se acojan en determinadas localidades. Como primer paso se necesita evaluar varios recursos renovables disponibles, asimismo, se debe conocer con profundidad los flujos de los portadores de energía. Por otro lado, se deben identificar mecanismos de financiamiento, crear normativas adecuadas, impulsar el compromiso y aceptabilidad de la ciudadanía, a más de establecer una estructura municipal sólida que incluya la energía como uno de sus ejes de desarrollo.

Es esencial que la sociedad se comprometa con la mejora de los problemas ambientales. La autosuficiencia energética es una forma de lograr el desarrollo sostenible. Sin lugar a duda, esta y otras acciones deben considerarse, ya que el éxito del desarrollo humano actual puede dejar un legado catastrófico que las futuras generaciones se verán obligadas a enfrentar si no hay cambios en el consumo de materiales, agua y energía.

La incorporación de las energías renovables en la ciudad es un planteamiento relativamente nuevo, por ello se formuló una metodología novedosa para seleccionar las tecnologías más adecuadas, así como valorar mediante escenarios e indicadores como se afectan los flujos metabólicos de la energía urbana. Las ciudades medianas y pequeñas son más adecuadas para establecer pautas de planificación en la forma en cómo se maneja la energía. Aunque se aplicó el planteamiento a la ciudad intermedia de Cuenca, es posible seguir el procedimiento para emplearlo en otras ciudades, especialmente en los países en desarrollo.

La metodología propuesta está relacionada con las aportaciones especificadas en el Capítulo 1 y sirven como una guía para presentar las conclusiones de esta tesis:

Aportación I: en esta investigación se analiza el uso de las energías renovables en el marco del metabolismo urbano. Además, se define el modelo metabólico para analizar la inclusión de las ER en la ciudad.

El objetivo es gestionar adecuadamente los recursos que requieren las ciudades sin comprometer la calidad de vida de las personas o el medioambiente de donde estos se obtienen. El metabolismo urbano es una herramienta que permite identificar los flujos de materiales, energía, agua y nutrientes. Se han expuesto varios métodos para

su evaluación, pero no todos son adecuados para el análisis de la energía directa de la ciudad.

Luego de una extensa revisión bibliográfica se ha definido que el método de flujos de energía utilizado para describir el metabolismo urbano de la ciudad es la herramienta que permite analizar y medir el impacto de la incorporación de las energías renovables en la matriz energética urbana. La revisión bibliográfica incluye estudios que analizan los conceptos y métodos para valorar el metabolismo urbano, así como ciudades en donde se los ha aplicado.

Aportación II: se determina once tecnologías de producción energética que utilizan recursos renovables disponibles en la ciudad.

Se ha identificado y justificado que existen al menos once tecnologías que aprovechan los recursos energéticos que disponen las ciudades y pueden evitar la importación energía directa. Se reunió varios artículos que discuten la incorporación de las tecnologías y que valoran el potencial energético en diversas ciudades. Si bien hay varias investigaciones académicas que analizan las energías renovables, la presente investigación, como otro aporte relevante reúne y define que tecnologías permiten aprovechar la materia prima disponible en las urbes.

En la mayoría de los estudios revisados la energía solar fotovoltaica es la que más interés ha despertado. Dadas las condiciones de cada ciudad se tienen diferentes potenciales, de acuerdo con el entorno urbano, la ubicación y los requisitos de energía. Las tecnologías, como la solar térmica o la geotérmica, pueden ser complementarias, ya sea calefacción o calentamiento de agua. Otras tecnologías, como la biomasa, el biogás, las corrientes hidroeléctricas o marinas, requieren una mayor infraestructura para ser aplicadas a los distritos, aunque son una alternativa como complemento a la intermitencia de la producción-demanda. La tecnología eólica tiene dificultades para adaptarse al entorno urbano, pero hay propuestas que promueven su distribución masiva. Los biocombustibles tendrían menos incidencia, por lo que son alternativas que requieren más investigación, más aún por la repercusión de los vehículos que utilizan combustibles fósiles.

Aportación III: se emplea un método multicriterio para seleccionar la tecnología más adecuada para una ciudad. Asimismo, establece, categoriza y jerarquiza catorce subcriterios (técnicos, económicos, ambientales y sociales) que se consideran influyentes para ayudar a la selección de las tecnologías renovables que utilizan recursos endógenos de la ciudad.

Mediante el análisis multicriterio sugerido se propone seleccionar las tecnologías más adecuadas para una ciudad, este cambio de escala es de hecho parte del cambio de paradigma pues las tecnologías renovables pueden insertarse en los entornos urbanos para aprovechar los recursos energéticos disponibles.

La metodología permite elegir las energías renovables mediante el uso del método multicriterio PROMETHEE. Para robustecer el proceso de decisión PROMETHEE, además, permite analizar el comportamiento de cada dimensión y cada subcriterio frente a las alternativas propuestas. Este método es ampliamente utilizado en la planificación energética y permitió jerarquizar las once alternativas energéticas, considerando cuatro dimensiones (técnica, económica, ambiental y social), que se componen de catorce subcriterios.

Los subcriterios analizados no necesariamente son los únicos; sin embargo, se asumen que pueden contribuir a la discusión en este ámbito. De hecho, la definición de estos subcriterios es un aporte al conocimiento, pues fueron identificados luego de una revisión bibliográfica. Además, se valoró su importancia mediante una consulta a expertos internacionales. De acuerdo con este análisis se establece que los factores económicos en conjunto son los más importantes. La existencia del recurso y la eficiencia resultan determinantes en función del aprovechamiento de la materia prima para producir energía. Por su parte, los factores ambientales y sociales se perciben como menos influyentes al momento de optar por una u otra opción. También se revela una baja empatía social respecto a la afectación a la naturaleza y al cambio climático. Al fraccionar la muestra entre procedencia y perfil laboral, se advierte que existe una variación en el posicionamiento de los factores. A pesar de ello, se destaca que en general la dimensión económica despierta la mayor preocupación.

Para especificar los ocho subcriterios cuantitativos se contrastó variada literatura científica, reportes institucionales internacionales y comunicaciones personales con proveedores. Particularmente el análisis efectuado para obtener los subcriterios de la dimensión económica y el indicador de empleo en tecnologías tan diversas hace

que la compilación de información en un solo documento sea un apoyo para otras investigaciones. En cuanto a los subcriterios cuantitativos, que son propios de las características locales, para su valoración se optó por la consulta a expertos del medio. Estas dos vías para valorar los subcriterios fortalecieron la selección, pues por un lado acogen información propia de cada tecnología, así como información inherente de la ciudad.

Al aplicar la metodología en la ciudad de Cuenca, se seleccionaron cinco tecnologías, una que sustituye al diésel como combustible para transportación, tres que producen electricidad y otra que permite el calentamiento de agua sanitaria. Las cinco tecnologías seleccionadas, de hecho, estuvieron en concordancia con los recursos existentes, con proyectos en ejecución o que se esperan poner en marcha.

Aportación III: se modela integralmente a la ciudad en términos de energía directa utilizando un modelo energético que caracteriza los flujos de energía y es generalmente utilizado en países o regiones.

Si no se entiende a la ciudad con el grado de detalle presentado no se puede medir el impacto de cualquier política energética que se proponga, por ello la información expuesta es valiosa para el entorno local. En este sentido, el metabolismo urbano promueve que se conozcan los flujos de energía y su destino.

En concordancia con el método de flujos de energía, se propone el uso del modelo LEAP, para caracterizar y desagregar la demanda de energía que requiere el sector residencial, comercial, industrial, transporte u otros. La elección del modelo LEAP, como herramienta para valorar el metabolismo urbano, es novedosa, por cuanto permite, además, incluir el potencial estimado de las energías renovables en la ciudad. El grado de desagregación posibilita que se incorporen otras medidas de eficiencia o políticas encaminadas a reducir la importación de energía.

Para establecer la línea base de energía urbana de la ciudad de Cuenca, se reunió información proveniente de reportes nacionales, institucionales y académicos. Se solicitó información específica a varias entidades que no necesariamente manejan la temática de la energía, pero fueron fundamentales para desagregar las demandas. Puesto que el Gobierno local no planifica en términos de energía, y en las entidades que manejan la energía (combustibles y electricidad) no se focaliza la situación

urbana de Cuenca, fue necesario reunir y consolidar la información de la energía de la ciudad.

Se determinó que la ciudad de Cuenca tiene una alta dependencia de recursos fósiles. El 60 % de la energía es utilizada para el transporte, mientras que las actividades productivas y comercio no sobrepasan el 25 %, mientras que el sector residencial requiere 13,7 %. En ese mismo sentido, el consumo de combustibles fósiles alcanza el 90 %, mientras que la energía eléctrica es del 10 %. Con el nivel de desagregación particularmente de la industria y el transporte que suman cerca del 80 % de los requerimientos energéticos, se puede identificar en dónde es adecuado realizar cambios de tecnología o emprender campañas de eficiencia energética.

La operación del parque automotor de Cuenca actualmente se basa enteramente en combustibles (60 % gasolina y 40 % diésel en términos de energía), por ello es inminente la búsqueda de sustitutos de combustibles o cambios tecnológicos. En los próximos años está pendiente la operación del tranvía en la ciudad de Cuenca (que utiliza principalmente electricidad), no obstante, no se dispone de información referente al impacto que su operación tendrá al desplazar unidades de transporte público o los incentivos que se propone para dejar de utilizar transporte privado. En este sentido, la desagregación de esta actividad con el detalle presentado (por vehículos y combustibles), es un aporte valioso, pues puede ser utilizada para medir diferentes políticas encaminadas a conseguir un modelo de transportación sostenible.

Otro aporte destacable es que, hasta la elaboración de esta tesis, no se conocía de manera integral el destino de la energía utilizado en la industria cuencana. En donde el 11 % de electricidad es usada con fines productivos y el resto procede de combustibles fósiles (38,4 % fueloil, 22,6 % diésel, 17,5 % GLP y 10,5 % gas natural). Si bien es cierto, para llegar al grado de desagregación propuesto se utilizaron estimaciones de sectores industriales foráneos, la información es valiosa para fomentar campañas focalizadas de sustitución de energía, uso de vapor o agua caliente proveniente de sistemas solares térmicos, electricidad proveniente de sistemas fotovoltaicos o campañas de eficiencia energética.

El sector residencial del total de energía que requiere, el 72,5 % proviene del GLP, mientras que el 27,5 % de electricidad. La sustitución del GLP, para calentamiento de agua, por calentadores solares térmicos es una solución que ha dado éxitos en otras locaciones, pero sin una visión municipal, no será posible la masificación de

esta tecnología pues se requieren ordenanzas constructivas propias acordes con los requerimientos urbanísticos de Cuenca, así como incentivos no solo a usuarios, sino a profesionales y constructores. Se estima que el 60 % del GLP es utilizado para la cocción, que puede ser sustituida por electricidad, de allí que el grado de desagregación de este sector permitiría hacer una prospectiva a mediano plazo para la sustitución de equipamiento.

Aportación IV: se estima el potencial renovable de una ciudad intermedia y valora como el modelo energético varía, en distintos escenarios.

El estudio de caso en Cuenca muestra que es posible disminuir la importación de recursos energéticos de fuera de la ciudad. Los resultados reflejan las conclusiones lógicas frente a las condiciones locales, tales como una alta y estable radiación solar, la presencia de ríos que cruzan la ciudad y el manejo de los desechos y efluentes que se pueden utilizar para producción de energía.

Al estimar el biometano producido por procesos anaeróbicos de las aguas residuales, se puede abastecer la demanda anual de 318 buses que utilizan diésel. Esta cantidad representa el 1,53 % de la energía total requerida para el parque automotor o 0,91 % del total de energía que requirió la parte urbana de Cuenca. De entre las tecnologías que producen electricidad, la energía solar fotovoltaica es la que más impactaría en los flujos energéticos, es más se tiene un potencial que puede cubrir hasta tres veces la demanda de electricidad. En cuanto a la energía hidroeléctrica y el biogás de vertedero, podría aportar hasta un 28,38 % y 3,43 % de los requerimientos de electricidad respectivamente. Sin embargo, la incidencia de las tres tecnologías en el conjunto de energéticos no sobrepasa el 10 % respecto al caso base. La energía solar térmica para calentamiento de agua puede sustituir a la importación de GLP en un 32,87 %, lo que corresponde el 1,00 %, si se compara con el escenario base.

Estos escenarios son óptimos en cuanto no analizan limitantes técnicos, económicos o ambientales que podría incidir en la implantación y, por tanto, reducirían el potencial. Asimismo, debido a la intermitencia de la energía solar y su desbalance con la carga, se requiere más investigación (bidireccionalidad de la red o el almacenamiento) para asegurar su implantación masiva. En este sentido, esta producción podría asignarse a otros usos, principalmente destinados a la transportación. Los vehículos eléctricos son una opción para aliviar las altas

demandas de los combustibles fósiles y a la vez podrían equilibrar la red. Puesto que la energía eléctrica tiene la capacidad para absorber todo tipo de demandas urbanas, incluidas la térmica y el transporte, se espera que su protagonismo en las matrices energéticas aumente.

La incorporación de varias tecnologías en una ciudad es un planteamiento integral, que contrasta con los estudios revisados, no solo porque se seleccionan las tecnologías más adecuadas, sino porque se presentan en conjunto las demandas y requerimientos de la ciudad. A diferencia de otras investigaciones que comparan una parte de la demanda con la producción renovable, en esta tesis se compara todo el sistema, esto da una visión completa y holística de la ciudad y de la aplicación de las diferentes tecnologías.

Aportación V: se definen siete indicadores de sostenibilidad energética urbana, que miden el impacto de la inclusión de las tecnologías renovables dentro del modelo energético urbano.

Varias propuestas internacionales promueven el uso de las energías renovables en la ciudad. A pesar de ese interés no se han establecido formas de medición del cambio del modelo energético urbano. Si bien es cierto como se ha demostrado hay varios indicadores urbanos, incluidos aquellos que miden el manejo y uso de la energía, son pocos los que están dirigidos a evaluar de manera integral el uso de las renovables en la ciudad. Por ello se identificaron siete indicadores energéticos sostenibles que suelen ser utilizados a nivel de país o región y que son compatibles con la propuesta de esta tesis.

La autarquía indica que bajo los escenarios propuestos se podría llegar como máximo a una AEn = 13,79 %. Es decir, es poco probable que una ciudad obtenga la autosuficiencia energética total al usar solo recursos endógenos, al menos a corto plazo. A pesar de que la importación de energía basada en recursos fósiles no disminuye en forma sustancial, los precios medios de la energía no se alteran sustancialmente e incluso pueden incrementarse en forma notoria. Esto se evidencia en una reducción del indicador PMEn en alrededor de treinta puntos porcentuales.

En cuanto el uso de las energías renovables UR se seguirá requiriendo de la importación del 86 % de energía, pero se podría llegar a sustituir el 100 % del requerimiento de electricidad. Esto, sin embargo, no altera la pureza energética, PRe, pues como máximo el indicador respecto al caso base aumenta 4 puntos

porcentuales. Esto se debe a que la matriz urbana está altamente influenciada por el transporte y los combustibles fósiles. El empleo a pesar de ello se ve favorecido, sobre todo con el uso intensivo de la energía solar fotovoltaica, pues con respecto al caso base se incrementa en cerca de ochenta puntos porcentuales.

Las matrices de energía urbana son complejas y utilizan principalmente energía basada en combustibles fósiles. En el caso de Cuenca, con las tecnologías evaluadas no se ha conseguido modificar este modelo energético. Por ello, a más de las energías renovables existen otras estrategias que deben acogerse y son ineludibles (programas de eficiencia energética, estrategias pasivas, o cambio de equipos de consumo). No obstante, cualquier propuesta que pretenda cambiar el paradigma de cómo se concibe la ciudad significará un cambio de actitud a diferentes escalas (autoridades, planificadores o ciudadanos) en la forma en que se proyecta la ciudad.

Limitaciones del estudio.

No se incluyó en el análisis tecnologías específicas que podrían disminuir los flujos de energía de las industrias, esto por cuanto hay diversos requerimientos, equipamiento y usos. Hay tecnologías que podrían ser útiles exclusivamente para industrias específicas. Por ejemplo, la producción de calor a altas temperaturas con sistemas solares térmicos, la producción de electricidad proveniente del biogás de sistemas anaeróbicos que requieren materia prima de ciertas industrias, o la producción de electricidad con energía fotovoltaica aprovechando las cubiertas de las naves industriales.

La experticia y formación previa de los participantes internacionales no fue valorada tal como se lo hizo con los profesionales locales. Esto por cuanto al extender el cuestionario se podría reducir el interés de los consultados. No obstante, se eligieron los perfiles de los encuestados en función de encuentros personales en congresos, páginas web de organismos académicos, públicos o privados, así como por recomendaciones de otros expertos. Además, la procedencia de profesionales participantes no es proporcional, lo que evitaría extender un análisis de las preferencias de los subcriterios a cada uno de esos países.

Al haber un limitado número de expertos en la ciudad de Cuenca, se encontró dificultades en realizar una segunda ronda para definir los criterios cualitativos. Esto por cuanto hubo resistencia en colaborar. Sin embargo, dado que los subcriterios

cualitativos que mantenían un coeficiente estadístico en el límite de ser aceptable no eran influyentes en la valoración de los pesos, se aceptó esta valoración como idónea.

El modelo LEAP de Cuenca requirió de información variada de diversas instituciones. Dicha información se concibió no necesariamente para los fines requeridos para este trabajo. No obstante, los resultados del LEAP son próximos a los totales entregados por los entes que manejan datos consolidados de energía.

Tanto en las bases de datos de combustibles como de energía eléctrica, no se disponía de información delimitada para la parte urbana del cantón Cuenca. En el caso de la energía eléctrica, el despliegue de las redes en los límites urbanos hace difícil determinar en forma exacta el consumo que demanda la ciudad. La empresa distribuidora suministró la información a partir de su sistema de información geográfica. En el caso de los combustibles, la entidad que controla estos energéticos no disponía de información desagregada de consumos. Se requirió levantarla a partir de los registros de información que se disponía y luego se aproximó al consumo en la parte urbana del cantón Cuenca. La estimación del potencial requirió datos de organismos internacionales. Estos datos han sido utilizados en otras investigaciones, pero se recalca que no necesariamente corresponden al área de estudio.

6.3 Estudios futuros propuestos

Esta investigación se desarrolló desde una perspectiva que engloba varias dimensiones y, por tanto, requiere diferentes visiones. Por ello las siguientes propuestas de estudios futuros pueden también desarrollarse desde varias disciplinas:

- Uno de los objetivos de este estudio fue determinar los flujos de energía directa dentro de la ciudad, así como determinar en detalle los usos. Como única estrategia para la disminución de los flujos energéticos se ha evaluado el uso de las energías renovables que utilizan los recursos que dispone la ciudad. Por ello, se recomienda un estudio integral que incluya otras medidas como la sustitución de equipamiento más eficiente o las posibilidades de cambio de combustible en el transporte principalmente utilizando electricidad.
- Los escenarios planteados no están descritos en función de una prospectiva energética. El requerimiento de variables macroeconómicas (valor agregado local por sectores) fue un limitante. En este sentido, se recomienda realizar

una prospectiva a nivel de ciudad que incluya hitos y políticas que reflejen un cambio en el contexto urbano.

- Los factores descritos han sido obtenidos sobre la base de una revisión bibliográfica. Se podría complementar estos con consultas a expertos, no solo valorando los factores, sino, agregando otros que no han sido considerados y que pueden ser relevantes. Como complemento se sugiere que la discusión de estos factores se extienda a investigadores de varias ciudades en diferentes países, e incluso se podría clasificar diferentes entornos, para encontrar factores específicos o divergentes. La metodología planteada a través de técnicas multicriterio es útil para seleccionar las tecnologías, por ello, alineado con lo anterior, se recomienda aplicar a varias ciudades con diferentes entornos.
- El modelo LEAP se ha diseñado para la planificación a nivel local y regional. Considera en su módulo de transformación instalaciones de gran potencia que podrían incidir a esta escala. Construir herramientas que se acoplen a este modelo u otras específicas que incluyan a las energías renovables a escala urbana es un reto que vale la pena emprender.
- Se ha revisado variada literatura que permite determinar el potencial de las renovables a nivel urbano, pero hace falta integrarlas en un solo módulo informático de forma que incluyan las características de la ciudad como clima, población, recursos o incluso una valoración de los factores definidos en este documento. Esto facilitaría las posibilidades de hacer una selección más rápida y a la vez la posibilitaría concebir una planificación urbana integral.
- A más de obtener conocimiento de la situación energética en las ciudades, también se deben considerar los intereses de los involucrados antes de implementar una política local. No solo es deseable la consulta a expertos en planificación urbana o técnicos relacionados con el manejo de la energía, urbanistas o arquitectos, es indispensable analizar las expectativas de los ciudadanos, con el fin de crear políticas urbanas energéticas acorde a las expectativas de los habitantes.
- Se recomienda, además, determinar qué tipo de opciones de utilización de los recursos renovables se pueden utilizar en la industria o en el comercio, así como las tecnologías que podrían emplearse.

6.4 Publicaciones resultado de la tesis

Publicaciones indexadas en la Web of Science

- **Barragán-Escandón, A.**; Terrados-Cepeda, J.; Zalamea-León, E. *The Role of Renewable Energy in the Promotion of Circular Urban Metabolism*. Sustainability 2017, 9, 2341.
- **Barragán, E. A.**; Terrados, J.; Zalamea, E.; Pablo, A. *Electricity production using renewable resources in urban centres*. Proc. Inst. Civ. Eng. 2018, 1, 178.
- **Barragán Escandón, E.**; Zalamea, E.; Terrados, J.; Vanegas P.; *Factores que influyen en la selección de energías renovables en la ciudad*. EURE, Revista Latinoamericana de Estudios Urbano-Regionales, 2019, 45; 134.

Publicaciones indexadas en Scopus

- **Barragán, A.**; Terrados, J. *Sustainable cities: an analysis of the contribution made by renewable energy under the umbrella of urban metabolism*. International Journal of Sustainable Development and Planning. 2017 12, 3.
- **Barragán Escandón, E.**; Zalamea, E.; Terrados, J.; Parra A. *Las energías renovables a escala urbana. Aspectos determinantes y selección tecnológica*. Revista Bitácora Urbano Territorial. Aceptada.
- Zalamea-León E.; Mena-Campos J.; **Barragán-Escandón A.**; Parra-González, Diego, Méndez-Santos P. *Urban photovoltaic potential in inclined roofing of buildings of heritage centres in equatorial areas*. Journal of Green Building, College Publishing. ISSN: 1943-4618. Aceptada.
- Zalamea-León E.; Mena-Campos J.; Moscoso-Cordero S.; **Barragán-Escandón A.**; Méndez-Santos P. *Perspectivas de cubiertas fotovoltaicas y arquitectura en contextos urbanos patrimoniales*. ACE Journal UPC BarcelonaTech. ISSN: 1886-4805. In Press.

Otras publicaciones

- **Barragán Escandón, A.**, Espinoza Abad, J. L., 2015. *Políticas para la promoción de las energías renovables en el Ecuador*. En: «Energías renovables en el Ecuador. Situación actual, tendencias y perspectivas», Editores: Peláez Samaniego, M. R. y Espinoza Abad, J. L. Universidad de Cuenca. Gráficas Hernández, Cuenca, Ecuador.

- **Barragán Escandón, A.**; Arias P.; Terrados J. *Fomento del metabolismo energético circular mediante generación eléctrica proveniente de rellenos sanitarios: Estudio de caso, Cuenca, Ecuador*. Revista Ingenius. 2016, 16.
- **Barragán Escandón, A.**; Arias P.; Terrados J. *Renewable Energy Generation Technologies on Urban Scale*. The Renewable Energy & Power Quality Journal. 2017, 14.
- Torres A.; Carrión V.; Quezada C.; Coronel C.; **Barragán Escandón, A.** *AHP analysis to minimize the effects produced by the textile industry in the rivers of Cuenca city*. Determination of the better alternative to mitigate water pollution. Humanitarian Technology Conference (MHTC), IEEE Mexican. 2017, Puebla, México.

Dirección de proyectos de titulación

- Cordero, P. (2017). *Evaluación del potencial energético de las aguas residuales urbanas generadas en ciudades de altura*. Proyecto de titulación de Maestría en Gestión y Planificación Energética. Universidad de Cuenca.
- Jaramillo, C. E. (2017). *Estudio de metabolismo urbano en la ciudad de Cuenca*. Proyecto de titulación en Ingeniería Ambiental. Universidad Politécnica Salesiana.
- Ordóñez, M. (2017). *Elección de tecnologías de energía renovable para uso en ciudades intermedias, utilizando criterios de sostenibilidad, caso de estudio Cuenca-Ecuador*. Proyecto de titulación en Ingeniería Ambiental. Universidad Politécnica Salesiana.
- Vicente, M. (2017). *Desarrollo de un sistema de información energético en el consumo de combustibles derivados de hidrocarburos en la jurisdicción de la regional de control de hidrocarburos y combustibles – Azuay*. Proyecto de titulación de Maestría en Gestión y Planificación Energética Universidad de Cuenca.
- Barzallo, E., Chasijuan P. (2018). *Selección de energías renovables en ambientes urbanos aplicando métodos multicriterio y lógica difusa, estudio de caso ciudad de Cuenca*. Proyecto de titulación en Ingeniería Eléctrica. Universidad Politécnica Salesiana.

REFERENCIAS

- Afsordegan, A., Sanchez, M., Agell, N., Zahedi, S., & L.V., C. (2016). Decision making under uncertainty using a qualitative TOPSIS method for selecting sustainable energy alternatives. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 13, 1419–1432.
- Agudelo-Vera, C. M., Leduc, W. R. W. A., Mels, A. R., & Rijnaarts, H. H. M. (2012). Harvesting urban resources towards more resilient cities. *Resources, Conservation and Recycling*, 64, 3–12.
- Aguiar-Virgen, Q., Taboada-González, P., & Ojeda-Benítez, S. (2014). Analysis of the feasibility of the recovery of landfill gas: a case study of Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 79, 53–60.
- Akella, A. K., Saini, R. P., & Sharma, M. P. (2009). Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems. *Renewable Energy*, 34, 390–396.
- Al-Otaibi, A., Al-Qattan, A., Fairouz, F., & Al-Mulla, A. (2015). Performance evaluation of photovoltaic systems on Kuwaiti schools' rooftop. *Energy Conversion and Management*, 95, 110–119.
- Al Garni, H., Kassem, A., Awasthi, A., Komljenovic, D., & Al-Haddad, K. (2016). A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 16, 137–150.
- Alfonso Piña, W. H., Pardo Martínez, C. I., Alfonso, W. H., & Pardo, C. I. (2014). Urban material flow analysis: An approach for Bogotá, Colombia. *Ecological Indicators*, 42, 32–42.
- Alsayed, M., Cacciato, M., Scarcella, G., & Scelba, G. (2013). Multicriteria optimal sizing of photovoltaic-wind turbine grid connected systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 28, 370–379.
- Alsayed, M., Cacciato, M., Scarcella, G., & Scelba, G. (2014). Design of hybrid power generation systems based on multi criteria decision analysis. *Solar Energy*, 105, 548–560.
- Araujo, A. (2014, May 6). Alza de tarifas eléctricas busca rebajar el subsidio. *Diario El Comercio*. Retrieved from

- <http://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/alza-de-tarifas-electricas-busca.html>
- ARCH-Azuay. (2017). *Base de datos*. Cuenca, Ecuador.
- Arodudu, O., Ibrahim, E., Voinov, A., & van Duren, I. (2014). Exploring bioenergy potentials of built-up areas based on NEG-EROEI indicators. *Ecological Indicators*, 47, 67–79.
- Arola, T., Eskola, L., Hellen, J., & Korkka-Niemi, K. (2014). Mapping the low enthalpy geothermal potential of shallow Quaternary aquifers in Finland. *Geothermal Energy*, 2, 9.
- Arola, T., & Korkka-Niemi, K. (2014). The effect of urban heat islands on geothermal potential: examples from Quaternary aquifers in Finland. *Hydrogeology Journal*, 22, 1953–1967.
- Aste, N., Adhikari, R. S., & Manfren, M. (2013). Cost optimal analysis of heat pump technology adoption in residential reference buildings. *Renewable Energy*, 60, 615–624.
- Atici, K. B., Simsek, A. B., Ulucan, A., & Tosun, M. U. (2015). A GIS-based Multiple Criteria Decision Analysis approach for wind power plant site selection. *Utilities Policy*, 37, 86–96.
- Avelino Gonçalves, F., Dos Santos, E. S., & De Macedo, G. R. (2015). Use of cultivars of low cost, agroindustrial and urban waste in the production of cellulosic ethanol in Brazil: A proposal to utilization of microdistillery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1287–1303.
- Bagočius, V., Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2014). Multi-person selection of the best wind turbine based on the multi-criteria integrated additive-multiplicative utility function. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20, 590–599.
- Baño Nieva, A., Castilla Pascual, F., & Estirado Oliet, F. (2015). Proyecto SYMBACITY del solar decathlon Europe 2014: Redensificación sostenible como forma de intervención urbana en tiempos de crisis. *Informes de La Construcción*, 67, 1–10.
- Barles, S. (2009). Urban Metabolism of Paris and Its Region. *Journal of Industrial Ecology*, 13, 898–913.
- Barragán, E., & Espinoza, J. L. (2015). Políticas para la promoción de las energías renovables en el Ecuador. In M. R. Peláez Samaniego & J. L. Espinoza Abad (Eds.), *Energías renovables en el Ecuador. Situación actual, tendencias y perspectivas*. Cuenca, Ecuador, Ecuador: Universidad de Cuenca, Gráficas Hernández. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- BCE. (2015a). *Cuadro cuentas cantonales 2015*. Quito, Ecuador. Retrieved from

- <https://www.bce.fin.ec/index.php/component/k2/item/763>
- BCE. (2015b). *Cuadro cuentas nacionales*. Quito, Ecuador. Retrieved from <https://www.bce.fin.ec/index.php/component/k2/item/763>
- Beccali, M., Cellura, M., & Mistretta, M. (2003). Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable Energy*, 28, 2063–2087.
- Beerepoot, M. (2011). *Technology roadmap geothermal heat and power*. International Energy Agency. Paris, France. Retrieved from http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Geothermal_Roadmap.pdf
- Beleño, J. (2014). Metodología para determinar ubicación y potencial de pequeñas centrales hidroeléctricas del tipo filo de agua con potencias menores de 20 MW, utilizando sistemas de información geográfica. *Revista CINTEX*, 19, 79–107.
- Benli, H. (2016). Potential application of solar water heaters for hot water production in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 99–109.
- Bennett, M., & Newborough, M. (2001). Auditing energy use in cities. *Energy Policy*, 29, 125–134.
- Bergamasco, L., & Asinari, P. (2011). Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Application to Piedmont Region (Italy). *Solar Energy*, 85, 1041–1055.
- Berkday, A., & Nas, B. (2008). Biogas production and utilization potential of wastewater treatment sludge. *Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects*, 30, 179–188.
- BID. (2014). *Cuenca, ciudad sostenible: Plan de Acción*. Cuenca, Ecuador. Retrieved from <http://propone.net/cccv.ec/docs/cuenca-cuidad-sostenible.pdf>
- BID. (2016). Ciudades emergentes y sostenibles. Retrieved August 4, 2017, from <https://www.iadb.org/es/ciudades>
- Bidart, C., Fröhling, M., & Schultmann, F. (2014). Electricity and substitute natural gas generation from the conversion of wastewater treatment plant sludge. *Applied Energy*, 113, 404–413.
- Blasco, J., López, A., & Mengual, A. S. (2010). Validación mediante método Delphi de un cuestionario para conocer las experiencias e interés hacia las actividades acuáticas con especial atención al windsurf. *Ágora Para La Educación Física y El Deporte*, 12, 75–96.
- Börjesson, P., & Berglund. (2006). Environmental systems analysis of biogas systems — Part I: Fuel-cycle emissions. *Biomass and Bioenergy*, 30, 469–485.

- Brans, J.-P., & Mareschal, B. (2005). PROMETHEE methods. In J. Figueira, S. Greco, & E. Matthias (Eds.), *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. International Series in Operations Research & Management Science* (pp. 163–195). Springer, New York, NY: Springer Science.
- Bristow, D. N., & Kennedy, C. A. (2013a). The energy for growing and maintaining cities. *Ambio*, 42, 41–51.
- Bristow, D. N., & Kennedy, C. A. (2013b). Urban metabolism and the energy stored in cities: implications for resilience bristow and kennedy the energy stored in cities. *Journal of Industrial Ecology*, 17, 656–667.
- Bristow, D. N., & Kennedy, C. A. (2013c). Urban metabolism and the energy stored in cities. *Journal of Industrial Ecology*, 17, 656–667.
- Broad, O., Sevillano, R. C., Alejo, L., & Pe, J. G. (2017). Techno-economic demand projections and scenarios for the Bolivian energy system, 16, 96–109.
- Brown, M. M. W. and R. C. (2007). Comparative economics of biorefineries based on the biochemical and thermochemical platforms. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 1, 4956.
- Browne, D., O'Regan, B., & Moles, R. (2010). Use of multi-criteria decision analysis to explore alternative domestic energy and electricity policy scenarios in an Irish city-region. *Energy*, 35, 518–528.
- Browne, D., O'Regan, B., & Moles, R. (2012). Comparison of energy flow accounting, energy flow metabolism ratio analysis and ecological footprinting as tools for measuring urban sustainability: A case-study of an Irish city-region. *Ecological Economics*, 83, 97–107.
- Brunner, P. H. (2007). Reshaping urban metabolism. *Journal of Industrial Ecology*, 11, 11–13.
- Bukala, J., Damaziak, K., Kroszczynski, K., Krzeszowiec, M., & Malachowski, J. (2015). Investigation of parameters influencing the efficiency of small wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 146, 29–38.
- Burrows, R., Walkington, I. A., Yates, N. C., Hedges, T. S., Wolf, J., & Holt, J. (2009). The tidal range energy potential of the West Coast of the United Kingdom. *Applied Ocean Research*, 31, 229–238.
- Burton, J., & Hubacek, K. (2007). Is small beautiful? A multicriteria assessment of small-scale energy technology applications in local governments. *Energy Policy*, 35, 6402–6412.
- Buyukozka, G., & Guleryuz, S. (2014). A new GDM based AHP framework with linguistic interval fuzzy preference relations for renewable energy planning.

- Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 27, 3181–3195.
- Byrne, J., Taminiau, J., Kim, K. N., Seo, J., & Lee, J. (2015). A solar city strategy applied to six municipalities: Integrating market, finance, and policy factors for infrastructure-scale photovoltaic development in Amsterdam, London, Munich, New York, Seoul, and Tokyo. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 5, 68–88.
- Byrne, J., Taminiau, J., Kurdgelashvili, L., & Kim, K. N. (2015). A review of the solar city concept and methods to assess rooftop solar electric potential, with an illustrative application to the city of Seoul. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 830–844.
- Capros, P., Mavrotas, G., & Diakoulaki, D. (2003). Combined MCDA–IP approach for project election in electricity market. *Annals of Operations Research*, 120, 159–170.
- Carapellucci, R., Giordano, L., & Pierguidi, F. (2015). Techno-economic evaluation of small-hydro power plants: Modelling and characterisation of the Abruzzo region in Italy. *Renewable Energy*, 75, 395–406.
- Carlisle, N., Geet, O. Van, & Pless, S. (2009). *Definition of a " Zero Net Energy " Community*. National Renewable Energy Laboratory. Golden, Colorado. Retrieved from <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/46065.pdf>
- Castro, A. (2006). *Minicentrales hidroeléctricas*. *Manuales de Energías renovables*. Madrid, España: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Retrieved from http://dl.idae.es/Publicaciones/10374_Minicentrales_hidroelectricas_A2006.pdf
- Centrosur. (2017). *Base de datos*. Cuenca, Ecuador.
- Centrosur, ARCH-Azuay, & Centrosur. (2017). *Base de datos*. Cuenca, Ecuador.
- CEPAL/OLADE/GTZ. (2003). *Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe: Guía para la formulación de políticas energéticas*. Cuadernos de la CEPAL. Santiago de Chile, Chile: Naciones Unidas. Retrieved from http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/27838/1/S2003004_es.pdf
- CGA. (2009). *Resumen del inventario de emisiones atmosféricas del cantón Cuenca, año base 2007*. Cuenca, Ecuador.
- CGA Cuenca. (2007). *Plan energético de Cuenca 2007 - 2017*. Cuenca, Ecuador.
- Chaianong, A., & Pharino, C. (2015). Outlook and challenges for promoting solar photovoltaic rooftops in Thailand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 356–372.

- Chang, K.-C., Lin, W.-M., Lee, T.-S., & Chung, K.-M. (2011). Subsidy programs on diffusion of solar water heaters: Taiwan's experience. *Energy Policy*, 39, 563–567.
- Chen, S., & Chen, B. (2012). Network environ perspective for urban metabolism and carbon emissions: A case study of Vienna, Austria. *Environmental Science & Technology*, 46, 4498–4506.
- Chen, S., & Chen, B. (2015). Urban energy consumption: Different insights from energy flow analysis, input–output analysis and ecological network analysis. *Applied Energy*, 138, 99–107.
- Chrysoulakis, N., Lopes, M., San José, R., Grimmond, C. S. B., Jones, M. B., Magliulo, V., ... Cartalis, C. (2013). Sustainable urban metabolism as a link between bio-physical sciences and urban planning: The BRIDGE project. *Landscape and Urban Planning*, 112, 100–117.
- Conke, L. S., & Ferreira, T. L. (2015). Urban metabolism: Measuring the city's contribution to sustainable development. *Environmental Pollution*, 202, 146–152.
- Connolly, D., Lund, H., & Mathiesen, B. V. (2016). Smart Energy Europe: The technical and economic impact of one potential 100% renewable energy scenario for the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1634–1653.
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. (2015). *Huella de carbono de los municipios de Andalucía*. *Consejería de Medio Ambiente web site*. Sevilla, España. Retrieved from http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal_web/web/temas_ambientales/aire/calidad_aire/resultadosestadistica_huella_2007.pdf
- Cordero, P. (2017). *Evaluación del potencial energético de las aguas residuales urbanas generadas en ciudades de altura*. *Tesis de Maestría*. Universidad de Cuenca.
- Creutzig, F., Baiocchi, G., Bierkandt, R., Pichler, P.-P., & Seto, K. C. (2015). Global typology of urban energy use and potentials for an urbanization mitigation wedge. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 6283–6288.
- Cumo, F., Garcia, D. A., Calcagnini, L., Rosa, F., & Sferra, A. S. (2012). Urban policies and sustainable energy management. *Sustainable Cities and Society*, 4, 29–34.
- Cutz, L., Haro, P., Santana, D., & Johnsson, F. (2016). Assessment of biomass energy sources and technologies: The case of Central America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1411–1431.
- Danielsson, D. (2011). *Bio-methane production expansion in Iceland - a cost-benefit analysis*. Aarhus University. Aarhus University.

- Dawoud, B., Amer, E., & Gross, D. (2012). Economical – environmental evaluation of natural gas and renewable energy systems. *International Journal of Energy Research*, 37, 135–147.
- de Barros Miranda Gomes, M., Sacomano, J. B., Papalardo, F., & da Silva, A. E. (2014). Production of sustainable electricity in landfills: the Case of the Bandeirantes landfill. In *Advances in production management systems. innovative and knowledge-based production management in a Global-Local World* (Vol. 439, pp. 366–373). Heidelberg, Alemania: Springer Berlin Heidelberg.
- De Clercq, D., Wen, Z., & Fei, F. (2017). Economic performance evaluation of bio-waste treatment technology at the facility level. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 178–184.
- De Jong, P., Kiperstok, A., & Torres, E. A. (2015). Economic and environmental analysis of electricity generation technologies in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 725–739.
- de Souza, S. N., Horttanainen, M., Antonelli, J., Klaus, O., Lindino, C. a, & Nogueira, C. E. (2014). Technical potential of electricity production from municipal solid waste disposed in the biggest cities in Brazil: landfill gas, biogas and thermal treatment. *Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 32, 1015–23.
- Diczfalusy, B., Taylor, P. (2011). *Technology roadmap, energy-efficient buildings: heating and cooling equipment*. International Energy Agency (Vol. 5). Paris, France. Retrieved from https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/buildings_roadmap.pdf
- Dixon, T., Eames, M., Britnell, J., Watson, G. B., & Hunt, M. (2014). Urban retrofitting: Identifying disruptive and sustaining technologies using performative and foresight techniques. *Technological Forecasting and Social Change*, 89, 131–144.
- Doukas, H., Karakosta, C., & Psarras, J. (2010). Computing with words to assess the sustainability of renewable energy options. *Expert Systems with Applications*, 37, 5491–5497.
- DWEA. (2015). *Distributed wind vision 2015-2030*. DWEA. Retrieved from <http://distributedwind.org/wp-content/uploads/2012/08/DWEA-Distributed-Wind-Vision.pdf>
- EEA Report. (2013). *EU bioenergy potential from a resource-efficiency perspective*. Copenhagen, Denmark.
- EEQ. (2012). *Determinación de los Usos finales de la energías en el sector residencial*. Quito,

- Ecuador.
- Eicker, U., & Klein, M. (2014). Large-scale renewable energy integration within energy-efficient urban areas: Results from three German case studies. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 9, 202–213.
- Eicker, U., Monien, D., Duminil, É., & Nouvel, R. (2015). Energy performance assessment in urban planning competitions. *Applied Energy*, 155, 323–333.
- Eicker, U., Nouvel, R., Duminil, E., & Coors, V. (2014). Assessing passive and active solar energy resources in cities using 3D City Models. *Energy Procedia*, 57, 896–905.
- El-Fadel, M., & Massoud, M. (2001). Methane emissions from wastewater management. *Environmental Pollution*, 114, 177–185.
- El Telégrafo. (2013, November 15). INPC presentará demanda por demolición de casa patrimonial, pp. 1–5.
- Eleftheriadis, I. M., & Anagnostopoulou, E. G. (2015). Identifying barriers in the diffusion of renewable energy sources. *Energy Policy*, 80, 153–164.
- EMAC. (2017). *Manejo de residuos sólidos del relleno Sanitario de Pichacay*. Cuenca, Ecuador.
- EMOV EP. (2011). *Inventario de emisiones atmosféricas del cantón Cuenca, 2009*. Cuenca, Ecuador.
- EMOV EP. (2012). *Inventario de emisiones atmosféricas del cantón Cuenca, 2011*. Cuenca, Ecuador.
- EMOV EP. (2015). *Inventario de emisiones atmosféricas del cantón Cuenca, 2014*. Cuenca, Ecuador, Ecuador. Retrieved from [http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/InventariodeEmisiones/Inventario de emisiones atmosféricas 2013.pdf](http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/InventariodeEmisiones/Inventario%20de%20emisiones%20atmosféricas%202013.pdf)
- EMOV EP. (2016). Red de Monitoreo de Calidad del Aire. Cuenca, Ecuador.
- Energy Styrelsen. (2012). *Technology data for energy plants. Generation of electricity and district heating, energy storage and energy carrier generation and conversion*. Danish Energy Agency and Energinet. Copenhagen, Denmark. Retrieved from [https://www.energinet.dk/SiteCollectionDocuments/Danske dokumenter/Forskning/Technology_data_for_energy_plants.pdf](https://www.energinet.dk/SiteCollectionDocuments/Danske%20dokumenter/Forskning/Technology_data_for_energy_plants.pdf)
- Energycities. (2014). *30 propuestas de Energy Cities para la transición energética de ciudades grandes y pequeñas*. Brussels, Belgium. Retrieved from www.energy-cities.eu
- Erdogan, M., & Kaya, I. (2015). An integrated multi-criteria decision-making methodology based on type-2 fuzzy sets for selection among energy

- alternatives in turkey. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, 12, 1–25.
- Eriksson, O. (2010). Environmental technology assessment of natural gas compared to biogas. In Primoz Potocnik (Ed.), *Natural Gas* (pp. 127–146). Intech.
- Ersahin, M. E., Gomec, C. Y., Dereli, R. K., Arikan, O., & Ozturk, I. (2011). Biomethane production as an alternative bioenergy source from codigesters treating municipal sludge and organic fraction of municipal solid wastes, 2011. doi:10.1155/2011/953065
- ESMAP. (2003). *Resultados de la Conferencia regional sobre energía y reducción de la pobreza de la Alianza Global de Energía comunal para América Latina y el Caribe*. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. Retrieved from http://www-wds.worldbank.org/servlet/WDSContentServer/WDSP/IB/2005/10/11/000012009_20051011141225/Rendered/INDEX/ESM302010SPANISH.txt
- Espinoza, J. L., & Vredenburg, H. (2010). Towards a model of wind energy industry development in industrial and emerging economies. *Global Business and Economics Review*, 12, 203–229.
- Estación metereológica Aereopuerto Mariscal Lamar. (2017). Registro metereológico. Cuenca, Ecuador.
- ETAPA EP, (Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento). (2017a). Niveles y caudales instantaneos, Estación Machángara (Llantera). Cuenca, Ecuador.
- ETAPA EP, (Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento). (2017b). Niveles y caudales instantaneos, Estación Matadero. Cuenca, Ecuador.
- ETAPA EP, (Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento). (2017c). Niveles y caudales instantaneos, Estación Tarqui AJ Yanuncay. Cuenca, Ecuador.
- ETAPA EP, (Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento). (2017d). Niveles y caudales instantaneos, Estación Yanuncay AJ Tarqui. Cuenca, Ecuador.
- Fallde, M., & Eklund, M. (2015). Towards a sustainable socio-technical system of biogas for transport: the case of the city of Linköping in Sweden. *Journal of Cleaner Production*, 98, 17–28.
- Fang, F., & Wang, N. (2014). Optimal hierarchical decision-making for heat source selection of district heating systems. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014. doi:10.1155/2014/594862
- Fath, K., Stengel, J., Sprenger, W., Wilson, H. R., Schultmann, F., & Kuhn, T. E. (2015).

- A method for predicting the economic potential of (building-integrated) photovoltaics in urban areas based on hourly Radiance simulations. *Solar Energy*, 116, 357–370.
- Fetanat, A., & Khorasaninejad, E. (2015). Ocean & Coastal Management A novel hybrid MCDM approach for offshore wind farm site selection : A case study of Iran. *Ocean and Coastal Management*, 109, 17–28.
- Fierro, J., & Murphy, J. D. (2014). What is the resource of second generation gaseous transport biofuels based on pig slurries in Spain ? *Applied Energy*, 114, 783–789.
- Frankó, B., Galbe, M., & Wallberg, O. (2016). Bioethanol production from forestry residues: A comparative techno-economic analysis. *Applied Energy*, 184, 727–736.
- Fujii, M., Tanabe, S., Yamada, M., Mishima, T., Sawada, A., & Ohsawa, S. (2015). Assessment of the potential for developing mini/micro hydropower: A case study in Beppu City, Japan. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11, 107–106.
- GAD Cuenca. (2015). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Cuenca*. Cuenca, Ecuador.
- GAD Cuenca. (2017). Información catastral del Cantón Cuenca (urbano). Cuenca, Ecuador.
- GAD Municipal de Cuenca. (2015). Ciudades intermedias, crecimiento y renovación urbana. In *Thematic meeting, Intermediate cities* (p. 27). Cuenca, Ecuador.
- Galo, J. J. M., Macedo, M. N. Q., Almeida, L. a L., & Lima, A. C. C. (2014). Criteria for smart grid deployment in Brazil by applying the Delphi method. *Energy*, 70, 605–611.
- García, F., Hernández, G., & Luna, N. (2011). *Manual de estadísticas energéticas*. OLADE (Vol. 53). Quito, Ecuador: Organización Latinoamericana de Energía. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Gautam, B. R., Li, F., & Ru, G. (2015). Assessment of urban roof top solar photovoltaic potential to solve power shortage problem in Nepal. *Energy and Buildings*, 86, 735–744.
- Georgescu-Roegen, N. (1975). Energy and Economic Myths. *Southern Economic Journal*, 41, 347–381.
- Georgopoulou, E., Lalas, D., & Papagiannakis, L. (1997). A multicriteria decision aid approach for energy planning problems: The case of renewable energy option. *European Journal of Operational Research*, 103, 38–54.
- Ghaghazi, S., Sowlati, T., Sokhansanj, S., & Melin, S. (2010). A multicriteria approach

- to evaluate district heating system options. *Applied Energy*, 87, 1134–1140.
- GHK, & BIOIS. (2006). *A study to examine the benefits of the End of Life Vehicles, Annex 5*. Birmingham, Inglaterra. Retrieved from <http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/study/annex5.pdf>
- Ghosh, S., Chakraborty, T., Saha, S., Majumder, M., & Pal, M. (2016). Development of the location suitability index for wave energy production by ANN and MCDM techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1017–1028.
- Gnansounou, E., & Dauriat, A. (2011). Techno-economic analysis of lignocellulosic ethanol. *Biofuels*, 101, 123–148.
- Golubiewski, N. (2012). The power of language in feedback metaphors: A response to Kennedy. *Ambio*, 41, 767–768.
- Google. (2017). Google Project Sunroof. Retrieved July 4, 2017, from <https://www.google.com/get/sunroof#p=0>
- Greening, B., & Azapagic, A. (2014). Domestic solar thermal water heating: A sustainable option for the UK? *Renewable Energy*, 63, 23–36.
- Greenpeace. (2015). *Energy [R] Evolution*. Energy [R]Evolution. Brussels, Belgium.
- Grewal, P. S., & Grewal, P. S. (2013). Can cities become self-reliant in energy? A technological scenario analysis for Cleveland, Ohio. *Cities*, 31, 404–411.
- Grieser, B., Sunak, Y., & Madlener, R. (2015). Economics of small wind turbines in urban settings: An empirical investigation for Germany. *Renewable Energy*, 78, 334–350.
- Grubler, A., Bai, X., Buettner, T., Dhakal, S., Fisk, D. J., Ichinose, T., ... Weisz, H. (2012). Urban energy systems. In *Global energy assessment: Toward a sustainable future* (pp. 1307–1400). Austria: International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg.
- Gsänger, S., & Pitteloud, J.-D. (2015). *2015 Small wind world report summary*. Bonn, Germany. Retrieved from http://small-wind.org/wp-content/uploads/2014/12/Summary_SWWR2015_online.pdf
- Guayanlema, V., Fernández, L., & Arias, K. (2017). Análisis de indicadores de desempeño energético del Ecuador. *Enerlac*, 1, 121–131.
- Haberl, H. (2001a). The energetic metabolism of societies, Part I: Accounting concepts. *Journal of Industrial Ecology*, 5, 11–33.
- Haberl, H. (2001b). The energetic metabolism of societies, Part II: Empirical examples. *Journal of Industrial Ecology*, 5, 71–88.
- Haberl, H., Fischer-Kowalski, M., Krausmann, F., Weisz, H., & Winiwarter, V. (2004). Progress towards sustainability? What the conceptual framework of material

- and energy flow accounting (MEFA) can offer. *Land Use Policy*, 21, 199–213.
- Hafeez, S., & Atif, S. (2014). 3D Rooftop photovoltaic potential calculation using GIS techniques: A case study of F-11 sector Islamabad. *2014 12th International Conference on Frontiers of Information Technology*, 187–192.
- Hajkowicz, S. A., McDonald, G. T., & Smith, P. N. (2010). An evaluation of multiple objective decision support weighting techniques in natural resource management. *Journal of Environmental Planning and Management*, 37–41.
- Hammons, T. J. (1993). Tidal power. *Proceedings of the IEEE*, 81, 419–433.
- Han, J., Mol, A. P. J., & Lu, Y. (2010). Solar water heaters in China: A new day dawning. *Energy Policy*, 38, 383–391.
- Haro, L., & Oscullo, J. (2016). Factor Anual de Emisión de CO2 Producido por el Parque Generador del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador, mediante la Aplicación de la Metodología de la Convención Marco Sobre el Cambio Climático UNFCCC, para el Periodo 2009-2014. *Revista Politécnica -Marzo*, 37. Retrieved from http://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen37/tomo1/Factor_Anual_de_Emision.pdf
- Hassan, A., & Lee, H. (2015). The paradox of the sustainable city: definitions and examples. *Environment, Development and Sustainability*, 17, 1267–1285.
- Hassanli, S., Hu, G., Kwok, K. C. S., & Fletcher, D. F. (2017). Utilizing cavity flow within double skin façade for wind energy harvesting in buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 167, 114–127.
- Haughton, G. (1997). Developing sustainable urban development models. *Cities*, 14, 189–195.
- Hazami, M., Naili, N., Attar, I., & Farhat, A. (2013). Solar water heating systems feasibility for domestic requests in Tunisia : Thermal potential and economic analysis. *Energy Conversion and Management*, 76, 599–608.
- Heaps, C. G. (2016). Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system. Somerville, MA, USA.: Stockholm Environment Institute.
- Huang, S.-L., & Hsu, W.-L. (2003). Materials flow analysis and emergy evaluation of Taipei's urban construction. *Landscape and Urban Planning*, 63, 61–74.
- Huang, S.-L. L., & Chen, C.-W. W. (2005). Theory of urban energetics and mechanisms of urban development. *Ecological Modelling*, 189, 49–71.
- Huang, S. L., & Chen, C. W. (2005). Theory of urban energetics and mechanisms of urban development. *Ecological Modelling*, 189, 49–71.
- IDAE. (2011). *Plan de energías renovables 2011 2020*. Madrid, España. Retrieved from

- <http://www.idae.es/index.php/id.670/mod.pags/mem.detalle>
- IDAE, & ISTAS. (2011). *Empleo asociado al impulso de las energías renovables: Estudio técnico PER 2011-2020*. Madrid, España. Retrieved from www.idae.es
- IDEE. (2016a). Balances energéticos. In *Seminario-Taller: Política energética para el desarrollo sustentable y el uso del Modelo LEAP* (15th ed.). Bariloche, Argentina: Fundación Bariloche.
- IDEE. (2016b). El Modelo LEAP, principales características y especificación para la prospectiva energética. In *Seminario-Taller: Política energética para el desarrollo sustentable y el uso del Modelo LEAP* (15th ed.). Bariloche, Argentina: Fundación Bariloche.
- IDEE. (2016c). La Construcción de Escenarios Socioeconómicos para la Prospectiva Energética. In *Seminario-Taller: Política energética para el desarrollo sustentable y el uso del Modelo LEAP* (15th ed.). Bariloche, Argentina: Fundación Bariloche.
- IDEE. (2016d). Modelos Energéticos. In *Seminario-Taller: Política energética para el desarrollo sustentable y el uso del Modelo LEAP* (15th ed.). Bariloche, Argentina: Fundación Bariloche.
- IEA/NEA. (2015). *Projected costs of generating electricity*. Paris, France: 2015 edition.
- IEA. (2002). Potential for building integrated photovoltaics. *IEA-PVPS Task*.
- IEA. (2009). *Cities, towns & renewable energy: yes in my front yard*. Paris, France: IEA/OECD. Retrieved from <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/cities2009.pdf>
- IEA. (2013). *Production of alternative transportation fuels: Influence of crude oil price and technology maturity*. Paris, France. Retrieved from <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/production-costs-of-alternative-transportation-fuels-influence-of-crude-oil-price-and-technology-maturity-.html>
- IEA. (2014). *Energy technology perspectives 2014*. Paris, France. Retrieved from http://www.oecd-ilibrary.org/energy/energy-technology-perspectives-2014_energy_tech-2014-en
- IEA. (2016). *Key world energy statistics*. Paris, France. Retrieved from <http://ec.europa.eu/eurostat>
- INAMHI. (2015). *Anuarios meteorológicos*.
- INEC. (2006). Base de datos condiciones de vida. Retrieved June 28, 2017, from <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/condiciones-de-vida-ecv-bases-de-datos/>
- INEC. (2010). Personas por Hogar.
- INEC. (2011a). *Encuesta exhaustiva del año 2011*. Quito, Ecuador. Retrieved from

- <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/encuesta-exhaustiva/>
- INEC. (2011b). VII Censo de Población y VI de Vivienda - 2010. Retrieved September 8, 2016, from <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/ecuador-en-cifras/>
- INEC. (2012). Clasificador geográfico estadístico. Retrieved December 20, 2017, from <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/clasificador-geografico-estadistico-dpa/>
- INEC. (2016a). Estadísticas de vivienda, hogar. Retrieved from <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/enemdu-2016/>
- INEC. (2016b). Proyecciones poblacionales. Retrieved June 27, 2017, from <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/>
- INER. (2016). *Escenarios de prospectiva energética para Ecuador a 2050*. Quito, Ecuador.
- IPCC. (1996). Waste. In *1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- IPCC. (2006a). Solid waste disposal. In N. T. y T. K. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K. (Ed.), *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Japan: IGES.
- IPCC. (2006b). Waste generation, composition, and management data. In *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*.
- IPCC. (2006c). Wastewater treatment and discharge. In N. T. y T. K. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K. (Ed.), *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Japón: IGES.
- IRENA. (2015). *Solar heating and cooling for residential applications technology brief*. Abu Dhabi, EAU. Retrieved from http://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_etsap_tech_brief_r12_solar_thermal_residential_2015.pdf
- IRENA. (2016a). *Habitat III high-level forum on renewable energy in urban settings*. Quito. Retrieved from <http://re-energising.org>
- IRENA. (2016b). *Renewable energy in cities*. Abu Dhabi, EAU. Retrieved from http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Renewable_Energy_in_Cities_2016.pdf
- Ishugah, T. F., Li, Y., Wang, R. Z., & Kiplagat, J. K. (2014). Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *37*, 613–626.
- Islam, M. R., Sumathy, K., & Ullah, S. (2013). Solar water heating systems and their market trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *17*, 1–25.
- Izquierdo, S., Montañés, C., Dopazo, C., & Fueyo, N. (2011). Roof-top solar energy

- potential under performance-based building energy codes: The case of Spain. *Solar Energy*, 85, 208–213.
- Jack, M. W. (2009). Scaling laws and technology development strategies for biorefineries and bioenergy plants. *Bioresource Technology*, 100, 6324–6330.
- Jacquet, N., Haubruge, E., & Richel, A. (2015). Production of biofuels and biomolecules in the framework of circular economy: A regional case study. *Waste Management & Research*, 12, 1121-1126 NV–33.
- Jaisankar, S., Ananth, J., Thulasi, S., Jayasuthakar, S. T., & Sheeba, K. N. (2011). A comprehensive review on solar water heaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3045–3050.
- Jamal, T., Ongsakul, W., Singh, J. G., Salehin, S., & Ferdous, S. M. (2014). Potential rooftop distribution mapping using Geographic Information Systems (GIS) for Solar PV Installation: A case study for Dhaka, Bangladesh. *2014 3rd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET)*, 1–6.
- Jaramillo, C. E. (2017). *Estudio de metabolismo urbano en la ciudad de Cuenca*. Universidad Politécnica Salesiana. Retrieved from <https://www.dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14260/1/UPS-CT007009.pdf>
- Jeswani, H. K., & Azapagic, A. (2016). Assessing the environmental sustainability of energy recovery from municipal solid waste in the UK. *Waste Management*, 50, 346–363.
- Jeswani, H. K., Smith, R. W., & Azapagic, A. (2013). Energy from waste: Carbon footprint of incineration and landfill biogas in the UK. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 218–229.
- Joubert, E. C., Hess, S., & Niekerk, J. L. Van. (2016). Large-scale solar water heating in South Africa : Status , barriers and recommendations. *Renewable Energy*, 97, 809–822.
- Kabak, M., & Dağdeviren, M. (2014). Prioritization of renewable energy sources for Turkey by using a hybrid MCDM methodology. *Energy Conversion and Management*, 79, 25–33.
- Kabir, M. H., Endlicher, W., & Jagermeyr, J. (2010). Calculation of bright roof-tops for solar PV applications in Dhaka Megacity, Bangladesh. *Renewable Energy*, 35, 1760–1764.
- Kanters, J., Wall, M., & Dubois, M.-C. (2014). Typical values for active solar energy in urban planning. *Energy Procedia*, 48, 1607–1616.

- Kanters, J., Wall, M., & Kjellsson, E. (2014). The solar map as a knowledge base for solar energy use. *Energy Procedia*, *48*, 1597–1606.
- Karthikeya, B. R., Negi, P. S., & Srikanth, N. (2016). Wind resource assessment for urban renewable energy application in Singapore. *Renewable Energy*, *87*, 403–414.
- Keirstead, J., Jennings, M., & Sivakumar, A. (2012). A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*, 3847–3866.
- Kennedy, C. (2012). Comment on article “Is there a metabolism of an Urban ecosystem?” by Golubiewski. *AMBIO*, *41*, 765–766.
- Kennedy, C., Cuddihy, J., & Engel-Yan, J. (2007). The changing metabolism of cities. *Journal of Industrial Ecology*, *11*, 43–59.
- Kennedy, C., Pincetl, S., & Bunje, P. (2011). The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environmental Pollution*, *159*, 1965–1973.
- Kennedy, C., Pincetl, S., & Bunje, P. (2012). Reply to Comment on “The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design” by Kennedy et al. (2011)”. *Environmental Pollution*, *167*, 186.
- Khan, J., & Arsalan, M. H. (2016). Estimation of rooftop solar photovoltaic potential using geo-spatial techniques: A perspective from planned neighborhood of Karachi - Pakistan. *Renewable Energy*, *90*, 188–203.
- Kilama, D. (2013). Review of small hydropower technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *26*, 515–520.
- Koo, C., Hong, T., Park, H. S., & Yun, G. (2014). Framework for the analysis of the potential of the rooftop photovoltaic system to achieve the net-zero energy solar buildings. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *22*, 462–478.
- Kook, J. W., & Lee, S. H. (2015). Analysis of biomass energy potential around major cities in South Korea, *26*, 178–183.
- Kosa, P., Kulworawanichpong, T., Srivoramas, R., Chinkulkijniwat, A., Horpibulsuk, S., & Teaumroong, N. (2011). The potential micro-hydropower projects in Nakhon Ratchasima province, Thailand. *Renewable Energy*, *36*, 1133–1137.
- Kovács, E. (2016). *Success Stories: anaerobic digestion of biodegradable municipal solid waste in European cities*. Brussels, Belgium.
- Kraxner, F., Aoki, K., Kindermann, G., Leduc, S., Albrecht, F., Liu, J., & Yamagata, Y. (2016). Bioenergy and the city – What can urban forests contribute? *Applied*

- Energy*, 165, 990–1003.
- Kucukali, S. (2010). Municipal water supply dams as a source of small hydropower in Turkey. *Renewable Energy*, 35, 2001–2007.
- Kumar, A., & Sharma, M. P. (2014). GHG emission and carbon sequestration potential from MSW of Indian metro cities. *Urban Climate*, 8, 30–41.
- Kusre, B. C., Baruah, D. C., Bordoloi, P. K., & Patra, S. C. (2010). Assessment of hydropower potential using GIS and hydrological modeling technique in Kopili River basin in Assam (India). *Applied Energy*, 87, 298–309.
- Kwartin, R. (2010). *The cost and performance of distributed wind turbines, 2010-35: Final report*. Fairfax, Virginia. Retrieved from <http://www.eia.gov/analysis/studies/distribgen/system/pdf/appendix-b.pdf>
- Lacal-Arantequi, R. A. J.-W., Andrei Bocin-Dumitriu, B. S., Zubi, G., Magagna, D., Carlsson, J., Moss, R., ... Moles, C. (2013). *2013 Technology map of the european strategic energy technology plan*. *Scientific and Policy Report*.
- Lamnatou, C., Chemisana, D., Mateus, R., Almeida, M. G., & Silva, S. M. (2015). Review and perspectives on life cycle analysis of solar technologies with emphasis on building-integrated solar thermal systems. *Renewable Energy*, 75, 833–846.
- Leduc, W. R. W. A., & Rovers, R. (2008). Urban tissue: The representation of the urban energy potential. In *25th Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA 2008)*. Dublin, Irlanta.
- Leduc, W. R. W. A., & Van Kann, F. M. G. (2013). Spatial planning based on urban energy harvesting toward productive urban regions. *Journal of Cleaner Production*, 39, 180–190.
- Leite Neto, P. B., Saavedra, O. R., & Souza Ribeiro, L. A. (2015). Optimization of electricity generation of a tidal power plant with reservoir constraints. *Renewable Energy*, 81, 11–20.
- Lenzen, M. (1998). Primary energy and greenhouse gases embodied in Australian final consumption: an input–output analysis. *Energy Policy*, 26, 495–506.
- Letti, L. A. J., de Carvalho, J. C., da Costa, S. J., Martins, T. S., da Silva Ramos, N., Dotto, M. C., ... Soccol, C. R. (2016). Life-Cycle assessment of biofuels. In C. R. Soccol, S. K. Brar, C. Faulds, & L. P. Ramos (Eds.), *Green Fuels Technology: Biofuels* (pp. 485–500). Cham: Springer International Publishing.
- Li, D., Cheung, K., Chan, W., Cheng, C., & Wong, T. (2013). An analysis of wind energy potential for micro wind turbine in Hong Kong. *Building Services Engineering Research and Technology*, 35, 268–279.

- Liang, J., Gong, J., Zhou, J., Ibrahim, A. N., & Li, M. (2015). An open-source 3D solar radiation model integrated with a 3D Geographic Information System. *Environmental Modelling & Software*, *64*, 94–101.
- Lin, L., Liu, M., Luo, F., Wang, K., Zhang, Q., & Xiang, W.-N. (2012a). Response to authors' reply regarding "The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design" by Kennedy et al. (2011). *Environmental Pollution*, *167*, 186.
- Lin, L., Liu, M., Luo, F., Wang, K., Zhang, Q., & Xiang, W. N. (2012b). Comment on "The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design" by. *Environmental Pollution*, *167*, 184–185.
- Løken, E. (2007). Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *11*, 1584–1595.
- López, C. (2006). Ejemplo simplificado de un estudio de viabilidad para la rehabilitación de una minicentral hidroeléctrica.
- Lopez Lozano, M. F. (2014). *Explotación del gas natural en el sector fabril del parque industrial de Cuenca*. Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/19859/1/TESIS.pdf>
- Ma, B., Song, G., Smardon, R. C., & Chen, J. (2014). Diffusion of solar water heaters in regional China: Economic feasibility and policy effectiveness evaluation. *Energy Policy*, *72*, 23–34.
- Madlener, R., Antunes, C. H., & Dias, L. C. (2009). Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, *197*, 1084–1094.
- Malenković Ivan. (2012). *Definition of performance figures for solar and heat pump systems*. Vienna, Austria.
- Malo-Larrea, A. (2014). *El metabolismo social, el Sumak Kawsay y el territorio: el caso de Cuenca, Ecuador*. Universidad Autonoma de Barcelona. Retrieved from <http://ddd.uab.cat/record/128775>
- Mambeli Barros, R., Tiago Filho, G. L., & da Silva, T. R. (2014). The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. *Energy Policy*, *65*, 150–164.
- Mareschal, B. (2013). Visual PROMETHEE Manual. Brussels, Belgium: VPSolutions.
- Marique, A.-F., & Reiter, S. (2014). A Simplified Framework to Assess the Feasibility of Zero-Energy at the Neighbourhood/community Scale. *Energy and Buildings*, *82*, 114–122.
- Martínez-Jaramillo, J. E., Arango-Aramburo, S., Álvarez-Uribe, K. C., & Jaramillo-Álvarez, P. (2017). Assessing the impacts of transport policies through energy

- system simulation: The case of the Medellin Metropolitan Area , Colombia. *Energy Policy*, 101, 101–108.
- Martínez, J. A., Montoya, N., & Sierra, M. (2014). The energy of the future: Bioalcohols from urban solid residuals (USR). *Revista EAN*, 64–81.
- Martinez, P. (2010). *Usos finales de energía eléctrica y GLP en el cantón Cuenca. Escenarios al año 2015*. Universidad de Cuenca.
- Masanet, E., Chang, Y., Gopal, A. R., Larsen, P., Morrow III, W. R., Sathre, R., ... Zhai, P. (2013). Life cycle assessment of electric power systems. *Annual Review of Environment and Resources*, Vol 38, 38, 107–136.
- Masruroh, N. A., Li, B., & Klemeš, J. (2006). Life cycle analysis of a solar thermal system with thermochemical storage process. *Renewable Energy*, 31, 537–548.
- Massimo, A., Dell’Isola, M., Frattolillo, A., & Ficco, G. (2014). Development of a Geographical Information System (GIS) for the Integration of Solar Energy in the Energy Planning of a Wide Area. *Sustainability*, 6, 5730–5744.
- Mateo, J. (2012). *Multi criteria analysis in the renewable energy industry* (1st ed.). Springer-Verlag London. doi:10.1007/978-1-4471-2346-0
- Matin, M., & Istiaque, S. M. (2014). Design and integrate dual renewable energy in a residential building of urban area. In *International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT) 2014* (pp. 2–7). Dhaka, Bangladesh.
- Mavromatidis, G., Orehounig, K., & Carmeliet, J. (2015). Evaluation of photovoltaic integration potential in a village. *Solar Energy*, 121, 152–168.
- McHugh, N., Edmondson, J. L., Gaston, K. J., Leake, J. R., & O’Sullivan, O. S. (2015). Modelling short-rotation coppice and tree planting for urban carbon management - a citywide analysis. *Journal of Applied Ecology*, 52, 1237–1245.
- McKeown, R. M., Hughes, D., Collins, G., Mahony, T., & O’Flaherty, V. (2012). Low-temperature anaerobic digestion for wastewater treatment. *Current Opinion in Biotechnology*, 23, 444–451.
- MEER. (2008). *Políticas y estrategias para el cambio de la matriz energética del Ecuador*. MEER. Quito, Ecuador.
- MEER. (2015). *Elaboración de la prospectiva energética del del ecuador 2012-2040*. Quito, Ecuador.
- MICSE. (2013). *Balance Energético Nacional 2013*. Quito, Ecuador.
- MICSE. (2015). *Balance energético nacional 2016, año base 2015*. Quito, Ecuador.
- Millward-Hopkins, J. T., Tomlin, A. S., Ma, L., Ingham, D. B., & Pourkashanian, M. (2013). Assessing the potential of urban wind energy in a major UK city using

- an analytical model. *Renewable Energy*, 60, 701–710.
- Ministerio Federal de Relaciones Exteriores de Alemania. (2017). La Energiewende Alemana. Retrieved April 4, 2018, from <http://www.energiewende-global.com/es/>
- Mogrovejo, W. F., & Sarmiento, J. (2011). *Análisis de factibilidad técnica y económica en la implementación de energía fotovoltaica y termo solar para generación de electricidad y calentamiento de agua mediante paneles solares fijos y con un seguidor de sol de construcción casera, para una vivien*. Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/681>
- Moles, R., Foley, W., Morrissey, J., & O'Regan, B. (2008). Practical appraisal of sustainable development—Methodologies for sustainability measurement at settlement level. *Environmental Impact Assessment Review*, 28, 144–165.
- Morales, M., Quintero, J., Conejeros, R., & Aroca, G. (2015). Life cycle assessment of lignocellulosic bioethanol: Environmental impacts and energy balance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1349–1361.
- Morán, D. (2015). The construction of the Kajaani Cellunolix® biorefinery of St1 is on track. Retrieved February 21, 2017, from <https://biorrefineria.blogspot.com>
- Moreno, B., & López, A. J. (2008). The effect of renewable energy on employment. The case of Asturias (Spain). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 732–751.
- Moscovici, D., Dilworth, R., Mead, J., & Zhao, S. (2015). Can sustainability plans make sustainable cities? The ecological footprint implications of renewable energy within Philadelphia's Greenworks Plan. *Sustainability: Science, Practice, & Policy*, 11, 32–43.
- Müller-Langer, F., Gröngroft, A., Majer, S., O'Keeffe, S., & Klemm, M. (2013). Options for biofuel production – Status and perspectives. In D. Stolten & V. Scherer (Eds.), *Transition to renewable energy systems* (pp. 523–553). Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Müller-Langer, F., Majer, S., & O'Keeffe, S. (2014). Benchmarking biofuels—a comparison of technical, economic and environmental indicators. *Energy, Sustainability and Society*, 4, 20.
- Münster, M., & Lund, H. (2009). Use of waste for heat, electricity and transport — Challenges when performing energy system analysis. *Energy*, 34, 636–644.
- Münster, M., & Lund, H. (2010). Comparing waste-to-energy technologies by applying energy system analysis. *Waste Management*, 30, 1251–1263.
- Nadaletti, W. C. C., Cremonez, P. A. A., de Souza, S. N. M. N. M., Bariccatti, R. A. A.,

- Belli Filho, P., & Secco, D. (2015). Potential use of landfill biogas in urban bus fleet in the Brazilian states: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 277–283.
- Ngo, N. S., & Pataki, D. E. (2008). The energy and mass balance of Los Angeles County. *Urban Ecosystems*, 11, 121–139.
- Nigim, K., Munier, N., & Green, J. (2004). Pre-feasibility MCDM tools to aid communities in prioritizing local viable renewable energy sources. *Renewable Energy*, 29, 1775–1791.
- Nixon, J. D., Dey, P. K., Ghosh, S. K., & Davies, P. A. (2013). Evaluation of options for energy recovery from municipal solid waste in India using the hierarchical analytical network process. *Energy*, 59, 215–223.
- Niza, S., Rosado, L., & Ferrão, P. (2009). Urban Metabolism. *Journal of Industrial Ecology*, 13, 384–405.
- Nolasco, D. A. (2010). *Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Banco Interamericano de Desarrollo (Vol. 116). Retrieved from <https://publications.iadb.org/handle/11319/5506>
- NREL. (2016). System Advisor Model. Golden, CO.
- NREL. (2017). Jobs and economic development impact (JEDI) cellulosic ethanol model. CE1.13.17. Golden. Retrieved from <http://www.nrel.gov/analysis/jedi/download.html>
- OECD/IEA. (2014). *Energy efficiency indicators : essentials for policy making*. Agency, International Energy. Paris, France. Retrieved from https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/IEA_EnergyEfficiencyIndicators_EssentialsforPolicyMaking.pdf
- Office of Energy Efficiency and Renewable Energy-US. (2015). Manufacturing energy and carbon footprints (2010 MECS). Retrieved July 7, 2017, from <https://energy.gov/eere/amo/manufacturing-energy-and-carbon-footprints-2010-mecs>
- OLADE. (2014). *Manual de planificación energética*. Quito, Ecuador. Retrieved from <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0378.pdf>
- Onar, S. C. S. C., Oztaysi, B., Otay, I., & Kahraman, C. (2015). Multi-expert wind energy technology selection using interval-valued intuitionistic fuzzy sets. *Energy*, 90, 274–285.
- ONU. (2015). Objetivos de desarrollo sostenible. Retrieved November 10, 2016, from <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/#prettyPhoto>

- ONU. (2016). *Proyecto de documento final de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Vivienda y el Desarrollo Urbano Sostenible (Hábitat III)*. Quito, Ecuador. Retrieved from <http://habitat3.org/wp-content/uploads/Draft-Outcome-Document-of-Habitat-III-S.pdf>
- Operacz, A. (2017). The term “effective hydropower potential” based on sustainable development – an initial case study of the Raba river in Poland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1453–1463.
- Orehounig, K., Evins, R., Dorer, V., & Carmeliet, J. (2013). Assessment of renewable energy integration for a village using the energy hub concept. *Energy Procedia*, 00, 940–949.
- Orehounig, K., Mavromatidis, G., Evins, R., Dorer, V., & Carmeliet, J. (2014). Towards an energy sustainable community: An energy system analysis for a village in Switzerland. *Energy and Buildings*, 84, 277–286.
- Páez, A. (2010). Energy-urban transition: The Mexican case. *Energy Policy*, 38, 7226–7234.
- Palmas, C., Jensen, H., Haaren, C. Von, & Schöner, R. (2012). Optimizing micro renewable generation for smart cities by combining solar and geothermal energy potentials a case study of the Hanover Region, 283–288.
- Pandis Iveroth, S., Johansson, S., Brandt, N., Iveroth, S. P., Johansson, S., & Brandt, N. (2013). The potential of the infrastructural system of Hammarby Sjöstad in Stockholm, Sweden. *Energy Policy*, 59, 716–726.
- Panepinto, D., Viggiano, F., & Genon, G. (2014). Energy production from biomass and its relevance to urban planning and compatibility assessment: two applicative cases in Italy. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 1429–1442.
- Parajuli, R., Dalgaard, T., Jørgensen, U., Peter, A., Adamsen, S., Trydeman, M., ... Kofod, J. (2015). Biorefining in the prevailing energy and materials crisis: a review of sustainable pathways for biorefinery value chains and sustainability assessment methodologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 244–263.
- Patlitzianas, K. D., Skylogiannis, G. K., & Papastefanakis, D. (2013). Assessing the PV business opportunities in Greece. *Energy Conversion and Management*, 75, 651–657.
- Patterson, T., Esteves, S., Dinsdale, R., & Guwy, A. (2011). An evaluation of the policy and techno-economic factors affecting the potential for biogas upgrading for transport fuel use in the UK. *Energy Policy*, 39, 1806–1816.

- Pauleit, S., & Duhme, F. (2000). Assessing the environmental performance of land cover types for urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 52, 1–20.
- Pehnt, M. (2006). Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable Energy*, 31, 55–71.
- Peláez Samaniego, M. R., García Pérez, M. A., R., B., Martí Herrero, J., Montero Izquierdo, A., Meyer, F. D., & García Núñez, J. . (2015). Estado de uso de la biomasa para la producción de bioenergía, biocombustibles y bioproductos en Ecuador. In M. . Peláez Samaniego & J. L. Espinoza Abad (Eds.), *Energías renovables en el Ecuador. Situación actual, tendencias y perspectivas* (pp. 29–115). Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca. Gráficas Hernández.
- Pembina Institute. (2004). *Canadian renewable electricity development: Employment impacts*. Retrieved from <http://www.cleanairrenewableenergycoalition.com/documents/Employment-Predictions.pdf>
- Peng, J., & Lu, L. (2013). Investigation on the development potential of rooftop PV system in Hong Kong and its environmental benefits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 149–162.
- Petroecuador EP. (2016). Precios de venta a nivel de terminal para las comercializadoras calificadas y autorizadas a nivel nacional periodo; marzo 2016. Retrieved January 29, 2018, from <http://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/02/WEB-ESTRUCTURA-DE-PRECIOS-MARZO-2016.pdf>
- Petropoulos, E., Dolfing, J., Davenport, R. J., Bowen, E. J., & Curtis, T. P. (2017). Developing cold-adapted biomass for the anaerobic treatment of domestic wastewater at low temperatures (4, 8 and 15 °C) with inocula from cold environments. *Water Research*, 112, 100–109.
- Pincetl, S. (2012). Nature, urban development and sustainability – What new elements are needed for a more comprehensive understanding? *Cities*, 29, Supple, S32–S37.
- Pincetl, S., Bunje, P., & Holmes, T. (2012). An expanded urban metabolism method: Toward a systems approach for assessing urban energy processes and causes. *Landscape and Urban Planning*, 107, 193–202.
- Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8, 365–381.
- Ponce-Jara, M. A., Castro, M., Pelaez-Samaniego, M. R., Espinoza-Abad, J. L., & Ruiz,

- E. (2018). Electricity sector in Ecuador: An overview of the 2007–2017 decade. *Energy Policy*, *113*, 513–522.
- Pöschl, M., Ward, S., & Owende, P. (2010). Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Applied Energy*, *87*, 3305–3321.
- Prasad, R. D., Bansal, R. C., & Raturi, A. (2014). Multi-faceted energy planning: A review, *38*, 686–699.
- Proops, J. L. R. L. R. (1977). Input-output analysis and energy intensities: a comparison of some methodologies. *Applied Mathematical Modelling*, *1*, 181–186.
- Radomes, A. A., & Arango, S. (2015). Renewable energy technology diffusion: an analysis of photovoltaic-system support schemes in Medellín, Colombia. *Journal of Cleaner Production*, *92*, 152–161.
- Radtke, J., Dent, C. J., & Couch, S. J. (2011). Capacity value of large tidal barrages. *IEEE Transactions on Power Systems*, *26*, 1697–1704.
- Radzi, A. (2014). A survey of expert attitudes on understanding and governing energy autonomy at the local level. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, *4*, n/a–n/a.
- Raheem, A., Yusri, M., & Shakoor, R. (2016). Bioenergy from anaerobic digestion in Pakistan: Potential, development and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *59*, 264–275.
- Raud, M., Kesperi, R., Oja, T., Olt, J., & Kikas, T. (2014). Utilization of urban waste in bioethanol production: potential and technical solutions. *Agronomy Research*, *12*, 397–406.
- Raud, M., Mitt, M., Oja, T., Olt, J., Orup??ld, K., & Kikas, T. (2017). The utilisation potential of urban greening waste: Tartu case study. *Urban Forestry and Urban Greening*, *21*, 96–101.
- Ren, H., Zhou, W., Nakagami, K., Gao, W., & Wu, Q. (2010). Feasibility assessment of introducing distributed energy resources in urban areas of China. *Applied Thermal Engineering*, *30*, 2584–2593.
- Ren21. (2014). *The first decade: 2004-2014, 10 years of renewable energy progress*. Paris, France. Retrieved from http://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/Topical Reports/REN21_10yr.pdf
- Roberts, J. J., Cassula, A. M., Osvaldo Prado, P., Dias, R. A., & Balestieri, J. A. P. (2015). Assessment of dry residual biomass potential for use as alternative energy source in the party of General Pueyrredón, Argentina. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *41*, 568–583.

- Rojanamon, P., Chaisomphob, T., & Bureekul, T. (2009). Application of geographical information system to site selection of small run-of-river hydropower project by considering engineering/economic/environmental criteria and social impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Rojas, J. C. (2012). *Planificación del suministro eléctrico en áreas rurales de los países en vías de desarrollo: un marco de referencia para la toma de decisiones*. Universidad de Zaragoza. Retrieved from <http://personal.unizar.es/jmyusta/wp-content/uploads/2014/09/Tesis-Juan-Rojas.pdf>
- Rojas, S., Miranda, T., & Montero, I. (2010). Aprovechamientos hidroeléctricos energía minihidráulica. León, España: Universidad de Andalucía.
- Romero, L., Duminil, E., mero Sánchez Ramos, J., & Eicker, U. (2017). Assessment of the photovoltaic potential at urban level based on 3D city models: A case study and new methodological approach. *Solar Energy*, 146, 264–275.
- Rosas-Flores, J. A., Rosas-Flores, D., & Fernández Zayas, J. L. (2016). Potential energy saving in urban and rural households of Mexico by use of solar water heaters, using geographical information system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 243–252.
- Rosenbloom, D., & Meadowcroft, J. (2014). Harnessing the Sun: Reviewing the potential of solar photovoltaics in Canada. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 488–496.
- Roth, S., Hirschberg, S., Bauer, C., Burgherr, P., Dones, R., Heck, T., & Schenler, W. (2009). Sustainability of electricity supply technology portfolio. *Annals of Nuclear Energy*, 36, 409–416.
- Rotunno, P., Lanzini, A., & Leone, P. (2017). Energy and economic analysis of a water scrubbing based biogas upgrading process for biomethane injection into the gas grid or use as transportation fuel. *Renewable Energy*, 102, 417–432.
- Roy, B., & Vanderpooten, D. (1996). The European school of MCDA: Emergence, basic features and current works. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 5, 22–38.
- Rutovitz, J. (2010). *South African energy sector jobs to 2030*. Institute for Sustainable Futures, University of Technology. Sydney, Australia. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:South+Africa+Energy+Sector+Jobs+to+2030#0>
- Rutovitz, J., & Atherton, A. (2009). *Energy sector jobs to 2030: a global analysis*. Retrieved from <http://www.greenpeace.org/brasil/PageFiles/3751/energy-sector-jobs-to-2030.pdf>

- Rutovitz, J., Dominish, E., & Downes, J. (2015). *Calculating global energy sector jobs 2015: methodology*. Sydney, Australia.
- Saha, M., & Eckelman, M. J. (2015). Geospatial assessment of potential bioenergy crop production on urban marginal land. *Applied Energy*, 159, 540–547.
- Salomon, K. R., & Silva Lora, E. E. (2009). Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 33, 1101–1107.
- Sánchez-lozano, J. M., García-cascales, M. S., & Lamata, M. T. (2015). Evaluation of suitable locations for the installation of solar thermoelectric power plants, 87, 343–355.
- Sánchez-Lozano, J. M., García-Cascales, M. S., & Lamata, M. T. (2014). Identification and selection of potential sites for onshore wind farms development in region of murcia, Spain. *Energy*, 73, 311–324.
- Sánchez-Lozano, J. M., Teruel-Solano, J., Soto-Elvira, P. L., & Socorro García-Cascales, M. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 544–556.
- Saner, D., Juraske, R., Kübert, M., Blum, P., Hellweg, S., & Bayer, P. (2010). Is it only CO₂ that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1798–1813.
- Sapkota, A., Lu, Z., Yang, H., & Wang, J. (2014). Role of renewable energy technologies in rural communities' adaptation to climate change in Nepal. *Renewable Energy*, 68, 793–800.
- Sarralde, J. J., Quinn, D. J., Wiesmann, D., & Steemers, K. (2015). Solar energy and urban morphology: Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in London. *Renewable Energy*, 73, 10–17.
- Sarralde, J. J., Quinn, D., & Wiesmann, D. (2011). Urban modelling for resource performance analysis: estimating cities' renewable energy potential. In *Buildings Simulation* (12th ed., pp. 14–16).
- Scarlat, N., Motola, V., Dallemand, J. F., Monforti-Ferrario, F., & Mofor, L. (2015). Evaluation of energy potential of Municipal Solid Waste from African urban areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1269–1286.
- Schaidle, J. A., Moline, C. J., & Savage, P. E. (2010). Biorefinery Sustainability Assessment. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 30, 743–753.
- Schiel, K., Baume, O., Caruso, G., & Leopold, U. (2016). GIS-based modelling of

- shallow geothermal energy potential for CO₂ emission mitigation in urban areas. *Renewable Energy*, 86, 1023–1036.
- Schuschny, A., & Soto, H. (2009). *Guía metodológica Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible*. CEPAL. Santiago de Chile, Chile: Naciones Unidas. doi:LC/W255
- Sengül, Ü., Eren, M., Eslamian Shiraz, S., Gezder, V., & Ahmet Bilal, S. (2015). Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey. *Renewable Energy*, 75, 617–625.
- Senplades. (2012). Zonas, distritos y circuitos. Retrieved November 23, 2017, from <http://www.planificacion.gob.ec/zonas-distritos-y-circuitos/>
- Shafiee, M. (2015). A fuzzy analytic network process model to mitigate the risks associated with offshore wind farms. *Expert Systems with Applications*, 42, 2143–2152.
- Shen, Y., Linville, J. L., Urgun-Demirtas, M., Mintz, M. M., & Snyder, S. W. (2015). An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 346–362.
- Shi, Y., Ge, Y., Chang, J., Shao, H., & Tang, Y. (2013). Garden waste biomass for renewable and sustainable energy production in China: Potential, challenges and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 432–437.
- SHIP. (2017). Database for applications of solar heat integration in industrial processes. Retrieved March 7, 2017, from <http://ship-plants.info/>
- Shmelev, S. E., & Van Den Bergh, J. C. J. M. (2016). Optimal diversity of renewable energy alternatives under multiple criteria: An application to the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 679–691.
- Shu, Z. R., Li, Q. S., & Chan, P. W. (2015). Statistical analysis of wind characteristics and wind energy potential in Hong Kong. *Energy Conversion and Management*, 101, 644–657.
- Silva, S., Alçada-Almeida, L., & Dias, L. C. (2014). Biogas plants site selection integrating Multicriteria Decision Aid methods and GIS techniques: A case study in a Portuguese region. *Biomass and Bioenergy*, 71, 58–68.
- Song, J., Yang, W., Li, Z., Higano, Y., & Wang, X. (2016). Discovering the energy, economic and environmental potentials of urban wastes: An input-output model for a metropolis case. *Energy Conversion and Management*, 114, 168–179.
- Subramanyam, V., Kumar, A., Talaei, A., & Hossain, A. (2017). Energy efficiency

- improvement opportunities and associated greenhouse gas abatement costs for the residential sector. *Energy*, 118, 795–807.
- Subramanyam, V., Paramshivan, D., Kumar, A., & Mondal, A. H. (2015). Using Sankey diagrams to map energy flow from primary fuel to end use. *Energy Conversion and Management*, 91, 342–352.
- Suhono, & Sarjiya. (2015). Long-term electricity demand forecasting of Sumatera system based on electricity consumption intensity and Indonesia population projection 2010-2035. *Energy Procedia*, 68, 455–462.
- Supriyasilp, T., Pongput, K., & Boonyasirikul, T. (2009). Hydropower development priority using MCDM method. *Energy Policy*, 37, 1866–1875.
- Sveinbjörnsson, D., Ben Amer-Allam, S., Hansen, A. B., Algren, L., & Pedersen, A. S. (2017). Energy supply modelling of a low-CO₂ emitting energy system: Case study of a Danish municipality. *Applied Energy*, 195, 922–941.
- Swenson, D. (2008). *The economic impact of ethanol production in Iowa*. Iowa. Retrieved from http://www2.econ.iastate.edu/research/webpapers/paper_12865.pdf
- Tahri, M., Hakdaoui, M., & Maanan, M. (2015). The evaluation of solar farm locations applying geographic information system and Multi-Criteria Decision Making methods: Case study in southern Morocco. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1354–1362.
- Tan, S. T., Hashim, H., Lim, J. S., Ho, W. S., Lee, C. T., & Yan, J. (2014). Energy and emissions benefits of renewable energy derived from municipal solid waste: Analysis of a low carbon scenario in Malaysia. *Applied Energy*, 136, 797–804.
- Terrados, J., Almonacid, G., & Pérez-Higueras, P. (2009). Proposal for a combined methodology for renewable energy planning. Application to a Spanish region. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2022–2030.
- The Music Project. (2015). The Music project. Retrieved September 10, 2015, from <http://themusicproject.eu>
- The Solar Heating and Cooling Programme. (2012). *Solar energy systems in architecture; IEA SHC Task 41*. Loussane, Switzerland.
- Theodorou, S., Florides, G., & Tassou, S. (2010). The use of multiple criteria decision making methodologies for the promotion of RES through funding schemes in Cyprus, A review. *Energy Policy*, 38, 7783–7792.
- Toja-Silva, F., Colmenar-Santos, A., & Castro-Gil, M. (2013). Urban wind energy exploitation systems: Behaviour under multidirectional flow conditions - Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 364–378.

- Topcu, Y. I. Ã., & Ulengin, F. (2004). Energy for the future : An integrated decision aid for the case of Turkey, *29*, 137–154.
- Tsita, K. G., & Pilavachi, P. A. (2017). Decarbonizing the Greek road transport sector using alternative technologies and fuels. *Thermal Science and Engineering Progress*, *1*, 15–24.
- Turconi, R., Boldrin, A., & Astrup, T. (2013). Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *28*, 555–565.
- UNFCCC. (2014). *Landfill methane recovery methodology, Versión 09.0*. Bonn, Germany. Retrieved from https://cdm.unfccc.int/filestorage/E/K/A/EKA6GXDLB5TNYVCIJJP0S3O9HQ8UW7F/EB81_repan32_AMS-III_G_ver09.0.pdf?t=OTJ8cDFuZ2pqfDAn1KrbQ5l4K7Dqy4HIDUV
- Universidad de Cuenca. (2017). Vivienda Sustentable y Segura. Retrieved May 8, 2007, from <http://viviendasustentablecuenca.com/informacion-cuenca/energia-medio-ambiente/>
- University of Cambridge. (2016). Energy Efficient Cities initiative. Retrieved February 20, 2017, from <http://www.eeci.cam.ac.uk/about.shtml>
- University of the Aegean. (2003). *Development and application of a Multi-Criteria Decision Analysis tool for renewable energy resources*. Mytilene, Greece. Retrieved from http://cordis.europa.eu/project/rcn/86822_en.html
- Uusitalo, V., Havukainen, J., Kapustina, V., Soukka, R., & Horttanainen, M. (2014). Greenhouse gas emissions of biomethane for transport: Uncertainties and allocation methods. *Energy and Fuels*, *28*, 1901–1910.
- Vagona, D. G., & Karanikolas, N. M. (2012). A multicriteria approach to evaluate offshore wind farms siting in Greece. *Global Nest Journal*, *14*, 235–243.
- Van Dael, M., Van Passel, S., Pelkmans, L., Guisson, R., Swinnen, G., & Schreurs, E. (2012). Determining potential locations for biomass valorization using a macro screening approach. *Biomass and Bioenergy*, *45*, 175–186.
- Van Meerbeek, K., Ottoy, S., De Meyer, A., Van Schaeybroeck, T., Van Orshoven, J., Muys, B., & Hermy, M. (2015). The bioenergy potential of conservation areas and roadsides for biogas in an urbanized region. *Applied Energy*, *154*, 742–751.
- Vandevyvere, H., & Stremke, S. (2012). Urban planning for a renewable energy future: Methodological challenges and opportunities from a design perspective. *Sustainability*, *4*, 1309–1328.
- Vargas, R. C. (2012). *Biorefinerías para la producción de biocombustibles de segunda*

- generación. Universidad Politécnica de Valencia. Retrieved from <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27803/tesisUPV9008.pdf>
- Vicente, M. (2017). *Desarrollo de un sistema de información energético en el consumo de combustibles derivados de hidrocarburos en la jurisdicción de la regional de control de hidrocarburos y combustibles - Azuay*. Universidad de Cuenca. Retrieved from [http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/27778/1/Trabajo de titulación.pdf](http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/27778/1/Trabajo_de_titulación.pdf)
- Walker, S. L. (2011). Building mounted wind turbines and their suitability for the urban scale—A review of methods of estimating urban wind resource. *Energy and Buildings*, 43, 1852–1862.
- Wanderer, T., & Herle, S. (2015). Creating a spatial multi-criteria decision support system for energy related integrated environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 52, 2–8.
- Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., & Zhao, J. H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2263–2278.
- Watson, J. J. W., & Hudson, M. D. (2015). Regional scale wind farm and solar farm suitability assessment using GIS-assisted multi-criteria evaluation. *Landscape and Urban Planning*, 138, 20–31.
- Wei, M., Patadia, S., & Kammen, D. M. (2010). Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US? *Energy Policy*, 38, 919–931.
- Weisz, H., & Steinberger, J. K. (2010). Reducing energy and material flows in cities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2, 185–192.
- Weng, Q. (2014). Assessing solar potential of commercial and residential buildings in Indianapolis using LiDAR and GIS modeling. *2014 Third International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA)*, 398–402.
- Whitaker, C. M., Townsend, T. U., Razon, A., Hudson, R. M., & Vallvé, X. (2011). PV systems. In A. Luque & S. Hegedus (Eds.), *Photovoltaic Science Handbook of Photovoltaic Science* (2nd ed, pp. 841–895). West Sussex, UK: John Wiley and Sons, Ltd., Publication.
- Wiginton, L. K., Nguyen, H. T., & Pearce, J. M. (2010). Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34, 345–357.
- Wilkins, I., & Schmuck, P. (2012). Transdisciplinary evaluation of energy scenarios

- for a German village using multi-criteria decision analysis. *Sustainability*, 4, 604–629.
- Willis, J., Stone, L., Durden, K., Beecher, N., Hemenway, C., & Greenwood, R. (2012). *Barriers to biogas use for renewable energy*. London, UK. Retrieved from <https://www.nyserda.ny.gov/-/media/Files/EERP/.../werf-biogasbarriers-%0Areport.pdf>
- Wolman, A. (1965). The metabolism of cities. *Scientific American*, 3, 179–190.
- World Energy Council. (2017). Energy Trilemma Index. Retrieved December 5, 2017, from <https://trilemma.worldenergy.org/#!/energy-index>
- Xu, J., Ni, T., & Zheng, B. (2015). Hydropower development trends from a technological paradigm perspective. *Energy Conversion and Management*, 90, 195–206.
- Xydis, G., Nanaki, E., & Koroneos, C. (2013). Exergy analysis of biogas production from a municipal solid waste landfill. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 4, 20–28.
- Yajure, C. (2015). Metodología integrada multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energía renovable a utilizar para la producción de energía eléctrica. *Revista Tecnológica ESPOL*, 28, 62–78.
- Yazdani-Chamzini, A., Fouladgar, M. M., Zavadskas, E. K., & Moini, S. H. H. (2013). Selecting the optimal renewable energy using multi criteria decision making. *Journal of Business Economics & Management*, 14, 957–978.
- Yeo, I.-A., & Yee, J.-J. (2014). A proposal for a site location planning model of environmentally friendly urban energy supply plants using an environment and energy geographical information system (E-GIS) database (DB) and an artificial neural network (ANN). *Applied Energy*, 119, 99–117.
- Yu, H., Pan, S., Tang, B., & Mi, Z. (2015). Urban energy consumption and CO₂ emissions in Beijing: current and future. *Energy Efficiency*, 8, 527–543.
- Zalamea, E. (2016). *Potencial de recolección solar activa integrada en vivienda unifamiliar: Caso de Estudio Concepción, Chile*. Universidad del Bio Bio/ Sede Concepción.
- Zalamea, E., & García Alvarado, R. (2014). Roof characteristics for integrated solar collection in dwellings of real estate developments in Concepción, Chile. *Journal of Construction*, 36, 36–44.
- Zardari, N. H., Ahmed, K., Shirazi, S. M., & Yusop, Z. (2015). *Weighting methods and their effect on multi criteria decision making model outcomes in water resources management*. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-12586-2 ISSN
- Zhang, L., Feng, Y., & Chen, B. (2011). Alternative scenarios for the development of

- a low-carbon city: A case study of Beijing, China. *Energies*, 4, 2295–2310.
- Zhang, L., Hu, Q., & Zhang, F. (2014). Input-output modeling for urban energy consumption in Beijing: dynamics and comparison. *PLoS ONE*, 9, e89850.
- Zhang, L., Zhou, P., Newton, S., Fang, J., & Zhou, D. (2015). Evaluating clean energy alternatives for Jiangsu, China: An improved multi-criteria decision making method. *Energy*, 90, 953–964.
- Zhang, Y. (2013). Urban metabolism: A review of research methodologies. *Environmental Pollution*, 178, 463–473.
- Zhang, Y., Choudhary, R., & Soga, K. (2015). Influence of GSHP system design parameters on the geothermal application capacity and electricity consumption at city-scale for Westminster, London. *Energy and Buildings*, 106, 3–12.
- Zhang, Y., Yang, Z., Fath, B. D., & Li, S. (2010). Ecological network analysis of an urban energy metabolic system: Model development, and a case study of four Chinese cities. *Ecological Modelling*, 221, 1865–1879.
- Zhang, Y., Yang, Z., & Yu, X. (2006). Measurement and evaluation of interactions in complex urban ecosystem. *Ecological Modelling*, 196, 77–89.
- Zhang, Y., Yang, Z., & Yu, X. (2009). Evaluation of urban metabolism based on energy synthesis: A case study for Beijing (China). *Ecological Modelling*, 220, 1690–1696.
- Zhang, Y., Zheng, H., & Fath, B. D. (2014). Analysis of the energy metabolism of urban socioeconomic sectors and the associated carbon footprints: Model development and a case study for Beijing. *Energy Policy*, 73, 540–551.
- Zhou, D., & Deng, Z. (Daniel). (2017). Ultra-low-head hydroelectric technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 23–30.
- Zhou, J., Mao, X. Q., Hu, T., Zeng, A., Xing, Y. K., & Corsetti, G. (2016). Implications of the 11th and 12th Five-Year Plans for energy conservation and CO₂ and air pollutants reduction: a case study from the city of Urumqi, China. *Journal of Cleaner Production Journal*, 112, 1767–1777.
- Zhou, X., Xu, Y., Yuan, S., Wu, C., & Zhang, H. (2015). Performance and potential of solar updraft tower used as an effective measure to alleviate Chinese urban haze problem. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1499–1508.
- Ziebell, A. C., & Singh, V. K. (2018). Energy indicator in sustainable urban energy metabolism and challenges. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, 171, 26–31.
- Zivkovic, M., Pereverza, K., Pasichnyi, O., Madzarevic, A., Ivezic, D., & Kordas, O.

- (2016). Exploring scenarios for more sustainable heating: The case of Niš, Serbia. *Energy*, 115, 1758–1770.
- Zubizarreta, J., Rodrigues, M., Gómez, A., Zubizarreta, J., Rodrigues, M., Dopazo, C., & Fueyo, N. (2010). Potential and cost of electricity generation from human and animal waste in Spain. *Renewable Energy*, 35, 498–505.

ANEXOS

Formulario para encuestas internacionales

Formulario para encuestas locales

Formulario para encuestas internacionales

Copia de Aplicación de las ER en la ciudad

PREGUNTAS

RESPUESTAS

Sección 1 de 4



APLICACIÓN DE MÉTODOS MULTICRITERIO EN LA ELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS QUE UTILIZAN RECURSOS RENOVABLES EN LA CIUDAD.

Los datos colocados, serán utilizados exclusivamente con fines de investigación.

Dirección de correo electrónico *

Dirección de correo electrónico válida

Este formulario recopila las direcciones de correo electrónico. [Cambiar configuración](#)

Nombre

Texto de respuesta corta

Fecha en la que contesta

Mes, día, año



Institución

Academia

Pública

Privada

Otra...

Texto de respuesta corta

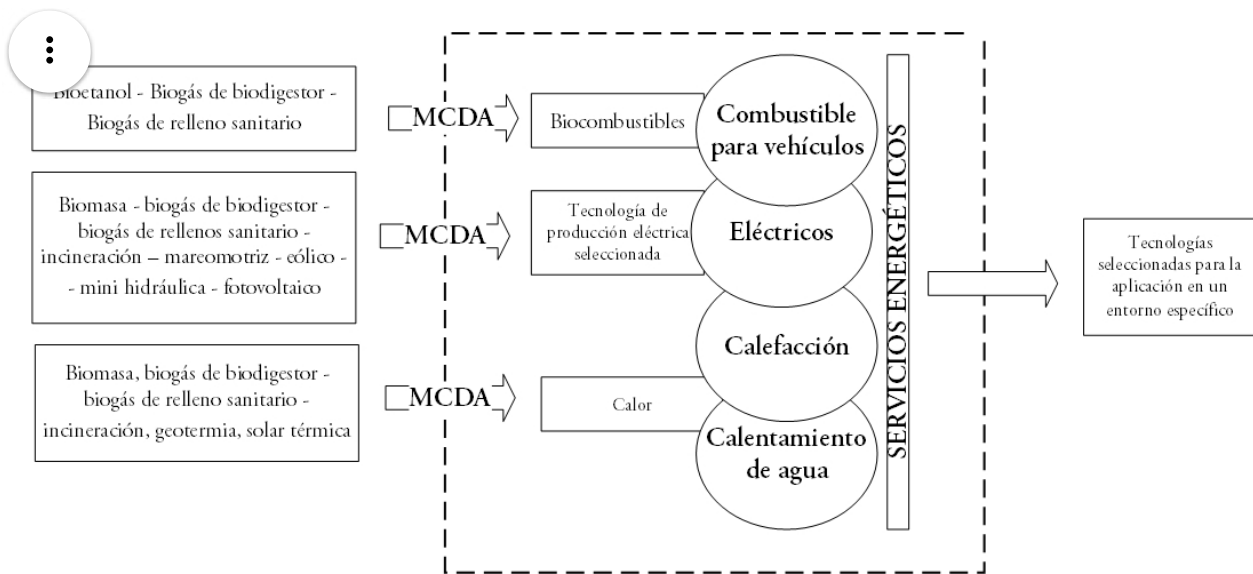
Después de la sección 1 **Ir a la siguiente sección**

Sección 2 de 4

Título de la sección (opcional)

Mediante una revisión bibliográfica se han definido 11 tecnologías RENOVABLES que podrían utilizarse aprovechando los flujos de energía y materiales que posee una ciudad. Se considera que pueden sustituir a la energía eléctrica, combustibles, calentamiento de agua y climatización.

Título de la imagen



1) De las siguientes tecnologías cuál considera que tendría más impacto en el futuro en un entorno urbano. Califique en escala de 1 a 5. 5 más impacto, 1 menos impacto. Dos o más tecnologías pueden tener la misma valoración.

Descripción (opcional)

Bioetanol *

1 2 3 4 5

Biomasa *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Pequeña hidroeléctrica *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Biogás (biodigestores) *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Mareomotriz *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Geotermia (baja temperatura) *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Biogás de rellenos sanitarios *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Incineración de desechos urbanos *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Solar fotovoltaica *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Solar térmica(calentamiento de agua) *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Después de la sección 2 [Ir a la siguiente sección](#) ▼

Sección 3 de 4



Título de la sección (opcional)

Descripción (opcional)

2) Se ha definido los siguientes criterios para seleccionar la tecnología más adecuada. En una escala del 1 al 10, califique los criterios según lo que usted considera más importante. 10 más importante, 1 menos importante (Dos o más criterios pueden tener la misma valoración.). Primero califique el criterio más importante, segundo el criterio menos importante, y luego el resto.

Demanda de tipo del servicio energético que prestan *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Eficiencia de la tecnología. *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Disponibilidad del recurso. *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Obstáculos urbanos y disponibilidad de área *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Integración arquitectónica *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Madurez de la tecnología *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Coste de la tecnología *

Coste de operación y mantenimiento *

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Coste de la energía *

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Calentamiento global (Emisiones de CO2). *

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Acidificación (Emisiones de SO2). *

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Eutrofización (Emisiones de NOx) *

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Aceptación social *

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Creación de empleo *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Concordancia con políticas públicas *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Después de la sección 3 **Ir a la siguiente sección** ▼

Sección 4 de 4



Título de la sección (opcional)

Descripción (opcional)

3) Cuáles son los factores clave para promover un modelo energético urbano que incluya las energías renovables. Usando una escala del 1 al 5, indique su opinión. 5 más importante, 1 menos importante. Dos o más factores pueden tener la misma valoración.

Descripción (opcional)

Estructura gubernamental *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Interés de las autoridades *

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

Disponibilidad del recurso (energía primaria). *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Leyes y regulaciones *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Calentamiento global *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Conocimiento local *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Interés de la ciudadanía *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Madurez tecnológica *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Costos *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Disminución de recursos fósiles *

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Formulario para encuestas locales

CUESTIONARIO

ESTE CUESTIONARIO ES ANÓNIMO Y REQUERIRÁ UNA SEGUNDA EVALUACIÓN.

Objetivo:

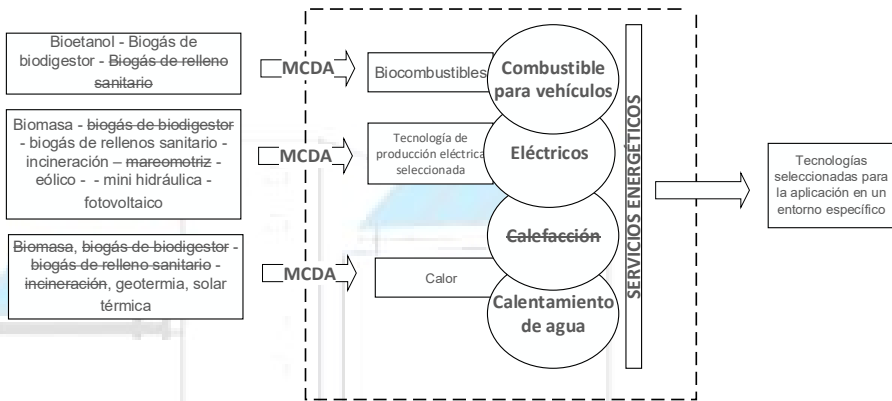
Valorar mediante el método de Delphi, la posible promoción de 11 tecnologías renovables en la ciudad de Cuenca.

Antecedentes:

Mediante una revisión bibliográfica se determinó que 11 tecnologías renovables que pueden reducir la importación de energía en las ciudades. Estas tecnologías utilizan recursos que disponen (p.e viento, radiación solar, agua...) o provienen de las ciudades (desechos urbanos, aguas residuales...). Se han definido 14 subcriterios que permitirían realizar la elección de una o varias tecnologías en una ciudad específica. Ocho criterios son valorados cuantitativamente, y seis requieren un análisis cualitativo.

El análisis cualitativo se aplica cuando no hay suficiente información que permita una valoración cuantitativa. Se ha optado por el método de Delphi para valorar los criterios cualitativos. El método de Delphi requiere de la colaboración de expertos, que conozcan la situación energética de la ciudad de Cuenca y estén vinculados con la planificación energética, academia, consultoría en sectores privados o públicos. Otro requisito fundamental es que conozcan sobre la aplicación y uso de las energías renovables.

Para el caso de la ciudad de Cuenca, se ponen las siguientes restricciones: i) No se considera la energía mareomotriz, pues no existe este recurso; ii) No se utiliza servicio de calefacción; iii) Se evita competición de tecnologías que utilizan el mismo recurso; iv) Se realiza el análisis en función del siguiente gráfico. En el que se ha tachado las tecnologías o usos con criterios previamente definidos.



Nota: En esta investigación se consideran los portadores energéticos a los combustibles y electricidad, mientras que a los servicios energéticos, se los considera como el uso que se les da a los portadores.

Formulación del problema:

Se requiere determinar que tecnología a partir de fuentes energéticas renovables puede ser utilizada en la ciudad de Cuenca, Ecuador. Cada tecnología será valorada utilizando una escala cuantitativa que se aplicará a 7 subcriterios.

NOMBRE: _____

Contacto (email): _____ **Teléfono:** _____

Título académico: _____ **Posgrado:** _____

Años de Experiencia Profesional: _____

Año de finalización del último posgrado (de ser aplicable): _____

PRIMERA PARTE

- A) Valore su conocimiento sobre el problema “Promoción de las energías renovables en la ciudad de Cuenca”. En una escala del 1 al 10. 10 es la más alta escala.

Kc:

Kc es un valor entre 1 y 10.

- B) Llene la siguiente tabla (con una X). En ella se indica el grado de influencia de las fuentes presentadas en las valoraciones que va a emitir:

FUENTES DE ARGUMENTACIÓN	GRADO DE INFLUENCIA DE CADA UNA DE LAS FUENTES EN SUS CRITERIOS		
	ALTO (A)	MEDIO (M)	BAJO (B)
1. Investigaciones teóricas y/o experimentales relacionadas con el tema.			
2. Experiencia obtenida en la actividad profesional (docencia de pregrado y postgrado recibida y/o impartida).			
3. Análisis de la literatura especializada y publicaciones de autores nacionales.			
4. Análisis de la literatura especializada y publicaciones de autores extranjeros.			
5. Conocimiento del estado actual de la problemática en el país y en el extranjero.			
6. Intuición			

SEGUNDA PARTE

De las siguientes tecnologías, cuál considera que **PODRÍA IMPLEMENTARSE EN LA CIUDAD DE CUENCA**. Califique en escala de 1 a 5. 5 más impacto, 1 menos impacto. Dos o más tecnologías pueden tener la misma valoración.

Subsistema	Sustituye al portador energético:	Calificación
Bioetanol	Combustible líquido	
Biomasa	Electricidad	
Biogás (biodigestores)	Electricidad o Combustible líquido	
Biogás (rellenos sanitarios)	Electricidad	
Incineración Co- incineración	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	
Mareomotriz	Electricidad	
Pequeña Eólica	Electricidad	
Geotermia	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	
Pequeña hidroeléctrica	Electricidad	
Fotovoltaico en terrazas o fachadas	Electricidad	
Solar térmica (agua caliente sanitaria)	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	

TERCERA PARTE

SC1) Disponibilidad de fuente primaria: Este criterio indica si está disponible la energía primaria para el uso de una determinada tecnología. Cada emplazamiento urbano tiene sus particulares condiciones, en función de su geografía, ubicación o clima, por ello se requiere un análisis específico para cada caso. La valoración del potencial energético es un inconveniente por cuanto las ciudades por lo general carecen de estudios que permitan definir sus recursos energéticos, por ello se considera adecuado recurrir a la opinión de los expertos. **Por favor lea la escala antes de contestar.**

Sin disponibilidad del recurso	Poca disponibilidad del recurso	Media disponibilidad del recurso	Bastante disponibilidad del recurso	Muy alta disponibilidad Del recurso
1	2	3	4	5

Subsistema	Sustituye al portador energético:	Calificación
Bioetanol	Combustible líquido	
Biomasa	Electricidad	
Biogás (biodigestores)	Electricidad / Combustible líquido	

Biogás (reellenos sanitarios)	Electricidad	
Incineración Co- incineración	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	
Mareomotriz	Electricidad	
Pequeña Eólica	Electricidad	
Geotermia	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	
Pequeña hidroeléctrica	Electricidad	
Fotovoltaico en terrazas o fachadas	Electricidad	
Solar térmica	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	

SC2) Madurez: Este criterio indica el grado de madurez de la tecnología, siendo el nivel comercial el que considera que está listo para utilizarse, mientras que la escala más baja es que la tecnología se encuentra en fase experimental. **Por favor lea la escala antes de contestar.**

Investigación	Investigación y Desarrollo	Investigación avanzada	Plantas piloto	Comercial
1	2	3	4	5

Subsistema	Sustituye al portador energético:	Calificación
Bioetanol	Combustible líquido	
Biomasa	Electricidad	
Biogás (biodigestores)	Electricidad / Combustible líquido	
Biogás (reellenos sanitarios)	Electricidad	
Incineración Co- incineración	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	
Mareomotriz	Electricidad	
Pequeña Eólica	Electricidad	
Geotermia	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	
Pequeña hidroeléctrica	Electricidad	

Fotovoltaico en terrazas o fachadas	Electricidad	
Solar térmica (agua caliente sanitaria)	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	

SC3) Obstáculos urbanos y disponibilidad de área: Una de las condicionantes para la implementación de las tecnologías en los límites de la ciudad, es el espacio requerido para su instalación. Los obstáculos o configuración de la ciudad son limitantes que se debe tomar en cuenta para valorar esta escala. **Por favor lea la escala antes de contestar.**

Nada adecuado para implementar	Poco adecuado para implementar	Adecuado para implementar	Bastante adecuado para implementar	Muy adecuado para implementar
1	2	3	4	5

Subsistema	Sustituye al portador energético:	Calificación
Bioetanol	Combustible líquido	
Biomasa	Electricidad	
Biogás (biodigestores)	Electricidad / Combustible líquido	
Biogás (rellenos sanitarios)	Electricidad	
Incineración Co- incineración	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	
Mareomotriz	Electricidad	
Pequeña Eólica	Electricidad	
Geotermia	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	
Pequeña hidroeléctrica	Electricidad	
Fotovoltaico en terrazas o fachadas	Electricidad	
Solar térmica (agua caliente sanitaria)	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	

SC4) Arquitectura: La intromisión de infraestructuras de generación de energía dentro del espacio urbano puede modificar el aspecto de la urbe. Este criterio dependerá de aspectos que son propios de la ciudad. Tecnologías poco invasivas como la solar, al momento que se masifiquen pueden causar impacto visual y/o ambiental y en edificaciones de valor arquitectónico su instalación podría ser restrictiva. Considere además que la instalación de plantas de producción de biocombustibles o biogás pueden ser colocadas fuera de la ciudad (cerca del relleno sanitario, junto a planta de tratamiento de aguas residuales), o en ambientes industriales.

La integración de las energías renovables y la arquitectura es esencial, así como su adecuada consideración en el diseño urbano, lo cual requiere una legislación coherente, que normalmente no existe en la mayoría de centros urbanos. **Por favor lea la escala antes de contestar.**

Ninguna intromisión arquitectónica	Poca intromisión arquitectónica	Media intromisión arquitectónica	Alta Intromisión arquitectónica	Muy alta intromisión arquitectónica
a	a	a	a	a
1	2	3	4	5

Subsistema	Sustituye al portador energético:	Calificación
Bioetanol	Combustible líquido	
Biomasa	Electricidad	
Biogás (biodigestores)	Electricidad / Combustible líquido	
Biogás (rellenos sanitarios)	Electricidad	
Incineración Co- incineración	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	
Mareomotriz	Electricidad	
Pequeña Eólica	Electricidad	
Geoterma	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	
Pequeña hidroeléctrica	Electricidad	
Fotovoltaico en terrazas o fachadas	Electricidad	

Solar térmica (agua caliente sanitaria)	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	
---	---	--

SC5) Aceptación social de la tecnología: Este subcriterio considera si la población urbana conoce la tecnología y/o está de acuerdo con la instalación de las tecnologías renovables. En este caso se valora la percepción de los expertos que conocen la ciudad. **Por favor lea la escala antes de contestar.**

No hay aceptación	Poca aceptación	Media aceptación	Alta aceptación	Muy alta aceptación
1	2	3	4	5

Subsistema	Sustituye al portador energético:	Calificación
Bioetanol	Combustible líquido	
Biomasa	Electricidad	
Biogás (biodigestores)	Electricidad / Combustible líquido	
Biogás (rellenos sanitarios)	Electricidad	
Incineración Co- incineración	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	
Mareomotriz	Electricidad	
Pequeña Eólica	Electricidad	
Geotermia	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	
Pequeña hidroeléctrica	Electricidad	
Fotovoltaico en terrazas o fachadas	Electricidad	
Solar térmica (agua caliente sanitaria)	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	

SC6) Compatibilidad con las políticas públicas: La creciente participación de las energías renovables en contextos nacionales, se ha dado por la implementación de políticas que motivan la instalación de este tipo de tecnologías principalmente a gran escala. Sin la implementación de políticas, la entrada de tecnologías que son nuevas y en algunos casos menos favorables desde el punto de vista económico no sería viable. **Por favor lea la escala antes de contestar.**

No hay compatibilidad	Poca compatibilidad	Media compatibilidad	Alta compatibilidad	Muy alta compatibilidad
1	2	3	4	5

Subsistema	Sustituye al portador energético:	Calificación
Bioetanol	Combustible líquido	
Biomasa	Electricidad	
Biogás (biodigestores)	Electricidad / Combustible líquido	
Biogás (rellenos sanitarios)	Electricidad	
Incineración Co- incineración	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	
Mareomotriz	Electricidad	
Pequeña Eólica	Electricidad	
Geotermia	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	
Pequeña hidroeléctrica	Electricidad	
Fotovoltaico en terrazas o fachadas	Electricidad	
Solar térmica (agua caliente sanitaria)	Electricidad Combustible líquido o gaseoso	

GENERAL.

Considera que en nuestra ciudad se podría masificar el uso de las energías renovables.

Cuáles cree que sería los factores favorables para que se masifique en la ciudad el uso de alguna tecnología.

Cuáles cree que serían los factores más desfavorables para impedir que se masifique en la ciudad el uso alguna tecnología.

CONSOLIDADO

TEC \ SC	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7	Suma
Expl								