

**MODELO TÉCNICO, ECONÓMICO Y FINANCIERO
ASEQUIBLE EN SISTEMAS ENERGÉTICOS, BASADO EN
MICRORREDES DE FUENTES RENOVABLES PARA LA
ELECTRIFICACIÓN RURAL**



MARÍA JULIANA CARDONA MÁRQUEZ

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MANIZALES – UAM
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA
LÍNEA EN ENERGÍA
MANIZALES, COLOMBIA
OCTUBRE DE 2021**

**MODELO TÉCNICO, ECONÓMICO Y FINANCIERO
ASEQUIBLE EN SISTEMAS ENERGÉTICOS, BASADO EN
MICRORREDES DE FUENTES RENOVABLES PARA LA
ELECTRIFICACIÓN RURAL**

MARÍA JULIANA CARDONA MÁRQUEZ

Tesis para optar al título de Doctor en Ingeniería

Director:

Yuri Ulianov López Castrillón

Co-director:

Gabriel Eduardo Escobar Arias

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MANIZALES – UAM
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA
LÍNEA EN ENERGÍA
MANIZALES, COLOMBIA
OCTUBRE DE 2021**

DEDICATORIA

Dedico este trabajo especialmente a la comunidad del archipiélago La Plata Bahía Málaga, por su energía al involucrarse en proyectos de investigación con las diversas universidades, en busca de soluciones para sus problemas locales, a ellos porque creen en el desarrollo investigativo como un medio para lograr sus objetivos.

Seguidamente a todas las personas que me apoyaron desde el principio, en la búsqueda de un proyecto que aportara un grano de arena al desarrollo de esta sociedad. A mis tutores, profesores y demás que me han apoyado y alentado para seguir desarrollando este proyecto.

Finalmente, a mi familia, quienes no solamente me han apoyado, sino que me han motivado en este largo camino, siendo mi inspiración constante para lograr los objetivos con los mejores estándares de ética y calidad.

Gracias Dios

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis agradecimientos a:

Yuri Ulianov López Castrillón, director de la tesis doctoral, por su constante atención y dedicación a mi proceso de formación, animándome siempre a desarrollar productos de calidad en pro del bienestar y mejoramiento de la sociedad.

Gabriel Eduardo Escobar Arias, Co-director de la tesis doctoral, por su disposición a trabajar en este proyecto, su apertura a nuevas temáticas y sus valiosos aportes al desarrollo del proyecto.

A la comunidad del archipiélago de La Plata por su calidez y disposición para entregar los insumos necesarios en los trabajos de campo mediante la recolección de la información necesaria para desarrollar el proyecto, así como por considerar que a través de la academia se pueden lograr grandes avances para la región y el país.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Manizales y al Doctorado en Ingeniería por proveerme todos los medios y apoyos para culminar esta etapa tan importante, a los docentes del área de energía que siempre brindaron ideas y soluciones para formular y desarrollar mi proyecto y a la Universidad Autónoma de Occidente, en especial al grupo de docentes en energía, por acogerme en su institución y brindarme el apoyo para lograr los objetivos.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	21
1. PROBLEMA, PREGUNTAS, HIPÓTESIS Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	24
1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	24
1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	27
1.3 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	28
1.3.1 Hipótesis principal.....	28
1.3.2 Hipótesis alternativas	28
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	28
2. OBJETIVOS DE LA TESIS	33
2.1 OBJETIVO GENERAL	33
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
3. MARCO REFERENCIAL	34
3.1 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	34
3.1.1 Zonas No Interconectadas en Colombia.....	34
3.1.2 Pobreza Energética	36
3.1.3 Energía Renovable (ER).....	36
3.1.4 Tipos de Generación.....	38
3.1.5 Modelos Técnico-económicos.....	41
3.1.6 Sostenibilidad, energización, productividad y emprendimiento.....	46
3.1.7 Índice de pobreza multidimensional (IPM)	47
3.1.8 Modelo Financiero	51
3.1.9 Microfinanzas o Microcréditos.....	52
3.1.10 Asociaciones Público-Privadas (APP).....	52
3.1.11 Productos bancarios	52
3.1.12 Incentivos tributarios	53

3.1.13	Recursos de la nación y sector privado.....	54
3.2	ESTADO DEL ARTE.....	55
3.2.1	Estado del arte modelos técnico – económicos	55
3.2.2	Estado del arte modelos financieros de electrificación rural	65
3.3	MARCO NORMATIVO	77
3.4	MARCO CONTEXTUAL	81
3.4.1	Contexto Colombiano en la ER.....	81
3.4.2	Zonas rurales aisladas y zonas no interconectadas	82
4.	METODOLOGÍA.....	85
4.1	ENFOQUE Y TIPO DE INVESTIGACIÓN	85
4.2	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	87
4.3	POBLACIÓN/UNIVERSO Y MUESTRA.....	88
4.4	FASES DE LA INVESTIGACIÓN	88
4.5	ACTIVIDADES INVESTIGATIVAS REALIZADAS	89
4.5.1	Actividad N°1	90
4.5.2	Actividad N°2.....	92
4.5.3	Actividad N°3.....	92
4.5.4	Actividad N°4.....	93
4.5.5	Actividad N°5	93
4.5.6	Actividad N°6.....	94
4.5.7	Actividad N°7.....	94
4.5.8	Actividad N°8.....	95
5.	RESULTADOS	97
5.1	CARACTERIZACIÓN DE LA ZNI CASO DE ESTUDIO – ARCHIPIÉLAGO LA PLATA. 97	
5.1.1	Ubicación geográfica.....	98
5.1.2	Información socio-demográfica.....	99
5.1.3	Conformación socio-política	102
5.1.4	Caracterización energética básica.....	104
5.1.5	Caracterización económico-productiva	108
5.1.6	Servicios públicos.....	112
5.1.7	Caracterización TIC	114

5.1.8	Caracterización ambiental	116
5.1.9	Caracterización cultural.....	118
5.2	MODELO TÉCNICO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN	121
5.2.1	Caracterización de la generación de energía	121
5.2.2	Caracterización de la demanda de energía	126
5.2.3	Variables del modelo para el dimensionamiento y operación	131
5.2.4	Modelo de optimización estocástico.....	135
5.2.5	Topología de la red.....	150
5.2.6	Monitoreo y control del sistema	158
5.3	ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA POBLACIÓN CASO DE ESTUDIO Y POSIBLE IMPACTO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN.....	160
5.3.1	Indicadores socio-económicos.....	160
5.3.2	Indicadores productivos	174
5.4	MODELO FINANCIERO.....	179
5.4.1	Modelos financieros para mantenimiento y pago del sistema	179
5.4.2	Integración de los criterios analizados.....	206
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	210
7.	CONCLUSIONES	223
8.	RECOMENDACIONES	228
9.	REFERENCIAS	229
10.	ANEXOS	239
10.1.1	ANEXO 1 INSTRUMENTO ECUESTA 1	239
10.1.2	ANEXO 2 INSTRUMENTO ENCUESTA 2	239
10.1.3	ANEXO 3 SIMULACIÓN FINANCIERA	239
10.1.4	ANEXO 4 PROPUESTA CENTRO DE ACOPIO	239

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de las ZNI en Colombia.....	35
Tabla 2. Dimensiones e Indicadores del índice de pobreza multidimensional en Colombia	47
Tabla 3. IPM Buenaventura – Valle del Cauca	50
Tabla 4. Fondos y programas de apoyo financiero para la electrificación rural en Colombia	54
Tabla 5. Búsquedas realizadas.....	56
Tabla 6. Criterios de inclusión y exclusión	57
Tabla 7. Artículos resultados de la RSL. Tipo A: Artículo; AR: Artículo de revisión	57
Tabla 8. Enfoques en modelos financieros a nivel nacional	69
Tabla 9. Enfoques en Modelos Financieros – Internacional	70
Tabla 10 Plazos de los préstamos: pros y contras	77
Tabla 11. Costo de inversión inicial para sistemas solares individuales ZNI	80
Tabla 12. Tipos o enfoques de investigación de la tesis.....	85
Tabla 13. Población y muestra de la investigación	88
Tabla 14. Actividades investigativas de la tesis y su relación con los objetivos específicos, las fases y los resultados obtenidos.	89
Tabla 15. Características de los hogares de La Plata.....	100
Tabla 16. Temas que tratan en la comunidad	102
Tabla 17. Quiénes toman las decisiones en la comunidad	103
Tabla 18. Ocupación múltiple de los aportantes en el hogar.....	109
Tabla 19. ¿Cómo eliminan principalmente la basura en esta vivienda?.....	113
Tabla 20. ¿Para cuáles de las siguientes actividades usa el computador?.....	115
Tabla 21. Resultados de indicadores ambientales para sistema solar individual y sistema solar centralizado en La Plata – Bahía Málaga.....	117
Tabla 22 Fuentes renovables y no renovables en el territorio del Archipiélago La Plata ..	122
Tabla 23. Número y capacidad en potencia de electrodomésticos por vivienda – La Plata	126
Tabla 24. Potencia instalada y efectiva total en La Plata	129
Tabla 25. Escenarios de carga y demanda diaria por vivienda – La Plata	130
Tabla 26. Análisis de sensibilidad para las diferentes restricciones.....	140

Tabla 27. Resultados del modelo de optimización escenario de cobertura más alta – Esc 2	143
Tabla 28. Resultados del modelo de optimización escenario de cobertura más baja – Esc 123	144
Tabla 29. Paneles solares FV comerciales utilizados para el dimensionamiento.....	151
Tabla 30. Baterías solares comerciales utilizadas para el dimensionamiento	152
Tabla 31. Inversores solares comerciales utilizados para el dimensionamiento	153
Tabla 32. Reguladores solares comerciales utilizados para el dimensionamiento	153
Tabla 33. Dimensionado para sistemas solares individuales (SSI) en La Plata	153
Tabla 34. Dimensiones e indicadores del índice de pobreza multidimensional - La Plata	161
Tabla 35. Resultados promedio de ingresos netos e incidencia de la pobreza monetaria de los habitantes de La Plata	173
Tabla 36. Costo sistema solar individual escenario bajo – La Plata	181
Tabla 37. Costo sistema solar individual escenario medio – La Plata	182
Tabla 38. Costo sistema solar individual escenario alto – La Plata	183
Tabla 39. Resumen de resultados simulación financiera, por usuario – Modelo 1	184
Tabla 40. Flujo de egresos Modelo 1 – SSI escenario bajo.....	187
Tabla 41. Cálculo del GIO , GAOM , G0 y Gm – primeros 5 años – SSI escenario bajo....	188
Tabla 42. Simulación de capital compuesto (intereses sobre los intereses) inversión inicial – SSI escenario bajo	189
Tabla 43. Simulación de capital compuesto (intereses sobre los intereses) reemplazo de las baterías – SSI escenario bajo	190
Tabla 44. Resultado cargo de generación Gm , costo de comercialización Cm y costo tarifario CUm , mensual – SSI escenario bajo – La Plata	190
Tabla 45. Tarifas modelo financiero 1 ventanilla única, para los tres tipos de escenarios.	191
Tabla 46. Flujo de caja del inversionista – Modelo 1 escenario bajo.....	192
Tabla 47. TIR, VPN y Retorno de la inversión – Escenario bajo, medio y alto – Modelo 1	193
Tabla 48. Resumen de resultados simulación financiera por usuario – Modelo 2	195
Tabla 49. Flujo de egresos del proyecto – Modelo 2 – SSI escenario bajo.....	196
Tabla 50. Simulación de capital compuesto (intereses sobre los intereses) inversión inicial – SSI escenario bajo – Modelo 2	197
Tabla 51. Tarifas modelo financiero 2 PAYGo, para los tres tipos de escenarios.	197

Tabla 52. TIR, VPN y Retorno de la inversión – Escenario bajo, medio y alto – Modelo 2 – 4% interés	198
Tabla 53. Tarifas modelo financiero 2 PAYGo, para los tres tipos de escenarios. 6% interés	198
Tabla 54. Comparativo tarifas del 4% y 6% de interés – Modelo financiero 2.....	199
Tabla 55. TIR, VPN y Retorno de la inversión – Escenario bajo, medio y alto – Modelo 2 – 6% interés	199
Tabla 56. Inversión en equipos y materiales para la microrred.....	201
Tabla 57. Inversión inicial para instalar microrred.....	202
Tabla 58. Simulación de capital compuesto (intereses sobre los intereses) inversión inicial microrred – Modelo 3	202
Tabla 59. Flujo de egresos y cuota de crédito – Modelo 3.....	203
Tabla 60. Inversión inicial microrred – Modelo financiero 4.....	205
Tabla 61. Flujo de egresos – Modelo 4	206
Tabla 62. Método de factores ponderados – calificación de expertos.....	207
Tabla 63. Método de factores ponderados – ponderación	207
Tabla 64. Método de factores ponderados – resultado	208
Tabla 65. Método de factores ponderados – opinión de expertos	208
Tabla 66. Cuadro comparativo de resultados modelos financieros	212
Tabla 67. Ventajas y desventajas del modelo financiero 1. Modelo de ventanilla única...	216
Tabla 68. Ventajas y desventajas del modelo financiero 2. Modelo PAYGo	217
Tabla 69. Comparativo inversión inicial microrred y sistemas solares individuales para toda la comunidad	218

LISTA DE ECUACIONES

Eq 1.....	131
Eq 2.....	131
Eq 3.....	132
Eq 4.....	132
Eq 5.....	132
Eq 6 SOC [kWh]	133
Eq 7 Máximo SOC dependiendo de las características de las baterías [kWh].....	133
Eq 8 Potencia de descarga [kW].....	133
Eq 9 Potencia de carga [kW]	133
Eq 10 Potencia suministrada por el sistema solar FV cada t hora en cada j escenario.....	133
Eq 11 Potencia entregada por la planta diésel cada t hora en cada j escenario.	134
Eq 12 Potencia suministrada por el banco de baterías, cada t hora en cada j escenario.....	134
Eq 13.....	134
Eq 14.....	134
Eq 15 Número de paneles.	135
Eq 16 Potencia máxima de carga.....	136
Eq 17 Potencia máxima de descarga.	136
Eq 18 Máxima energía en baterías.	136
Eq 19 Relación de carga.	136
Eq 20 Relación de descarga.....	136
Eq 21 Potencia de la batería.	136
Eq 22 Energía inicial.	137
Eq 23 Energía final.....	137
Eq 24 Límite de combustible.....	137
Eq 25.....	137
Eq 26.....	137
Eq 27.....	138
Eq 28.....	138
Eq 29.....	138
Eq 30.....	151

Eq 31.....	151
Eq 32.....	152
Eq 33.....	152
Eq 34.....	152
Eq 35.....	153
Eq 36.....	153
Eq 37.....	156
Eq 38.....	156
Eq 39.....	157
Eq 40.....	157
Eq 41.....	185
Eq 42.....	186
Eq 43.....	186
Eq 44.....	186
Eq 45.....	189
Eq 46.....	189

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de la tesis doctoral	23
Figura 2. Árbol de problemas	27
Figura 3. Participación porcentual de fuentes de energía en Colombia - 2018	29
Figura 4. Matriz energética colombiana	29
Figura 5. Zonas No Interconectadas en Colombia a) Comunidades Afro y Resguardos Indígenas (Rojo). B) Con servicio de electricidad por horas (Puntos verde), Sin servicio (Puntos rojo), sin información (punto negro).....	35
Figura 6. PIEC 2016-2020.....	36
Figura 7. Capacidades de energía renovable en el mundo. Los 10 países líderes	37
Figura 8. Adiciones anuales de capacidad en energías renovables por tecnología, 2013-2019	38
Figura 9. Configuración de una turbina eólica	39
Figura 10. Configuración de una Microrred	40
Figura 11. Estructura de una microrred	41
Figura 12. Etapas de escritura de artículos de investigación que realizan análisis y aplican modelos técnico-económicos de sistemas de generación de ER	42
Figura 13. Modelo hidro-energético	43
Figura 14. Simulación de un sistema de generación en HOMER	45
Figura 15. Estructura general de un PERS	46
Figura 16. Niveles de pobreza multidimensional en Colombia – Censo 2018	49
Figura 17. Pobreza multidimensional en Colombia – 2018 2019	50
Figura 18. DANE Mapas Arcgis. IPM Buenaventura	50
Figura 19. Objetivo de los artículos al aplicar modelos tecno-económicos en proyectos de energización rural con el uso de sistemas híbridos y microrredes.	62
Figura 20 Tree of Science ToS	65
Figura 21. Cambio en la percepción de la demanda por nuevos microcréditos - Colombia	67
Figura 22. Funciones y características claves del negocio	68
Figura 23. Inversión mundial de las compañías de sistemas solares fuera de red (Off grid) 2013 - 2017.....	73
Figura 24. Stakeholders	74

Figura 25. Actores del Ecosistema del Negocio.....	75
Figura 26. Tasas de acceso a la electricidad en países en desarrollo sector urbano y rural .	83
Figura 27 Población sin acceso a la electricidad 2016 - IEA 2017	83
Figura 28. Fases de la investigación.....	89
Figura 29. Evidencias de la aplicación de los instrumentos de recolección de información en La Plata	93
Figura 30. Mapa de ubicación geográfica La Plata Bahía Málaga Colombia	98
Figura 31. Fotografía Archipiélago La Plata Bahía Málaga Colombia	98
Figura 32. Gráficas de edad y género	99
Figura 33. Estado civil habitantes de La Plata.....	101
Figura 34. Nivel de Escolaridad habitantes de La Plata	101
Figura 35. Menores de edad por vivienda – La Plata	102
Figura 36. Personas más importantes en las que los habitantes confían	104
Figura 37. Frecuencia de pagos por electricidad Figura 38. Pagos por la electricidad .	105
Figura 39. Fallas de la planta diésel Figura 40. Número de fallas	105
Figura 41. Combustible para cocinar. Figura 42. Cuáles son sus gastos mensuales en combustible para cocinar 106	106
Figura 43. Tipo de energía que es más beneficiosa para la comunidad	107
Figura 44. Interés de la comunidad por tener más horas de energía al día.....	107
Figura 45. Disposición de la comunidad en pagar un poco más por más horas de energía	108
Figura 46. Gráfica de distribución de actividades productivas de los habitantes de La Plata	109
Figura 47. Pescado seco en La Plata	110
Figura 48. Productos elaborados con madera por los Platences.....	110
Figura 49. Piangua – La Plata.....	111
Figura 50. Centro de acopio de la piangua en La Plata	111
Figura 51. Árboles de piña y algodón en La Plata.....	112
Figura 52. Priorización de necesidades de servicios públicos por los habitantes de La Plata.	114
Figura 53.¿Cuánto acostumbra pagar para recargar el celular?.....	115
Figura 54. Religión – La Plata Figura 55. Tiempo libre – La Plata	119
Figura 56. Rutinas de los habitantes de La Plata.....	119

Figura 57. Lectura.....	120
Figura 58. Microrred de generación de energía para el Archipiélago La Plata.....	122
Figura 59 Radiación global diaria promedio en Bahía Málaga para cada mes del año.....	123
Figura 60. Perfil de radiación solar en La Plata	124
Figura 61. Distribución de frecuencia para datos de radiación solar global en La Plata, año 2019	124
Figura 62. Distribución de frecuencia para datos de radiación solar global en La Plata, enero de 2019.....	125
Figura 63. Sistema solar individual – Restaurante o cocina comunitaria en La Plata.....	125
Figura 64. Perfil de carga o demanda de energía para 4 horas de servicio de energía al día - La Plata.....	129
Figura 65. Perfil de carga o demanda de energía para 24 horas de servicio de energía al día – La Plata	130
Figura 66. Diagrama de flujo del algoritmo de optimización	139
Figura 67 Potencia generada por cada tecnología, carga y % de cobertura	141
Figura 68. Gráfico de distribución de frecuencias de cobertura, por año.....	142
Figura 69. Escenario 2. Cobertura media 99.8%. Mejor escenario	142
Figura 70. Escenario 123. Cobertura promedio = 60.8%. Escenario más bajo	144
Figura 71. Vertido total de renovables, energía no cubierta y % de cobertura	145
Figura 72. Generación total de energía por tecnología y, carga.....	146
Figura 73. Vertido de renovables total	147
Figura 74. Relación entre inversión y % cobertura	148
Figura 75. Relación entre el tamaño del Sistema solar, el almacenamiento en baterías y el costo nivelado de energía	148
Figura 76. Generación total de energía por tecnología y, carga – Escenario 95.75% de cobertura.....	150
Figura 77. Vertido de renovables total – Escenario 95% de cobertura	150
Figura 78. Topología sistema solar individual – Escenario bajo.....	154
Figura 79. Topología sistema solar individual – Escenario medio	155
Figura 80. Topología sistema solar individual – Escenario alto	155
Figura 81. Arreglo Solar FV – Microrred Figura 82. Arreglo de banco de baterías	157
Figura 83. Topología Microrred – La Plata.....	158
Figura 84. Estructura jerárquica de monitoreo y control de una Microrred.....	159

Figura 85. Pregunta n°5 del instrumento aplicado. ¿Cuál es su nivel de escolaridad?.....	164
Figura 86. Indicador de analfabetismo Buenaventura y otros municipios	165
Figura 87. Indicador de inasistencia escolar Buenaventura y otros municipios.....	165
Figura 88. Pregunta n°33 del instrumento aplicado. ¿Cuáles son las actividades productivas de su hogar, de las cuales obtiene un ingreso?	168
Figura 89. Pregunta n°35 del instrumento aplicado. ¿ Los ingresos mensuales que origina su hogar son aproximadamente?	168
Figura 90. Pregunta n°36 del instrumento aplicado. ¿Qué otros usos tienen su vivienda? ..	169
Figura 91. Pregunta n°2 del instrumento aplicado. ¿Número de habitantes en el hogar? ..	171
Figura 92. Porcentaje de hogares que enfrentan privación por indicador – La Plata - 2020	172
Figura 93. Ingresos promedio del hogar – La Plata.....	174
Figura 94. Ingresos promedio por actividad en el hogar – La Plata.....	175
Figura 95. Gastos mensuales promedio en hogares de La Plata.....	175
Figura 96. Ingresos vs gastos promedio	176
Figura 97. Porcentaje de hogares con ingresos > gastos, ingresos < gastos e ingresos = gastos	176
Figura 98. Niveles de ingresos vs gastos	177
Figura 99. Costo promedio de artículos de la canasta familiar en la región de La Plata....	177
Figura 100. Modelos financieros para inversión y AOM de sistema de generación en La Plata - Colombia	180
Figura 101. Diagrama de flujo de la operación del modelo PAYGo en La Plata	194

LISTA DE ACRÓNIMOS

AOM: Administración, Operación y Mantenimiento
BID: Banco Interamericano de Desarrollo
FAZNI: Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas No Interconectadas
FENOGE: Fondo de energías no convencionales y gestión eficiente de la energía
FENR: Fuentes de Energía No Renovable
FER: Fuentes de Energía Renovable
ICEE: Índice de Cobertura de Energía Eléctrica
IPSE: Instituto de Planeación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas
MINMINAS: Ministerio de Minas y Energía de Colombia
Pers: Plan de energización rural sostenible
RUM: Red Universitaria Mutis
SSI: Sistema solar fotovoltaico individual
UAM: Universidad Autónoma de Manizales
UAO: Universidad Autónoma de Occidente
UNAB: Universidad Autónoma de Bucaramanga
UPME: Unidad de Planeación Minero Energética
USAID: Agencia Estadounidense para el Desarrollo
ZNI: Zonas No Interconectadas

MODELO TÉCNICO, ECONÓMICO Y FINANCIERO ASEQUIBLE EN SISTEMAS ENERGÉTICOS, BASADO EN MICRORREDES DE FUENTES RENOVABLES PARA LA ELECTRIFICACIÓN RURAL

María Juliana Cardona Márquez

Yuri Ulianov López Castrillón (Director de tesis)

Gabriel Eduardo Escobar Arias (Co-director de tesis)

Red Universitaria Mutis - RUM

Universidad Autónoma de Manizales – UAM (Colombia)

Programa de Doctorado en Ingeniería

Línea en Energía

RESUMEN

Colombia y el mundo se encuentran en la búsqueda de soluciones y estrategias que permitan alcanzar la universalización de la energía, en especial para aquellas comunidades de bajos ingresos y alta vulnerabilidad. En Colombia existen alrededor de 500,000 familias sin servicio de energía eléctrica, lo cual limita su desarrollo económico y productivo, así como su calidad de vida. Con las estrategias actuales, el país pronostica alcanzar este objetivo en un periodo de 50 años, lo cual retrasará al país medio siglo más. Las fuentes renovables de energía han sido una iniciativa muy eficiente para la energización de zonas rurales aisladas. A nivel nacional existe un gran potencial en este tipo de fuentes en especial en zonas no interconectadas, no obstante, la inversión en estos sistemas sigue siendo muy poco asequible para comunidades pobres de países en vía de desarrollo. Una de las barreras que limitan el acceso son la ausencia de esquemas administrativos y financieros que permitan la auto sostenibilidad de los proyectos en sus cuatro dimensiones (técnica, social, ambiental y económico financiera). En especial los esquemas financieros son los menos valorados en la formulación de este tipo de proyectos.

El proyecto de investigación doctoral realizó el diseño un modelo técnico, económico y financiero asequible en sistemas energéticos basado en Microrredes de fuentes renovables para la electrificación rural a través de una investigación cuantitativa de alcance correlacional, no experimental, mediante un caso de estudio en una población del Pacífico colombiano caracterizada como zona no interconectada. El desarrollo de la investigación implicó la programación de un modelo de optimización estocástico para el dimensionamiento y la operación del sistema de generación incluyendo patrones de consumo y un amplio perfil de la demanda.

La comunidad de La Plata es un asentamiento que se encuentran en una importante condición de vulnerabilidad debido a sus altos índices de pobreza multidimensional (42.01%) y pobreza monetaria (75%). La ampliación de la cobertura de energía a través de un sistema de generación impactaría de manera positiva las actividades principales de los habitantes, aumentando su productividad e ingresos. El proyecto podría realizarse a través de la implementación de un modelo financiero que sufrague un sistema de generación solar individual o una microrred a través de los modelos de ventanilla única y

PAYGo, los cuales han resultado más asequibles en términos técnicos, económico financieros, ambientales y sociales.

Palabras clave: modelo técnico – económico; modelo financiero; electrificación rural; energía renovable; microrred; zona no interconectada.

AFFORDABLE TECHNICAL, ECONOMIC AND FINANCIAL MODEL IN ENERGY SYSTEMS, BASED ON MICROGRIDES OF RENEWABLE SOURCES FOR RURAL ELECTRIFICATION

María Juliana Cardona Márquez

Yuri Ulianov López Castrillón (Director of thesis)

Gabriel Eduardo Escobar Arias (Co-director of thesis)

Red Universitaria Mutis - RUM

Universidad Autónoma de Manizales –UAM (Colombia)

Doctoral Program in Engineering

Energy line

ABSTRACT

Colombia and the world search solutions and strategies that allow the achievement the universalization of energy, especially for those communities with low income and high vulnerability. There are around 500,000 families without electricity service in Colombia, which limits their economic and productive development, as well as their quality of life. The national government has said that it will take 50 years to solve this specific problem. Renewable sources of energy have been an efficient strategy of the National Government to cover these isolated rural areas. However, it is not easy for the communities themselves to invest in these kinds of systems, they usually do not have the management skills and financial knowledge that it is necessary to implement these kinds of system in their four basic dimensions: technical, social, environmental and economic-financial.

This PhD project had designed an affordable technical, economic and financial model in energy systems based on microgrids of renewable sources for rural electrification. Its design was a qualitative correlational research as a case study. The research designed a stochastic optimization model for the dimensioning and operation of the generation system, including consumption patterns and a broad demand profile. It was developed in the population of La Plata in the Pacific region in Colombia which has high levels of vulnerability as its multidimensional poverty (42.01%) and monetary poverty (75%).

The best model to implement this system on rural non-interconnected areas was the financial model that pays for an individual solar generation system or a microgrid through the one stop shop and PAYGo models, which have been more affordable in technical, economic, financial, environmental and social terms.

Key words: technical - economic model; financial model; rural electrification; renewable energy; microgrid; non-interconnected zones.

INTRODUCCIÓN

Según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), el índice de cobertura de energía eléctrica (ICEE) en Colombia es del 96.45%. Alrededor de 504,878 viviendas aún no cuentan con el servicio de energía eléctrica. Dichas viviendas se encuentran en áreas rurales alejadas denominadas Zonas No Interconectadas (ZNI). Estas comunidades están siendo abastecidas la tercera parte del día en algunos casos por termoeléctricas a gas, a carbón y en zonas aún más alejadas con la venta de combustible como el Diésel. Las ZNI se caracterizan por ser zonas de baja densidad poblacional, lo que produce bajo consumo y a su vez baja prioridad en la electrificación, agregando a ello, la no viabilidad económica para la electrificación debido a la complejidad de las redes eléctricas en la transmisión y distribución de la energía.

El aumento en las emisiones de gases contaminantes, la deforestación, el impacto sobre la biodiversidad, la disminución de las cuencas hídricas, e impactos en la salud de los habitantes por el uso de leña para cocinar, es causado por el uso de fuentes de energía no renovable fósiles y no fósiles en las ZNI. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA) los habitantes de estas zonas rurales tienen precarios niveles de ingresos económicos, por lo que se concluye que la ausencia del recurso genera impactos importantes en la calidad de vida y el bienestar de las personas, disminuyendo sus capacidades productivas y de desarrollo económico.

La electrificación de estas comunidades vulnerables y la universalización de la energía es un objetivo común de los países en vía de desarrollo, plasmados en los compromisos de desarrollo sostenible del Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo. Los informes de la IEA, el REN21, el Banco Mundial, *World resources Institute*, GIZ, *Practical Action (Poor Peoples energy Outlook)*, entre otros, muestran como los países realizan cada año múltiples esfuerzos e inversiones por ampliar la cobertura y garantizar este derecho básico en sus regiones.

Una de las barreras más importantes que se han identificado en los últimos tiempos a nivel internacional, es la ausencia de modelos financieros y administrativos que le permitan a estas comunidades acceder a las tecnologías de generación de energía renovable, puesto que los altos costos de inversión inicial impiden la compra de los sistemas en las regiones con ingresos bajos. A nivel nacional, a pesar de los múltiples esfuerzos del Ministerio de Minas y Energía, con las estrategias actuales la universalización de la energía no se alcanzaría hasta el año 2050, periodo supremamente extenso si se quiere cumplir con las metas de los planes de gobierno y los compromisos internacionalmente adquiridos. Por lo tanto, el Ministerio de Minas y Energía está en la búsqueda de nuevas estrategias que permitan agilizar la electrificación de las poblaciones.

Dentro de los retos que se ha planteado el Instituto de Planeación y Promoción de Soluciones Energéticas para acelerar la electrificación son, la actualización del marco institucional y regulatorio colombiano, la vinculación del sector privado nacional e internacional, nuevos esquemas para fomentar la competencia a través de subastas, implementación de microrredes y soluciones individuales solares fotovoltaicas, búsqueda de cooperación internacional,

capacitación y desarrollo de comunidades, articulación de la academia e innovación para incrementar la sostenibilidad en la dimensión técnica y social de los proyectos.

Esta investigación doctoral pretende aportar a este problema social desde el campo de la ingeniería, por lo que se ha planteado darle respuesta a preguntas como, ¿cómo diseñar un modelo técnico económico y financiero asequible en sistemas energéticos basado en microrredes de fuentes renovables para la electrificación rural?, ¿cuáles son las ventajas para una comunidad en una ZNI, en la implementación de un modelo auto sostenible de bajos costos tarifarios para el sistema energético?, ¿qué parámetros deben evaluarse en un sistema energético para encontrar el óptimo modelo financiero para usuarios, para la empresa y/o inversionista?, y si ¿puede ofrecerse un esquema tarifario asequible a una comunidad rural con recurso energético local?.

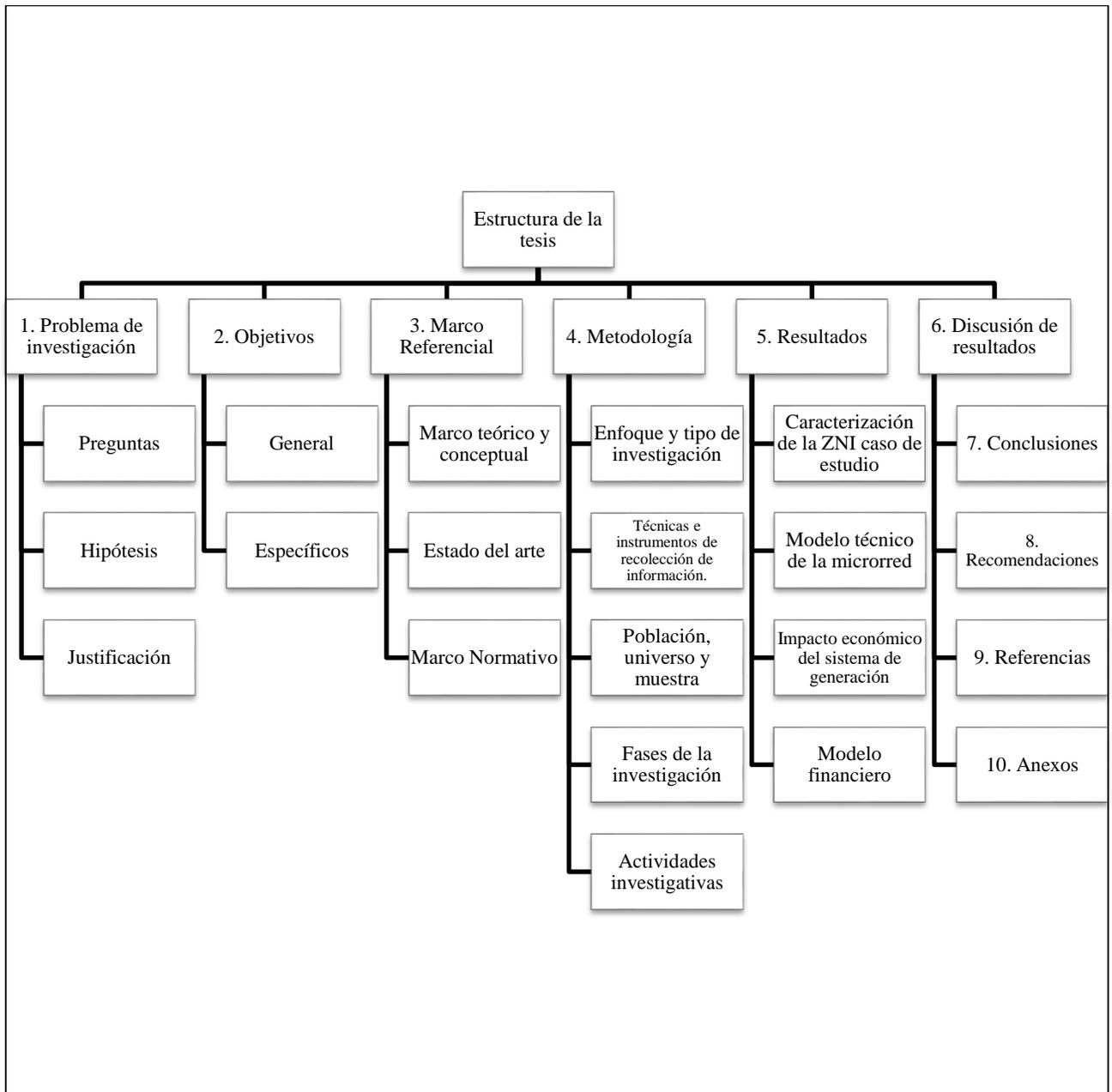
La investigación que se desarrolló fue de tipo aplicada no experimental, mediante un caso de estudio en una población del Pacífico colombiano. La investigación tiene un enfoque cuantitativo, de alcance correlacional, ya que implica la descripción de las variables técnicas, económicas y financieras que intervienen en un modelo de energización rural, para minimizar el costo de generación. Se observará el contexto natural de la comunidad de la ZNI desde diferentes perspectivas tales como económicas, productivas, financieras, sociales, culturales y ambientales, por lo que se denomina transeccional, con recolección de datos única.

La investigación no pretende generalizar el resultado que se obtenga de una comunidad en todas las comunidades de las ZNI en Colombia, debido a que existen diferencias significativas como tipo y disponibilidad de las fuentes de energía renovable, tamaño de la carga de la red, tamaño de la población y potenciales productivos. Sin embargo, el modelo sí pretende generalizar la cantidad, calidad e importancia de las variables a considerar para la determinación de un modelo óptimo de generación y asequible para los usuarios.

El proyecto doctoral se desarrolló en tres fases. La primera buscó la caracterización del modelo técnico del sistema de generación, en la segunda la determinación del impacto económico de un sistema en la comunidad caso de estudio y por último se desarrolló un modelo financiero para el pago y administración del sistema.

Para mostrar del desarrollo de la investigación y los resultados obtenidos, el documento es estructurado en 10 capítulos tal como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Estructura de la tesis doctoral



Elaboración propia

1. PROBLEMA, PREGUNTAS, HIPÓTESIS Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El presente capítulo tiene el propósito de dar a conocer el problema de investigación abordado en este proyecto de tesis doctoral. Está organizado en subsecciones donde se encuentra detallado el problema, las preguntas, las hipótesis y la justificación. En este capítulo se encuentra descrito el vacío del conocimiento y el aporte que quiere darle este proyecto al área del conocimiento.

1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La energía, recurso natural indispensable para la humanidad ha sido producida por el mundo en sus diferentes formas y a través de fuentes diversas. Cerca del 81% de la energía consumida a nivel mundial proviene de fuentes fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural [1].

El petróleo se ha venido agotando debido al aumento de la población que hace más presión sobre los recursos. Adicional a la escasez que se pronostica en esta fuente, la producción de energía a través del carbón y el petróleo como combustible, produce grandes emisiones contaminantes, principal causa del cambio climático y el deterioro del medio ambiente [2].

El desequilibrio entre el índice de producción y el consumo de energía genera crisis energética en los países, no quedando más opción que importar recursos energéticos y/o adoptar energías renovables no convencionales. Se hace evidente la necesidad de una transición mundial hacia la energía renovable.

Colombia no se encuentra en crisis energética, su matriz es rica tanto en recursos fósiles como en fuentes de energía renovable (FER); aun así, el país está en la búsqueda de una diversificación energética debido a la escasez que se pronostica en 170 años de carbón, 7 años de petróleo y 15 años de gas natural. Adicional a ello, se requiere mejorar la eficiencia y aumentar la capacidad de los sistemas energéticos actuales [3], participar en la producción de energía proveniente de FER no convencionales, limpias y alternativas con alto potencial en el país [4], con la intención de electrificar y ampliar la cobertura del 52% del territorio nacional que aún hoy no posee el servicio [5] [6].

Según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), entidad designada por el Ministerio de Minas y Energía (MINMINAS) para calcular el Índice de Cobertura de Energía Eléctrica (ICEE), afirma que Colombia tiene una cobertura del 96,45%, lo que equivale a 504,878 viviendas sin servicio de energía eléctrica [7] [8] [9]. Dichas viviendas se encuentran en áreas rurales alejadas denominadas Zonas No-Interconectadas (ZNI). Estas comunidades están siendo abastecidas la tercera parte del día en algunos casos por termoeléctricas a gas, a carbón y en zonas aún más alejadas con la venta de combustible como el diésel, sistemas

solares fotovoltaicos (FV) e híbridos solar-diésel [10]. Las ZNI se caracterizan por ser zonas de baja densidad poblacional, lo que produce bajo consumo y a su vez baja prioridad en la electrificación, agregando a ello, la no viabilidad económica para la conexión al SIN, en virtud de la alta complejidad de las redes eléctricas en la transmisión y distribución de la energía.

El uso de fuentes de energía no renovables (FENR) en las ZNI como grupos electrógenos del diésel, la leña, el carbón vegetal, entre otros, tiene efectos económicos y ambientales negativos tales como el aumento en las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, la deforestación, el impacto sobre la biodiversidad, la disminución de las cuencas hídricas [11], e impactos en la salud de los habitantes por el uso de leña para cocinar, bajo acceso a los servicios de salud, transporte y educación. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA) se estima que más de 1.3 billones de personas en el mundo no poseen acceso a la electricidad y 2.6 billones cocinan con dispositivos rudimentarios a partir de biomasa tradicional, donde un gran porcentaje de estas personas se encuentran ubicadas en zonas rurales aisladas, con precarios niveles de ingresos económicos [12]. Es así como, la ausencia del recurso tiene impactos importantes en la calidad de vida y el bienestar de las personas, disminuyendo sus capacidades productivas y de desarrollo económico.

A pesar de los recursos dispuestos por el gobierno nacional para el desarrollo de proyectos de electrificación rural, a través de fondos y programas como el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE), el Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas No Interconectadas (FAZNI) y el Fondo de Energías no Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE), los proyectos no han tenido el impacto esperado a consecuencia de lo que se ha denominado la insuficiente auto sostenibilidad. Existen grandes dificultades para planear un esquema empresarial que garantice la AOM del sistema eléctrico en estas comunidades. Es decir, no se plantea un esquema empresarial para que la población local lo mantenga en el tiempo, por tanto, los proyectos de desarrollo rural no reflejan soluciones auto sostenibles, no hay transferencia de obligaciones financieras a la comunidad, y no se asocian aspectos productivos que promuevan el desarrollo y avance de estas zonas [13].

Dentro de las limitantes identificadas por el MINMINAS, la UPME y la Agencia Estadounidense para el Desarrollo (USAID), para la universalización de la energía, descritas en la “guía para la elaboración de un plan de energización rural sostenible (pers) 2015, se encuentran barreras asociadas a la problemática socio económica de la población rural, entre ellas, la *“deficiencia significativa en la formulación y estructuración de proyectos que dificultan el acceso a los fondos de apoyo financiero... así como la ... deficiencia en la identificación de esquemas empresariales incluyentes y adaptables a las condiciones de las áreas rurales, la incierta sostenibilidad de los proyectos energéticos... y el desinterés de las organizaciones en la atención de mercados dispersos debido a la baja demanda y los altos costos de administración, operación y mantenimiento”*¹ (AOM). Por tanto, el principal enfoque de los proyectos para la energización del área rural debería ser la sostenibilidad de

¹ Guía para la elaboración de un plan de energización rural sostenible (pers) 2015, pagina 11.

los proyectos energéticos implementados [13] [14] con estudios riguroso de caracterización de patrones de consumo, expectativas de demanda futura de las poblaciones, y la asociación de estrategias de desarrollo productivo a partir del uso eficiente de la energía [1].

Adicional a ello también se han evidenciado situaciones de abandono de los equipos por la ausencia de personal técnico que opere y mantenga el sistema en caso de falla, concluyendo que *“no existen en Colombia modelos debidamente consolidados y documentados ni se ha adoptado una metodología para el exitoso desarrollo de este tipo de sistemas híbridos, que sirvan como pauta para su réplica²”*

En Colombia los planes de energización rural son financiados por el gobierno nacional y por proyectos de cooperación internacional a través de donación, estos recursos son insuficientes para expandir el servicio y alcanzar la cobertura universal en un plazo razonable [15], por lo tanto en el decreto 1623 de 2015, se reformuló el marco de lineamientos de política para la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica. El decreto deja expreso que *“la ampliación de la cobertura a usuarios a quienes no sea económicamente eficiente conectar al SIN se realizará mediante soluciones aisladas centralizadas o individuales y microrredes. El desarrollo de la infraestructura podrá ser realizado por una organización del SIN o a través esquemas empresariales tales como las Áreas de Servicio Exclusivo, bien sea con recursos públicos o con inversiones a riesgo efectuadas por empresas prestadoras del servicio y remuneradas en tarifas.”*, dichas empresas deberán encargarse también de la AOM del sistema.

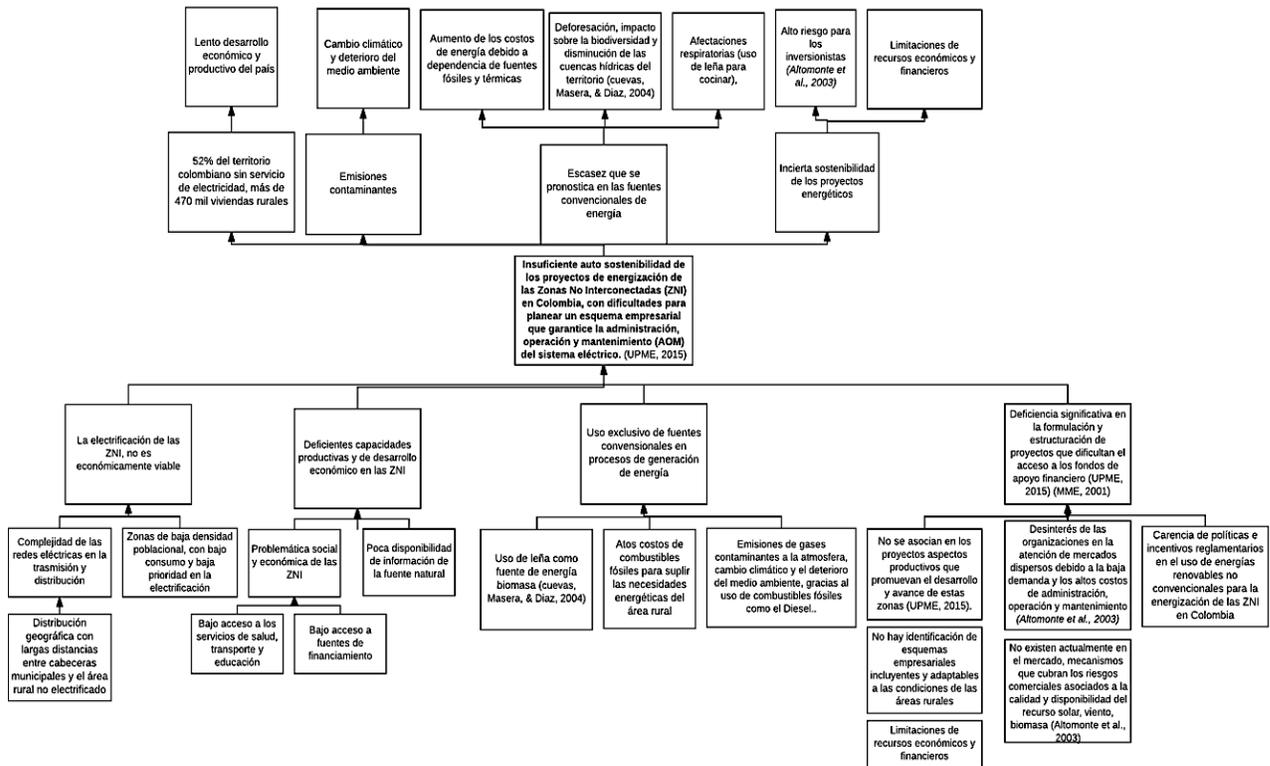
A partir de las proyecciones que ha realizado el IPSE, la universalización de la energía en Colombia con las estrategias y presupuestos actuales se lograría en el año 2050, periodo extremadamente largo considerando que el país se comprometió con los objetivos de desarrollo sostenible de las naciones unidas, en lograr esta meta en el año 2030. Por lo tanto, el Ministerio de Minas y Energía del país está en la búsqueda de nuevas estrategias que permitan agilizar la electrificación de las poblaciones.

Los retos y estrategias que se ha planteado el IPSE para acelerar la electrificación son, actualización del marco institucional y regulatorio, vinculación del sector privado nacional e internacional, nuevos esquemas para fomentar la competencia a través de subastas, microrredes y soluciones individuales solares fotovoltaicas, cooperación internacional, capacitación y desarrollo de comunidades, articulación de la academia e innovación para incrementar la sostenibilidad en la dimensión técnica y social de los proyectos [16].

Este marco de referencia deja al investigador un sinnúmero de preguntas que responder, por tanto, el proyecto de investigación se encuentra enmarcado en el diseño de un modelo auto sostenible para la energización de las ZNI en Colombia, bajo sistemas de generación con microrredes de fuentes renovables, en el marco de la energización, productividad y emprendimiento, con el menor costo unitario para el usuario. En la Figura 2 se encuentra esquematizada la problemática de investigación a abordar en este documento.

² Integración de energías renovables no convencionales en Colombia. [1]. Página 77.

Figura 2. Árbol de problemas



Elaboración propia

1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Cómo diseñar un modelo técnico económico y financiero asequible en sistemas energéticos basado en microrredes de fuentes renovables para la electrificación rural?
- ¿Cuáles son las ventajas para una comunidad en una ZNI, la implementación de un modelo auto sostenible de bajos costos tarifarios para el sistema energético?
- ¿Cuáles parámetros deben evaluarse en un sistema energético para encontrar el óptimo modelo financiero para usuarios, para la empresa y/o inversionista?
- ¿Puede ofrecerse un esquema tarifario asequible a una comunidad rural con recurso energético local?

1.3 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

A continuación, se expresan las hipótesis de la tesis de doctorado, planteadas desde de las preguntas de investigación a resolver.

1.3.1 Hipótesis principal

La formulación de proyectos de energización para las ZNI que consideran gran variedad de factores y criterios técnicos, ambientales, sociales y financieros, genera impactos positivos en la evaluación de su sostenibilidad, así como mayor confianza para la toma de decisiones en su implementación.

1.3.2 Hipótesis alternativas

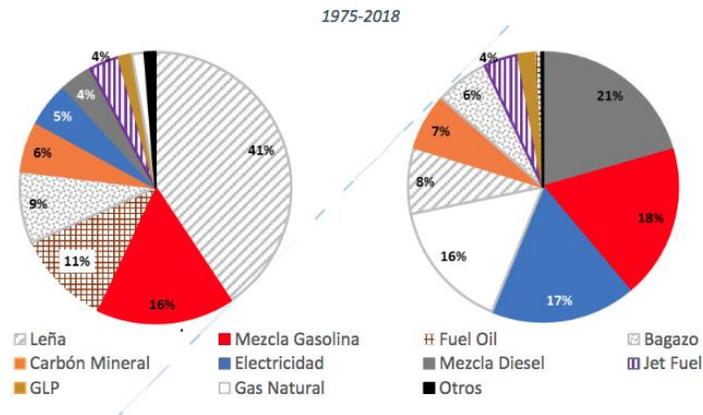
El diseño de modelos técnico, económico y financieros de electrificación rural para ZNI, puede ofrecer tarifas asequibles y un negocio rentable para el inversionista.

Es posible diseñar modelos de electrificación rural, a partir de fuentes renovables, asequibles para las comunidades rurales en situación de vulnerabilidad y pobreza.

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

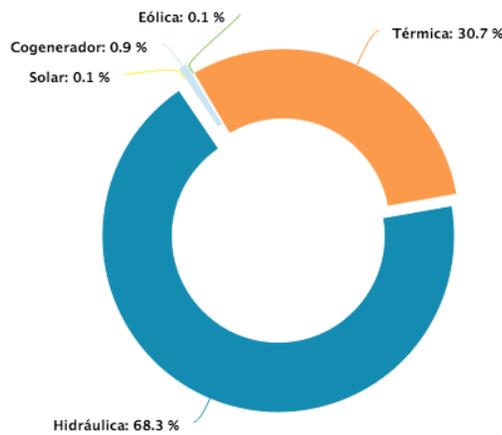
El 2019 fue otro año de grandes incorporaciones en energías renovables (más de 200GW) alcanzando un total de 27.3% de la producción de energía a nivel mundial [17]. Colombia ha tenido gran participación en generación de energía renovable a partir de la hidro-energía [18]. Según el UPME 2015, la generación de energía renovable en Colombia equivale al 70% del total de la producción, en gran medida gracias al sistema hidroeléctrico y a la biomasa utilizada como energía térmica para la cocción de los alimentos. En menor medida son aprovechadas las fuentes, solar, geotérmica, eólica y biocombustibles (1%) [1].

Figura 3. Participación porcentual de fuentes de energía en Colombia - 2018



Fuente: [19]

Figura 4. Matriz energética colombiana



Fuente: Sitio virtual Acolgen

Los nichos de oportunidad para el país se encuentran en las fuentes eólicas, solar fotovoltaica, biocombustible y geotérmica, debido a sus grandes potenciales en las fuentes naturales, como la velocidad del viento en departamentos como la Guajira, la cantidad de radiación solar y las horas de brillo solar alcanzadas en sectores como las costas con órdenes de hasta 6.0 kWh/m²/d, valores por encima del promedio mundial, y una radiación promedio en el país de 4.5 kWh/m²/d [20] a lo largo del año al no experimentar fenómenos estacionales.

Según estudios sobre el potencial solar, las zonas más aptas para la producción de este tipo de energía son el departamento de la Guajira, la Costa Atlántica, la Orinoquía, la Amazonía, la Región Andina y la Costa Pacífica (muchas de éstas consideradas zonas no interconectadas [5]), con valores de perfil solar entre 2000 y 1550 W/h/m²/año [21] y valores máximos de velocidades de viento de 10 y 11 m/s.

Colombia ha demostrado gran interés por el abastecimiento de energía a través de fuentes renovables no convencionales, y se ha preocupado por dicha transición a través de la aprobación de la ley 1715 de 2014, donde se habilitan y promueven las actividades alrededor de los sistemas de generación de energías renovables. Más allá de la generación de energía, existe también una preocupación latente por la reducción del efecto invernadero y la mitigación del cambio climático para la disminución de las emisiones de Co₂, obligación adquirida por Colombia con su participación en el Acuerdo de París [22] y los objetivos de desarrollo sostenible.

En los departamentos del Magdalena, Cundinamarca, Valle del Cauca, Antioquia, Caldas y la Guajira, se ha desarrollado la energía renovable con una producción total de más de 30 MW en aplicaciones como sistemas solares fotovoltaicos (Celsia solar Yumbo) para la generación de energía eléctrica tanto distribuida como aislada, un parque eólico en la Guajira (Jepirachi), sistemas híbridos solar-fotovoltaicos y calentadores solares domésticos [23].

Se han desarrollado también sistemas de generación híbrida, generalmente solar-diésel (Bolívar), específicamente la ZNI de Isla Fuerte, Santa Cruz de Islote y Múcura, y en la Guajira Macuira-Flamencos, entre los años 2013 y 2014 [5]. Así como la microrred solar-diésel en Punta Soldado en el Pacífico Colombiano en el año 2016 [24][25]. Estos proyectos han electrificado a más de 3,000 colombianos.

Los paneles solares fotovoltaicos fueron inicialmente utilizados como base para el funcionamiento de las telecomunicaciones y las antenas satelitales en áreas rurales; sistemas que funcionan en la actualidad, pero que han resultado relativamente poco eficientes debido a problemas como el deficiente mantenimiento y calidad del servicio, de los cuales no se han encontrado estudios muy rigurosos [26]. Actualmente, existen más de 13,000 usuarios que cuentan con servicio de energía eléctrica a través de soluciones solares fotovoltaicas individuales en las ZNI [27].

Colombia tiene una gran oportunidad para generar desarrollo a partir del uso de fuentes renovables, algunos de los impactos que tendría son, menor vulnerabilidad del sector eléctrico debido al cambio climático y el tipo de matriz energética principalmente hídrica; lograr la meta de la universalización de la energía, disminución de los precios del combustible fósil, generación de empleos locales, y aumento de la competitividad global al desarrollar tecnologías de generación de energía renovable [1].

Actualmente, el país tiene el propósito de electrificar a más de 2 millones de colombianos, a través de cuatro estrategias puntuales. Densificación de las redes existentes del sistema de distribución local (9%), la implementación de microrredes o sistemas híbridos (48%) y soluciones fotovoltaicas individuales aisladas (43%), para lo cual debe invertir cerca de \$7.4 billones de pesos [28]. A nivel internacional se ha demostrado que la implementación de sistemas renovables para la electrificación rural es un camino exitoso, en especial las microrredes han tenido un interés particular, debido a las grandes ventajas que proporciona al funcionar con diferentes fuentes de energía locales y a la seguridad del sistema [29].

Además de la electrificación, los sistemas híbridos en ZNI tienen el propósito de generar desarrollo a partir de estrategias productivas que incrementen los ingresos de la comunidad y de esta manera puedan mantener y pagar el costo del servicio de la electricidad [30], es por ello que el diseño de estos proyectos debe realizarse de una manera integral, considerando todos los factores y criterios que puedan afectar la sostenibilidad de los mismos.

Múltiples investigaciones en el campo de la energía han dejado evidencia de los criterios utilizados para la selección de la mejor alternativa en la planeación de la cobertura tanto en el sector urbano como rural. Los factores más ampliamente utilizados son los técnicos y económicos [31], sin embargo los factores ambientales y sociales han tomado fuerza en los últimos años [32]. En la medida en que los proyectos consideren todos estos criterios, la confiabilidad en su implementación es mayor.

A partir de la revisión de [33] parece ser que los factores como, eficiencia, capacidad instalada, costo de la inversión, costo de la operación y mantenimiento, emisiones de CO₂, uso de la tierra, creación de empleo y aceptación social, son los factores fundamentales que permiten la toma de decisiones de los interesados. A pesar de ello, se han identificado en la literatura las dificultades que tienen estas comunidades para acceder a los servicios y productos de energía debido a los elevados costos de inversión inicial [30] [12], lo cual parece no estar siendo considerado en los análisis multicriterio. La asequibilidad (*affordability*) y los análisis financieros, brillan por su ausencia en los criterios generales y específicos de estas técnicas para la toma de decisiones en inversión de sistemas renovables de energía en comunidades aisladas de bajos ingresos en países en vía de desarrollo.

Las herramientas de cálculo que se tienen a disposición para la evaluación financiera de dichos proyectos son las metodologías para el cálculo del costo total (COE) y el costo nivelado de energía (LCOE), las cuales permiten comparar los costos del proyecto sobre su vida útil. Herramientas como HOMER permiten el análisis, diseño, evaluación y optimización técnico- económicas de soluciones híbridas, aun así, la línea base que se propone desde la Unidad de Planeación Minero Energética y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), son (entre otras), esquemas empresariales novedosos y uso de herramientas de evaluación técnico-económicas.

Se han realizado estudios e investigaciones para el diseño de sistemas híbridos o microrredes eléctricas [34] [35] [36], apoyándose en el software HOMER, el cual asiste el cálculo del potencial de energía requerido en la salida de la red, considerando las demandas actuales de los usuarios para poder dimensionar el sistema. Los costos asociados al proyecto equivalen únicamente a la estimación de los costos netos de la red en temas de inversión inicial, reemplazo, operación, mantenimiento y salvamento. Los estudios se enfocan en el factor de viabilidad técnica, pero existen barreras y dificultades para estimar la viabilidad económica y financiera que garantice la autosostenibilidad del sistema.

El desarrollo e implementación de modelos financieros sostenibles novedosos son necesarios para llegar a los usuarios más necesitados y con menos capacidad financiera, ya que son ellos quienes requieren estas soluciones para mejorar su calidad de vida y lograr desarrollo

productivo de sus comunidades [37]. Sin un claro diseño financiero, la mesa de las cuatro patas de la sostenibilidad quedaría coja.

Comprometidos con los ODS 2015-2030 del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el país ha demarcado como propósitos institucionales las acciones que la comunidad académica y científica puedan aportar a los objetivos. Adicionalmente la Universidad Autónoma de Manizales ha definido dentro de sus objetivos institucionales aportar a los ODS número: 3,4,8,9,13 y 16. El impacto de este proyecto de investigación estará en el marco del desarrollo de los ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico, 13: Acción por el clima y 7: Energía asequible y no contaminante.

Surgen entonces nuevas inquietudes acerca de cómo formular proyectos auto sostenibles con modelos financieros novedosos y esquemas empresariales locales, para realizar una eficiente AOM, especialmente de fuentes de energía renovables como la energía solar, eólica y biomasa, de las cuales el país goza de gran potencial.

2. OBJETIVOS DE LA TESIS

El presente ítem tiene como propósito definir el objetivo general de la tesis de investigación y los objetivos específicos que fueron necesarios para el desarrollo el proyecto.

El ítem se organiza en dos subsecciones, donde se describirá el objetivo general del proyecto y tres (3) objetivos específicos.

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un modelo técnico, económico y financiero asequible en sistemas energéticos, basado en microrredes de fuentes renovables para la electrificación rural.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar un modelo técnico para una microrred de fuentes renovables de energía para una zona no interconectada en Colombia específicamente en la comunidad de La Plata bahía Málaga, considerando recursos energéticos locales.
2. Determinar el impacto económico del sistema de generación de microrredes para la ZNI del caso de estudio.
3. Desarrollar un modelo financiero sostenible y asequible para el usuario de microrredes dentro de la ZNI caso estudio.

3. MARCO REFERENCIAL

En el marco referencial se encuentra contenido el marco conceptual y teórico, así como el estado del arte, marco contextual y marco regulatorio del estado actual de las zonas no interconectadas de Colombia, así como los conceptos relacionados con los proyectos de electrificación rural a nivel nacional e internacional. Se hace especial énfasis en los factores técnicos, económicos y los modelos financieros de electrificación rural, siendo este el principal enfoque de esta investigación.

Adicional a ello, el marco referencial contiene las teorías y conceptos relacionados con la situación económica actual de las comunidades en las zonas no interconectadas de Colombia y los posibles impactos que podría traer un sistema de generación de energía renovable en los indicadores socio económicos como índice de pobreza multidimensional y pobreza monetaria, así como los indicadores productivos como ingresos, gastos y ahorro promedio, tiempos de actividades productivas y tipos de gastos.

3.1 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Esta sección tiene el propósito de exponer los conceptos y teorías abordadas en el proyecto de investigación de modelos técnico, económico y financieros de los proyectos de electrificación rural en zonas no interconectadas colombianas.

Esta sección se organiza en quince subsecciones, donde se encontrarán conceptos como zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia, pobreza energética, energía renovable, microrredes y sistemas híbridos, modelos técnico económicos, modelos financieros, sostenibilidad, índice de pobreza multidimensional, entre otros.

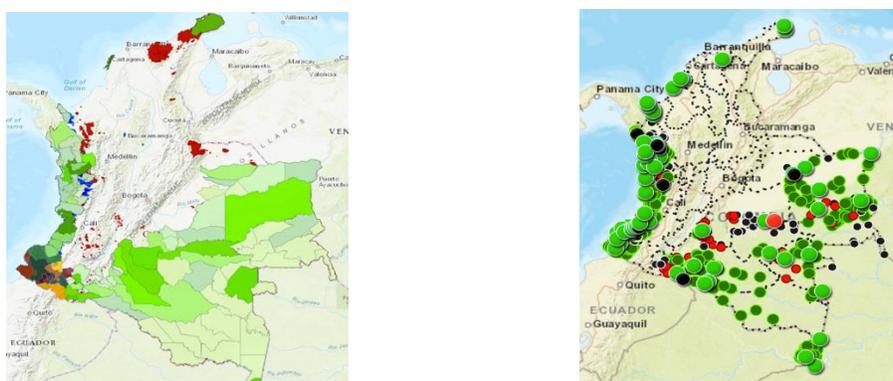
3.1.1 Zonas No Interconectadas en Colombia

Colombia es un país de generación centralizada debido a que la población del territorio se estableció alrededor de los ríos Cauca y Magdalena, corrientes de agua que atraviesan el país de norte a sur entre las cordilleras oriental, central y occidental. La zona mencionada ha sido electrificada en gran medida con energía hidroeléctrica y es llamado Sistema Interconectado Nacional (SIN), mientras que las Zonas No Interconectadas (ZNI) hacen referencia a los alrededores del país donde se situó el resto de la población, la cual está siendo abastecida en algunos casos por termoeléctricas a gas y a carbón y en zonas aún más alejadas con la venta de combustible como el diésel, sistemas solares fotovoltaicos (FV) e híbridos solar-diésel.

El SIN está compuesto por plantas y equipos de generación, la red de interconexión, las redes regionales e interregionales de transmisión, redes de distribución y las cargas eléctricas de los usuarios. Las ZNI son los municipios, corregimientos, localidades y caseríos no interconectados al SIN [38].

Las ZNI en Colombia pertenecen a 20 departamentos (Figura 5, Tabla 1). estas zonas se caracterizan por tener baja densidad poblacional, lo que produce poco consumo y a su vez baja prioridad en la electrificación. Se identifican por tener un índice de necesidades básicas insatisfechas (NBI) mayor al 77%, son zonas de baja densidad poblacional debido a su alta dispersión, bajo nivel de consumo promedio, baja capacidad de pago, bajo nivel de recaudo, altos costos de prestación de servicio de energía eléctrica, alto nivel de pérdidas, bajo nivel de medición, con un promedio ponderado de 8.8 horas de servicio al día y una demanda total de energía de aproximadamente 384,812 MWh [10] [5] [7] [28].

Figura 5. Zonas No Interconectadas en Colombia a) Comunidades Afro y Resguardos Indígenas (Rojo). B) Con servicio de electricidad por horas (Puntos verde), Sin servicio (Puntos rojo), sin información (punto negro).



Fuente: IPSE Centro Nacional de Monitoreo

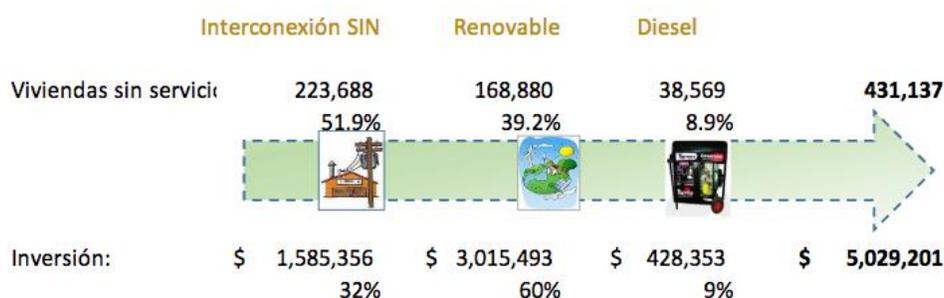
Tabla 1. Caracterización de las ZNI en Colombia

ZNI	20 departamentos
	52% del territorio Nacional
	74 municipios
	20 territorios especiales biodiversos y fronterizos
	1702 localidades
	Capacidad operativa de los prestadores: 280.38MW
	Capacidad operativa de fuentes renovables: 14.1MW
Áreas de acción del IPSE	Amazonas, Antioquia, Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Bolívar, Caquetá, Casanare, Cauca, Chocó, Guainía, Guaviare, la Guajira, Meta, Nariño, Putumayo, Valle del Cauca, Vaupés, Vichada.
Comunidades Étnicas	1,378,884 personas. Afrocolombianos, población ROM (Gitana), Raizales. Ubicados en Chocó, valle, Bolívar Cauca (Afro), Caquetá, Meta, Arauca; Nariño, Casanare (ROM), San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Raizales).

Fuente: [39]

Según el Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica (PIEC) 2016-2020, se requieren alrededor de \$5 billones de pesos para la universalización de la energía eléctrica en Colombia. De acuerdo a este plan, el 51% de las viviendas que aún no tienen el servicio de electricidad serían conectadas al SIN por medio de inversiones en redes de transmisión y distribución, mientras que el 39.2% sería electrificado con ER y el 8.9% restante se subsidiará a partir de combustible diésel, tal como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. PIEC 2016-2020



Fuente: [7]

3.1.2 Pobreza Energética

La pobreza energética está definida por la corte constitucional (sentencia C-565/17, 08 de septiembre de 2017, magistrada ponente: Diana Fajardo Rivera) como “*Aquella condición en la que un persona o núcleo familiar: (i) es incapaz de pagar una cantidad mínima de electricidad para la satisfacción de sus necesidades domésticas (calefacción, iluminación, refrigeración y cocción de alimentos) o; (ii) en los eventos en que se ve obligada a destinar una parte excesiva de sus ingresos a pagar la factura energética de su vivienda.*”

Un estudio realizado en el año 2013 acerca del índice de pobreza energética en el país, indica que en Colombia el 23% de los hogares pueden considerarse pobres multidimensionalmente en energía y que los niveles más altos de pobreza se encuentran en el departamento del Valle del Cauca, en la región Pacífica [40].

3.1.3 Energía Renovable (ER)

El desarrollo tecnológico de fuentes no convencionales de energía renovable es una actividad esencial a consecuencia de los compromisos adquiridos por Colombia para la reducción de las emisiones contaminantes, la disminución de la pobreza, la electrificación del 52% del territorio nacional que aún no tiene el recurso [5], el mejoramiento de la eficiencia y el aumento de la capacidad de los sistemas energéticos actuales [3]; así como la disminución del consumo de fuentes fósiles, y la generación de ventaja competitiva.

A nivel mundial se definen tres factores que impulsan la utilización de las energías renovables, el permanente crecimiento del consumo energético mundial, el alto impacto de las fuentes de generación de energía que utilizan combustibles fósiles (más del 80% de la generación de electricidad actual) [1] y, el fin de la era del petróleo para combustible estimado entre el 2020 y el 2050.

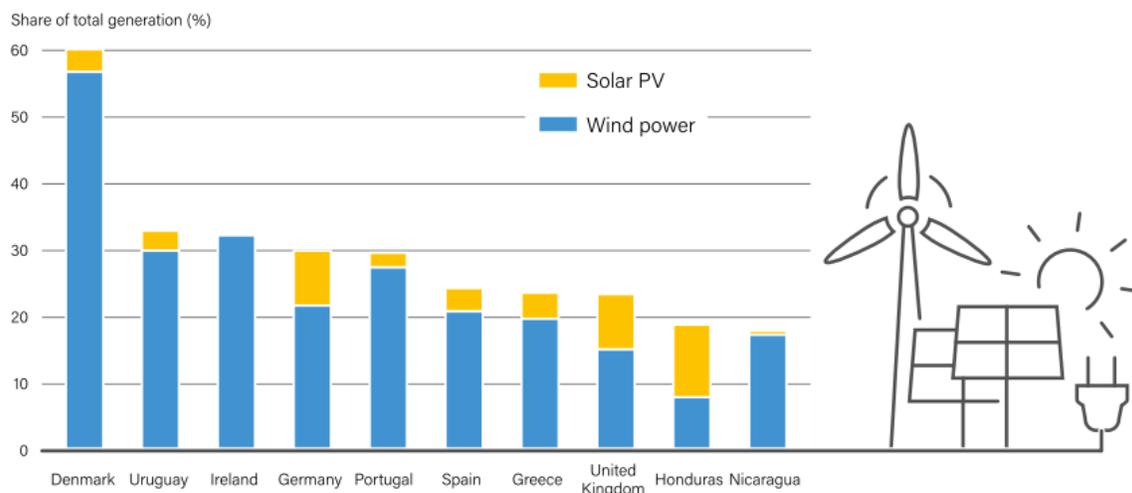
Las fuentes de energía renovable son aquellas que utilizan como fuente primaria de energía la obtenida de recursos naturales inagotables. Son consideradas como fuentes renovables la energía solar térmica, energía solar fotovoltaica, la energía eólica, la energía mareomotriz, la energía de la biomasa, la energía geotérmica, entre otras.

La utilización de energías limpias a nivel mundial es muy importante para la conservación del medio ambiente, para evitar el efecto invernadero y mejorar la calidad de vida de las poblaciones ubicadas en zonas marginadas y de difícil acceso.

Las energías renovables están en auge y se han establecido en todo el mundo, las iniciativas más importantes en la adquisición de estas fuentes de energía son los compromisos medioambientales por la reducción de las emisiones de dióxido de carbono, las ventajas competitivas en la producción de energía, los mercados emergentes, la productividad de las nuevas tecnologías, los beneficios adquiridos financieramente, la no dependencia de las fuentes fósiles que se escasean en el mundo y el desarrollo sostenible. En el 2019, la energía renovable generó un 27.3% en el consumo final mundial de energía [17] (Figura 8).

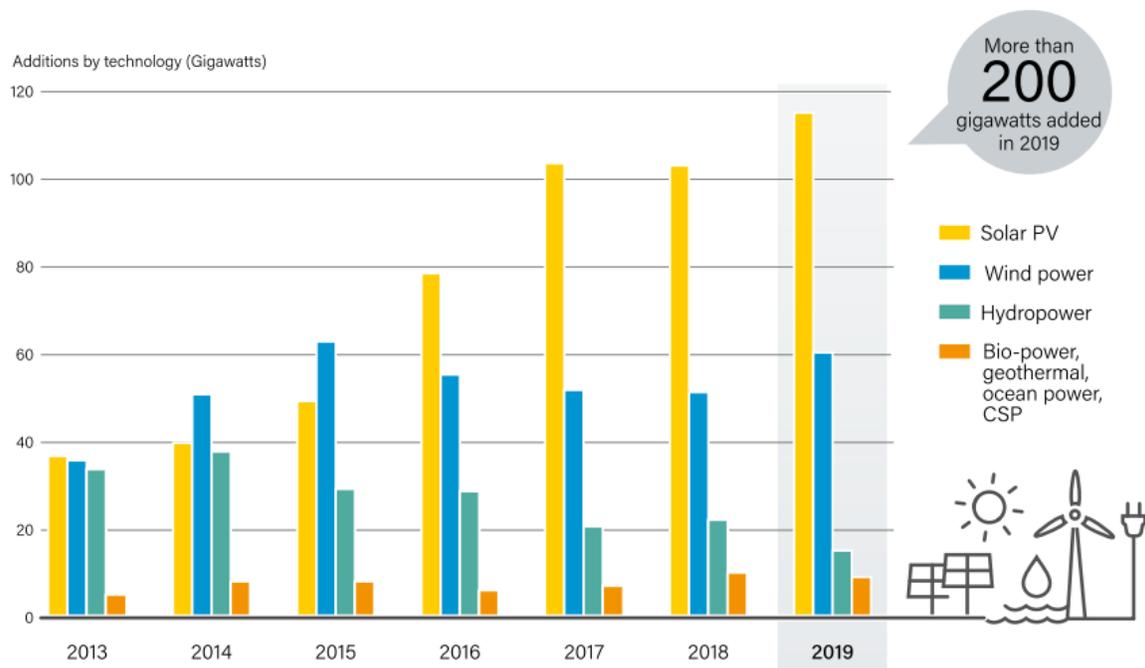
La Figura 7 muestra los países líderes en generación de energía renovable con China a la cabecera, Alemania, España, y Estados Unidos, países pioneros en el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de la energía hidráulica, eólica, solar, geotérmica y de las biomasas, como fuentes de origen renovable [1].

Figura 7. Capacidades de energía renovable en el mundo. Los 10 países líderes



Fuente: [17]

Figura 8. Adiciones anuales de capacidad en energías renovables por tecnología, 2013-2019



Fuente: [17]

Las estadísticas internacionales muestran la preferencia por la explotación de las fuentes solares fotovoltaicas y eólicas debido a su fácil acceso, a las condiciones climáticas de los países y a su transformación. La energía eólica y la solar fotovoltaica, han tenido altas inversiones en nuevas instalaciones. Bangladesh es el mayor mercado del mundo para sistemas solares domésticos, mientras que otros países como Kenia, Uganda y Tanzania en África; China, India y Nepal en Asia; Brasil y Guyana Francesa en América Latina, están experimentando una rápida expansión de sistemas renovables a pequeña escala para regiones no interconectadas [18].

3.1.4 Tipos de Generación

3.1.4.1 Sistemas Solares Fotovoltaicos

Son sistemas de generación de energía eléctrica renovable no convencional, conformado por una serie de celdas o paneles solares conectados (en serie, paralelo o ambas) para maximizar la potencia generada. Pueden transformar la radiación solar en energía eléctrica a partir de un arreglo eléctrico donde intervienen elementos como reguladores, inversores, cableado y en la mayoría de los casos, baterías para almacenar la energía generada por el panel solar.

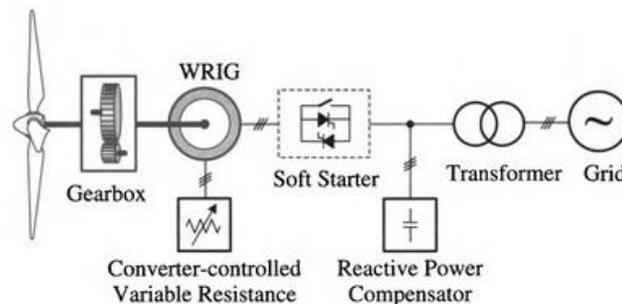
La planeación del emplazamiento óptimo de la central fotovoltaica es un factor necesario para el desarrollo de los sistemas tecnológicos de tal manera que maximice sus ingresos y reduzca los costos de la inversión [41], minimizando la incertidumbre en el productividad

del sistema, aspecto que facilita el análisis de factibilidad de este tipo de proyectos tecnológicos.

3.1.4.2 Sistemas Eólicos

Son sistemas que transforman la energía cinética contenida en el viento en energía potencial a través de turbinas eólicas. Está compuesto por una turbina, un rotor de interruptor, un generador y un convertidor como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Configuración de una turbina eólica



Fuente: [42]

La generación eólica depende de variables determinantes en la cantidad de energía que puede extraerse del viento, algunos de estos son: la potencia nominal, el diámetro de la turbina, la velocidad de la turbina, la velocidad y dirección del viento, la caja de cambios, las características del convertidor, la altura de aerogenerador, entre otras.

Un generador eólico puede producir energía a partir de una velocidad del viento de 3m/s. La eficiencia considerada en estos sistemas oscila entre 20% y 25% de capacidad de extracción.

3.1.4.3 Biomasa

Es la materia viva presente en la biosfera, así como los residuos de los procesos de transformación de recursos naturales en productos, clasificándose en biomasa natural y biomasa residual. Las fuentes más comunes de generación de biomasa son: actividades agroindustriales, residuos forestales, cultivos energéticos, estiércol de animales y residuos urbanos, entre otros.

En la composición de la biomasa se encuentran grandes cantidades de carbono, oxígeno e hidrógeno. Las cadenas de C_nH_m , constituyen los compuestos involucrados en las reacciones exotérmicas generadoras de energía [43].

Los procesos de conversión térmicos y biológicos son los que se aplican a la biomasa para generar energía, y convertirla en combustibles gaseosos, líquidos o sólidos, a partir de los cuales se puede obtener calor, electricidad o fuerza motriz.

3.1.4.1 Sistemas Híbridos, Microrredes (*MicroGrids*)

También denominadas miniredes (*MiniGrids*) o sistemas híbridos. Son sistemas de generación y distribución de energía eléctrica que proporciona electricidad a pocos usuarios de una comunidad remota o a centros poblados con mayor densidad poblacional [44].

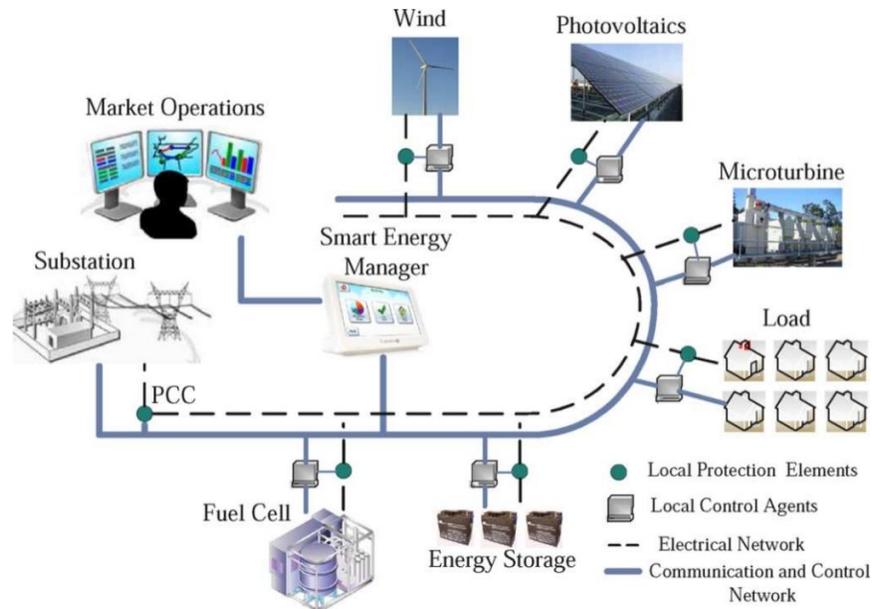
Técnicamente, las microrredes tienen ventajas sobre los sistemas de generación convencionales como, su capacidad de autoabastecerse y funcionar autónomamente, versatilidad en el funcionamiento con fuentes renovables y no renovables, brindando disminución en los indicadores de volatilidad e incertidumbre [45].

Las microrredes de energía tienen la capacidad de funcionar con fuentes renovables de energía como se muestra en la Figura 10, lo que favorece el escenario debido a su volatilidad e incertidumbre. La electrónica de potencia es la encargada de garantizar el funcionamiento y control de las fuentes para la generación.

En comparación con los sistemas eléctricos comunes, estos comprenden la generación, distribución y transmisión en un solo sistema, adicional a ello cuentan con tecnología digital que genera un flujo bidireccional entre generadores y consumidores.

Una de las virtudes más importantes de la microrred es la confiabilidad que le brinda al sistema al garantizar la continuidad del servicio eléctrico, aun cuando algún componente del sistema no produzca energía por deficiencia en la fuente de abastecimiento que puede ser renovable (radiación solar, viento, biomasa, biogás) o no renovable (combustibles fósiles).

Figura 10. Configuración de una Microrred

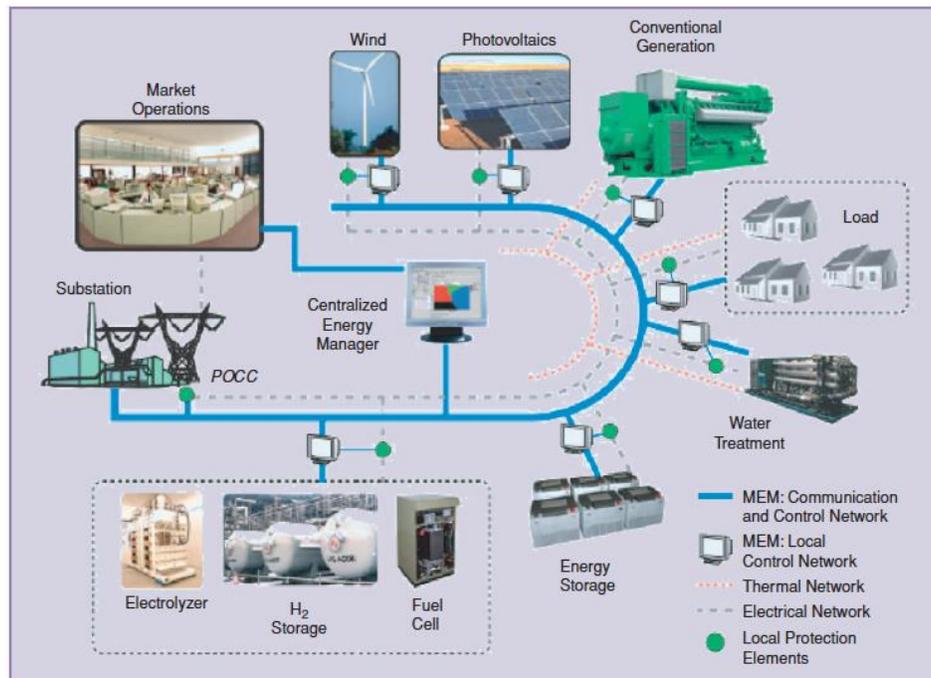


Fuente: [46]

Las microrredes han venido desarrollándose rápidamente, como una solución clave para la pobreza energética en todo el mundo, en especial, para comunidades geográficamente aisladas o con pobre acceso a dicho servicio.

Estos sistemas modernos de generación se han convertido en una gran alternativa para desplazar el uso de energías convencionales contaminantes, lograr la transición energética y electrificar a las regiones que aún no poseen el servicio. Las microrredes son muy útiles para aprovechar la fuente de energía con alto potencial en determinado momento, así la otra no esté produciendo, como por ejemplo en países con estaciones en donde la radiación solar es muy alta en la mitad del año y la velocidad del viento alcanza sus mayores valores en la época de invierno [47]. En la Figura 11 se puede apreciar a estructura de una microrred.

Figura 11. Estructura de una microrred

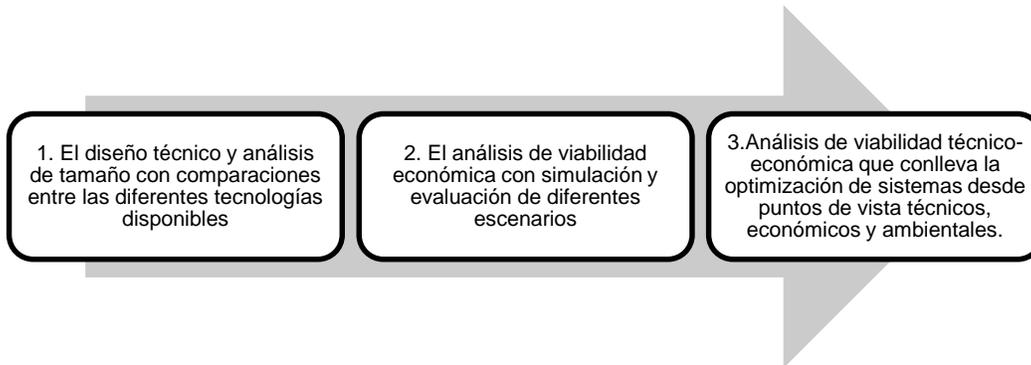


Fuente: [48]

3.1.5 Modelos Técnico-económicos

La mayoría de los trabajos de investigación que se consultaron para el planteamiento de esta investigación, utilizaron modelos y análisis técnico-económicos a través de la simulación, optimización y análisis de sensibilidad de los sistemas de generación de energía, adicional a ello, algunos trabajos utilizaron un enfoque probabilístico para calcular los índices de confiabilidad relevantes en el funcionamiento de los sistemas [49] [50] [51] [52]. Las fases de escritura de los artículos generalmente pasan por 3 etapas como se observa en la Figura 12.

Figura 12. Etapas de escritura de artículos de investigación que realizan análisis y aplican modelos técnico-económicos de sistemas de generación de ER



Elaboración propia

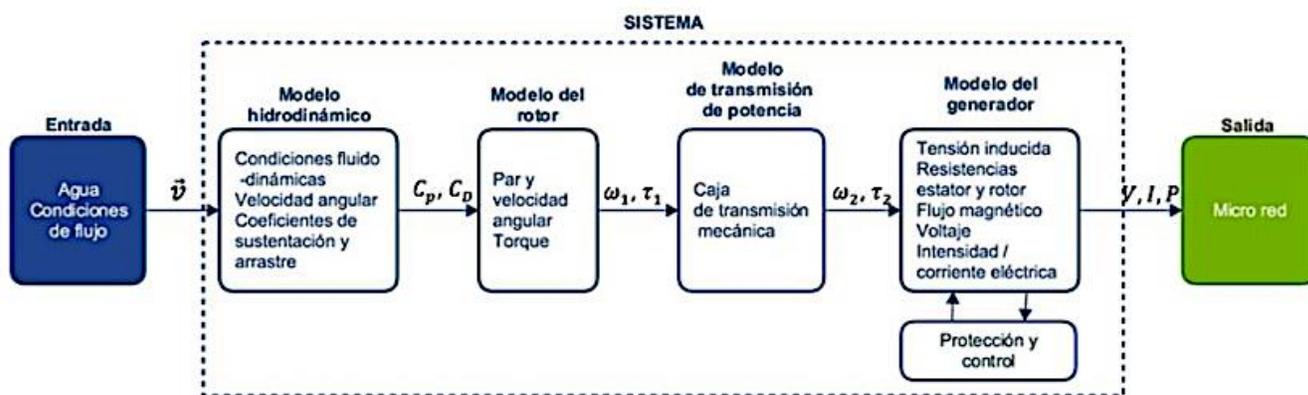
Los modelos y análisis técnico-económicos suelen dividirse en dos partes: los análisis técnicos y los análisis económicos, para evaluarse posteriormente de una manera integrada. Esto ha demostrado con el paso del tiempo que deja de lado aspectos relevantes como el factor ambiental, el sociocultural y financiero, que serán considerados en esta investigación.

3.1.5.1 Modelo Técnico

Los modelos técnicos de sistemas de generación de energía a partir de fuentes renovables en especial sistemas híbridos o microrredes, consisten en el diseño técnico de la combinación más eficiente de equipos de generación de energía que incluyen sistemas solares FV, sistemas eólicos, sistemas de biomasa, sistemas de biogás e hidrogenación para maximizar la energía entregada por el sistema, considerando las fuentes renovables disponibles en determinada región, tales como radiación solar, horas de brillo solar, velocidad del viento, dirección del viento, cantidad de residuos o recursos de biomasa disponible y afluentes de agua (dimensionamiento del sistema).

El modelado de los sistemas de generación de energía a partir de fuentes renovables varía según el tipo de sistema puesto que la transformación de energía a partir de fuentes solares, eólicas, hidro-energía o biomasa se realiza a través de procesos diferentes, considerando variables que afectan específicamente el sistema. Para ejemplificar un tipo de modelo de generación de energía, se tomará un modelo hidro-energético mostrado en la Figura 13.

Figura 13. Modelo hidro-energético



Fuente: [53]

3.1.5.2 Modelos económicos

Los modelos económicos aplicados para los análisis de los proyectos de generación de energía consideran cálculos de indicadores económicos y financieros, los cuales dependiendo de sus valores determinan si una inversión es económicamente viable especificando su costo total.

Los modelos económicos que se han trabajado en la literatura consultada para el desarrollo de esta propuesta involucran diferentes factores que aumentan la sostenibilidad y factibilidad de los proyectos [54] [55] [56] [57]. De esta manera, proyectos en donde se consideren la mayor cantidad de factores que podrían afectar la implementación del proyecto y su vida útil tales como elementos económicos, productivos, ambientales, sociales, culturales y técnicos, serán proyectos con un nivel mayor de confiabilidad para los inversionistas, los ejecutores y la comunidad beneficiada. Los factores que se han identificado se describen en los siguientes numerales.

3.1.5.3 Costo del proyecto de generación

Según los modelos investigados hasta ahora, para el cálculo de los costos totales del proyecto y los índices de factibilidad de una inversión son utilizadas las siguientes componentes:

- *ICC* (Costo de inversión inicial): costo de la instalación total de los equipos más los costos de la infraestructura.
- Tasa de descuento: tasa especial que otorga el gobierno a la ejecución de proyectos de energías renovables.
- *AOM*: porcentaje del capital inicial destinado a la administración, operación y mantenimiento.

- **EA** (Tasa de interés efectiva anual) %: tasa a la cual se incurre si el proyecto de implementación es financiado por una entidad bancaria. La tasa efectiva anual es definida por la entidad financiera.
- **LCOE**(\$ / kWh) Costo nivelado de energía:

$$\frac{Capex}{Opex} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + AOM_t + C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Donde se evalúa por cada año t , los I_t = gastos de inversión, AOM_t = costos de operación y mantención, C_t = costos de combustibles, E_t = electricidad generada, r = tasa de descuento y t = tiempo de vida de la planta.

- **COE**(US\$/ kWh) Costo nivelado considerando el valor presente de la inversión inicial:

$$COE = FRC * \frac{CI}{8760CF} + OM$$

Donde el **FCR** es el factor o cargo fijo de gastos, considerando un valor presente de servicios de deuda, retorno de capital, tasas de interés e impuestos, y seguros. El **CI** costo de inversión, el **CF** factor de capacidad y los **OM** costos directos de operación y mantenimiento por unidad de energía.

- **NPC** Costo presente neto (\$): $\frac{\text{Costo total anual}}{\text{Factor de recuperación del capital}}$
- Factor de recuperación de la inversión: $\frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1}$

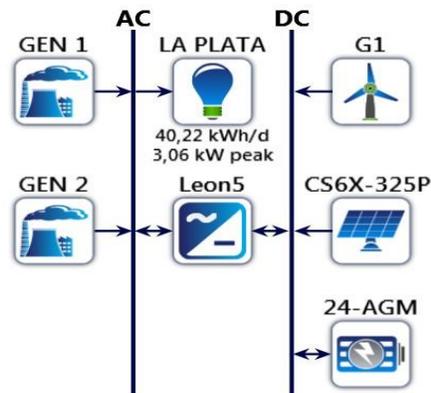
Donde N es el tiempo de vida del sistema e i es la tasa de interés anual.

3.1.5.4 Simulación, optimización y análisis de sensibilidad

Los estudios y análisis técnico-económicos de los sistemas de generación de energía consisten en el modelamiento del sistema, la simulación, la optimización y los análisis de sensibilidad, los cuales pueden realizarse de forma matemática o a través de software como el HOMER, Microgrid Lab, Opal RT, LEAP, entre otros.

Una vez se diseña el sistema para cumplir con la carga demandada y a partir de los recursos disponibles en la zona estudiada, se procede a realizar una optimización que define el diseño óptimo, basado en méritos técnicos y económicos. El diseño óptimo define el número de componentes requeridos como paneles FV, aerogeneradores, baterías, convertidor, entre otros equipos, tal como se muestra en la Figura 14.

Figura 14. Simulación de un sistema de generación en HOMER



Fuente: HOMER

La simulación en el software HOMER modela el rendimiento de una configuración particular del sistema de microrred cada hora del año, para determinar su viabilidad técnica y costo del ciclo de vida. En el proceso de optimización, HOMER simula diferentes configuraciones de sistema en busca del que satisface las restricciones técnicas al costo más bajo del ciclo de vida [58].

Adicional al dimensionamiento del sistema, es indispensable elaborar el modelo de optimización del despacho económico, el cual consiste en la minimización del costo de la generación del sistema para operar cada hora del día bajo las restricciones y condiciones tanto de las fuentes renovables como de la demanda y de los equipos o tecnologías que acompañan al sistema. La optimización de la operación del sistema puede hacerse más compleja y completa cuando se involucran las restricciones de la distribución de las redes del sistema, el control óptimo para el funcionamiento de las baterías y la estocasticidad (variabilidad o probabilidad de que la variable se mueva dentro de unos rangos naturales) de las variables del sistema.

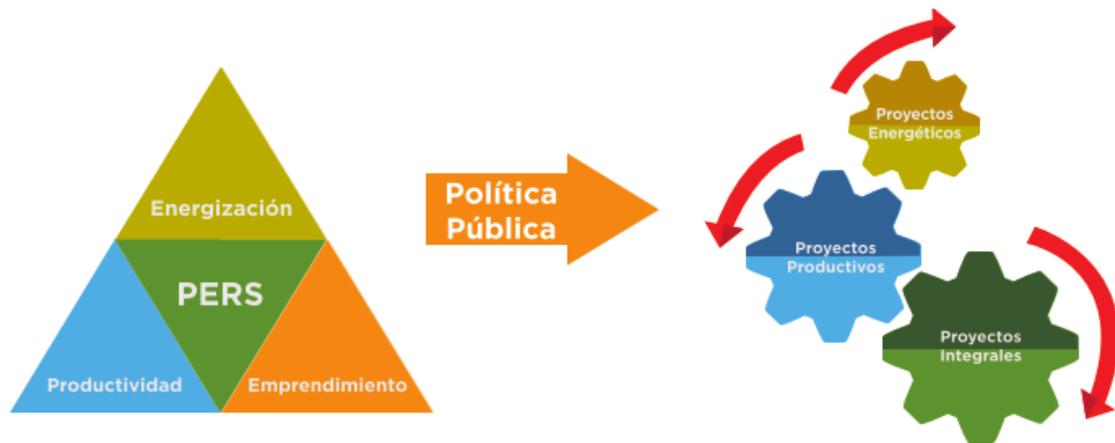
Para el proceso de simulación de microrredes de energía, se deben tener en cuenta variables técnicas, necesarias para optimizar la producción de energía a partir de una carga fija. Es por ello por lo que para el modelo técnico económico de una microrred se deben considerar variables e indicadores técnicos, económicos, de confiabilidad y ambientales. Algunos de ellos son:

- $ET(MWh)$ Energía total generada: suma de la energía generada por todos los sistemas.
- $EPV(MWh)$ Energía fotovoltaica: energía generada por el sistema solar fotovoltaico.
- $EW(MWh)$ Energía eólica: energía generada por el sistema eólico.
- $EB(MBTUh)$ Generador de biocombustible: energía generada por el generador de biocombustible o biogás.
- $LOLP(\%)$: probabilidad de pérdida de carga.

3.1.6 Sostenibilidad, energización, productividad y emprendimiento

En Colombia, los términos sostenibilidad, energización, productividad y emprendimiento para proyectos de electrificación en el área rural, son definidos en los planes de energización rural sostenible (PERS), los cuales son elaborados para establecer políticas energéticas públicas que vayan en sintonía con el entorno y planteen una visión de desarrollo de la región. Estas guías facilitan la identificación, formulación y estructuración de proyectos integrales y sostenibles en un período mínimo de 15 años, que además de generar energía, apoyen el crecimiento y el desarrollo de las comunidades rurales.

Figura 15. Estructura general de un PERS



Fuente: [13]

La sostenibilidad de los proyectos de energización sostenibles en el corto, mediano y largo plazo, está definida para un horizonte de 15 años, donde la comunidad pueda mantener en funcionamiento el sistema y beneficiarse de él, lo cual requiere contemplar diferentes dimensiones así:

- **Económica:** diseño que garantice su rentabilidad financiera y que los ingresos de los proyectos perduren en el tiempo.
- **Ambiental:** diseño con mínimo impacto sobre el medio ambiente, favoreciendo el uso de fuentes locales, preferiblemente renovables, que promuevan el uso de los desperdicios, que comprendan medidas de mitigación adecuadas y que no afecte el entorno socioeconómico de la región en forma negativa, forzando el traslado de habitantes o deteriorando la calidad del entorno ambiental de los mismos
- **Social:** diseño que favorezca la inclusión de la población local en el desarrollo y operación de requerimientos de energía.
- **Tecnológica:** diseños compatibles con el entorno social y económico, que las tecnologías sean probadas y eficientes y que la operación pueda ser realizada con la capacitación adecuada del talento humano local [13].

3.1.7 Índice de pobreza multidimensional (IPM)

El índice de pobreza multidimensional es un indicador que mide y define la población pobre en una región. Este evalúa la satisfacción o no privación de las personas, respecto a condiciones vitales que nos provee el medio, tales como, la educación, el empleo, los servicios públicos, la salud, entre otros [59].

Este indicador es calculado por el DANE a partir de la metodología de *Alkier y Foster*, con un enfoque de punto de corte dual, en donde se considera que una persona es pobre si sufre privaciones en al menos k dimensiones, a partir de un punto de corte en cada dimensión y de todas privaciones.

El IPM en Colombia tiene 5 dimensiones y 15 indicadores. Los hogares son considerados pobres multidimensionalmente cuando tienen privación en por lo menos el 33% de los indicadores definidos. Cabe resaltar que la unidad de análisis es el hogar mas no el individuo. Si un hogar se encuentra privado en alguna dimensión, todos los habitantes del hogar estarán privados. En la Tabla 2 se pueden apreciar todos los componentes del IPM con sus definiciones y ponderaciones.

Tabla 2. Dimensiones e Indicadores del índice de pobreza multidimensional en Colombia

Dimensión y ponderación	Indicador y ponderación	Descripción	Puntos de corte para la privación
Condiciones educativas del hogar (0.2)	Bajo logro educativo (0.1)	Escolaridad promedio de las personas de 15 años y más del hogar	Menor a 9 años
	Analfabetismo (0.1)	Porcentaje de personas del hogar de 15 años y más que no saben leer y escribir	Mayor 0 (al menos una persona no sabe leer y escribir)

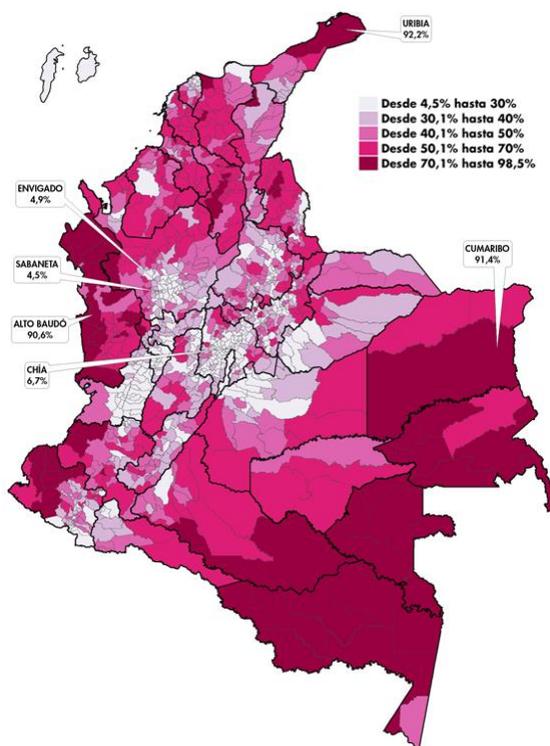
Condiciones de la niñez y la juventud (0.2)	Inasistencia escolar (0.05)	Proporción de niños, niñas y adolescentes (NNA) entre 6 y 16 años en el hogar que no asisten al colegio	Mayor a 0 (al menos un NNA no asiste al colegio)
	Rezago escolar (0.05)	Proporción de NNA (7-17 años) dentro del hogar con rezago escolar (según la norma nacional)	Mayor a 0 (al menos un NNA tiene rezago escolar)
	Barreras a servicios para cuidado de la primera infancia (0.05)	Proporción de niños de cero a cinco años en el hogar sin acceso a servicios de salud o que pasa la mayor parte del tiempo con su padre o madre en el trabajo, en casa solo, o está al cuidado de un pariente menor de 18 años	Mayor a 0 (al menos un niño(a) tiene barreras de acceso a salud o cuidado)
	Trabajo infantil (0.05)	Proporción de niños, niñas y adolescentes entre 12 y 17 años en el hogar que se encuentran ocupados	Mayor a 0 (al menos un NNA se encuentra ocupado)
Trabajo (0.2)	Tasa de dependencia económica (0.1)	Número de personas por miembro ocupado en el hogar	Mayor o igual a 3
	Trabajo informal (0.1)	Proporción de la Población Económicamente Activa (PEA) del hogar que son ocupados y no cotizan a fondo pensiones. Para la construcción del indicador se utilizó información del registro de la PILA teniendo en cuenta que el CNPV 2018 no contó con información de afiliación en pensiones	Mayor a 0 (al menos una persona ocupada que no está afiliada a pensión)
Salud (0.2)	Sin aseguramiento en salud (0.1)	Proporción de miembros del hogar mayores de cinco años sin aseguramiento a Seguridad Social en Salud. Para el cálculo de este indicador se tomó la información de registros administrativos del BDU-A-BDEX3 teniendo en cuenta que el CNPV 2018 no incluyó dicha información. El indicador genera privación para los estados de afiliación: desafiliado, retirado e interrumpido por viaje al exterior. Para las personas que no fue posible extraer la información del estado de afiliación desde la BDU-A y BDEX no se genera privación con excepción de aquellos que cuentan con documento de identificación consistente registrado en el CNPV 2018.	Mayor a 0 (al menos una persona que no está asegurada en el SSS)
	Barreras de acceso a servicios de salud (0.1)	Proporción de personas del hogar que no acceden a servicio institucional de salud ante una enfermedad que no requiere hospitalización en los últimos 30 días	Mayor a 0 (al menos una persona que tuvo un problema de salud que no requiere hospitalización en los últimos 30 días y no recurrió a servicio institucional)
Vivienda y servicios públicos (0.2)	Sin acceso a fuente de agua mejorada (0.04)	Hogar urbano: se considera como privado si no tiene servicio público de acueducto en la vivienda Hogar rural: se considera privado cuando obtiene el agua para preparar los alimentos de pozo sin bomba, agua lluvia, río, manantial, carro tanque, aguatero, agua embotellada o en bolsa	
	Inadecuada eliminación de excretas (0.04)	Hogar urbano: se considera como privado si no tiene servicio público de alcantarillado Hogar rural: se considera como privado si tiene inodoro sin conexión, letrina, bajamar o no tiene servicio sanitario	

	Material inadecuado de pisos (0.04)	Se consideran en privación los hogares que tienen pisos en tierra	
	Paredes exteriores inadecuadas (0.04)	Hogar urbano: se considera privado si el material de las paredes exteriores es madera burda, tabla, tablón, guadua, otro vegetal, zinc, tela, cartón, desechos o sin paredes Hogar rural: se considera privado si el material de las paredes exteriores es guadua, caña, otro vegetal, zinc, tela, cartón, desechos o sin paredes	
	Hacinamiento crítico (0.04)	Número de personas por cuarto para dormir excluyendo cocina, baño y garaje e incluyendo sala y comedor	Urbano: 3 o más personas por cuarto Rural: Más de 3 personas por cuarto

Fuente: [60]

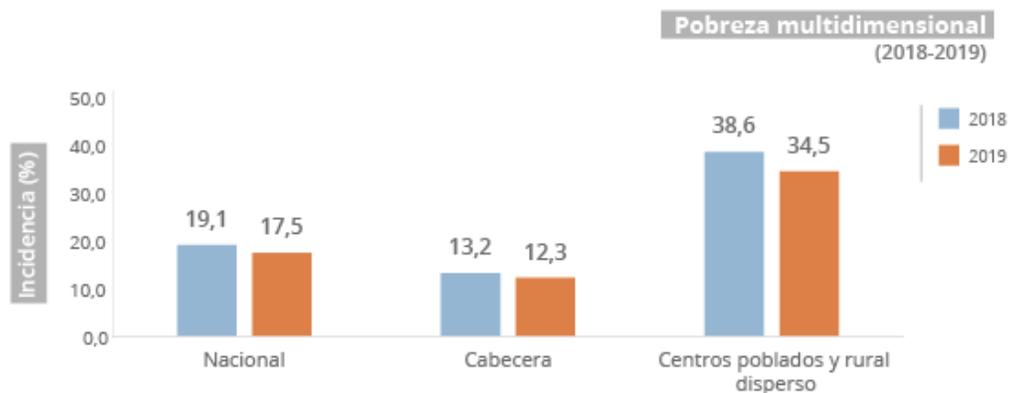
Para el año 2018, el IPM en Colombia alcanzó un valor de 19.1%, y para el 2019 1.6 puntos porcentuales menos que en 2018 (17.5%), con mayores niveles de pobreza en las regiones Pacífica, Orinoquía y Amazonía (Figura 16 y Figura 17)

Figura 16. Niveles de pobreza multidimensional en Colombia – Censo 2018



Fuente: DANE – IPM 2018

Figura 17. Pobreza multidimensional en Colombia – 2018 2019



DANE – IPM 2019

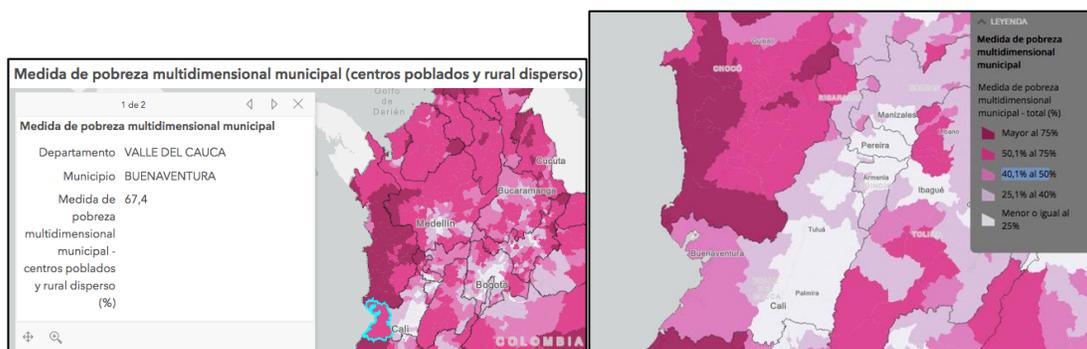
Según el informe de desarrollo económico de la gobernación del Valle del Cauca [61], en el municipio de Buenaventura el porcentaje de personas pobres multidimensionalmente ha venido incrementando entre los años 2013 a 2015, convirtiendo a este municipio en uno de los más pobres en el departamento (Figura 18, Tabla 3).

Tabla 3. IPM Buenaventura – Valle del Cauca

Censo 2005	2013	2014	2015	Censo 2018
34.52% Cabecera Municipal	34.83%	38.68%	44.08%	41% Cabecera Municipal
47.32.4% Centros Poblados y Rural disperso				67.4% Centros Poblados y Rural disperso

[61] [62]

Figura 18. DANE Mapas Arcgis. IPM Buenaventura



(DANE Maps)

A pesar de que el IPM en el municipio de Buenaventura es tal alto y ha aumentado a través de los años en especial para los centros poblados y el área rural disperso, el gobierno nacional se ha comprometido a disminuir el índice nacional (19.6% en 2018) a un 8.4% en el 2020, en el marco de los ODS y el Compes 3918 de 2018.

3.1.8 Modelo Financiero

Un modelo financiero es una representación matemática de algunos o todos los aspectos de la actividad económica de una empresa o de un negocio con el fin de representar su funcionamiento. Su objetivo es predecir con precisión el precio o el rendimiento. El modelo involucra los precios de los activos, movimientos del mercado, rendimientos, tipos de interés, créditos, modelado en periodos de tiempo, el modelado de riesgos financieros (VAR) etc.

Los modelos financieros en el área de las ER son enfoques desarrollados y adoptados para fomentar la inversión en proyectos que pretenden generar energía eléctrica a partir de fuentes renovables de energía eléctrica.

Los modelos financieros para los proyectos de generación de energía pretenden responder las siguientes preguntas, ¿qué se va a instalar para cubrir con la demanda de energía?, ¿cuánto va a costar?, ¿a quiénes va a afectar?, ¿cómo se va a pagar?, ¿cuál es la tarifa que garantiza sostenibilidad?, ¿cuál es el retorno sobre la inversión? y ¿cuáles son los riesgos de la inversión?

El contexto financiero para las energías renovables se caracteriza por ser de alto riesgo para los inversionistas, debido a los altos costos de inversión inicial, periodos largos de financiamiento, altas tasas de retorno de la inversión, incertidumbre en la disponibilidad de la fuente solar y eólica (debido a su naturaleza) y desconocimiento de las entidades financiadoras en temas tecnológicos y económicos en el área de las ER [63] [64]. Aun así, países como Estados Unidos y Bangladés han propuesto e implementado modelos de financiamiento para impulsar el desarrollo de este tipo de tecnologías que favorezcan a comunidades pobres con sistemas eléctricos subdesarrollados [65].

Otras dificultades identificadas alrededor del financiamiento de los proyectos en áreas que aún no poseen el servicio de la electricidad están asociadas a que dichas comunidades no poseen un sistema económico productivo consolidado con el cual se puedan realizar estudios crediticios, historial financiero, así como un obsoleto sistema de recaudo de dinero para el pago del crédito a las entidades bancarias, por insuficiente acceso a tecnologías de la información y la comunicación.

Algunos modelos de financiación adoptados por las entidades bancarias, cooperativas y organizaciones no gubernamentales (ONG) son, líneas de financiamiento verde (créditos y bonos verdes), líneas de redescuento, microfinanzas, entre otras.

3.1.9 Microfinanzas o Microcréditos

Es un modelo financiero que ofrece préstamos a personas o pequeñas empresas que carecen de acceso a los servicios bancarios [65]. El modelo ha sido impulsado por organizaciones no gubernamentales, cooperativas e instituciones del gobierno. El modelo surgió en Bangladesh a través del *Grameen Bank* y se ha replicado en múltiples países.

Actualmente en Colombia existen 47 entidades financieras que ofrecen este servicio, aún así el Banco de la República de Colombia refiere que la percepción del servicio se encuentra entre el 0.1% y el 0.3%.

3.1.10 Asociaciones Público-Privadas (APP)

“Es un instrumento de vinculación de capital privado, que se materializa en un contrato entre una entidad estatal y una persona natural o jurídica de derecho privado, para la provisión de bienes públicos y de sus servicios relacionados, que involucra la retención y transferencia de riesgos entre las partes y mecanismos de pago, relacionados con la disponibilidad y el nivel de servicio de la infraestructura y/o servicio” [15].

Las APP surgen a consecuencia de las crisis por bajas coberturas y servicio con deficiente calidad en la prestación de servicios públicos que estaban a cargo exclusivamente del gobierno nacional en los años 90. Las APP han tenido gran participación en el desarrollo de la infraestructura colombiana bajo la ley 1508 de 2012 en la construcción de la cuarta generación de concesiones viales, construcción, dotación y operación de colegios, construcciones en la infraestructura carcelaria, el sector cultural, salud, entre otros.

En términos de las ZNI, existen antecedentes de programas para la energización rural desarrollados por el gobierno de Chile con el programa “PER”; el programa “Luz para Todos” en Brasil, el programa “Áreas No Conectadas a la Red” en Perú. Estos programas fueron diseñados para aumentar la cobertura de electricidad rural e incrementar el acceso a la salud, educación y desarrollo económico [15].

En Chile el PER se financia con recursos del presupuesto anual de la nación, bajo la consideración de que la inversión en la prestación del servicio de energía en zonas aisladas no resulta rentable para la empresa privada [66]. En Brasil, los recursos provienen de subsidios pagados en las tarifas de energía de los usuarios regulados y que conforman un fondo o cuenta de desarrollo energético [67] (similar a Colombia). En Perú se realiza el proceso a través de subastas en la bolsa, donde los inversionistas colocan todos los recursos y las utilidades son devueltas a ellos en periodos de tiempo específicos, a partir de las ganancias del proyecto.

3.1.11 Productos bancarios

Las líneas de financiamiento verde, líneas de redescuento, créditos y bonos verdes, entre otros, son productos ofrecidos por las entidades bancarias para promover el acceso a medios

de financiamiento para proyectos que involucran la conservación del medio ambiente mediante la inversión en sistemas de generación de energía de fuentes renovables.

Entidades a nivel internacional como, Corporación Financiera Internacional (IFI), Banco de Desarrollo de América Latina (CAF), Banco Interamericano de Desarrollo (BID); y a nivel nacional tales como, Asobancaria, Findeter, Finagro, Bancoldex, Serfinansa, Bancolombia, Banco de Bogotá, entre otros, ofrecen diferentes modalidades de financiamiento para favorecer el acceso a estos servicios y aportar a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Dentro de las estrategias financieras se encuentran, reducción de las tasas de interés a mayor impacto del proyecto, periodos de gracia para iniciar el pago, y redescuentos.

3.1.12 Incentivos tributarios

La ley 1715 de 2014 fue diseñada con el objetivo de promover e incentivar la ejecución de proyectos de generación de energía renovable en el país a través de incentivos tributarios para las personas naturales o jurídicas interesadas en realizar inversiones en proyectos de energías renovables no convencionales. Los incentivos que ofrece el gobierno son:

- Deducción especial en la determinación del impuesto sobre la renta: esta deducción aplica a las inversiones que se realicen en investigación y desarrollo para la utilización o producción de energías renovables no convencionales o gestión eficiente de la energía. El valor máximo deducible será el 50% del valor total de la inversión realizada en un periodo menor a 5 años a partir del año siguiente a la fecha de la inversión.
- Depreciación acelerada: se le permitirá realizar una depreciación acelerada a los generadores de energía renovable no convencional, que hayan realizado compra de maquinaria, equipos y obras civiles. La depreciación no podrá exceder el 20% de la tasa anual global. Este procedimiento se debe realizar por la técnica contable.
- Exclusión del IVA en las adquisiciones de bienes y servicios: esta exclusión aplica para la compra nacional o internacional de equipos, elementos y maquinaria o la adquisición de servicios que sean requeridos para la producción y utilización de energía renovable no convencional. También se incluyen las inversiones realizadas en pro de la medición del potencial de las fuentes renovables.
- Exención de gravámenes arancelarios: se realizará exención del pago de los gravámenes arancelarios a los equipos y maquinarias comprados para inversiones en proyectos de producción de energía renovable no convencional. Solamente aplica para bienes adquiridos a través de importación y que su disponibilidad no sea viable en Colombia.

El procedimiento para la aplicación a los incentivos deberá ser tramitada por las personas naturales o jurídicas titulares de las nuevas inversiones, a través de los procedimientos que define la UPME, antes de la compra de los equipos y posterior a ella. Cabe resaltar que una

vez se radiquen estas solicitudes, la UPME define mediante comunicado a cuál o cuales incentivos se le aprueba la solicitud (IVA, renta y/o arancel).

3.1.13 Recursos de la nación y sector privado

Fondos y programas destinados a la distribución de recursos, formulación de proyectos y ejecución de los rubros destinados a la universalización de la energía.

El Ministerio de Minas y Energía de Colombia constituyó fondos de apoyo financiero como medio para aumentar la cobertura de energía eléctrica en el país, en especial de las zonas que no se encuentran conectadas al SIN.

En la Tabla 4 se encuentran descritos los programas y fondos de apoyo financiero para las ZNI en Colombia.

Tabla 4. Fondos y programas de apoyo financiero para la electrificación rural en Colombia

SIGLA	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
IPSE	Instituto de planeación y promoción de soluciones energéticas	El IPSE es el instituto encargado de identificar, promover, fomentar, desarrollar e implementar soluciones energéticas para zona no interconectadas.
FAZNI	Fondo de apoyo financiero para la energización de las zonas no interconectadas	Creado en los artículos 81 al 83 de la Ley 633 de 2000. Encargado de financiar planes, programas y proyectos de inversión en infraestructura energética en las ZNI.
FAER	Fondo de apoyo financiero para la energización de las zonas rurales interconectadas	Creado en el artículo 105 de la Ley 788 de 2002. Permite que los entes territoriales con el apoyo de las empresas prestadoras del servicio de energía eléctrica en la zona de influencia sean los gestores de planes, programas y proyectos de inversión priorizados para la construcción e instalación de la nueva infraestructura eléctrica.
FENOGE	Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía	Creado en el artículo 10 la Ley 1715 de 2014. El fondo podrá financiar parcial o totalmente, entre otros programas y proyectos dirigidos al sector residencial de estratos 1, 2 y 3, tanto para la implementación de soluciones de autogeneración a pequeña escala, como para la mejora de eficiencia energética. Los recursos de este fondo podrán ser aportados de la Nación, entidades públicas y privadas, y organismos de carácter multilateral e internacional.

Ministerio de Minas y Energía

Los recursos financiados por los fondos de apoyo financiero en las ZNI, son insuficientes para expandir el servicio y alcanzar la cobertura universal en un plazo razonable [15], por lo tanto el sector privado y los prestadores de servicios públicos de energía en el país juegan un rol importante y aportan significativamente en la ejecución de proyectos para ampliar el suministro de energía eléctrica en el país. Empresas como *Colombia Clean Energy Program*

de la USAID trabajan por aumentar el acceso a fuentes de energía renovables y mejorar las prácticas de eficiencia energética en Colombia.

3.2 ESTADO DEL ARTE

El estado del arte planteado en este apartado presenta una revisión de los trabajos recientes que se han desarrollado a nivel nacional e internacional alrededor la electrificación rural a partir de energías renovables en especial las microrredes, en términos de los modelos técnico-económicos y financieros, así como los factores multicriterio requeridos para garantizar la sostenibilidad de los proyectos.

Para la estructuración del estado del arte se consultaron más de 30 artículos científicos relevantes en el tema, seleccionados con criterios de inclusión como número de citas por documento. Las bases de datos consultadas fueron *Scopus* y la *Web of Science* (WOS).

Esta sección se organiza en de tal manera que inicialmente se encontrará la revisión de literatura de los modelos técnico – económicos, para pasar después al estado del arte de los modelos financieros empleados a nivel nacional e internacional para financiar este tipo de proyectos.

3.2.1 Estado del arte modelos técnico – económicos

Con el objetivo de establecer el estado actual de los modelos técnico-económicos empleados para la electrificación del área rural o zonas no interconectadas a partir de fuentes renovables de energía como los sistemas híbridos, se realizó una revisión sistemática de literatura RSL, utilizando para ello la metodología establecida por [68] [69], la cual se divide en tres fases, 1) Establecer el plan de búsqueda, 2) La realización de la búsqueda y 3) La presentación del informe.

La RSL es una metodología novedosa que permite establecer un marco teórico, identificar vacíos del conocimiento, tendencias investigativas, soportar una investigación, entre otros, de una manera rápida y eficiente, gracias a que se realiza a través de un interrogante de investigación específico en el área de interés. Para este proyecto de investigación se utilizaron las siguientes preguntas orientadoras:

1. ¿Cuál es el objetivo de los modelos técnico-económicos en los proyectos de generación de energía renovable?
2. ¿Cuáles son los modelos técnico-económicos aplicados para calcular, la factibilidad, el costo total y el precio unitario para el usuario, en los proyectos de generación de energía renovable para la energización/electrificación rural?
3. ¿Cuáles son las variables de los modelos encontrados?

4. ¿Cuáles son los desafíos que han sido identificados?

3.2.1.1 Plan de búsqueda

Se utilizaron los portales y bases de datos de la *Web of Science (WoS)*, el *Tree of Science (ToS)* y *Scopus*, para identificar las fuentes primarias y secundarias más relevantes en el tema de investigación. En la Tabla 5 se muestran las ecuaciones de búsqueda utilizadas en los dos portales, cubriendo un periodo de todos los años disponibles, todos los documentos y los idiomas.

El portal *WoS*, es una herramienta de búsqueda de información actual o retrospectiva (1996 al presente) relacionada con la ciencia, las ciencias sociales, las artes y las humanidades de aproximadamente 9300 de las revistas de investigación más prestigiosas y de alto impacto del mundo.

El *Tree of Science (ToS)* es una herramienta basada en web que utiliza sofisticados algoritmos de red para optimizar la búsqueda y selección de artículos publicados.

Tabla 5. Búsquedas realizadas

Base de datos	Cadena de búsqueda	Resultados
WoS	<i>Model (tema) AND Renewable energy generation (tema) AND techno economic (tema)</i>	137
	Filtro por Topic: <i>rural</i>	29
Scopus	<i>Model (Article title, Abstract, Keywords) AND Renewable energy generation (Article title, Abstract, Keywords) AND techno economic (Title)</i>	70
	Filtro por Topic: <i>rural</i>	25

Fuente: [31]

3.2.1.2 Búsqueda

Una vez realizada la búsqueda se definen los criterios de inclusión y exclusión (Tabla 6), con el objetivo de refinar la búsqueda y seleccionar los documentos de interés para la investigación.

Tabla 6. Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión	Tipo de documentos: artículos, revisiones y capítulos de libro
	Artículos en idioma español e inglés
	Artículos con al menos 3 citas
	Al menos una palabra clave incluida en el título. En el caso de <i>Renewable energy generation</i> se aceptaron también, <i>solar PV, wind, biomass, smart grid, hybrid.</i>
Criterios de exclusión	Artículos sin citas, a excepción de los artículos publicados en el 2017 y 2018
	Artículos que estén relacionados con el tema de investigación: “modelos técnico-económicos de electrificación rural con energías renovables”

Fuente: [31]

Al utilizar la metodología de la RSL se encontraron inicialmente 54 artículos, de los cuales se descartaron 23 aplicando los criterios de inclusión y exclusión, porque dichos documentos no cumplían con el número de citas requeridas, no incluían al menos una palabra clave en el título o no estaban relacionados con el tema de investigación. En la Tabla 7, se presenta la clasificación de los 31 artículos resultado de la búsqueda, de los cuales se extrajo la información relevante para responder a las cuatro preguntas orientadoras.

Tabla 7. Artículos resultados de la RSL. Tipo A: Artículo; AR: Artículo de revisión

Nº	Título	Autores	Fuente	Año	Citas	Tipo	Cita
1	Techno-economic feasibility study of autonomous hybrid wind/PV/battery power system for a household in Urumqi, China	Li, C., Ge, X., Zheng, Y., Xu, C., Ren, Y., Song, C., Yang, C.,	Energy	2013	89	A	[70]
2	Design of an optimized photovoltaic and microturbine hybrid power system for a remote small community: Case study of Palestine	Ismail, M. S.; Moghavvemi, M.; Mahlia, T. M. I.	Energy Conversion And Management	2013	46	A	[71]
3	Techno-economic potential of retrofitting diesel power systems with hybrid wind-photovoltaic-diesel systems for off-grid electrification of remote villages of Saudi Arabia	Shaahid, S.M., El-Amin, I., Rehman, S., Al-Shehri, A., Ahmad, F., Bakashwain, J., Al-Hadhrami, L.M.,	International Journal Of Green Energy	2010	39	A	[72]
4	Economic sizing of a hybrid (PV-WT-FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by	Hosseinizadeh, Ramin; Shakouri, Hamed G.; Amalnick, Mohsen	Renewable & Sustainable Energy Reviews	2016	37	A	[73]

	an optimization-simulation model: Case study of Iran	Sadegh; Taghipour, Peyman					
5	Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive literature review	Mandelli, Stefano; Barbieri, Jacopo; Mereu, Riccardo; Colombo, Emanuela	Renewable & Sustainable Energy Reviews	2016	37	AR	[74]
6	Techno-economic study of a PV-hydrogen-battery hybrid system for off-grid power supply: Impact of performances' ageing on optimal system sizing and competitiveness	Guinot, B., Champel, B., Montignac, F., Lemaire, E., Vannucci, D., Sailler, S., Bultel, Y.,	International Journal Of Hydrogen Energy	2015	29	A	[75]
7	Techno-economic evaluation of a hybrid PV - Wind power generation system	Dursun, B., Gokcol, C., Umut, I., Ucar, E., Kocabey, S.,	International Journal Of Green Energy	2013	27	A	[76]
8	PV-wind hybrid power option for a low wind topography	Bhattacharjee, Subhadeep; Acharya, Shantanu	Energy Conversion And Management	2015	24	A	[77]
9	Smart Microgrids as a Solution for Rural Electrification: Ensuring Long-Term Sustainability Through Cadastre and Business Models	Ubilla, Karen; Jimenez- Estevez, Guillermo A.; Hernandez, Roberto; Reyes-Chamorro, Lorenzo; Irigoyen, Claudia Hernandez; Severino, Bernardo; Palma-Behnke, Rodrigo	Ieee Transactions On Sustainable Energy	2014	23	A	[78]
10	Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia	Mamaghani, Alireza Haghighat; Escandon, Sebastian Alberto Avella; Najafi, Behzad; Shirazi, Ali; Rinaldi, Fabio	Renewable Energy	2016	23	A	[79]
11	Feasibility study of using a biogas engine as backup in a decentralized hybrid (PV/wind/battery) power generation system - Case study Kenya	Sigarchian, Sara Ghaem; Paleta, Rita; Malmquist, Anders; Pina, Andre	Energy	2015	21	A	[80]
12	Techno-economic evaluation of various hybrid power systems for rural telecom	Amutha, W. Margaret; Rajini, V.	Renewable & Sustainable Energy Reviews	2015	20	A	[81]
13	Modelling an off-grid integrated renewable energy system for rural electrification in India using	Castellanos, J. G.; Walker, M.; Poggio, D.; Pourkashanian, M.; Nimmo, W.	Renewable Energy	2015	20	A	[82]

	photovoltaics and anaerobic digestion						
14	Techno-economic feasibility study on Integrated Renewable Energy System for an isolated community of India	Chauhan, Anurag; Saini, R. P.	Renewable & Sustainable Energy Reviews	2016	18	A	[83]
15	Feasibility study of renewable energy-based microgrid system in Somaliland's urban centers	Abdilahi, Abdirahman Mohamed; Yatim, Abdul Halim Mohd; Mustafa, Mohd Wazir; Khalaf, Omar Tahseen; Shumran, Alshammari Fahad; Nor, Faizah Mohamed	Renewable & Sustainable Energy Reviews	2014	17	AR	[50]
16	A techno-economic assessment of a combined heat and power photovoltaic/fuel cell/battery energy system in Malaysia hospital	Isa, N.M., Das, H.S., Tan, C.W., Yatim, A.H.M., Lau, K.Y.,	Energy	2016	16	A	[84]
17	Techno-economic and life cycle environmental performance analyses of a solar photovoltaic microgrid system for developing countries	Akinyele, Daniel O.; Rayudu, Ramesh K.	Energy	2016	12	A	[85]
18	A techno-economic study of an entirely renewable energy-based power supply for North America for 2030 conditions	Aghahosseini, A., Bogdanov, D., Breyer, C.,	Energies	2017	12	A	[52]
19	Feasibility and sensitivity analysis of an off-grid micro hydro-photovoltaic-biomass and biogas-diesel-battery hybrid energy system for a remote area in Uttarakhand state, India	Bhatt, Ankit; Sharma, M. P.; Saini, R. P.	Renewable & Sustainable Energy Reviews	2016	11	A	[86]
20	Stand-alone PV-hydrogen energy system in Taleghan-Iran using HOMER software: Optimization and techno-economic analysis	Shiroudi, A., Taklimi, S.R.H., Mousavifar, S.A., Taghipour, P.,	Environment, Development And Sustainability	2013	10	A	[87]
21	Techno-economic feasibility study of autonomous hybrid wind and solar power systems for rural areas in Iran, A case study in Moheydar village	Ataei, A., Biglari, M., Nedaei, M., Assareh, E., Choi, J.-K., Yoo, C., Adaramola, M.S.,	Environmental Progress And Sustainable Energy	2015	9	A	[88]
22	Techno-economic feasibility analysis of a solar-biomass off grid system for the electrification of remote rural areas in Pakistan using HOMER software	Shahzad, M. Kashif; Zahid, Adeem; Rashid, Tanzeel Ur; Rehan, Mirza Abdullah; Ali, Muzaffar; Ahmad, Mueen	Renewable Energy	2017	9	A	[54]

23	Development of a Model for Techno-economic Assessment of a Stand-alone Off-grid Solar Photovoltaic System in Bangladesh	Rahman, Md. Mustafizur; Islam, A. K. M. Sadrul; Salehin, Sayedus; Al-Matin, Md. Abdullah	International Journal Of Renewable Energy Research	2016	8	A	[89]
24	Techno-economic analysis and performance assessment of standalone photovoltaic/wind/hybrid power system in Lakshadweep islands of India	Bhakta, S., Mukherjee, V., Shaw, B.,	Journal Of Renewable And Sustainable Energy	2015	5	A	[57]
25	A techno-economic feasibility of a stand-alone hybrid power generation for remote area application in Bangladesh	Das, Barun K.; Hoque, Najmul; Mandal, Soumya; Pal, Tapas Kumar; Abu Raihan, Md	Energy	2017	3	A	[90]
26	Electricity from Wind for Off-Grid Applications in Bangladesh: A Techno-Economic Assessment	Rahman, Md. Mustafizur; Baky, Md Abdullah Hil; Islam, A. K. M. Sadrul	International Journal Of Renewable Energy Development-Ijred	2017	2	A	[91]
27	A thorough investigation on hybrid application of biomass gasifier and PV resources to meet energy needs for a northern rural off-grid region of Bangladesh: A potential solution to replicate in rural off-grid areas or not?	Islam, Md Shahinur; Akhter, Ruma; Rahman, Mohammad Ashifur	Energy	2018	1	A	[92]
28	Techno-economic analysis of a PV-wind-battery-diesel standalone power system in a remote area	Adefarati, T.; Bansal, R. C.; Justo, Jackson J.	Journal Of Engineering-Joe	2017	0	A	[92]
29	Optimal sizing of wind-PV-based DC microgrid for telecom power supply in remote areas	Kaur, Rajvir; Krishnasamy, Vijayakumar; Kandasamy, Nandha Kumar	Iet Renewable Power Generation	2018	0	A	[93]
30	Techno economic analysis of a wind-photovoltaic-biomass hybrid renewable energy system for rural electrification: A case study of Kallar Kahar	Ahmad, Jameel; Imran, Muhammad; Khalid, Abdullah; Iqbal, Waseem; Ashraf, Syed Rehan; Adnan, Muhammad; Ali, Syed Farooq; Khokhar, Khawar Siddique	Energy	2018	0	A	[94]
31	General indicator for techno-economic assessment of renewable energy resources	Liu, Gang; Li, Mengsi; Zhou, Bingjie; Chen, Yingying; Liao, Shengming	Energy Conversion And Management	2018	0	A	[51]

Fuente: [31]

3.2.1.3 Resultados de la RSL

Se elaboró un análisis de calidad a los artículos seleccionados con el objetivo de identificar si los documentos cumplen con los requisitos necesarios para ser un artículo científico de calidad. Sin embargo, todos los artículos publicados en *WoS* y *SCOPUS*, son artículos de excelente calidad publicados en los mejores *journals* con altos factores de impacto. De este análisis se concluye que el 100% de los artículos seleccionados cumplen con los requerimientos de calidad. Son artículos científicos redactados con los mejores estándares, son claros y tienen la información necesaria en el resumen, palabras clave, introducción y conclusiones.

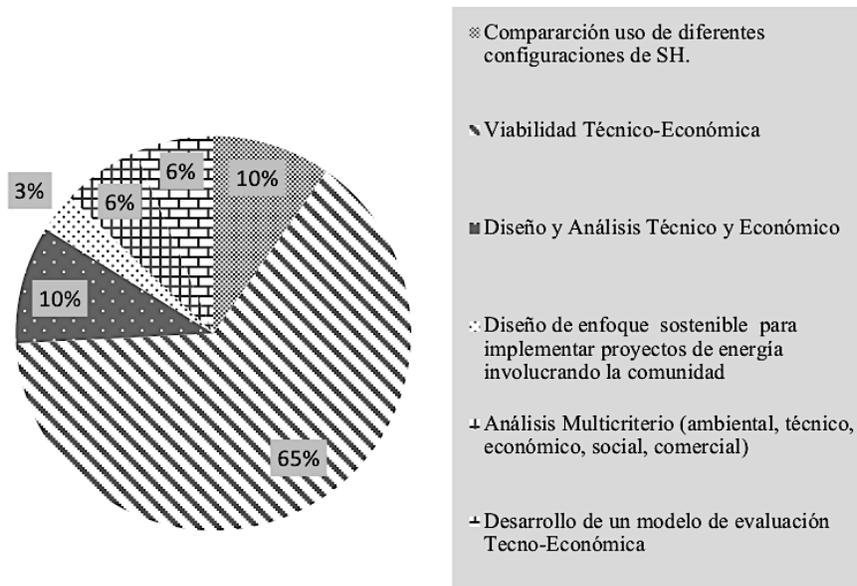
Las fechas de publicación de los documentos se encuentran en el intervalo de tiempo entre el 2010 y 2018. El artículo más citado es el escrito por Li, C., Ge, X., Zheng, Y., Xu, C., Ren, Y., Song, C., Yang, C., con 89 citaciones, publicado en 2013.

Energy, y *Renewable & sustainable energy reviews*, son las 2 revistas en donde se encontraron la mayor cantidad de artículos publicados en el tema de investigación, con un 22% y 19% de artículos respectivamente. *Energy*, lleva más de 10 años en el cuartil 1 de SCOPUS, mientras *Renewable & sustainable energy reviews*, se mantiene en Q1 desde 2002. De los resultados se puede indicar que los autores con más documentos en el tema de investigación son Islam AKMS (Bangladesh), Kusakana K (Sur África), Saini RP (India). La mayoría de los artículos provienen de los países de India, Irán, Bangladesh y Sur África con gran cantidad de publicaciones entre el 2015 y 2016.

Con respecto a las cuatro preguntas de orientadoras se obtuvieron los siguientes resultados.

Los objetivos de los modelos técnico económicos para la electrificación rural con sistemas híbridos y microrredes de energía renovable, identificados en la lectura de artículos científicos publicados en las revistas de mayor impacto en el sector de la energía a nivel mundial, se muestran en la Figura 19; de esta se concluye que el principal objetivo de los modelos es el análisis de la viabilidad técnica y económica de proyectos o sistemas de generación de energía para la electrificación rural, con un porcentaje de participación del 65%, seguido por el diseño y análisis técnico - económico con un 10% y, la comparación de uso de diferentes configuraciones de sistemas híbridos (SH) en diversos escenarios.

Figura 19. Objetivo de los artículos al aplicar modelos tecno-económicos en proyectos de energización rural con el uso de sistemas híbridos y microrredes.



Fuente: [31]

Solamente un artículo de los analizados definió un enfoque sostenible para implementar proyectos de energía involucrando la comunidad, por medio de estrategias como una actividad catastral y la agrupación social de las comunidades para la administración, operación y mantenimiento de los sistemas de generación de energía [79]; así como solamente se encontró un artículo elaborado para una zona en territorio colombiano [78].

Los modelos técnico-económicos encontrados en la revisión de literatura corresponden a la simulación, optimización y análisis de sensibilidad, adicional a ello algunos autores realizan el diseño de los sistemas de energía con enfoque probabilístico, calculado el índice de la probabilidad de pérdida de carga de energía LOLP y el índice de pérdida de carga esperada LOLE. El primer índice calcula el costo de la escasez de energía mientras que el último se usa para identificar y seleccionar las combinaciones aceptables.

El modelo general para el cálculo del costo total del sistema de energía fue el COE (costo nivelado de energía), el NPC (Costo presente neto) y el periodo de recuperación de la inversión, indicadores utilizados para realizar análisis financieros y viabilidad económica del proyecto.

El 61% de los artículos ejecuta simulaciones y optimizaciones con el software HOMER, por lo que se evidencia el uso frecuente de esta herramienta para realizar los análisis de los sistemas de generación. En un solo caso se utilizaron herramientas de análisis cualitativos [79], y herramientas como hojas de cálculo [89].

En términos del precio unitario para el usuario, se resalta el artículo [92] donde se propone un modelo de negocio para la financiación del sistema de energía, a través de una estrategia de copropiedad entre la industria local y el sector privado, donde este último realizará la administración, operación y mantenimiento por 12 años y vende la energía a la industria y a los hogares de la región. Pasados 12 años se ha recuperado la inversión y la administración del sistema pasa a manos de la industria local.

Las variables más utilizadas por los autores son:

- COE Costo nivelado de energía
- LOLE: valor esperado de número de eventos con pérdida de carga
- LOLP: probabilidad de pérdida de carga
- Rendimiento de la planta
- Número de componentes del sistema
- Costo inicial
- Costo reemplazo
- Costo de O&M: operación y mantenimiento
- Valor salvamento
- Costo del ciclo de vida
- NPC: Valor presente neto
- Tasa de interés
- Parámetros sociales y ambientales
- Catastro de las comunidades
- Datos climáticos
- Disponibilidad de los recursos energéticos
- Condiciones socio-económicas y medio ambiente
- Necesidades locales
- Carga eléctrica
- Crecimiento de carga
- LCC: costo del ciclo de vida
- LCI: impacto del ciclo de vida
- Cantidad de emisiones contaminantes

Los desafíos identificados por los autores proponen tener en cuenta la calidad y cantidad de los datos medidos in-situ para ser usados en el modelo de simulación, la necesidad de incorporar los componentes sociales e institucionales como insumos necesarios para la sostenibilidad de los proyectos a largo plazo, los altos costos de inversión en las tecnologías (principal barrera que dificulta la posibilidad de implementación de los sistemas en las comunidades), los altos costos de AOM que claramente no pueden ser pagados por las comunidades consideradas de bajos ingresos y la no paridad de red entre los sistemas de energías renovables simulados y el costo nivelado del sistema de generación convencional en la zona.

Adicional a ello, se encuentra una gran predilección por el uso del software HOMER para realizar análisis de viabilidad técnico-económica de sistemas de generación de energía en zonas rurales, con un bajo porcentaje de utilización de modelos matemáticos para la optimización de la generación, considerando el costo en un horizonte a largo plazo, en el marco de una planeación económica y confiable.

Múltiples investigaciones en el campo de la energía han dejado evidencia de los criterios utilizados para la selección de la mejor alternativa en la planeación de la cobertura tanto en el sector urbano como rural. Los factores más ampliamente utilizados son los técnicos y económicos [31], sin embargo los factores ambientales y sociales han tomado fuerza en los últimos años [32]. Los factores económicos se limitan al cálculo del COE y el NPC a través de herramientas como el software HOMER.

A partir de la revisión de [33] parece ser que los factores como, eficiencia, capacidad instalada, costo de la inversión, costo de la operación y mantenimiento, emisiones de CO_2 , uso de la tierra, creación de empleo y aceptabilidad social, son los factores fundamentales que permiten la toma de decisión de los interesados. A pesar de ello, se ha identificado en la literatura las dificultades que tienen estas comunidades para acceder a los servicios y productos de energía debido a los elevados costos de inversión inicial [30] [12], lo cual parece no estar siendo considerado en los análisis multicriterio.

El trabajo de [95] propone un análisis multicriterio para un sistema híbrido involucrando los tres núcleos del trilema energético, medio ambiente, seguridad y equidad, sin embargo no se expresa ningún criterio que involucre la asequibilidad.

Se resalta el trabajo de [96] sobre las metodologías multicriterio para la toma de decisiones hacia el desarrollo de energías renovables. En este trabajo se identifican cinco tipos de criterios con múltiples partes interesadas, tales como, técnicos, económicos, ambientales, organizacionales y sociales. Los indicadores económicos se enfocan en la perspectiva financiera con factores como, rentabilidad, ganancias reservadas para el reemplazo de los equipos, retraso arancelario, desarrollo de usos productivos, porcentaje de hogares que utilizan electricidad para actividades generadoras de ingresos. En el criterio social, son incluidos indicadores como facilidades de crédito a partir de micro-créditos y subsidios para los servicios de electricidad.

Los factores financieros mencionados en el párrafo anterior, fueron implementados en el trabajo de [97] sin embargo, ninguna de las organizaciones encuestadas en este trabajo está encargada de los costos de inversión inicial, ya que los donantes internacionales han financiado principalmente las inversiones en los sistemas [96].

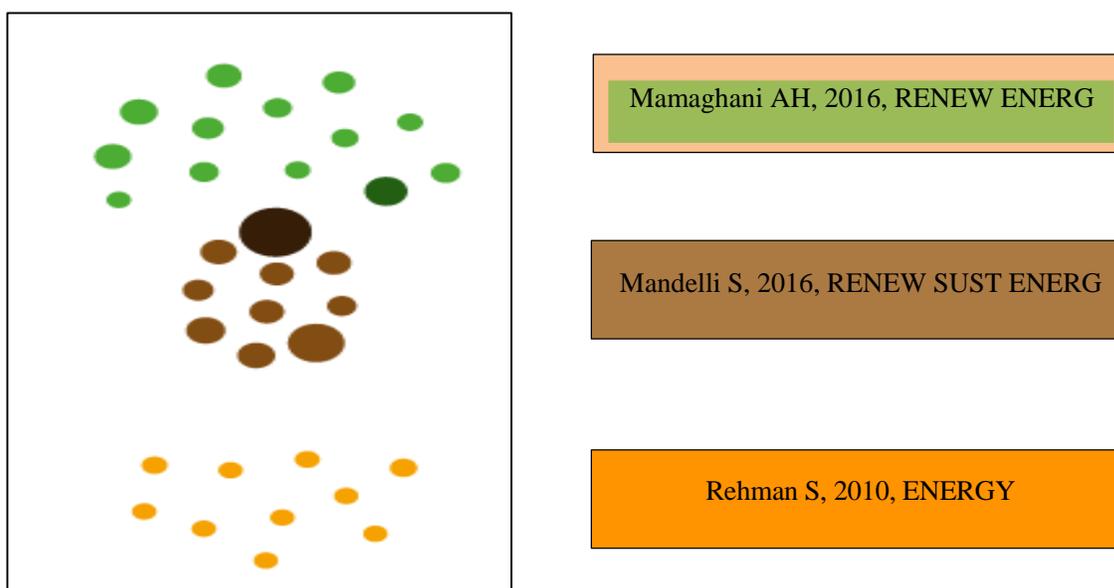
3.2.1.4 Árbol de la ciencia *ToS*

El *tree of science* es una técnica basada en teoría de grafos y redes de citaciones de artículos científicos. El árbol de la ciencia evalúa los artículos de acuerdo al grado de entrada, grado de intermediación y grado de salida.

En el ToS se procesa la información importada de la WoS y se obtiene como resultado el árbol de la ciencia. Ahí se realiza un análisis de los datos por medio de algoritmos en el marco de las citas de los textos, para generar el árbol de la ciencia, en donde ubica los artículos según tres categorías, en las hojas están los artículos más recientes, en el tronco los artículos estructurales y en la raíz los artículos y autores clásicos.

En la Figura 20 se muestra el árbol de la ciencia de los artículos seleccionados.

Figura 20 Tree of Science ToS



Fuente: [31]

En el árbol de la ciencia el 30.3% de los artículos corresponden con estudios clásicos, el 30.3% estudios estructurales y el 39.4% estudios recientes, lo cual muestra que el tema de investigación es actual y de rápido desarrollo.

3.2.2 Estado del arte modelos financieros de electrificación rural

En esta sección se muestra el desarrollo de los conceptos y teorías de los modelos financieros que proporciona la literatura, para el financiamiento de la inversión de los proyectos de electrificación, en especial para zonas rurales aisladas de países en vía de desarrollo con bajos ingresos económicos y dificultades para acceder a este tipo de servicios.

En el área financiera, uno de los primeros autores en trabajar el tema de los modelos financieros para energías renovables fue *Richard Ottinger* en 1990 [98] [65], donde propone el cálculo del costo total de los recursos energéticos incluyendo los costos ambientales para una regulación prudente. También realiza un análisis de métodos innovadores exitosos a nivel mundial para el financiamiento de la inversión inicial de proyectos para la generación de energía renovable, para zonas no interconectadas y zonas conectadas a la red.

El análisis planteado por el autor [65], expone las razones por las cuales los modelos financieros tradicionales no son suficientes para las inversiones en ER, en especial con dificultades asociadas a altos costos de transacción, retorno limitado de la inversión, largos periodos de financiación dependiendo de la vida útil del sistema que puede aproximarse a los 25 años, poca información del desempeño de los sistemas de generación a largo plazo que genera incertidumbre, alto riesgo para los inversionistas o financiadores, y desconocimiento de las entidades financieras con la tecnología y la economía de las ER.

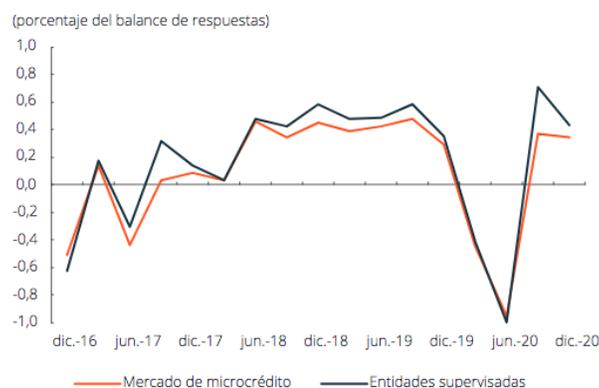
Los enfoques financieros tradicionales con fines de lucro, no corresponde con la situación actual de las zonas rurales donde no está satisfecha la necesidad, puesto que son consideradas zonas de alto riesgo financiero, con problemáticas económicas, financieras y sociales, que dificultan el acceso a los servicios.

Algunos modelos financieros innovadores para las áreas sin acceso a la electricidad son las microfinanzas, con antecedentes en el banco Bangladesh (*Grameen Bank*), el cual estableció en 1983 un programa de micro inversión para financiar actividades económicas en comunidades pobres. El banco es considerado pionero en microfinanzas.

En Colombia, existen alrededor de 47 entidades (bancarias, cooperativas y fundaciones) que otorgan micro créditos a sectores del comercio, servicios, personas naturales, industria, comunicaciones, sector agropecuario y construcción, en diversos departamentos del país [99]. Entre las entidades reconocidas por adoptar este tipo de modelos financieros esta, Actuar Atlántico, Caldas, Quindío y Tolima, Bancamía, Bancolombia, Banco de Bogotá, Banco Caja Social, Cooperativa de Ahorro y Crédito Congente, Cooperativa Financiera de Antioquia, Fundación Coomeva, Fundación de la Mujer Bucaramanga, Fundación Ecopetrol – Fundesca, entre otras.

Lamentablemente la percepción de la demanda por nuevos micro créditos a 2020, se encuentra en niveles entre el 0.6 y 0.7%, donde las principales causas del no otorgamiento de préstamos son, en primer lugar el sobreendeudamiento de los solicitantes (18.2)% y la capacidad de pago de los cliente (45.2%) [100]. Lo anterior es muy negativo para las perspectivas de este tipo de modelos en el sector eléctrico colombiano, especialmente las oportunidades para las ZNI en Colombia.

Figura 21. Cambio en la percepción de la demanda por nuevos microcréditos - Colombia



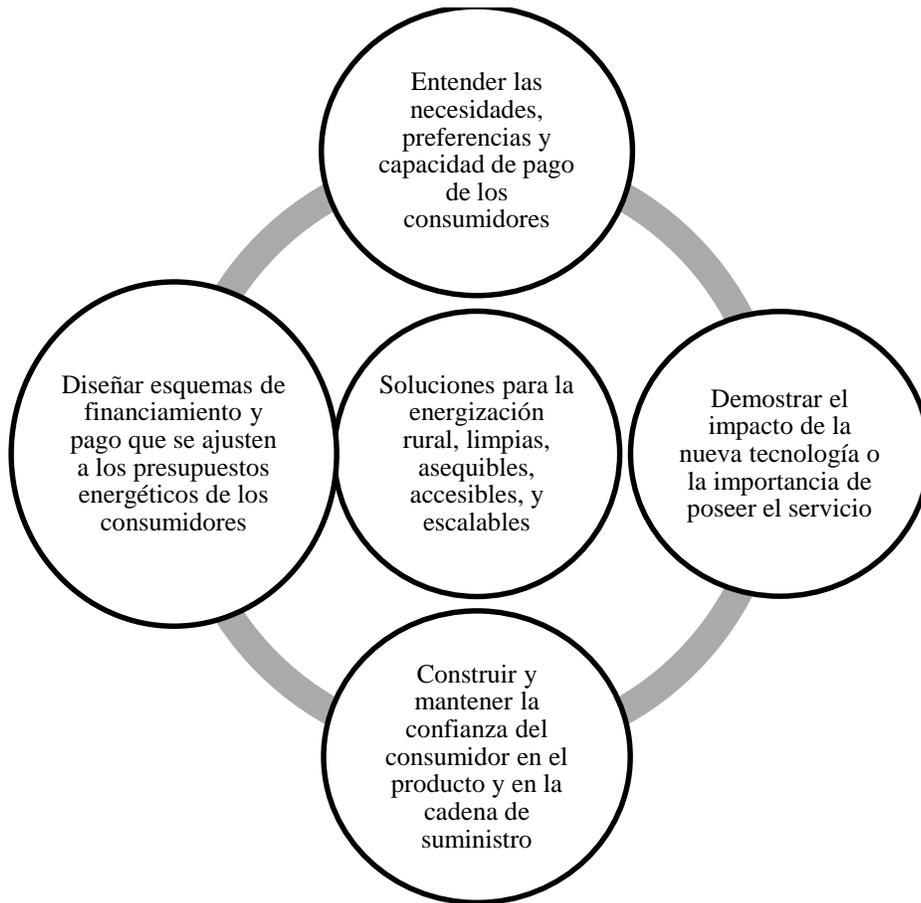
Fuente: [100]

Adicional a las microfinanzas o los micro-créditos, las empresas del sector de la energía a nivel mundial, reconocen las necesidades energéticas de los consumidores con bajos ingresos en los países en vía de desarrollo. Estas empresas han desarrollado e implementado múltiples estrategias y modelos de negocio para proveer y distribuir servicios de energía a las áreas rurales bajo unos principios rectores como, soluciones energéticas limpias, asequibles, accesibles y escalables. Las estrategias centrales de los modelos de negocio involucran cuatro características comunes, tales como:

- Entender las necesidades, preferencias y capacidad de pago de los consumidores: soluciones personalizadas que consideren las necesidades, preferencias y presupuestos del consumidor como, prácticas culturales en especial las que involucran la cocción de alimentos, empleo y patrones de ingresos, limitación de presupuesto económico, costos, características de las tecnologías existentes, proveedores de servicios, disponibilidad de recursos energéticos alternativos, geografía, infraestructura, acceso a instituciones financieras, oferta de servicios postventa y actividad productiva de los consumidores finales.
- Tipo de tecnología y la importancia de poseer el servicio: adicional a las consideraciones económicas que son una de las más importantes, también es relevante que el consumidor final valore los cambios en la calidad de vida una vez se implemente el nuevo sistema de energía, tales como, ahorro de tiempo, casas más limpias y seguras y eliminación de contaminación, los cuales justifican la inversión inicial.
- Construir y mantener la confianza del consumidor en el producto y en la cadena de suministro: involucra demostración y capacitación en el funcionamiento del producto, servicio post-venta, mantenimiento y reparación.
- Diseñar esquemas de financiamiento y pago que se ajusten a los presupuestos energéticos de los consumidores: los planes a pagos son más útiles, las estrategias que involucren al consumidor en la etapa de la planeación fomentan la comprensión,

la identificación de soluciones y evita las dificultades futuras, así como facilita la recopilación de las preferencias de los consumidores.

Figura 22. Funciones y características claves del negocio



Fuente: adaptado de [12] [101]

Toda la información que se reúne para que los modelos de negocio funcionen, es recolectada a través de encuestas y grupos focales con la comunidad, de esta manera se involucra a los usuarios finales y se identifican las preferencias, diseñando un modelo a la medida del cliente.

Algunos de los productos y servicios que se han diseñado para las comunidades han sido estufas solares (Tanzania), mini centrales eléctricas de gasificación de biomasa que convierte residuos agrícolas en electricidad, y microrredes en aldeas, para proporcionar electricidad a base de pago por uso (India), bombillas de bajo consumo de energía, tecnología de carga de celulares, quioscos de carga de teléfonos móviles, centros de servicio atendidos por residentes locales, biogás doméstico, entre otros.

Muchas empresas de suministro de energía han demostrado a través de casos de implementación, que con los mecanismos correctos, un financiamiento efectivo y eficiente e involucrando a la comunidad en todas las fases del proceso, las comunidades pueden acceder a servicios de energía asequible [12]. Algunos de los países y regiones que se han beneficiado con la implementación de este tipo de estrategias son, Bangladesh, India, Indonesia, Kenia, Mali, Uganda, Sur África y los Estados Unidos de América.

Al realizar una revisión de literatura de modelos financieros para la implementación de proyectos de energización rural en áreas alejadas de bajos ingresos económicos, se construyeron las Tabla 8 y Tabla 9, en las cuales se presentan los nombres de los modelos, los países donde se han utilizado y algunas características relevantes en su implementación.

Tabla 8. Enfoques en modelos financieros a nivel nacional

Nº	Modelo/Esquema	Organización /País	Características
1	Microfinanzas o Micro créditos	Surgió en el Banco Bangladesh <i>Grameen Bank</i> . En Colombia 47 entidades financieras lo ofrecen al mercado.	Los micro créditos o microfinanzas son un modelo financiero que ofrece préstamos a personas o pequeñas empresas que carecen de acceso a los servicios bancarios [100]. El modelo ha sido impulsado por organizaciones no gubernamentales, cooperativas e instituciones del gobierno. También utilizado por EEUU a través de <i>On Bill Financing por Co-ops</i> , que proporciona energía a más de 42 millones de personas.
2	Asociaciones Públicas - Privadas	BID África – Monte Trigo Chile, Brasil, Perú.	“Un instrumento de vinculación de capital privado, que se materializa en un contrato entre una entidad estatal y una persona natural o jurídica de derecho privado, para la provisión de bienes públicos y de sus servicios relacionados”. PER (Chile), Luz para Todos (Brasil), Áreas No Conectadas a la Red (Perú). En el año 2012 se dio inicio al funcionamiento de una microrred solar en Monte Trigo África, la cual ha suministrado desde entonces electricidad y desarrollo a más de 60 hogares de la comunidad. El sistema involucra un dispensador/controlador que se encarga de entregar la información para la gestión y control de la demanda a partir de un enfoque asignación energética individual [102].
3	Líneas de financiamiento verde	ASOBANCARIA	Utiliza recursos propios. Algunas de las organizaciones que ofrecen este servicio son Corporación Financiera Internacional (IFI) Banco de Desarrollo de América Latina (CAF) Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
4	Líneas de redescuento	Findeter Finagro Bancoldex Serfinansa	Préstamos otorgados por un banco central a los bancos mediante endoso pleno de efectos o pólizas de crédito en función del límite de redescuento fijado para cada entidad. Otorgando a los clientes créditos de fomento en condiciones financieras muy favorables.
5	Créditos y bonos verdes	Bancolombia	Reducción de las tasas de interés a mayor impacto del proyecto. Periodos de gracia para iniciar el pago.

6	Protocolo verde, productos financieros verdes	Banco de Bogotá	Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.
7	<i>Project Finance</i>	Bancolombia	Esta línea ofrece créditos para proyectos verdes. Algunas de las consideraciones que el financiador analiza al momento de otorgar recursos para el desarrollo de proyectos de este tipo, corresponden a los riesgos asociados a la construcción y operación del proyecto que condicionan la capacidad de este para repagar la deuda, son: <ul style="list-style-type: none"> • Experiencia en el diseño, construcción y operación del sistema. • Fortaleza financiera para cumplir con los aportes de capital y respaldar sobrecostos durante la construcción del proyecto.
8	Recursos de la Nación	IPSE – FENOGE – FAZNI - FAER	Fondos y programas destinados a la distribución de recursos, formulación de proyectos y ejecución de los rubros destinados a la universalización de la energía. Áreas de servicio exclusivo (ASE).
9	Sector Privado	<i>Colombia Clean Energy Program</i> de la USAID	Entidad americana que trabaja por aumentar el acceso a fuentes de energía renovables y mejorar las prácticas de eficiencia energética en Colombia
10	Incentivos tributarios		La ley 1715 de 2014 fue diseñada con el objetivo de promover e incentivar la ejecución de proyectos de generación de energía renovable en el país a través de incentivos tributarios para las personas naturales o jurídicas que interesados en realizar inversiones de proyectos de energías renovables no convencionales. Dentro de los incentivos se encuentran, deducción en el impuesto de renta, depreciación acelerada, exclusión de bienes y servicios de IVA y extensión de gravámenes arancelarios [103].

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Enfoques en Modelos Financieros – Internacional

N°	Modelo/Esquema	Organización/ Empresa	Países	Tipos de productos	Características	Fuente
1	<i>One-Stop-Shop Model</i> (Modelo de ventanilla única)	<i>Bright Green Energy Foundation (BGEF)</i>	<i>Bangladesh</i>	Sistemas solares para el hogar y financiación a medio plazo para sus clientes.	En este modelo el financiador es el mismo proveedor de energía. El proveedor de energía decide ofrecer finanzas o el financiero decide vender productos energéticos. Las ventajas son que el vendedor tiene control total sobre ambos aspectos del negocio y la desventaja es que debe desarrollar dos áreas muy importantes dentro del negocio. El modelo involucra servicio post-venta en locales de servicio técnico solar para los clientes. También capacita técnicamente a personas de la comunidad para presentar	[12], [101]

					los servicios en los quioscos de servicio al cliente, brindando también empleo para la comunidad.	
2	<i>Financial Institution Partnered with Energy Enterprise</i> (Institución financiera asociada con una empresa energética)	<i>ArcFinance Ashden Awards GVEP International SELCO India</i>	India	Luces solares, sistemas solares.	<p>En este modelo la empresa energética, se asocia con una empresa financiera local, para vender los productos energéticos. En dicho modelo la institución de energía se encarga de la instalación, administración y mantenimiento del producto y la empresa financiera se encarga del seguimiento y de los pagos. Una ventaja importante es que cada empresa se dedica al negocio que conoce mejor. Dentro de los mecanismos de financiamiento que ofrecen las entidades financieras incluyen contribuciones de los usuarios, préstamos, subsidios, pagos móviles, modelos de alquiler y financiamiento comunitario.</p> <p>El modelo implica conocer la dinámica de los ingresos de la comunidad, la cual puede ser periódica o estacional. Dependiendo de esta dinámica la entidad financiera brinda acuerdos de pago para que los clientes puedan acceder a los productos energéticos.</p>	[12], [101]
3	<i>Umbrella Partnership Model</i> (Modelo de asociación paraguas)	<i>ArcFinance Ashden Awards GVEP International Kenya Union of Savings and Credit Cooperatives (KUS- CCO)</i>	Kenia	Energía solar, gas licuado de petróleo (GLP) y biogás	<p>La empresa de energía se asocia con una "institución apex" que maneja una red de instituciones financieras locales (por ejemplo, un sindicato u organización de cooperativas de crédito, cooperativas de crédito u otras instituciones financieras). La institución más importante presta dinero a los proveedores financieros locales, quienes luego prestan a un usuario final y administran los procesos de supervisión y pago. La empresa energética proporciona el producto energético, la instalación, el servicio y el mantenimiento.</p> <p>El modelo incluye: diagnóstico en el tipo de necesidades energéticas de la comunidad, distribuye los productos, brinda capacitación en el uso de los productos y servicios post-venta. Los precios de los productos son competitivos y el margen de costo reducido.</p>	[12], [101]
4	<i>Franchise/Dealership Model</i> (Modelo de franquicia / concesionario)	<i>ArcFinance Ashden Awards GVEP International The Energy and Resources Institute (TERI)</i>	India	Alquiler de linternas solares	<p>La empresa de energía proporciona crédito a los concesionarios y/o franquicias para permitirles vender a los clientes a plazos. Este modelo en particular es común para productos relativamente económicos, generalmente aquellos que cuestan menos de US\$50 (por ejemplo, linternas solares, bombas de pedal o cocinas eficientes).</p> <p>El modelo implica la capacitación de empresarios en la administración de micro-empresas energéticas. La operación y el mantenimiento lo asume el empresario, a través de los ingresos de las tarifas de alquiler. Los costos de los productos energéticos deben ser más bajos que los costos con el combustible común.</p> <p>El modelo recibe apoyo financiero de los gobiernos locales.</p>	[12], [101]

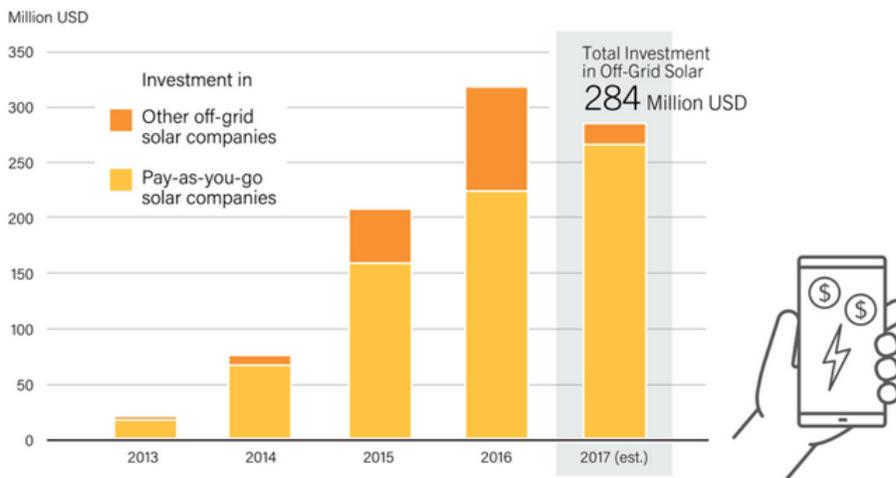
5	<i>Brokering Model</i> (Modelo de corretaje)	<i>ArcFinance</i> <i>Ashden</i> <i>Awards</i> <i>GVEP</i> <i>International</i> <i>Frontier</i> <i>Markets</i>	India	Productos energéticos	<p>En este modelo el proveedor financiero y la empresa energética pagan a una organización o individuo (tercero) para comercializar productos de energía y evaluar la idoneidad de los clientes para el financiamiento. Luego, atraerán a los clientes viables hacia adelante para comprar productos energéticos. El corredor también puede estar involucrado con el cobro del pago del préstamo, el servicio postventa y el mantenimiento técnico.</p> <p>En este modelo el intermediario se acerca a un fabricante de tecnología de energía renovable y, por una pequeña tarifa, ofrece vender el producto en una comunidad, en mercados de difícil acceso. En el mercado se venden los productos bajo un modelo mayorista y minorista.</p> <p>El intermediario ofrece enlaces para financiar a los consumidores a través de la asociación con instituciones de microfinanzas, grupos de ayuda, y organizaciones que se especializan en préstamos.</p>	[12], [101]
6	<i>Pay As You Go Model</i> - (Modelo de pago por uso) Paga lo que consumes pagos (PAYG) ó <i>Fee-For-Service (FFS)</i>	<i>Simpa Networks.</i> <i>Husk Power Systems</i> <i>Mera Gao Power.</i> <i>M-KOPA Solar</i> <i>Simpa Networks</i>	Kenia e India	Sistema solar portátil para el hogar. Instalación de sistemas solares domésticos para consumidores, normalmente de 25 a 50 vatios de pico (Wp), que se paga aprox en 3 años.	<p>Los consumidores compran servicios de energía según un programa de pago por consumo. El modelo de negocios es similar al de los consumidores de electricidad conectados a red.</p> <p>El pago se programa como un anticipo en el servicio (pre-pago), en lugar de una facturación retroactiva (post-pago).</p> <p>Los operadores de mini-redes pueden establecer tarifas diferenciales según la demanda de energía esperada. El modelo surge del éxito de los servicios de telefonía móvil a través de tarjetas de prepago combinadas con las comunicaciones por SMS para desbloquear el servicio de manera remota. El modelo requiere de medidores bidireccionales.</p> <p>El modelo de "pay as you go" para la energía solar, los consumidores realizan un pequeño pago por adelantado por el hardware del sistema solar y luego compran créditos por incrementos de servicio, que se utilizan para pagar el costo total del sistema.</p> <p>El pago y el control del sistema se hace a través del teléfono móvil.</p> <p>Las empresas que funcionan a través de este modelo han calculado que el costo de un sistema de energía solar para el hogar de 25 Wp durante 10 años es aproximadamente la mitad del costo de las soluciones de energía tradicionales en el mismo período de tiempo, y entregará diez veces la cantidad de luz más la capacidad eléctrica adicional para cargar teléfonos móviles. y el uso de dispositivos como ventiladores, TV y radio.</p> <p>El modelo involucra los flujos de efectivo variables de los clientes y sus patrones de consumo energético.</p>	[12], [101]

					En la actualidad es el modelo financiero más utilizado para proyectos de energización rural [104].
7	<i>Time Of Use</i>	Ministerio de Energía Brasil	Brasil	Sistemas de generación	Modelo de esquemas de tarifas de pago facturación horaria. El valor de la tarifa es diferencial para los picos y valles de la curva de la demanda. Gestión de la demanda.
8	<i>Cost reflective tariff</i> (tarifa reflectiva de costos)	Ministerio de Energía	África Namibia Tanzania	Sistemas de generación	Las tarifas permiten a los operadores de mini redes recuperar todo su capital y costos operativos y recibir un rendimiento definido y razonable. Respuesta de la demanda.

Fuente: elaboración propia

Es importante resaltar que las compañías con modelos PAYG, atrajeron la gran mayoría de la inversión en energía renovable en proyectos rurales a finales de 2017 con un total de 263 millones de dólares [104] y en el 2019 contribuyó con la cuarta parte de las inversiones en sistemas solares fuera de red a nivel mundial.

Figura 23. Inversión mundial de las compañías de sistemas solares fuera de red (Off grid) 2013 - 2017



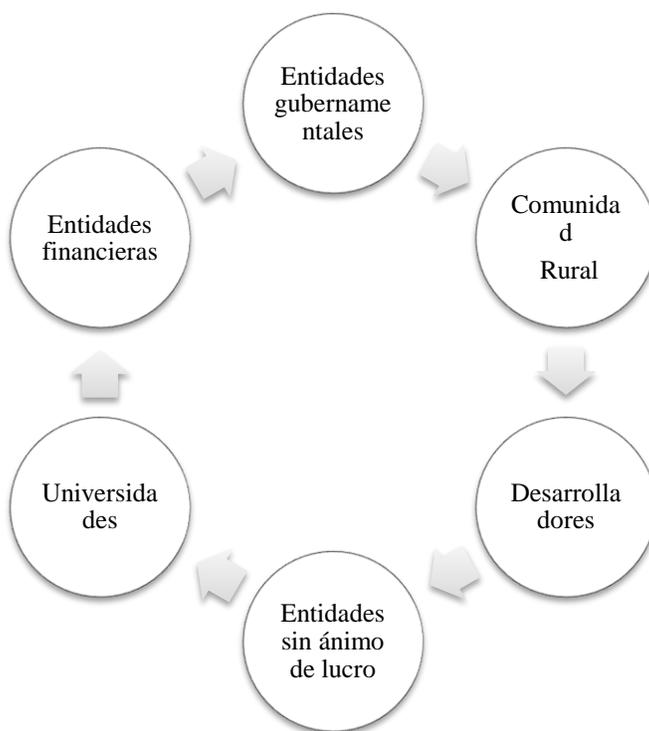
Fuente: REN21 2018

Una de las recomendaciones más importantes que sugieren los autores y empresas dedicadas a la electrificación rural son, el desarrollo de estrategias innovadoras no solo desde un enfoque técnico y financiero, sino también en la implementación de funciones básicas empresariales, que garanticen la sostenibilidad del proyecto energético, e involucrar a las organizaciones sin ánimo de lucro a participar en la toma de decisiones gubernamentales, ya

que de ellas provienen las prácticas más innovadoras. Adicionalmente, se recomienda adoptar nuevas métricas e indicadores para medir el éxito e impacto de los proyectos implementados, puesto que el número de personas atendidas ya no se considera una métrica que dé cuenta de las mejoras en la calidad de vida de las comunidades y la calidad de los servicios de energía renovable, “se necesita investigación adicional sobre cómo medir el desempeño que sea inclusivo y que reconozca los otros beneficios para el consumidor, el hogar y la comunidad local” [104].

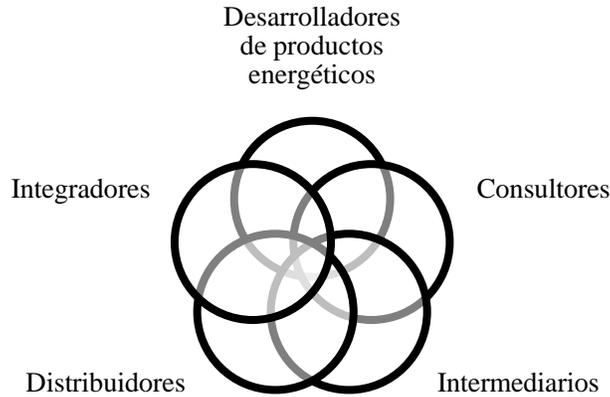
Los modelos de negocio que se han formado a partir de la transición energética han sido propuestos por desarrolladores de productos energético, intermediarios, consultores, distribuidores e integradores (Figura 24 y Figura 25) [105]. Las estrategias de negocio se pueden agrupar en tres tipos de modelos, los centrados en el producto, centrados en servicios a terceros y centrados en la comunidad [106].

Figura 24. Stakeholders



Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Actores del Ecosistema del Negocio



Fuente: [105]

Otro referente internacional ha sido la microrred Solar-Diésel con asignación energética individual de suministro de energía a 60 familias del pueblo de Monte Trigo África. El proyecto se realizó a través de un concepto mixto de compañía eléctrica pública y privada con la cámara municipal de Porto Novo y Aguas de Porta Preta, quienes son responsables directos de la gestión del servicio y de las tareas de funcionamiento y mantenimiento de las instalaciones. El cobro de las tarifas se realiza con cuotas fijas mensuales asociadas a la energía diaria asignada, que se establecieron de acuerdo con la capacidad de pago de la población. La tarifa que pagan los usuarios incluye los costos de funcionamiento y de mantenimiento, y también sirven para devolver en parte la inversión de capital [102].

3.2.2.1 Pay As You Go – PAYGo – PAYG

En el modelo *Pay As You Go* (PAYGo) o *Free for service*, es el actual modelo financiero más utilizado para proyectos de energización rural a nivel mundial (263 millones de dólares en inversión en energía renovable para proyectos rurales en las compañías con modelos de PAYGo) [104] [17]. En este, los consumidores compran servicios de energía solar según un programa de pago por consumo. El pago se programa como un anticipo en el servicio (pre-pago), en lugar de una facturación retroactiva (post-pago). Los operadores del sistema pueden establecer tarifas diferenciales según la demanda de energía esperada.

El modelo de PAYGo ha sido ampliamente utilizado por empresas del sector de la energía como *Village Power Centre* en Uganda, Mozambique and Zambia [107], M-KOPA en Kenia y *Simpa Networks* en India, para productos como sistemas solares portátiles para el hogar e instalación de sistemas solares domésticos [12]. Las empresas PAYGo no solo venden productos sino también la financiación necesaria para los consumidores.

En este modelo los consumidores realizan un pequeño pago por adelantado por el hardware del sistema solar y luego compran créditos por incrementos de servicio, que se utilizan para pagar el costo total del sistema. El pago y el control del sistema se hace a través del teléfono móvil.

El modelo de PAYGo es un modelo de inversión inicial y pago a cuotas. Según la investigación realizada por El Grupo Consultivo de Ayuda a los Pobres (CGAP) del Banco Mundial, acerca de los sistemas solares instalados en las comunidades de Kenya, se ha implementado el modelo a partir de dos esquemas de financiamiento exitosos [108]. En la actualidad es el modelo financiero más utilizado para proyectos de energización rural [104] [12].

En el primer esquema (ofrecido por la empresa M-KOPA), se realiza el financiamiento del sistema solar a un año, con pagos diarios de forma prepagada. Al inicio del proceso de financiamiento, el cliente paga un depósito por tres meses, antes de que se le sea instalado el sistema. Una vez cuenta con el sistema, utiliza la billetera electrónica para comprar diariamente créditos de energía por un monto fijo pequeño. Los créditos van descontando automáticamente el saldo del cliente. Cuando se agotan los créditos de energía el sistema se desactiva automáticamente y si el cliente incumple con el crédito diario también se desactiva, pero no incurre en tasas de mora. Para volver a utilizar el sistema, debe pagar el saldo atrasado. Una vez hayan transcurrido 12 – 13 meses el sistema solar será propiedad privada del usuario [108].

El segundo esquema más utilizado es el financiamiento a tres años con pagos mensuales. El modelo ha sido utilizado por las empresas BBOXX y Off-Grid Electric. En este esquema, no es obligatorio hacer un depósito inicial. Las tarifas mensuales son más bajas y permite captar los clientes con menores ingresos en la población. Sin embargo, los riesgos financieros son más elevados para los inversionistas.

Los pagos se realizan de forma prepago mensualmente, aunque no es necesario pagar toda la tarifa de una sola vez, sino estar al día al menos 3 días antes de que se termine el mes. Al igual que el modelo de financiamiento a un año, no se generan intereses de mora. Si los clientes se atrasan varios meses en el pago de la tarifa, el sistema puede ser embargado [108].

En la Tabla 10 se muestran algunos contrastes frente a los pros y contras de los dos esquemas de financiamiento de sistemas solares para poblaciones rurales con bajos ingresos del modelo PAYGo.

Tabla 10 Plazos de los préstamos: pros y contras

	Préstamo a un año	Préstamo a tres años
Riesgo de incumplimiento de pagos —en definitiva, se traspasa a los costos del cliente. El riesgo se exagera por la disminución de los costos de la energía solar, lo que puede hacer más atractivos los productos de la competencia antes de que se termine de pagar el préstamo inicial.	Menor	Mayor
Costo del capital —en definitiva, se traspasa a los costos del consumidor	Menor	Mayor
Período para cambiar a un sistema mejor/ofrecer servicios con valor agregado	Más corto	Más largo
Asequibilidad para clientes de bajos ingresos ^a	Más difícil de pagar	Menos difícil de pagar
Posibilidad de ofrecer desde un principio un producto más grande, con pagos asequibles	No	Sí

Fuente: [108]

3.3 MARCO NORMATIVO

El marco regulatorio está conformado por la normatividad colombiana para la integración de energías renovables no convencionales en el territorio nacional, principalmente regida por la ley 1715 del 2014 y la participación del país en organizaciones conformadas para el cuidado del medio ambiente y el desarrollo de tecnologías limpias y sostenibles a través de compromisos soportados en acuerdos internacionales.

Resolución CREG 091 de 2007

Esta resolución establece las metodologías generales para remunerar las actividades de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica y las fórmulas tarifarias generales para establecer el costo unitario de prestación del servicio público de energía en las ZNI. Dicha resolución ha sido modificada por las resoluciones CREG 161 y 179 de 2008, 056,057 y 097 de 2009 y, 072 de 2013.

Esta resolución define el Costo Unitario de Prestación del Servicio de Energía Eléctrica (CU): como “*Es el costo económico eficiente de prestación del servicio de energía eléctrica al usuario regulado, expresado en pesos por kilovatio hora (\$/kWh) que resulta de aplicar la Fórmula Tarifaria General establecida en la resolución, y que corresponde a la suma de los costos eficientes de cada una de las actividades de la cadena eléctrica.*” (modificación resolución 161 de 2008)” También denominado en la literatura consultada como costo nivelado de energía o *levelized energy cost* (LCOE).

El concepto de **costo** está asociado a la sumatoria de costos del sistema en términos monetarios (\$). En la resolución CREG 091 de 2007, se establecen los cargos máximos de generación como la sumatoria de los de los costos de inversión y los costos de Administración, Operación y Mantenimiento, por tipo de tecnología (Unidades Diésel, centrales hidroeléctricas a pequeña escala, sistemas solares FV) [109].

Ley 1665 de 2013

La ley 1665 del 2013 se celebró en Colombia con el objetivo de dar soporte a la participación de Colombia en la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) cuando ingresó como país gestor de desarrollo de tecnologías de producción limpias y amigables con el medio ambiente.

Ley 1715 de 2014

Emitida el 13 de mayo del 2014 por el Congreso de la República de Colombia, la ley 1715 de 2014 constituye la normativa colombiana para integración de las energías renovables en el sistema eléctrico nacional y las zonas no interconectadas. La ley impulsa la respuesta de la demanda como complemento de las acciones de uso racional y eficiente de la energía e introduce dos actores al mercado eléctrico nacional [110], así mismo autoriza la entrega de excedentes de energía a la red por parte de los auto generadores, que dispongan de tecnologías como sistemas de medición bidireccional, mecanismos simplificados de conexión y créditos de energía.

La norma se crea con miras al cumplimiento de objetivos planteados por el país como, la reducción de las emisiones de carbono, incrementar la seguridad de abastecimiento de electricidad, promover la eficiencia energética, involucrar a los consumidores para crear programas de respuesta a la demanda y fomentar la investigación, inversión y desarrollo de tecnologías limpias. Acuerdos a los cuales se había comprometido el país en la participación en la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) en el año 2013.

Resolución CREG 161 de 2008 y CREG 004 de 2014

El concepto de tarifa proviene de la resolución CREG 161 de 2008 y CREG 004 de 2014, llamada Fórmula Tarifaria general o fórmula tarifaria al *“Conjunto de criterios y de métodos de tipo general en virtud de los cuales se determina, a los Comercializadores de energía eléctrica que atienden a usuarios regulados, el costo promedio por unidad.”*

La tarifa incluye la remuneración de la prestación del servicio para el inversionista o comercializador. La resolución contempla la fórmula para el cálculo de los cargos máximos de comercialización para la prestación del servicio en una ZNI.

Cabe resaltar que, el costo de inversión de sistemas híbridos y otras tecnologías de generación no es definida en la resolución CREG 091 de 2007, en su lugar se manifiesta que *“Los costos unitarios de inversión para sistemas híbridos y otras tecnologías de generación no definidos en la presente resolución, podrán proponerse a la Comisión quién definirá en Resolución particular los costos correspondientes.”* (Artículo 22, parágrafo 4d).

El sistema tarifario para sistemas híbridos o microrredes en la resolución 004 de 2014 y en el marco normativo 002 de 2014 de la CREG, no es considerado como un sistema individual, en tanto que los costos de inversión y AOM, son definidos de la misma manera que se hizo para una central térmica a base de Diésel N°2 [111].

Resolución UPME 281 de 2015

Se establece 1MW como límite máximo de potencia de autogeneración a pequeña escala en capacidad instalada.

Decreto 1623 de 2015

El cargo que remunera la generación en las ZNI, será aquel que de la generación con combustible diésel en el momento de realizar la inversión.

Acuerdo de París de 2015

En la 21ª conferencia de las partes COP21 de la UNFCCC sobre el cambio climático en la ciudad de París, fue acordado entre 195 países del mundo, limitar el calentamiento global por debajo de 2 grados centígrados. Para lograr el cometido cada país se comprometió a implementar las energías renovables y a mejorar la eficiencia energética. Colombia participó del acuerdo y ha venido implementando estrategias para cumplir con el objetivo mencionado en el acuerdo de París.

Resolución CREG 038 de 2018

Resolución por la cual se regula la actividad de autogeneración en las Zonas no interconectadas y se dictan algunas disposiciones sobre la generación distribuida en las Zonas no interconectadas [112].

Están exentos de la regulación los auto generadores con potencia instalada menor a 100kW. La resolución establece las características técnicas que debe garantizar el sistema de información de la administración del auto generador en las ZNI, tales como: un sistema de información que permita la captura, procesamiento, almacenamiento, actualización y publicación de la información de la actividad de autogeneración presentes en los sistemas de distribución que se encuentren bajo su operación.

El componente normativo de esta sección involucra la legislación y regulaciones vigentes de la Comisión de Regulación de Energía y Gas de Colombia (CREG), alrededor de las fórmulas tarifarias para el cálculo de cobro del servicio de energía eléctrica para los usuarios de las zonas no interconectadas en el país.

Resolución CREG 166 de 2020

Por la cual se define la fórmula tarifaria transitoria para el servicio de energía eléctrica en las ZNI para sistemas solares individuales AC mayores a 500Wp, lo cual permitirá asegurar el acceso a energía en tiempos de pandemia, mitigando efectos negativos en la seguridad alimentaria, conservación de alimentos y medicamentos, educación, internet y telefonía. La fórmula tarifaria estará vigente por los próximos cinco años.

Esta resolución surge gracias a las disposiciones del gobierno nacional en el plan de desarrollo 2018-2022 donde define que “El suministro de energía eléctrica a partir de soluciones solares individuales en ZNI se considerará un servicio público domiciliario”, por

lo que todos los prestadores del servicio se encuentran autorizados a trasladarle a los usuarios los costos definidos y reconocidos en la regulación.

Es importante mencionar que en esta resolución o en anteriores, la CREG no ha definido una fórmula tarifaria para microrredes o sistemas híbridos en ZNI y que la comisión puede definir los costos particulares para tecnologías no previstas mediante resolución particular.

El cargo máximo de generación está definido en dicha resolución como:

$$G_o = G_{Io} + G_{AOMo}$$

Donde G_{Io} son los costos de inversión en sistemas solares fv individuales, expresado en \$/mes, y G_{AOMo} es el componente que remunera los costos de administración, operación y mantenimiento del sistema solar en \$/mes. Los cargos máximos de remuneración de G_{Io} se definen en la Tabla 11. El cargo máximo de G_{AOMo} está definido en \$86.525/mes por usuario.

Tabla 11. Costo de inversión inicial para sistemas solares individuales ZNI

Componente	\$/mes por usuario
Módulos, estructura y obra	\$83,151
Controlador	\$15,986
Inversor	\$25,617
Batería	\$104,539
TOTAL	\$229,293

[27]

La fórmula tarifaria con la que se factura al usuario es:

$$CU_m = G_m + C_m$$

Donde, CU_m es el costo de prestación del servicio de energía eléctrica para usuarios regulados atendidos con sistemas solares FV individuales, G_m cargo máximo de generación del mes m y C_m es el cargo máximo de comercialización el cual está definido el un costo unitario de \$23.181/mes por usuario.

El costo de prestación del servicio de energía eléctrica a partir de esta fórmula tarifaria por usuario sería de aproximadamente \$345.937/mes, que solo será trasladado al usuario dependiendo el porcentaje del costo proporcional a la disponibilidad real del servicio en cada mes.

3.4 MARCO CONTEXTUAL

Esta sección tiene el propósito de mostrar el contexto de las energías renovables en Colombia, así como de las zonas no interconectadas y de los financiadores actuales de proyectos de electrificación en el país.

3.4.1 Contexto Colombiano en la ER

La producción de energía en Colombia proviene principalmente de fuentes fósiles como el carbón mineral con un 46% de participación, el petróleo con un 38% y el gas natural con el 25% de participación; la generación a partir de fuentes renovables está liderada por la hidroenergía con un 4% y en muy pequeña proporción el uso de fuentes como la leña, el bagazo de la caña y residuos de biomasa [1]. A pesar de que tan solo un 4% de la producción de energía se dé a partir de procesos hidroeléctricos, Colombia es considerada como uno de los 9 países líderes con mayor capacidad de energía hidráulica [18].

El mayor gasto de energía proveniente del petróleo como combustible es consumido en el sector del transporte, mientras que las demás fuentes son usadas para uso doméstico e industrial en la generación de energía eléctrica. Colombia cuenta con un sistema eléctrico relativamente bajo en emisiones de carbono, no depende de energéticos importados y posee suficiente capacidad para la producción de energía de fuentes renovables.

Los nichos de oportunidad para el país se encuentran en las fuentes eólicas, solar fotovoltaica, biomasa y geotérmica, debido a sus grandes potenciales en velocidad del viento en regiones como la Guajira, y sectores costeros. También posee importantes fuentes de energía a partir la palma de aceite, caña de azúcar, el arroz, el plátano y el banano, de residuos animales, residuos sólidos urbanos y forestales.

Colombia cuenta con un alto potencial de recurso solar y está posicionado por encima de países como Alemania, que produce aproximadamente 36 GW de energía solar. La radiación promedio del país es de 4.5 kWh/m²/d a lo largo del año al no experimentar fenómenos estacionales. Las regiones que presentan niveles altos de radiación solar son, la Guajira, la costa Atlántica, Orinoquía, Amazonía, la región Andina y la Costa Pacífica, con órdenes de hasta 6.0 kWh/m²/d, valores por encima del promedio mundial.

La energía solar fotovoltaica es considerada un nicho de oportunidad para Colombia debido a su gran potencial natural, los costos decrecientes de la tecnología y fácil instalación de los sistemas fotovoltaicos, y la iniciativa tanto del estado como de los usuarios que han desarrollado sus propios sistemas de autogeneración y que tienen la posibilidad de desconectarse de la red principal para evitar la volatilidad del sistema principal.

Los avances en innovación tecnológica en el sector eléctrico se ven reflejados, inicialmente en países desarrollados, de ahí la delantera en un ciclo de desarrollo tecnológico de países como EU, Europa y China en comparación con Colombia.

La evolución del sector eléctrico en países desarrollados ha sido enmarcada por la adopción de políticas y legislaciones para la regulación eléctrica, los límites y alcances del sector y sus participantes. Se ha encontrado a través de estudios de innovación tecnológica y análisis de la evolución y desarrollo histórico del sector, que el mercado eléctrico ha mostrado progreso en periodos de 40 a 60 años en promedio, conformados por cuatro fases de, irrupción, frenesí, sinergia y madurez, que van en aumento en progreso tecnológico [113].

En el caso de Colombia, se observa un atraso en su primer ciclo de desarrollo tecnológico, ya que no ha alcanzado a presentar oleadas de innovación, debido a la permanencia en la etapa de madurez que le ha costado alrededor de 100 años de recorrido desde la etapa de iniciación.

Realizando una búsqueda de patentes del sector de la energía en Colombia, se puede observar alrededor de 89 resultados de patentes en Colombia referentes al tema de energía renovable. Algunas de las innovaciones tecnológicas se encuentran en temas como, optimizaciones en sistemas hidráulicos, procedimientos para la producción de biocombustibles, convertidores de energía solar a un menor costo, entre otras, y han venido en aumento desde el año 1998. Entre el 2013 y 2016 ha experimentado el mayor número de patentamientos. Al revisar los periodos de las publicaciones, se puede estimar que el ciclo de innovación es alrededor de 7 nuevos productos por año.

La investigación propuesta apuntará a las innovaciones de tipo organizacional y financieras, puesto que lo que pretende es establecer un modelo financiero para la energización de las ZNI en Colombia.

3.4.2 Zonas rurales aisladas y zonas no interconectadas

Según la resolución 114 de 1996 y la 077 de 1997 de la CREG, en Colombia la Zona No interconectada es el *“área geográfica en donde no se presta el servicio público de electricidad a través del Sistema Interconectado Nacional”*, y según la Ley 1715 de 2014 del Congreso de la República de Colombia la ZNI se entiende por *“los municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN)”*.

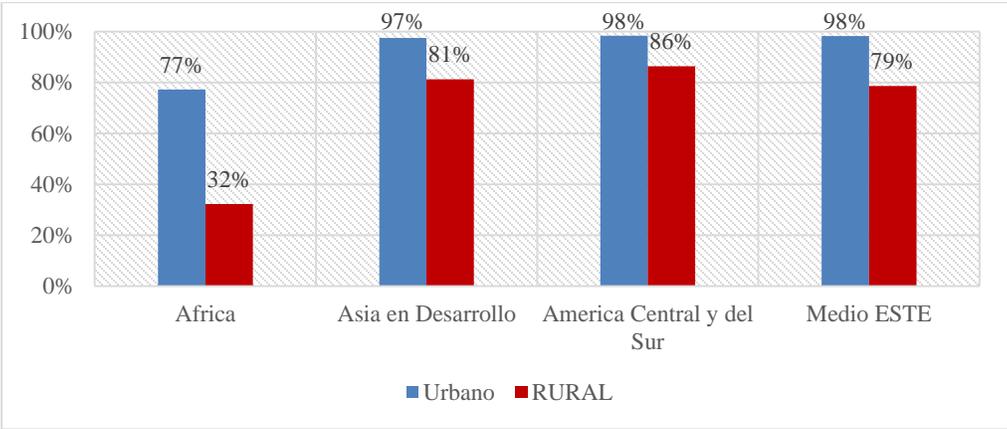
Esta definición es propia del país y se ha utilizado para referirse a los territorios donde existe baja o insuficiente oferta del servicio público de energía eléctrica al no estar conectado al sistema principal. El índice de cobertura de energía eléctrica (ICEE) actualmente es del 96.96% con un aproximado de 425,212 viviendas sin servicio de energía en Colombia [7].

A nivel mundial, existen alrededor de 1,100 millones de personas sin acceso a los servicios de energía eléctrica (Figura 27), donde un 84% de estas personas viven en zonas rurales de países en desarrollo [30]. El 16% restante corresponde a áreas urbanas sin cobertura de energía eléctrica, aun así, el acceso urbano ha superado en gran medida el acceso en las zonas rurales a nivel global (Figura 26).

Gracias a estas proporciones en el territorio mundial, se ha generalizado el término “zonas rurales” o “áreas rurales”, para referirse a las poblaciones sin acceso a los servicios de energía eléctrica, a sabiendas de que todavía no se ha logrado la universalización de la energía del sector urbano mundial.

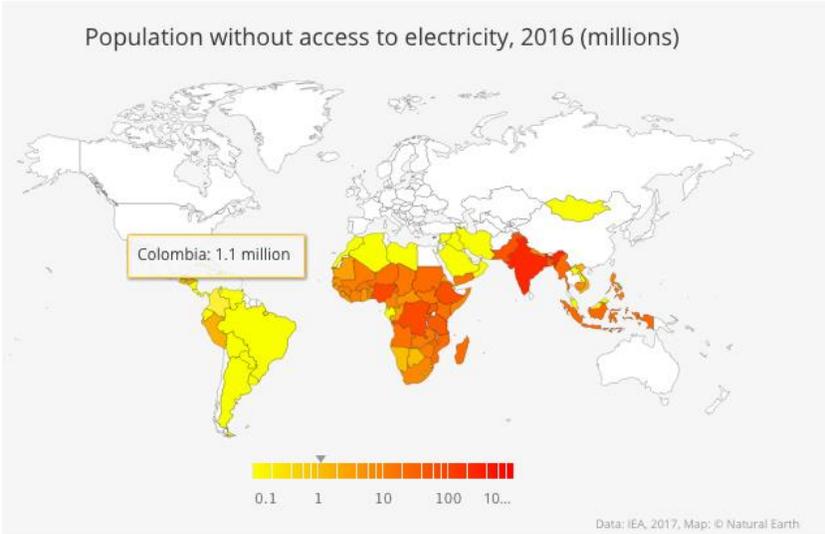
En países de Sur América estos territorios han sido denominados de diferentes maneras, tales como, comunidades aisladas, rurales e insulares sin servicio de energía eléctrica en Chile (Programa de energización rural PER), personas del área rural (Programa luz para todos) en Brasil y áreas no conectadas a red en Perú.

Figura 26. Tasas de acceso a la electricidad en países en desarrollo sector urbano y rural



Fuente: Elaboración propia a partir del dataset 2017 IEA

Figura 27 Población sin acceso a la electricidad 2016 - IEA 2017



Fuente: database IEA 2017

En conclusión, las zonas rurales y las ZNI en Colombia, no son lo mismo. Las primeras están definidas por el DANE como “*área caracterizada por la disposición dispersa de viviendas y explotaciones agropecuarias existentes en ella. No cuenta con un trazado o nomenclatura de calles, carreteras, avenidas, y demás. Tampoco dispone, por lo general, de servicios públicos y otro tipo de facilidades propias de las áreas urbanas*”, aun así pueden estar conectadas al SIN, mientras que las ZNI no están conectadas. Las zonas rurales en Colombia contienen las Zonas No interconectadas.

Por lo anterior, el campo de acción de esta investigación son las zonas no interconectadas en Colombia, en especial el archipiélago de La Plata, pero se toma como referente las áreas rurales sin servicio de energía eléctrica a nivel mundial, con características de aislamiento territorial, poblaciones dispersas y desatendidas.

4. METODOLOGÍA

Este capítulo tiene el propósito de presentar el enfoque metodológico que se llevó a cabo para desarrollar la investigación, el cual garantiza que los resultados sean veraces y útiles para el campo del conocimiento y para las comunidades de las zonas no interconectadas en Colombia, en especial para el archipiélago de La Plata.

La investigación que se desarrolló fue de tipo aplicada no experimental, mediante un caso de estudio en una población del Pacífico colombiano.

Este capítulo fue organizado de tal manera que se describe inicialmente el enfoque y tipo de investigación, las técnicas e instrumentos de recolección de los datos, la población y la muestra, y por último las fases con sus respectivas actividades realizadas para alcanzar los objetivos de investigación planteados.

4.1 ENFOQUE Y TIPO DE INVESTIGACIÓN

Investigación de enfoque cuantitativo y alcance correlacional, puesto que implica la descripción de las variables técnicas, económicas y financieras que intervienen en un modelo de energización rural, para minimizar el costo de generación. En esta investigación es de vital importancia dar a conocer cómo el comportamiento de unas variables afecta directa o indirectamente otras, dentro del mismo problema. El diseño de la investigación es no experimental ya que no se manipularon las variables dependientes (efectos generados después de manipular la población) e independientes (causas o acciones que se realizan para manipular la población o muestra de un experimento) del problema de investigación [114]. Se observó el contexto natural de la comunidad de la zona no interconectada desde el enfoque económico, productivo, social, cultural y ambiental, por lo que la investigación se denomina transeccional, con recolección de datos única. La investigación no tendrá una etapa de implementación por lo que no tratará de cambiar el comportamiento de la comunidad a través de estímulos provocados en la investigación. En la Tabla 12 se detalla el enfoque de la investigación desarrollada en esta tesis.

Tabla 12. Tipos o enfoques de investigación de la tesis

Tipo de investigación en el cual se clasifica la tesis	Definición del tipo	Referencia	Razón por la cual la tesis se considera de este tipo
Cuantitativo	<i>“Utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis</i>	[114]	La investigación es de tipo cuantitativo ya que se realizó la recolección de datos, el análisis y tabulación de los mismos, a través

	<i>estadístico, con el fin establecer pautas de comportamiento y probar teorías.”</i>		de encuestas e instrumentos, con el objetivo de analizar estadísticamente los datos y probar la hipótesis de la investigación.
Alcance correlacional	<i>“Este tipo de estudios tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra o contexto en particular.”</i>	[114]	Esta investigación es considerada de alcance correlacional puesto que más que describir, intenta determinar la variación de unos factores como, las variables meteorológicas, el tipo de consumo de energía, la demanda, los ingresos, actividades productivas, entre otras, en relación con otras, como el potencial energético, el costo de un sistema de generación, la operación del sistema, el dimensionamiento y el tipo de modelo financiero acorde con las características de las variables.
Diseño, no experimental, transeccional o transversal	<i>“Estudios que se realizan sin la manipulación deliberada de variables y en los que solo se observan los fenómenos en su ambiente natural para analizarlos.”</i>	[114]	El diseño de la investigación es no experimental, ya que no se pretende modificar el comportamiento de las variables de la investigación. El sistema de generación de energía diseñado no llegará a la etapa de implementación en esta investigación, gracias a su alcance, por lo que solo se observará el comportamiento de la comunidad en términos energéticos, productivos, económicos y sociales, para plantear un sistema de generación acorde con estos factores. Implica la recolección de datos en un solo momento y no pretende ver su evolución.
Caso de estudio	<i>“Estudios que al utilizar los procesos de investigación cuantitativa, cualitativa o mixta; analizan profundamente una unidad para responder al planteamiento del problema, probar hipótesis y desarrollar alguna teoría”</i>	[115]	Esta investigación es considerada un caso de estudio ya que solamente se recolectan los datos de una comunidad en una ZNI en Colombia, específicamente La Plata Bahía Málaga. El diseño del sistema de generación es único para esta comunidad ya que es planteado con la información propia del sitio.

Elaboración propia

4.2 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La investigación requirió la recolección de datos energéticos, técnicos, económicos, productivos, ambientales, sociales y culturales de la comunidad caso de estudio. Para ello se diseñaron instrumentos tipo encuesta y se aplicaron a los habitantes de la comunidad de la Plata.

Para la construcción del instrumento se identificaron previamente las variables requeridas y se realizaron pruebas piloto para garantizar la confiabilidad, validez y objetividad del instrumento. Estos fueron construidos multidisciplinariamente con profesionales de las áreas de ingeniería, comunicación social, estadística, economía e ingeniería ambiental, con el fin de incluir todas aquellas preguntas que darían respuesta a la caracterización energética, económico-productiva, financiera, social-cultural y ambiental de la comunidad. También se tuvo como referencia la encuesta del DANE para el censo poblacional.

Se presentó el proyecto ante el comité de bioética de la Universidad Autónoma de Manizales, el 11 de marzo de 2020, así como los instrumentos diseñados para aplicar en la comunidad, con su respectivo consentimiento informado. La investigación no presenta riesgos bioéticos por que los criterios de inclusión involucran a personas entre los 18 y 60 años, cabezas de familia. A pesar de que la población de Buenaventura se encuentra en el Registro Único de Víctimas de Violencia en Colombia, la investigación no indagará en ningún momento temas relacionados con este factor, y todas las actividades realizadas se desarrollaron con el consentimiento del líder social del asentamiento La Plata. La investigación y sus instrumentos fueron aprobados por dicho comité con el acta número 096.

Finalmente se aplicaron dos instrumentos tipo encuesta a los habitantes. El primero pretendía realizar una caracterización energética, técnica, económica, productiva, ambiental y sociocultural. Este fue aplicado a través de un trabajo de campo, en donde los integrantes del programa de investigación, del cual hace parte esta investigación, realizamos las encuestas de manera presencial a cada vivienda disponible de la comunidad. En total fue posible aplicar 18 encuestas. El instrumento aplicado se encuentra en el anexo n°1.

El segundo instrumento pretendía reunir la información faltante para la construcción del perfil técnico, económico, productivo y capacidad financiera de los habitantes de la comunidad. En este caso, no fue posible aplicar la encuesta de manera presencial, ya que nos encontrábamos en cuarentena obligatoria por la pandemia del coronavirus, por lo tanto, las encuestas se aplicaron con el apoyo de un habitante de la comunidad y fueron enviadas a los investigadores. En total hubo respuesta positiva de 12 hogares de La Plata. El detalle del instrumento se encuentra en el anexo n°2.

Por último, los datos de radiación solar necesarios para hallar el perfil solar y el potencial de la fuente FV, fueron recolectados de la estación meteorológica Naval Málaga y de las bases de datos satelitales de la NASA, y contratados con mediciones experimentales in-situ.

El análisis de los datos recolectados se ejecutó en las herramientas de Excel, SPSS y software de programación Julia box.

4.3 POBLACIÓN/UNIVERSO Y MUESTRA

La población de la investigación será una comunidad de las Zonas No-Interconectadas del territorio colombiano. La muestra es no probabilística por conveniencia, donde se seleccionó a la comunidad de la Plata en Bahía Málaga Pacífico Colombiano, debido a la cercanía, accesibilidad a la comunidad e interés en trabajar por la universalización de la energía.

La investigación no pretende generalizar el resultado que se obtenga de una comunidad en todas las comunidades de las ZNI en Colombia, debido a que existen diferencias significativas como, tipo y disponibilidad de las fuentes de energía renovable, tamaño de la carga en la red, tamaño de la población y potenciales productivos diferentes. Sin embargo, el modelo si pretenderá generalizar la cantidad, calidad e importancia de las variables a considerar para la determinación de un modelo óptimo de generación y asequible para la comunidad. En la Tabla 13 se presenta la población caso de estudio.

Tabla 13. Población y muestra de la investigación

Denominación de la población	Descripción de la población	Ubicación de la población	Tamaño de la población
Comunidad del archipiélago de La Plata Bahía Málaga Colombia	Comunidad afrodescendiente de actividad pesquera, ubicados en una isla de la bahía Málaga de Colombia en el pacífico colombiano. Es denominada como asentamiento rural del municipio de Buenaventura. Tiene aproximadamente 225 habitantes, distribuidos en 45 viviendas habitadas.	Bahía Málaga Pacífico Colombiano.	45 viviendas

Fuente: elaboración propia.

4.4 FASES DE LA INVESTIGACIÓN

El proyecto doctoral se desarrolló en tres fases, la primera correspondió con la caracterización del modelo técnico de la microrred, posterior a ello se determinó el impacto económico de la implementación de un sistema de generación de energía, así como la definición del perfil económico – productivo de la comunidad y por último se desarrolló el modelo financiero para el sistema (Figura 28). En la sección 4.5 se detallan las actividades desarrolladas en cada una de estas fases.

Figura 28. Fases de la investigación



Elaboración propia

4.5 ACTIVIDADES INVESTIGATIVAS REALIZADAS

Las actividades investigativas que se llevaron a cabo para desarrollar cada uno de los objetivos de la tesis de investigación se describen en la Tabla 14 y en las subsecciones siguientes.

Tabla 14. Actividades investigativas de la tesis y su relación con los objetivos específicos, las fases y los resultados obtenidos.

Actividad investigativa	Objetivo específico	Fase	Resultado obtenido
1. Caracterización de la generación, la demanda de energía, la topología de la red, el monitoreo y control de una microrred.	1. Caracterizar un modelo técnico para una microrred de fuentes renovables de energía para una zona no interconectada en Colombia específicamente en la comunidad de La Plata bahía Málaga, considerando recursos energéticos locales.	Fase 1. Diseño del modelo técnico del sistema de generación.	Capítulo 5
2. Análisis de la microrred para identificar las variables presentes en un modelo de generación de energía, desde un enfoque técnico y midiendo los impactos económicos, ambientales. Caso de estudio: una ZNI en Colombia. La Plata en la comunidad de Bahía Málaga del Pacífico Colombiano.			Sección 5.2 Modelo técnico del sistema de generación.
3. Construcción del perfil de la comunidad, a través de un análisis económico y productivo de la población en estudio, identificando los tipos de recursos, actividades y necesidades productivas.	2. Determinar el impacto económico del sistema de generación de microrredes para la ZNI del caso de estudio.	Fase 2 Análisis e impacto económico	Capítulo 5
4. Cálculo de los indicadores económicos y productivos de la comunidad.			Sección 5.1 Caracterización de la ZNI Caso de estudio – archipiélago La Plata.
5. Diseño y solución de un modelo de optimización estocástico para definir el despacho óptimo de generación desde un enfoque confiable y económico y planificar la generación con el menor costo unitario para el usuario.			Sección 5.2 Subsección 5.2.3 Variables del modelo.

			Subsección 5.2.4 Modelo de optimización estocástico Sección 5.3 Análisis económico de la población caso de estudio y posible impacto del sistema de generación.
6. Desarrollo del esquema tarifario para ZNI con el menor costo unitario	3. Desarrollar un modelo financiero sostenible y asequible para el usuario de microrredes dentro de la ZNI caso estudio.	Fase 3 Diseño del modelo financiero para el sistema de generación	Capítulo 5 Sección 5.4 Modelo Financiero
7. Diseño de un modelo financiero que permita la AOM del activo de generación a partir de estrategias de agrupación comunitaria, gestión de la demanda y estrategias de desarrollo productivo mediante el uso eficiente de la energía.			
8. Integrar los aspectos técnicos, económicos, y financieros bajo el esquema auto sostenible en el marco de la energización, productividad y emprendimiento, con el menor costo unitario para el usuario. Validar los resultados del modelo con diferentes técnicas de optimización.			

Fuente: elaboración propia.

4.5.1 Actividad N°1

En esta actividad se realizó la caracterización de la generación, la demanda de energía, la topología de la red y el monitoreo y control de una microrred.

Para caracterizar la generación se analizaron las fuentes de generación de energía en la región, en especial las fuentes de energía renovable. En investigaciones previas del programa de investigación se definió que la velocidad del viento en la zona y los residuos biodegradables son insuficientes para la producir energía [116] [117], por lo tanto, solamente se analizó el recurso solar.

Se estudiaron series históricas horarias de radiación solar global (directa y difusa) durante un año completo para visualizar la variación de radiación mensual. Fueron elaborados 365 perfiles solares para disminuir la incertidumbre frente a la volatilidad de la fuente renovable. Por último, se calcularon distribuciones de probabilidad y frecuencia de aparición de determinados rangos de radiación para cada hora del día.

Los datos fueron extraídos de las estaciones meteorológicas Naval Málaga, Juanchaco del IDEAM, y de fuentes satelitales y se procesaron en hojas de cálculo de Microsoft Excel.

Para la caracterización de la demanda, fue necesario realizar una visita de campo a la comunidad de La Plata y aplicar una encuesta a sus habitantes. El instrumento (Anexo n°1) fue diseñado por múltiples investigadores en campos disciplinares diversos (técnico,

ambiental, social, cultural, económico) para garantizar la inclusión de todos los criterios necesarios para el diseño del sistema. De estos documentos se pudo extraer la carga eléctrica de cada vivienda, en términos de la cantidad de electrodomésticos y equipos que poseen. Con esta capacidad instalada se asumió un perfil diario actual (con cuatro horas de energía) y un perfil diario proyectado asumiendo un tiempo de servicio de energía de 24 horas del día.

Se elaboró la curva de carga diaria de la comunidad y se definieron 3 escenarios (perfil de carga bajo, medio y alto) relacionado con la realidad de la población, para evaluar un escenario en donde la generación de energía no se realice con una microrred, sino con sistemas solares individuales y una planta diésel comunitaria.

La topología de la red tanto para la microrred como para los sistemas solares individuales (SSI) se elaboró a partir de los cálculos matemáticos dependiendo del potencial de la fuente solar, la capacidad de la planta diésel y la cantidad de combustible diario disponible. Las fórmulas básicas para el cálculo del dimensionamiento de este tipo de sistemas se obtuvieron de [118], [119], [120] y [121].

La topología de la microrred fue calculada a través de un modelo de optimización estocástico en el lenguaje de programación de *Julia*, paquete *JuMP* y solucionador *Gurobi* para problemas lineales y no lineales.

Julia es un lenguaje de programación libre, que opera en línea o en la interfaz de Atom o Jupiter; “*este lenguaje es dinámico flexible, apropiado para la computación científica y numérica, con un rendimiento comparable al de los lenguajes tradicionales de tipado estático*” (<https://julialang.org/>).

JuMP es un paquete de lenguaje para la optimización matemática, que admite múltiples solucionadores comerciales y de código abierto para problemas lineales, entero-mixto, de segundo orden, semidefinida y no lineal (<https://jump.dev/JuMP.jl/stable/>).

Gurobi, es un *solver* de optimización matemática comercial, muy utilizado gracias a su alto potencial (<https://www.gurobi.com/>).

Con el objetivo de conocer los costos y características de los equipos a dimensionar en los sistemas de generación, se procedió a seleccionar la referencia de las tecnologías a utilizar a través de la búsqueda y cotización de equipos comerciales con excelente calidad, precio bajo, e idóneos para instalar en este tipo de regiones.

El monitoreo y control para microrredes de generación de energía renovable es asumido según la literatura como un problema de optimización y despacho de energía como control secundario para microrredes aisladas, el cual se desarrolló en el subcapítulo de resultados 5.2.4 Modelo de optimización estocástico.

4.5.2 Actividad N°2

En esta actividad se realizó un análisis de la microrred para identificar las variables presentes en un modelo de generación de energía desde un enfoque técnico y midiendo los impactos económicos y ambientales para el caso de estudio.

A partir de la revisión sistemática de literatura realizada en la formulación del proyecto de investigación, una de las preguntas orientadoras de la técnica empleada consistía en identificar las variables presentes en un modelo técnico-económico de dimensionamiento y operación de una microrred. Por lo tanto, este análisis arrojó las variables generalmente contempladas por los investigadores y autores, tales como, potencial de la fuente renovable natural (radiación, velocidad del viento, capacidad de residuos, combustible disponible), demanda de energía, características de los equipos y costos, como datos de entrada para el modelo; mientras que las variables de decisión están asociadas a potencia entregada por los generadores, potencia de descarga de las baterías, número de equipos (paneles, baterías, inversores, controladores, etc.), deslastre de energía y vertido de renovables. La descripción de estas variables se desarrolla en el subcapítulo de resultados 5.2.3 Variables del modelo.

4.5.3 Actividad N°3

Construcción del perfil de la comunidad a través de un análisis económico y productivo de la población en estudio, identificando los tipos de recursos, actividades y necesidades productivas.

Para dicha actividad se requirió la recolección de datos técnicos, económicos, productivos, ambientales, sociales y culturales de la comunidad caso de estudio, por lo que se diseñaron instrumentos de recolección de información.

El primer instrumento se aplicó en el mes de marzo de 2018 a través de un trabajo de campo de tres (3) días con un grupo interdisciplinar de la UAM y la UAO, con el objetivo de recopilar la información (encuestas a los habitantes) de base para la posterior revisión de literatura acerca de las condiciones de suministro de energía en estos sitios. Como resultado de la visita se evidenciaron las necesidades básicas insatisfechas tales como el suministro de energía eléctrica, con tan solo cuatro horas de servicio al día, que se obtiene de subsidio del gobierno, el cual no alcanza a cubrir más del 16% de la demanda.

El instrumento aplicado (Anexo n°1) abordaron aspectos, demográficos y poblacionales, financieros, productivos, culturales, sociales, energéticos, laborales, educativos, de salud, vivienda, entre otros. Este fue diseñado con la aprobación de profesionales de las áreas de ingeniería, estadística y sociología, para que contara con las preguntas claves necesarias y estuviera adecuado a un vocabulario de fácil comprensión.

Con el instrumento uno (Anexo n°1) fue posible obtener respuesta del 40% de los hogares, mientras que con el segundo instrumento (Anexo n°2) fue posible una respuesta del 27%. Cabe resaltar que el segundo instrumento fue aplicado en el mes de julio de 2020, en medio

de la pandemia del covid-19, por lo que esta se realizó de manera remota, acogiéndonos a quienes estuvieron dispuestos a diligenciarla.

Figura 29. Evidencias de la aplicación de los instrumentos de recolección de información en La Plata



Instrumento n°2

Instrumento n°1

Fuente: propia

4.5.4 Actividad N°4

En esta actividad se determinó el impacto económico que podría tener el sistema de generación diseñado, a partir del perfil económico productivo construido en la actividad anterior. Se realizó un análisis económico y productivo de la población, identificando los tipos de recursos disponibles, actividades y necesidades productivas. Se calcularon los indicadores económicos y productivos, tales como el índice de pobreza multidimensional (IPM) y pobreza monetaria (5.3 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA POBLACIÓN CASO DE ESTUDIO Y POSIBLE IMPACTO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN)

4.5.5 Actividad N°5

Diseño y solución de un modelo de optimización estocástico para definir el despacho óptimo de generación desde un enfoque confiable y económico y planificar la generación con el menor costo unitario para el usuario.

En esta actividad se desarrolla un modelo de despacho óptimo para una microrred en una ZNI en Colombia en el marco de un modelo financiero sostenible y asequible para los usuarios, en la cual se realizará la planeación económica y financiera.

Con miras a definir la operación del sistema de generación, es indispensable elaborar el modelo de optimización del despacho económico, el cual consiste en la minimización del costo de la generación del sistema para operar cada hora del día bajo las restricciones y condiciones tanto de las fuentes renovables como de la demanda y de los equipos o tecnologías que acompañan al sistema. La optimización de la operación del sistema se hace más compleja y completa cuando se involucran las restricciones de la distribución de las redes del sistema, el control óptimo para el funcionamiento de las baterías y la estocasticidad (variabilidad o probabilidad de que la variable se mueva dentro de unos rangos naturales), de las variables del sistema.

El resultado de esta fase es un modelo de optimización estocástico para determinar el despacho óptimo o económico desde un enfoque confiable y económico y con el menor costo unitario para el usuario, el cual se desarrolla en el subcapítulo 5.2.4.

4.5.6 Actividad N°6

En esta actividad se planea el desarrollo de un esquema tarifario para el pago de un sistema de generación en la ZNI caso de estudio con el menor costo unitario, a través de la aplicación de normatividad actual colombiana para la definición de tarifas en estas zonas del país.

La tarifa diseñada corresponderá con el modelo financiero desarrollado paralelamente en la actividad n°7 de la metodología. El desarrollo de estas actividades se encuentra detallada en la subsección de resultados 5.4.

4.5.7 Actividad N°7

Diseño de un modelo financiero que permita la AOM del activo de generación a partir de estrategias de agrupación comunitaria, gestión de la demanda y estrategias de desarrollo productivo mediante el uso eficiente de la energía.

Después de darle solución a los criterios técnicos y económicos del sistema, se desarrolla el modelo financiero, diseñando un esquema tarifario para la utilización de la energía con el menor costo unitario, que permita la administración operación y mantenimiento del activo de generación a partir de estrategias de agrupación comunitaria, gestión de la demanda y estrategias de desarrollo productivo mediante el uso eficiente de la energía.

Las fases del modelo financiero se desarrollaron bajo cuatro principios rectores definidos por empresas del sector de la energía a nivel mundial [12] [101] [17], los cuales involucran:

1. Entender las necesidades, preferencias y capacidad de pago de los consumidores.
2. Demostrar el impacto de la nueva tecnología o la importancia de poseer el servicio.

3. Construir y mantener la confianza del consumidor en el producto y en la cadena de suministro.
4. Diseñar esquemas de financiamiento y pago que se ajusten a los presupuestos energéticos de los consumidores.

El logro del objetivo se expresa en: 1) esquema tarifario del suministro de energía para las comunidades de la ZNI caso de estudio y 2) modelo financiero para el mantenimiento y pago del sistema energético de generación;

A partir de los resultados del modelo técnico de la microrred y el análisis económico y productivo de la comunidad caso de estudio, se realizó un análisis financiero de los costos de inversión inicial de un sistema de generación de energía que supiera la demanda de los usuarios en el mayor porcentaje de cobertura asequible.

Para el desarrollo de este objetivo se propone una evaluación financiera de tres tipos de escenarios de suministro de energía bajo determinados modelos de financiación que garanticen la asequibilidad a la tecnología a partir de las condiciones socio-económicas de la población. Estos tres escenarios considerarán un sistema solar individual aislado para cada vivienda con tres tipos de carga (baja, medio y alta) y tres tipos de ingresos promedio obtenidos de las tabulaciones y análisis de las encuestas realizadas en campo. De otro lado, se analizó financieramente una microrred de generación.

Los escenarios fueron seleccionados de esta manera gracias a los análisis detallados que se realizaron frente al comportamiento de la comunidad, sus ingresos, flujo de efectivo, sus gastos, los costos de los sistemas, los antecedentes de la literatura y la estructura de los modelos financieros efectivos hasta el momento a nivel internacional.

Los créditos y modelos financieros fueron simulados y analizados utilizando tablas de Excel con proyecciones financieras, resultados de rentabilidad y formas de pago.

4.5.8 Actividad N°8

Con el propósito de integrar los aspectos técnicos, económicos, y financieros bajo el esquema auto sostenible en el marco de la energización, productividad y emprendimiento, con el menor costo unitario para el usuario y validar los resultados del modelo, se aplicó el método de análisis costo beneficio, en especial, la técnica de método de factores ponderados para la toma de decisiones.

Se integraron los aspectos técnicos, económicos y financieros bajo el esquema auto sostenible, entendiendo la sostenibilidad desde los enfoques económicos (garantía de rentabilidad financiera), ambientales (mínimo impacto sobre el medio ambiente), sociales (inclusión de la población local, asistencia técnica, formación, capacitación) y tecnológicos (diseños compatibles con el entorno social y económico). Por último, se socializaron los resultados con la comunidad de La Plata utilizando cartillas de apropiación social del conocimiento, con los resultados de la investigación.

Para el análisis y la validación del modelo financiero se tuvo en cuenta la opinión de expertos a través de la aplicación de encuestas. Esta actividad se encuentra desarrollada en la subsección 5.4.2.

5. RESULTADOS

El presente capítulo tiene el propósito de revelar los resultados de la investigación doctoral conforme con los objetivos específicos planteados, en pro del cumplimiento del objetivo general de la investigación.

El apartado se organiza en cuatro subsecciones que dan respuesta a los resultados de la investigación comenzando con la caracterización geográfica, socio-demográfica, socio-política, energética, económico-productiva, servicios públicos, TIC y caracterización ambiental, de la zona no interconectada caso de estudio. Seguidamente se muestra el resultado de la caracterización del modelo técnico del sistema de generación con el perfil de generación, la demanda de energía, el modelo de optimización para el dimensionamiento y la operación del sistema, la topología de la red y por último el monitoreo y control de esta.

Una vez se finaliza el subcapítulo técnico, se encuentra el análisis frente al impacto económico del sistema de generación para la ZNI, donde se calcularon indicadores socio-económicos y productivos. Finalmente se presenta el desarrollo de los modelos financieros para el pago del sistema de generación, a través de un esquema tarifario para garantizar la AOM, las estrategias de agrupación comunitaria y la sostenibilidad del proyecto desde un enfoque técnico, económico-financiero, social y ambiental.

5.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZNI CASO DE ESTUDIO – ARCHIPIÉLAGO LA PLATA

Este capítulo de resultados pretende describir la zona caso de estudio en la que se desarrolló el proyecto de tesis doctoral. La selección de la comunidad se realizó gracias a la cercanía, accesibilidad a la comunidad e interés de esta en trabajar por la universalización de la energía. La Plata cumple con todas las características para participar en el proyecto, puesto que es denominada una zona no interconectada en Colombia, no priorizada y con una cobertura promedio de horas de energía del 16% diario, que obtiene de la combustión de ACPM o diésel subsidiado por Gobierno Nacional, cada 3 meses.

La caracterización de la comunidad se hace necesaria para contextualizar al lector acerca de la comunidad caso de estudio y sus principales peculiaridades, las cuales aportan información relevante para diseñar el sistema de generación, tales como, localización, número de habitantes, sistema energético actual, costos del servicio, actividades productivas, servicios públicos, aspectos culturales y ambientales.

Esta caracterización se logra a partir de la tabulación de las encuestas aplicadas en el trabajo de campo con el instrumento (Anexo n°1), realizado en esta investigación en el año 2018 y 2020.

5.1.1 Ubicación geográfica

El archipiélago La Plata Bahía Málaga es una comunidad ubicada en zona rural costera del pacífico colombiano muy cerca de Buenaventura en el departamento del Valle de Cauca a una altitud de 7 msnm y con acceso marítimo. Su ubicación geográfica es Latitud: 4.034622 y Longitud: -77.228853. La Plata es considerada un centro poblado y asentamiento de comunidad afrodescendiente. La distancia entre Buenaventura y La Plata es de aproximadamente 40 minutos en lancha rápida.

Figura 30. Mapa de ubicación geográfica La Plata Bahía Málaga Colombia



Fuente: [116]

Figura 31. Fotografía Archipiélago La Plata Bahía Málaga Colombia



Fuente: Tomada por los autores, en La Plata

Esta zona geográfica se caracteriza por ser un atractivo turístico y natural rodeada de manglares, paisaje vegetal y diversidad animal. La Plata se encuentra protegida por el Parque Nacional Natural Uramba Bahía Málaga.

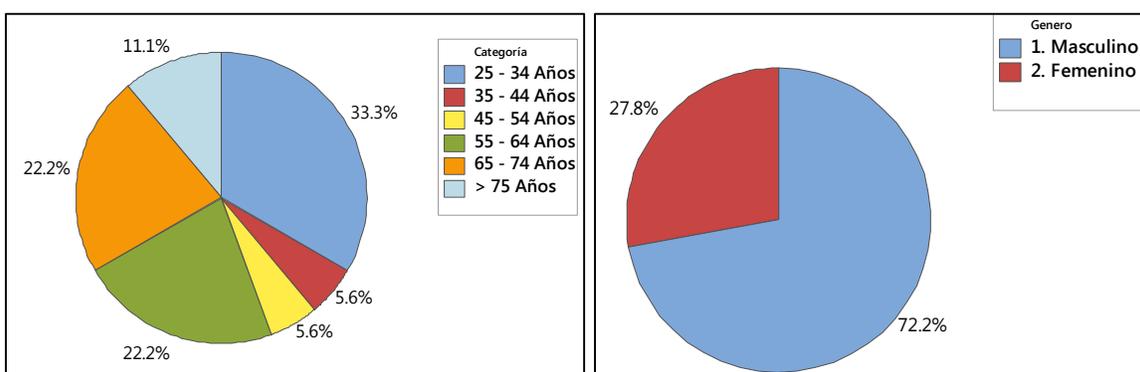
La asociación comunitaria “Ecomanglar” conformada por 32 asociados, fue creada con el propósito de contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes, a través de la explotación ecoturística responsable por la conservación del medio ambiente (Ecomanglar.org).

5.1.2 Información socio-demográfica

La población de La Plata es pequeña, con aproximadamente 225 habitantes que residen en 45 viviendas en total. Los oriundos de La Plata son afrodescendientes, de actividad principalmente pesquera.

La distribución por edad de las personas encuestadas se muestra en la Figura 32, donde la mayor cantidad de población está entre los 25 y 34 años. Sin embargo, hay habitantes desde los 0 hasta los 90 años de edad.

Figura 32. Gráficas de edad y género

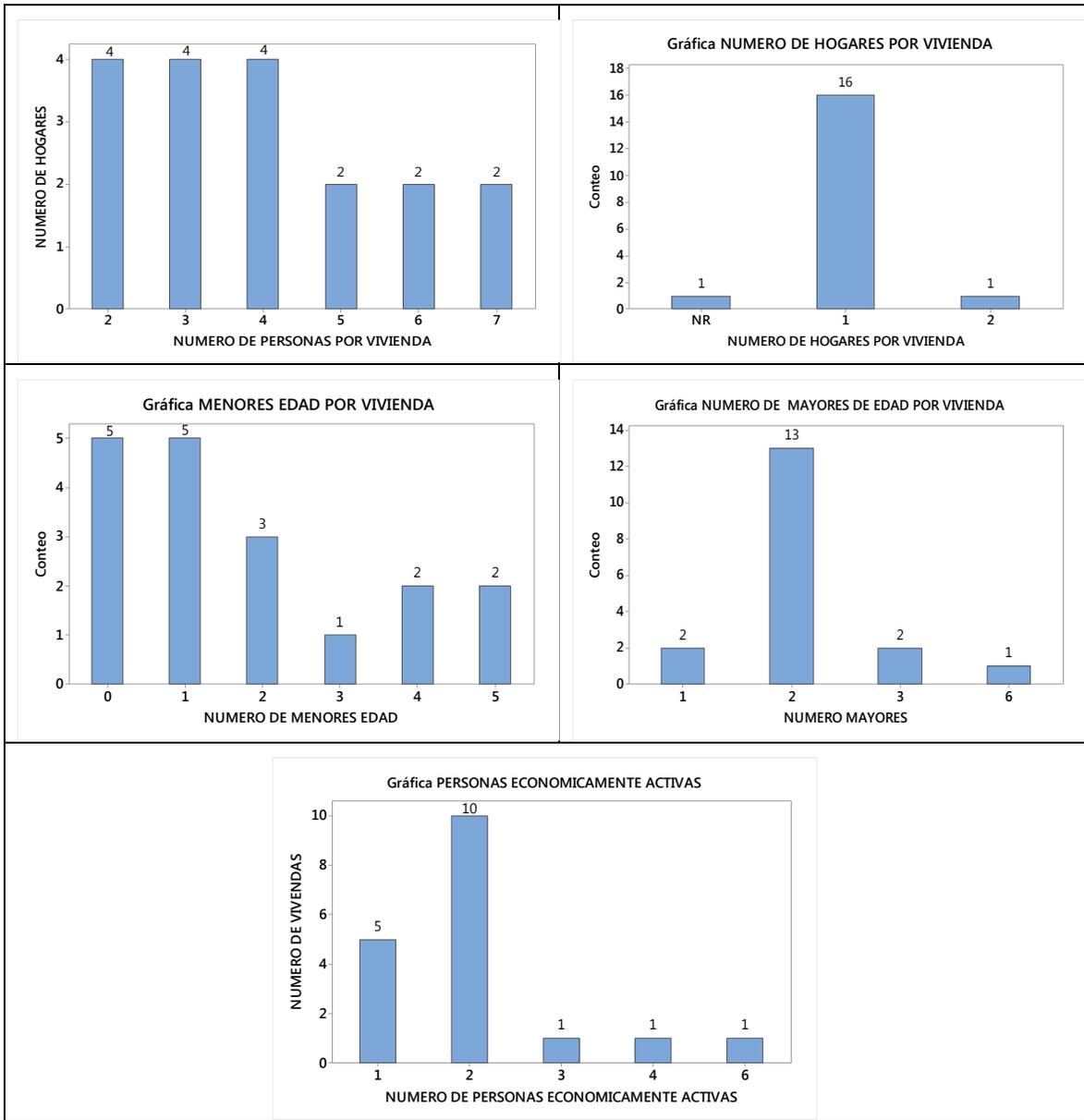


Fuente: Programa de Investigación “Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para ZNI en Colombia”

Las características de los hogares y habitantes en La Plata se pueden observar en la Tabla 15 donde el número de habitantes por vivienda oscila entre dos y siete personas, con un 66% entre dos y cuatro personas/vivienda. En los hogares habita al menos un menor de edad, pero predominan los hogares con más de 3 niños, con un 72.2%.

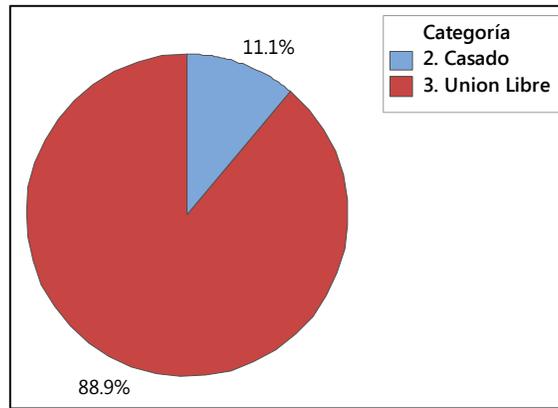
En el 55% de los hogares existen dos personas económicamente activas, mientras que en un 27% una sola persona. El estado civil de los jefes del hogar es mayormente unión libre con varios hijos a su cargo.

Tabla 15. Características de los hogares de La Plata



Fuente: Programa de Investigación "Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para ZNI en Colombia"

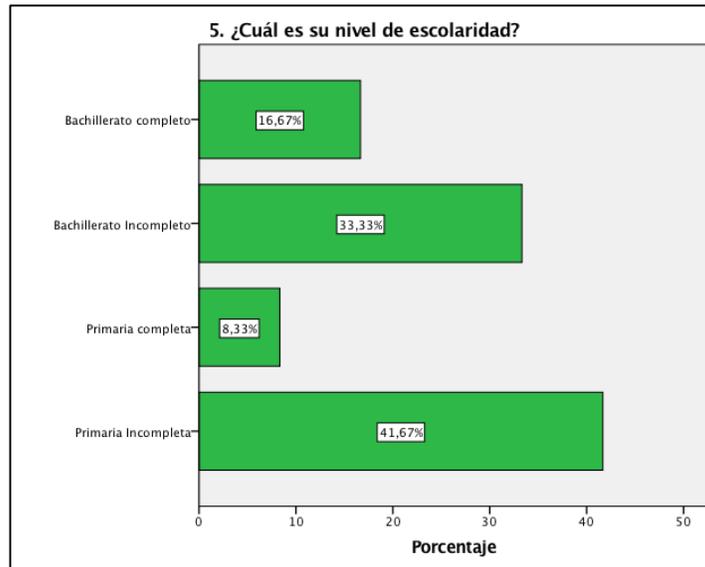
Figura 33. Estado civil habitantes de La Plata



Fuente: Programa de Investigación “Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para ZNI en Colombia”

En la comunidad de La Plata existe un jardín infantil y una institución educativa de básica primaria (IE Rosa Zarate de Peña). Para acceder a básica secundaria los estudiantes deben desplazarse a otra comunidad. La duración del desplazamiento promedio al día es de 43.89 minutos en lancha. El mayor nivel de escolaridad alcanzado por los habitantes es bachillerato completo, sin embargo, la mayor cantidad de habitantes tiene un nivel de escolaridad de primaria incompleta.

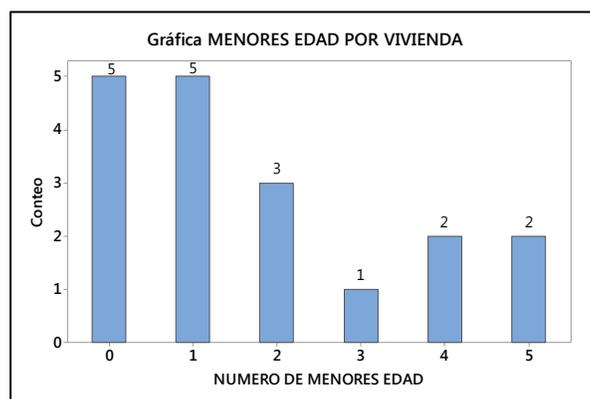
Figura 34. Nivel de Escolaridad habitantes de La Plata



Fuente: propia

Al menos en el 72% de los hogares hay menores de edad en etapa escolar (Figura 35), por lo que se evidencia la necesidad de educación formal en la zona.

Figura 35. Menores de edad por vivienda – La Plata



Fuente: Programa de Investigación “Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para ZNI en Colombia”

5.1.3 Conformación socio-política

La comunidad de La Plata es considerada un asentamiento en la zona rural de Buenaventura. El archipiélago está atado políticamente a la conformación socio política de su municipio y cabecera municipal. Esta está representada por un líder social y una asociación comunitaria denominada “Ecomanglar”.

El líder social representa a la población ante la administración municipal, exigiendo y velando por los derechos de los habitantes.

Los habitantes de esta comunidad son muy unidos y organizados. Se reúnen frecuentemente para hablar, con especial énfasis, de los proyectos que emprenden para mejorar su calidad de vida, la productividad y el fortalecimiento de sus actividades económicas.

Tabla 16. Temas que tratan en la comunidad

Temas	Porcentaje
Energía	11.76
Lo que ocurre en la comunidad	17.65
Necesidad de proyectos	5.88
Ambientales y sociales	5.88
Energía y lo que ocurre en la comunidad	5.88
Energía y pesca	11.76

Energía y socializar obras	5.88
Lo que ocurre en la comunidad y necesidad de proyectos	11.76
Pesca y madera	5.88
Socializar obras y necesidad de proyectos	5.88
Ninguno	5.88
Energía, pesca y socializar obras	5.88
No responde	5.88

Fuente: Programa de Investigación “Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para ZNI en Colombia”

Internamente tiene pequeñas asociaciones lideradas por personas con amplia experiencia en áreas como la pesca, la piangua y el turismo. Esta comunidad es muy abierta a recibir a organizaciones y empresas (como universidades), para participar en proyectos que contribuyan al cumplimiento de sus objetivos, entre los cuales está acceder a la energía.

Cabe resaltar que en esta zona hay presencia constante de los militares navales de la estación Málaga, es una comunidad un pacífica y democrática Tabla 17.

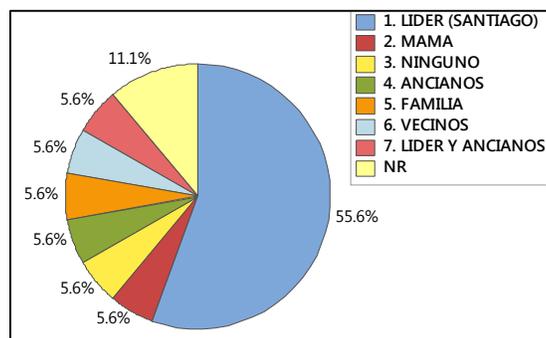
Tabla 17. Quienes toman las decisiones en la comunidad

Decisiones	Porcentaje
Los más educados	11.76
Por casa un representante	11.76
Todos (votación)	58.82
No han participado	5.88
No todas las veces participan	5.88
No responde	11.76

Fuente: Programa de Investigación “Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para ZNI en Colombia”

A partir de las encuestas realizadas se pudo observar que las personas más importantes para la comunidad y en las cuales generalmente confían los habitantes son, el líder social y los jefes del hogar (Figura 36).

Figura 36. Personas más importantes en las que los habitantes confían



Personas importantes	Porcentaje
Líder social	61,12
Pescadores	16.67
Personas mayores	38.89
Profesores de la escuela	50.00

Fuente: Programa de Investigación “Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para ZNI en Colombia”

5.1.4 Caracterización energética básica

La Plata es considerada una ZNI en Colombia, es decir no se encuentra conectada al SIN. Sus habitantes obtienen energía eléctrica a partir de una planta de generación diésel con una capacidad máxima de 12kW. El combustible que requiere la planta es obtenido a través de un subsidio gubernamental de 200gal/mes. Con este subsidio, la comunidad tiene un suministro de energía eléctrica de 4 horas al día (de las 18:00 a las 22:00 horas). Aun así, por lo general, el combustible se agota antes de finalizar el mes y los habitantes deben pagar por el combustible adicional que requieren para abastecerse las mismas 4 horas/día por los días faltantes.

Para un promedio de 5 habitantes por vivienda la demanda de energía promedio de la comunidad es de 596.9 kWh/día.

Los costos que el centro poblado debe asumir por la obtención del combustible son los costos logísticos para el traslado del combustible subsidiado hasta la isla. Este traslado implica costos de transporte en lancha el cual tiene una duración promedio de 1 hora (por trayecto), costo de transporte y movilidad en el municipio de Buenaventura y costo de hospedaje y alimentación para el encargado de dicha actividad.

Cada vivienda de la isla debe pagar aproximadamente \$20,000 al mes para subsidiar esta actividad. El dinero se reúne diariamente y un delegado del comité de energía pasa casa por casa recolectándolo.

Figura 37. Frecuencia de pagos por electricidad

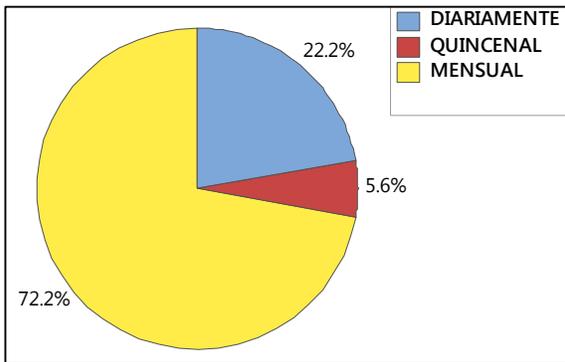
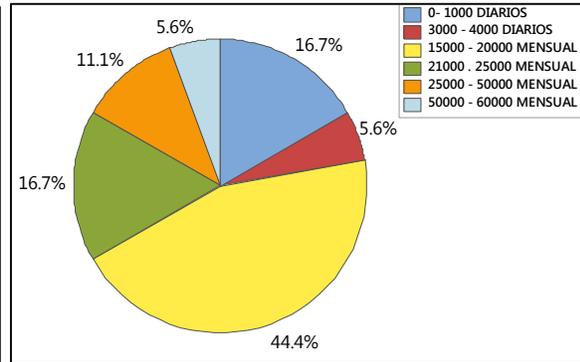


Figura 38. Pagos por la electricidad



Fuente: Programa de Investigación “Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para ZNI en Colombia”

Para cubrir la falta de combustible cuando este se ha agotado, los habitantes deben volver a pagar entre \$1,000 y \$4,000 por familia, por el resto de los días que se deben cubrir.

Adicional a estos costos, la población también debe pagar por la reparación de la planta diésel cuando ha sufrido averías, sin considerar los costos de oportunidad por los días en que no se posee el servicio y se limitan las actividades productivas como el turismo, la pesca, la elaboración de artesanías, así como la iluminación nocturna.

Figura 39. Fallas de la planta diésel

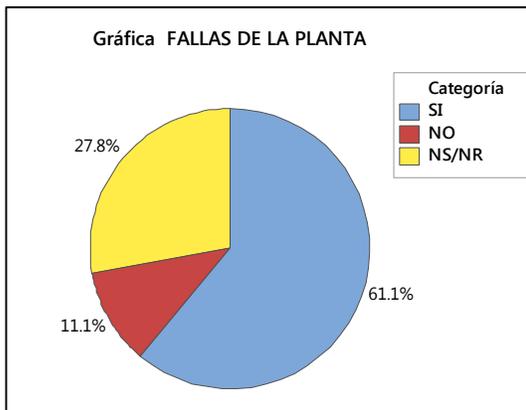
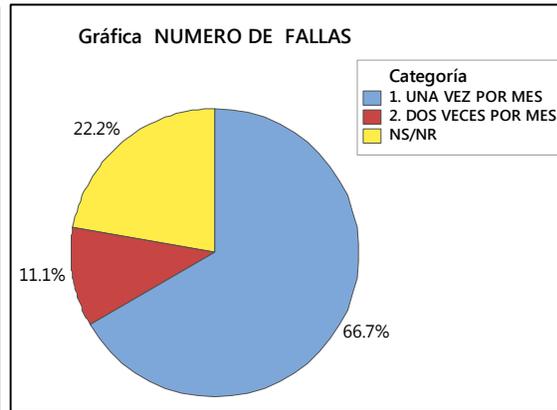


Figura 40. Número de fallas



Fuente: Programa de Investigación “Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para ZNI en Colombia”

Los principales recursos energéticos utilizados para la cocción de alimentos y necesidades de calefacción son la biomasa natural a partir de la combustión de leña de la región, cortando árboles y especies naturales como Mangle.

Es importante resaltar que La Plata Bahía Málaga es considerada área protegida del Valle del Cauca, y el corte de Mangle está limitado, ya que es un ecosistema valioso e importante para la conservación de la región. Esta formación vegetal tiene grandes propiedades como su capacidad para el control de la erosión, purificación del agua y del aire, pesca, formación de suelo, paisajismo y espiritualidad; sin embargo, su tala excesiva afecta la biodiversidad y reduce las capacidades productivas de la misma región.

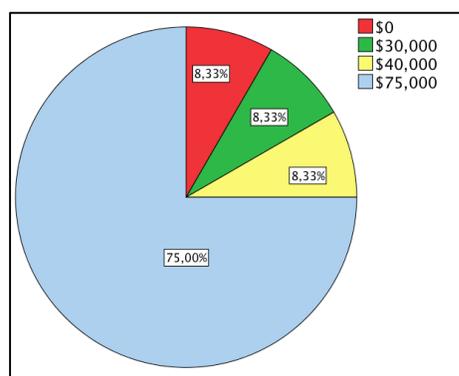
Los resultados de las encuestas arrojaron que el 50% de los hogares encuestados cocinan con leña, madera, material de desecho y carbón vegetal, así como el 45.8% de esos mismos hogares también cocinan con gas propano y solamente el 4.2% cocinan con petróleo.

Cuando las personas de La Plata no utilizan la leña para realizar esta actividad básica, utilizan cilindros de gas, los cuales cuestan aproximadamente \$75,000 al mes.

Figura 41. Combustible para cocinar.

Tipo de fuente	Porcentaje
Gas en cilindro o pipeta	45,8%
Petróleo	4,2%
Leña, madera, material de desecho, carbón vegetal	50,0%
Total	100,0%

Figura 42. Cuáles son sus gastos mensuales en combustible para cocinar



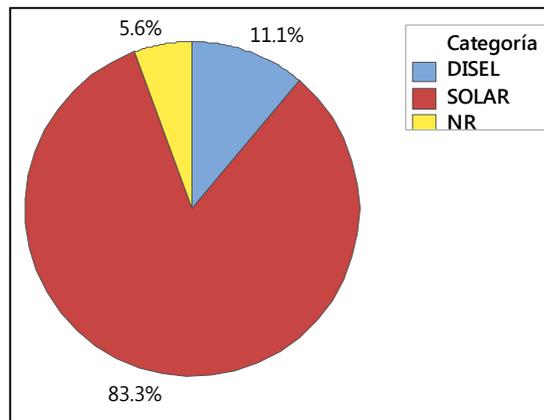
Fuente: propia

5.1.4.1 Percepción frente al uso de una tecnología renovable

En las visitas de campo y los encuentros con la comunidad se ha indagado sobre la opinión que tienen los habitantes acerca de la energía renovable, en especial la energía solar FV. De esta búsqueda se ha encontrado que el 100% de las personas saben que es un panel solar. Adicional a ello la comunidad tiene claridad frente a los beneficios y problemas que causa el uso de combustibles fósiles para cubrir las necesidades energéticas, tales como contaminación ambiental y emisión de gases de efecto invernadero, ruido, mal olor, deforestación e impacto sobre la diversidad ambiental.

Ante la pregunta sobre el tipo de energía que más beneficios trae para la comunidad, el 83% de la población encuestada respondió que esta es la solar FV. Dentro de los beneficios nombrados fueron, el sol es gratis, no es ruidoso, costos más bajos, es permanente y es una tecnología limpia.

Figura 43. Tipo de energía que es más beneficiosa para la comunidad

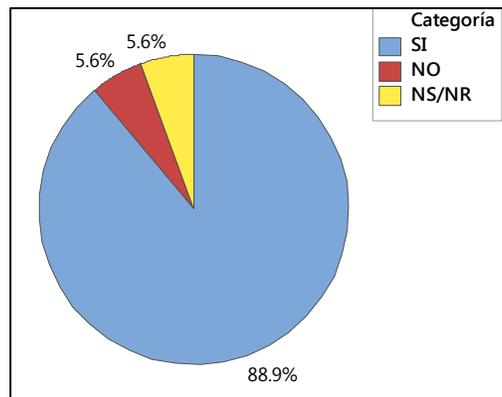


Fuente: Programa de Investigación “Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para ZNI en Colombia”

El 88% de la población, está interesada en tener más cobertura de energía eléctrica para usar de diversas formas, tales como, acceder a las telecomunicaciones (23.53%), poseer alumbrado por más tiempo (17.65%), mayor recreación (17.65%), adquirir electrodomésticos (11.76%), mejorar la calidad de vida (11.11%), mayor tiempo de conservación de los productos frescos (5.88%), escuchar música (6.25%), mejorar el proceso artesanal (5.88%) e incrementar su economía (5.56%).

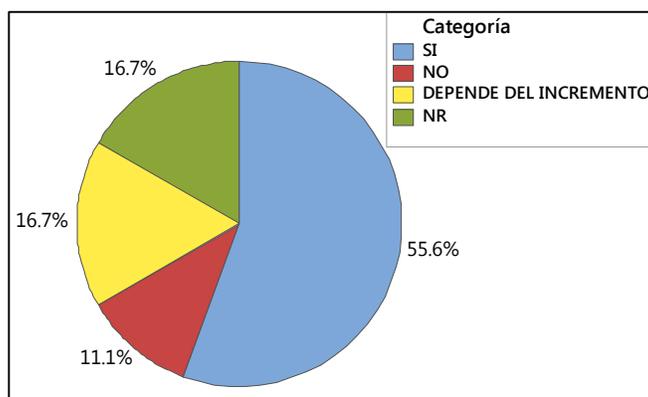
De la misma manera como encuentran beneficioso el uso de un sistema renovable, también encuentran algunos aspectos perjudiciales, tales como, modificación en los hábitos de los niños y el impacto de la televisión (11.76%), efectos en los cambios culturales (5.88%), e incremento de los costos de energía (5.88%).

Figura 44. Interés de la comunidad por tener más horas de energía al día



Fuente: Programa de Investigación “Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para ZNI en Colombia”

Figura 45. Disposición de la comunidad en pagar un poco más por más horas de energía



Fuente: Programa de Investigación “Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para ZNI en Colombia”

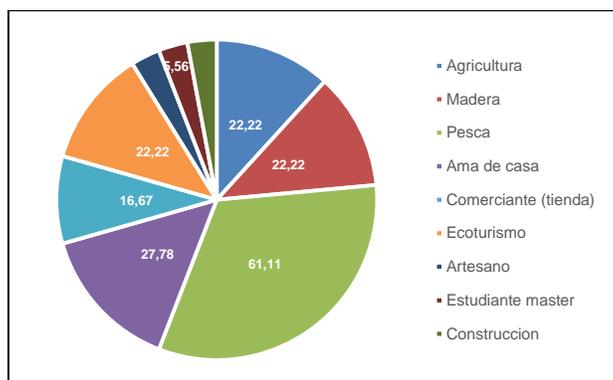
En términos generales, el uso de la tecnología solar FV tiene una percepción positiva en los habitantes de La Plata. La mayoría estarían dispuestos a pagar un poco más por más cobertura de energía y se encuentran muchos más beneficios que perjuicios con el uso de esta tecnología.

5.1.5 Caracterización económico-productiva

Los platences, tienen actividades productivas principalmente derivadas de los recursos naturales que tienen a disposición tales como la pesca, la piangua, actividades turísticas, artesanales y comerciales. A partir de las encuestas realizadas se ha encontrado que el mayor porcentaje de la comunidad depende de actividades productivas como la pesca, con un 61.11%.

También se ha encontrado que los habitantes en edades productivas suelen tener múltiples ocupaciones, combinando tareas de pesca y elaboración de productos derivados de la madera, o actividades turísticas y artesanales. La distribución de las actividades en orden de importancia se encuentra en la Figura 46 y la ocupación de los aportantes en el hogar en actividades múltiples se muestran en la Tabla 18.

Figura 46. Gráfica de distribución de actividades productivas de los habitantes de La Plata



Fuente: propia

Tabla 18. Ocupación múltiple de los aportantes en el hogar

Ocupación aportante	Porcentaje (%)
Pesca	29,41
Ecoturismo	5,88
Agricultura-madera	5,88
Madera - pesca	17,65
Pesca- comerciante (tienda)	11,76
Pesca-ecoturismo	5,88
Ama de casa- comerciante (tienda)	5,88
Ama de casa - ecoturismo	5,88
Madera- pesca- construcción	5,88
Ama de casa - ecoturismo-artesano	5,88
No responde	5,89

Fuente: Programa de Investigación “Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para ZNI en Colombia”

Como ya se mencionó, los habitantes de La Plata en especial los hombres, se dedican a las actividades de pesca en las horas de la mañana, eligiendo otras actividades productivas en las horas de la tarde, tales como el ecoturismo, elaboración de productos con madera (remos, botes, casa, entre otros). Las mujeres de La Plata se dedican al cuidado del hogar y de los hijos y también ejercen algunas actividades productivas como, elaboración de artesanías y dulces, atención de comercios en casa (tiendas) y el ecoturismo.

Una de las principales dificultades en el trabajo de pesca es la baja conservación del pescado fresco para la venta, porque, al carecer de congeladores y energía para su funcionamiento,

este se descompone rápidamente, así que debe ser consumido o secado al sol para la venta como pescado seco, perdiendo gran parte de la utilidad. Una de las soluciones que brindaría un sistema de generación de energía sería el aumento en la productividad de esta actividad principal.

Figura 47. Pescado seco en La Plata



Tomada por los autores en La Plata

Figura 48. Productos elaborados con madera por los Platences



Tomada por los autores en La Plata

Otra de las actividades productivas y turísticas más destacadas es la piangua y la “ruta de la piangua”. La actividad ancestral, las piangueras se dirigen a remo hacia los manglares cercanos de la zona y hacen una búsqueda manual de este molusco. Dicha actividad tiene gran valor para la comunidad ya que ha sido realizada por las comunidades negras a lo largo del pacífico colombiano. La recolección de la piangua genera ingresos por comercialización

del molusco, así como ingresos turísticos a través de la ruta de la piangua que ofrecen a los visitantes. El molusco es almacenado vivo en un centro de acopio que se ha construido, para ser utilizado en diversas preparaciones. Otro beneficio que traería la ampliación de la cobertura de energía sería la conservación de la piangua en otras presentaciones para ser comercializada en otras regiones.

Figura 49. Piangua – La Plata



Tomada por los autores en La Plata

Figura 50. Centro de acopio de la piangua en La Plata



Tomada por los autores en La Plata

Durante el trabajo de campo que se realizó en la zona, se encontraron fuentes naturales de frutos tales como la piña, el algodón, entre otros. Estos recursos que se utilizan para el propio

consumo son potenciales productivos, que a través de una buena capacitación y adecuación de cultivos podría generar ingresos adicionales para los platences.

Figura 51. Árboles de piña y algodón en La Plata



Tomada por los autores en La Plata

5.1.6 Servicios públicos

El archipiélago de La Plata tiene gran carencia en el acceso a los servicios públicos no solo de energía eléctrica sino de los demás indispensables para el bienestar humano, no obstante, esta comunidad ha generado maneras prácticas de obtener lo que necesitan.

5.1.6.1 Salud

Los habitantes de la comunidad se encuentran vinculados al régimen subsidiado y son atendidos en las IPS de Buenaventura cuando ellos lo requieren. Sin embargo, la distancia con la cabecera municipal hace que el transporte en lancha hasta el lugar de atención sea difícil y costoso, por lo que este acceso es muy bajo. Cuando se presenta alguna emergencia vital, los habitantes se han trasladado a la Estación Naval Málaga, donde han sido atendidos. En La Plata no existe una institución de salud que atienda ocasionalmente a los habitantes.

5.1.6.2 Fuente de agua mejorada

El agua para el consumo humano la obtienen de botellas o bolsas de agua que comercializan algunos habitantes, así como agua lluvia, algunos de ellos poseen filtros para purificar el agua.

5.1.6.3 Energía

En la comunidad existe una Planta eléctrica de combustible diésel de 12kW, para cubrir las necesidades energéticas, sin embargo, el combustible que es subsidiado por el gobierno, alcanza a cubrir 4 horas al día entre las 18:00 y las 22:00 horas.

5.1.6.4 Educación

En La Plata se cuenta con un jardín y una escuela primaria llamada I.E. Rosa Zarate de Peña, donde asisten los niños más pequeños hasta el año escolar 5º, a partir de esta edad los estudiantes continúan sus estudios en la institución educativa Rosa Zarate de Peña en una comunidad cercana.

Los habitantes de La Plata han manifestado durante las visitas de campo, la baja calidad del sistema educativo en esta comunidad, ya que la escuela no cuenta con la totalidad de los cursos necesarios para culminar los estudios, hay una precaria infraestructura y deficiencia de docentes. Dicha situación provoca que se abandone la formación o que los jóvenes migren a otras ciudades como Buenaventura, para finalizar sus estudios y por lo general no regresan.

5.1.6.5 Eliminación de desechos

Los desechos orgánicos e inorgánicos son eliminados principalmente a través de la quema de los mismos. La eliminación de excretas se realiza con inodoro conectado a pozo séptico. En el territorio no hay alcantarillado, lo cual es muy común en este tipo de regiones costeras.

Tabla 19. ¿Cómo eliminan principalmente la basura en esta vivienda?

Respuesta	Porcentaje
La entierran	25,0
La queman	41,7
La tiran a un patio, lote, zanja, baldío	33,3
Total	100,0

Fuente: propia

5.1.6.6 Centros de acopio

Existe un centro de acopio para la Piangua, que fue construido hace algunos años por la comunidad. Allí se almacenan vivos estos moluscos para luego comercializarlo y consumirlo.

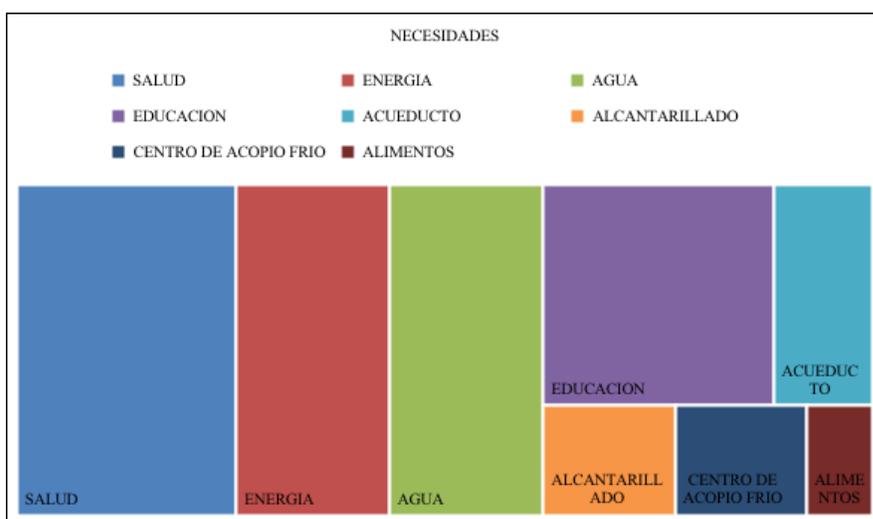
No hay centros de acopio para el pescado. Algunos habitantes poseen sus propios congeladores para conservar estos productos, sin embargo, es necesario comprar hielo en una comunidad cercana (Punta Soldado) para verter en los congeladores a causa de la falta de energía. Los habitantes que no tienen estas posibilidades secan el pescado al sol, para comercializarlo en este estado.

5.1.6.7 Combustible para la cocción de alimentos

Los alimentos se cocinan con leña, carbón vegetal, o en los mejores casos con cilindros de gas, que compran en Buenaventura. El uso de estas fuentes naturales de energía para cocinar, produce afectaciones respiratorias a los usuarios ya que solo los habitantes con más ingresos económicos pueden acceder a fuentes de gas propano.

Los habitantes de La Plata han priorizado sus necesidades de servicios públicos, tal como se observa en la Figura 52, donde los servicios de salud resultan ser los más importantes con un 58.82%, seguido por la energía eléctrica, el agua potable y la educación con igualdad de porcentajes (41.18%).

Figura 52. Priorización de necesidades de servicios públicos por los habitantes de La Plata.



Fuente: propia

5.1.7 Caracterización TIC

El acceso a las tecnologías de la información y la comunicación es supremamente limitado en estas zonas costeras. En La Plata no hay conexión a internet y la señal de teléfono es muy

débil. A pesar de esto, los habitantes poseen celulares y en algunos momentos pueden recargar con minutos y datos para acceder a información.

En las encuestas realizadas se indagó sobre el acceso y uso que se les da a estas tecnologías, concluyendo que el 66% de los encuestados indica que, entre dos y tres personas en el hogar, saben manejar un computador y el uso que le dan principalmente es para comunicarse con otras personas (Tabla 20).

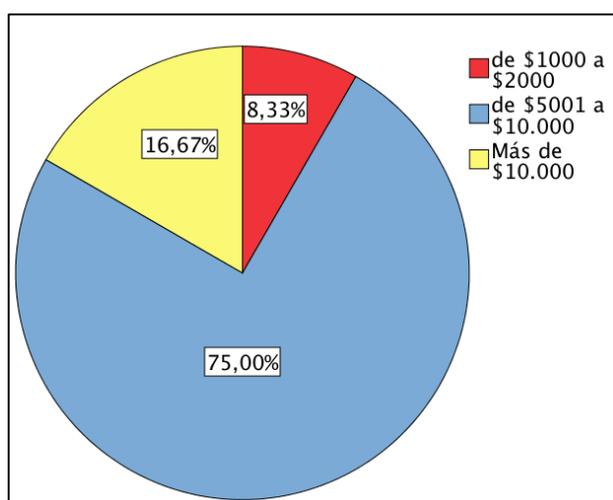
Tabla 20. ¿Para cuáles de las siguientes actividades usa el computador?

Respuestas	Porcentaje
Realizar tareas propias de su trabajo	7,1%
Entretenimiento (Series, redes sociales)	28,6%
Comunicarse con otras personas	35,7%
Realizar tareas propias de su Educación	28,6%
Total	100,0%

Fuente: propia

El 75% de los habitantes encuestados indican que la calidad del internet en la zona es regular. Una hora de internet cuesta \$1,000 y el principal operador es *Hughesnet*. En cuanto a la telefonía móvil, el principal operador es *movistar*. Los habitantes poseen planes prepago que recargan con \$5,000 a \$10,000 en el 75% de los casos.

Figura 53. ¿Cuánto acostumbra pagar para recargar el celular?



Fuente: propia

El restringido acceso a los servicios de internet y señal de teléfono es una limitante para la comunidad, puesto que impide acceder a toda la información disponible en internet, limita la

educación, hace obsoletos los sistemas de recaudo de dinero y las transacciones bancarias, y el sistema de generación de energía tendría limitantes para capturar información en tiempo real.

5.1.8 Caracterización ambiental

Al ser este proyecto perteneciente al programa de investigación “Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para ZNI en Colombia”, se han desarrollado varios proyectos y tesis para el análisis del componente ambiental de alternativas de suministro energético para zonas no interconectadas en Colombia, en especial la tesis titulada “Evaluación ambiental de alternativas de suministro energético para una zona no interconectada del contexto colombiano: caso archipiélago de La Plata, consejo comunitario de Bahía Málaga” [117].

Gracias al impacto ambiental que genera la extracción de los recursos naturales para la generación de energía eléctrica, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ha definido los términos de referencia para la elaboración del estudios de impacto ambiental para definir la viabilidad de la licencia ambiental de los proyectos de generación de energías renovables [122]. Algunos de estos impactos están asociados a la generación de gases de efecto invernadero como el CO₂, que se obtiene de la combustión de recursos fósiles como el combustible y el carbón, así como de la biomasa natural en la quema de leña para cocinar alimentos o cubrir las necesidades de calefacción.

Estas actividades son comúnmente realizadas por los habitantes de las comunidades sin acceso a la red eléctrica nacional, para suplir sus necesidades energéticas.

Las tecnologías renovables como los sistemas solares FV, sistemas eólicos y las microrredes se han convertido en una alternativa novedosa, eficiente y ambientalmente amable para ampliar la cobertura de energía en estas zonas en las que no es viable económica y físicamente interconectar [120]. Dichas soluciones son consideraras limpias porque no generan emisiones contaminantes a la atmósfera, sin embargo si son considerados los costos del ciclo de vida de las tecnologías y la contaminación que generarán al finalizar su vida útil [98].

La investigación se basó en el análisis de cuatro criterios ambientales para evaluar el impacto que puede traer un sistema de generación de energía en el medio ambiente de la zona. Estos cuatro criterios fueron, área intervenida, afectación de especies, cambio climático y emisiones contaminantes.

Como ya se mencionó anteriormente, la comunidad de La Plata hace parte del Parque Natural Nacional Uramba, que tiene una extensión de 47.092ha. Sus parámetros meteorológicos le han dado una categoría de clima tropical húmedo, con una temperatura ambiental de aproximadamente 27°C, humedad relativa del 80% y promedio anual de precipitaciones mayor a 6000 mm, zona muy lluviosa durante más de 300 días al año (página web del Parque Nacional Natural Uramba Bahía Málaga). Este parque natural se resalta a nivel mundial por su especial concentración en biodiversidad de flora y fauna y gracias a sus aguas cálidas y

calmadas es un destino con mayor concentración de migración gestacional de la ballena jorobada [117].

Los resultados de la evaluación de los criterios e indicadores ambientales realizados en [117] (Tabla 21) arrojaron que la implementación de sistemas solares individuales representa la opción con menor impacto ambiental para la comunidad, en comparación con un sistema solar centralizado o la cobertura con fuente diésel.

Tabla 21. Resultados de indicadores ambientales para sistema solar individual y sistema solar centralizado en La Plata – Bahía Málaga

Criterios e indicadores		Solar		Diésel
		Sistema solar individual	Sistema solar centralizado	
Área intervenida	Índice del área intervenida	0.34	1	0.5
Afectación a especies	Abundancia Relativa	15.04%	96.33%	15.04%
	Circularidad del Radio	2.77	2.77	-2.77
Cambio climático	Impacto	0	0	-1
	Vulnerabilidad	3	3	3
Gases de efecto invernadero	Emisiones de CO ₂	28.54 kgCO ₂ /año		21201.7 kgCO ₂ /año

Fuente: [117]

En cuanto al área intervenida, el sistema solar individual y la generación diésel poseen un valor más positivo siendo menor a uno, ya que el área total de una base (torre) que soportaría aproximadamente dos paneles solares por vivienda es de $1.13m^2$ y el área total de la planta diésel $2m^2$, mientras que el área intervenida para un sistema solar centralizado ocuparía un área aproximada de $240 m^2$.

El sistema solar centralizado en este ejercicio se consideró en una ubicación sobre el nivel del mar en muelle flotante, por lo que la afectación a las especies es importante, ya que restringiría el paso de la luz solar hacia el fondo del mar impidiendo la fotosíntesis y el normal desarrollo de la vida marina. En cuanto al sistema solar individual y la planta diésel, no habría mucho impacto sobre la afectación a las especies ya que, por el tránsito de las personas, los animales no suelen frecuentar la zona residencial.

El cambio climático para este tipo de proyectos se mide a través de dos indicadores, la vulnerabilidad que tiene el sistema de generación por las características ambientales de la zona y el impacto que puede tener el sistema sobre las condiciones meteorológicas. En este caso el impacto que tiene el sistema solar sobre el cambio climático es evaluado en cero ya que no produce ningún tipo de gas de efecto invernadero, mientras que la planta diésel es valorada negativamente. La vulnerabilidad para los tres tipos de sistemas es considerada

media a partir de los datos del mapa del instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, gracias a que los componentes electrónicos pueden sufrir oxidación en la estructura por la salinidad del ambiente.

Por último, las emisiones de gases contaminantes fueron calculadas a partir de las emisiones generadas en el transporte de los equipos hasta la zona de estudio, ya que el sistema solar individual o centralizado no genera dióxido de carbono a la atmósfera en su funcionamiento, mientras que la planta diésel es supremamente contaminante y genera un total de $21201.74 \text{ kg } CO_2/\text{año}$, con un factor de emisión para este combustible de $2.79 \text{ kg } CO_2/\text{litro}$, si se considera que la comunidad consume 20.81 litros/día .

En el cálculo para la generación de emisiones contaminantes con diésel, no se asumió un aumento en la cobertura, por lo tanto, se puede deducir que actualmente la comunidad genera un total de $21201.7 \text{ kg } CO_2/\text{año}$, para suplir cuatro horas de energía al día con combustible diésel.

Los sistemas solares individuales son diseñados para aumentar la cobertura en gran proporción (cercana al 100%), por lo tanto, este sistema con $28.54 \text{ kg } CO_2/\text{año}$ de emisiones al año, sigue siendo una alternativa mucho más positiva si se considera el cuidado del medio ambiente y de la comunidad.

Para cubrir el total de la demanda de energía con combustible diésel, se necesitaría alrededor de 58.13 gal/día , con eficiencia en la planta diésel de 0.0974 gal/kWh (para plantas con una potencia de 12 kW). Eso equivaldría a un total de $221048.49 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{año}}$ en emisiones contaminantes a la atmósfera.

$$\text{Emisión} = 79228.85 \frac{\text{L}}{\text{año}} * 2.79 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{L diésel}} = 221048.49 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{año}}$$

Donde $2.79 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{L diésel}}$ es el factor de emisión extraído de la guía practica para el cálculo de las emisiones efecto invernadero GEI [123].

Por lo tanto, se concluye que ambientalmente, la alternativa que menor impacto traería al ecosistema es el sistema solar individual.

5.1.9 Caracterización cultural

La comunidad de La Plata es una población de etnia indígena embera-wounaan, mestiza y negra. Los habitantes son mayormente católicos de actividad pesquera con múltiples hábitos culturales, dinámicos, democráticos e interesados por el desarrollo económico y productivo, siempre en el marco del cuidado del medio ambiente y su rico ecosistema.

Con aproximadamente 225 personas de todas las edades, los platences tiene múltiples actividades productivas, culturales y de ocio. Por lo general los habitantes realizan sus actividades económico-productivas en las horas de la mañana, puesto que la pesca es más

eficiente a tempranas horas. Adicional a la pesca, la piangua, las artesanías y los servicios ecoturísticos, son su vocación.

A través de encuestas y conversaciones con la comunidad se pudieron encontrar algunos rasgos culturales como, celebraciones que generalmente festejan, tiempo libre, música y rutinas, lugares importantes, entre otros.

Figura 54. Religión – La Plata

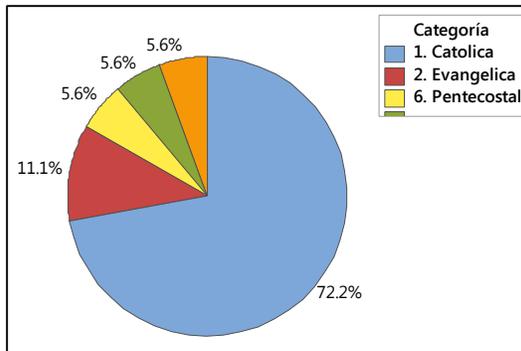
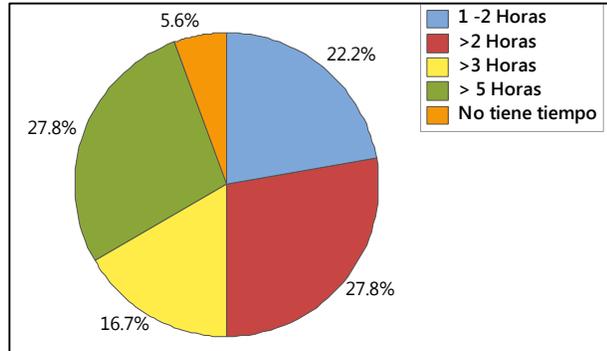
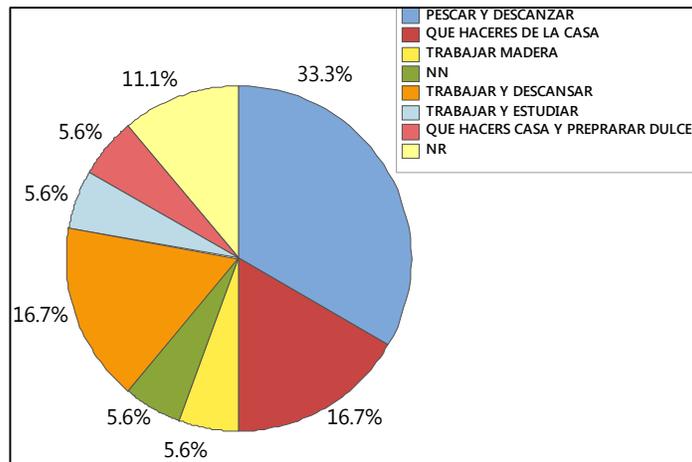


Figura 55. Tiempo libre – La Plata



Fuente: Programa de Investigación “Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para ZNI en Colombia”

Figura 56. Rutinas de los habitantes de La Plata

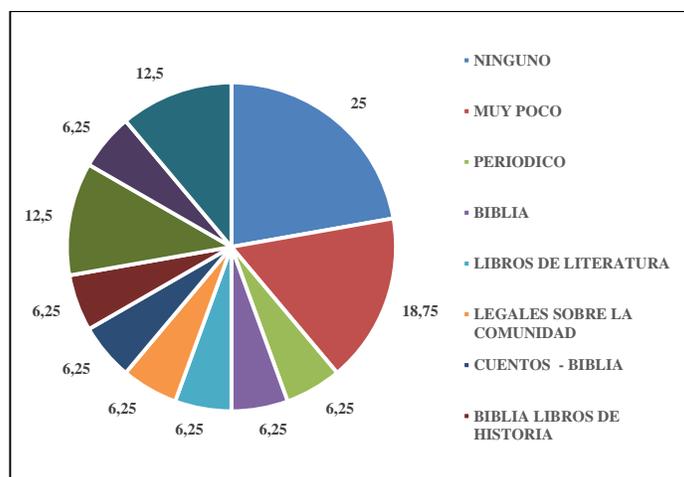


Fuente: Programa de Investigación “Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para ZNI en Colombia”

Dentro de las celebraciones más importantes para los platences están aquellas asociadas a la Virgen del Carmen, las fiestas decembrinas, San Buenaventura, Tumará y los evangelios. Las creencias religiosas se encuentran alrededor de Dios y Jesús, la tunda, el duende o riviél y el mal de ojo.

Dentro de las actividades de ocio que realizan se encuentran, escuchar música vallenata, la salsa, el merengue y el arrullo de las cantoras. También interpretan y escuchan música folclórica típica de la región. Los Platences hacen lectura especialmente de la biblia y libros de literatura. Ven televisión y escucha radio, principalmente canales nacionales como RCN, Caracol y Marina Estéreo.

Figura 57. Lectura



Fuente: Programa de Investigación “Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para ZNI en Colombia”

El licor típico de la región viche, es elaborado por los propios habitantes, con este amenizan las fiestas y celebraciones.

En el tiempo libre las mujeres juegan parkes y bingo, se reúnen con la comunidad o con sus amigas y realizan artesanías o trabajos manuales. Los hombres dedican su tiempo libre a jugar al dominó, fútbol, bingo y parkes con sus amigos, y hacen reparaciones y actividades caceras. Por otro lado, los niños de la comunidad dedican este tiempo a jugar en la calle, en el mar o ayudar a sus padres en actividades pesqueras.

Los lugares naturales más importantes para los habitantes de La Plata son, el mar, los manglares, las cascadas, la montaña y la selva, es curioso ver, como la casa no es reconocida como un lugar importante. Por otro lado, los lugares culturales más importantes son el muelle, la iglesia, la casa de los vecinos, el centro de acopio y la tienda. Dentro de los sonidos que más recuerdan y resaltan son los que producen las aves y los animales, el mar, los motores, la brisa y la gente hablando.

Al analizar estas respuestas, se puede concluir que los habitantes de La Plata son muy religiosos y sociales. Siempre están en la búsqueda de encontrarse con la comunidad a practicar actividades culturales y sociales, así como también la importancia que tiene el medio ambiente natural que se convierte en su un aspecto de vital importancia en el reconocimiento como habitantes de La Plata.

5.2 MODELO TÉCNICO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN

El presente capítulo tiene el propósito de caracterizar un modelo técnico para el dimensionamiento y la operación óptima de un sistema de generación de energía que aumente la cobertura de la comunidad caso de estudio. Este subcapítulo pretende dar respuesta al primer objetivo específico de la tesis de doctorado el cual está definido como “Caracterizar un modelo técnico para una microrred de fuentes renovables de energía para una zona no interconectada en Colombia específicamente en la comunidad de La Plata Bahía Málaga, considerando recursos energéticos locales”.

Una de las principales actividades que se lleva a cabo en proyectos de electrificación rural, es el diseño técnico de un sistema que sea capaz de generar la energía demandada al costo más bajo. Los sistemas de generación de energía renovable como los sistemas solares FV, los sistemas eólicos, entre otros, han obligado a los diseñadores a considerar la estocasticidad de la fuente natural como un criterio relevante para dimensionar el sistema con la capacidad de cubrir la demanda los días con escasez y abundancia en la fuente renovable. Los sistemas híbridos o microrredes han sido una solución factible para este tipo de problemas, ya que son capaces de combinar diferentes fuentes de energía en un solo sistema para generar a partir de la fuente más abundante disponible en determinado momento [124]. Es así como los modelos de optimización que simulan los sistemas juegan un papel importante en el dimensionamiento y operación, para garantizar que se esté supliendo la demanda con la fuente priorizada al menor costo.

Para solucionar este problema, se utilizó el software de optimización *Julia Box* y el paquete *JuMP* para problemas de optimización mediante el solucionador de *Gurobi LP*, descrito en la metodología del proyecto.

Este subcapítulo de resultados se organiza en seis partes, las cuales consisten en la caracterización de la generación de energía y la demanda de energía en la comunidad, posterior a ello se describe la topología de la red y se desarrolla y resuelve un modelo de optimización estocástico para definir el dimensionamiento y la operación óptima de la microrred para 365 escenarios (365 días al año), por último, se describe su monitoreo y control.

Como resultado principal de este capítulo se obtiene el diseño de un sistema de generación híbrido que es capaz de abastecer de energía a la comunidad de La Plata al menor costo por hora, así como la simulación del despacho óptimo del sistema por cada hora y cada día de un año.

5.2.1 Caracterización de la generación de energía

El análisis de los registros de radiación solar, velocidad del viento y capacidad de residuos para la generación de biomasa (en previas investigaciones del programa de investigación), arrojó que en la zona geográfica del archipiélago de La Plata solo es viable la generación de

energía solar fotovoltaica, ya que los otros recursos no tienen el potencial suficiente [116] [117] (Tabla 22).

Como ya se mencionó en la sección 5.1.4 (Caracterización energética básica), la energía en esta comunidad es actualmente abastecida a través de una planta de generación diésel que es alimentada con 200gal mensuales. La generación con este combustible fue tomada en cuenta en el diseño del sistema como otra fuente de generación, especialmente de respaldo cuando la fuente solar no cuente con el potencial suficiente.

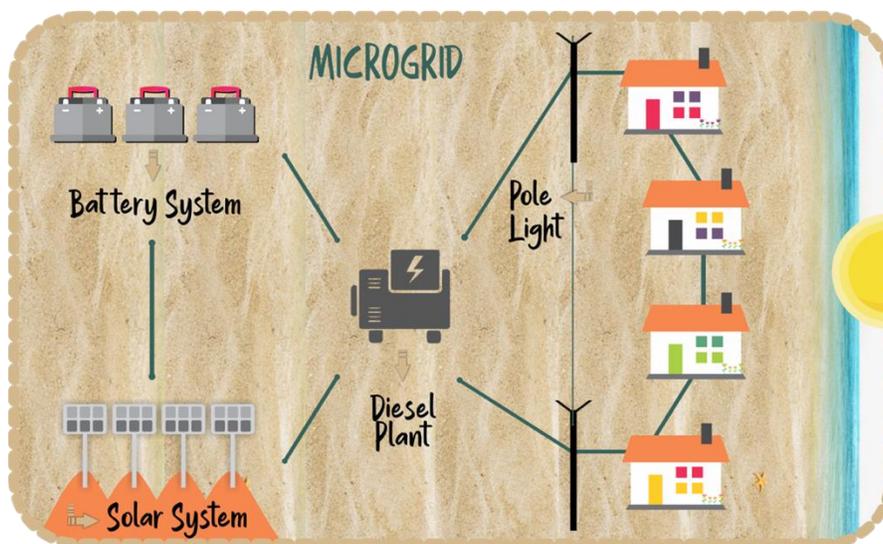
Tabla 22 Fuentes renovables y no renovables en el territorio del Archipiélago La Plata

Fuente	Dato Promedio / Descripción
Radiación Solar promedio	3 - 4 kWh/m ² /día
Velocidad del Viento promedio	1.5 a 2m/seg
Biomasa	Los residuos de madera no son suficientes para la generación, adicional a ello produce impacto medioambiental e impacto en la biodiversidad debido a la tala irracional de árboles.
Combustible diésel	Subsidio gubernamental de 200 gal/mes. Será utilizado como tecnología complementaria que garantiza confiabilidad del sistema.

Fuente: Adaptado de [116] [117]

Por lo anterior se propone un sistema de generación de microrred solar – diésel – baterías, para suplir la demanda de la comunidad, asumiendo los costos de generación para dichas tecnologías (Figura 58).

Figura 58. Microrred de generación de energía para el Archipiélago La Plata



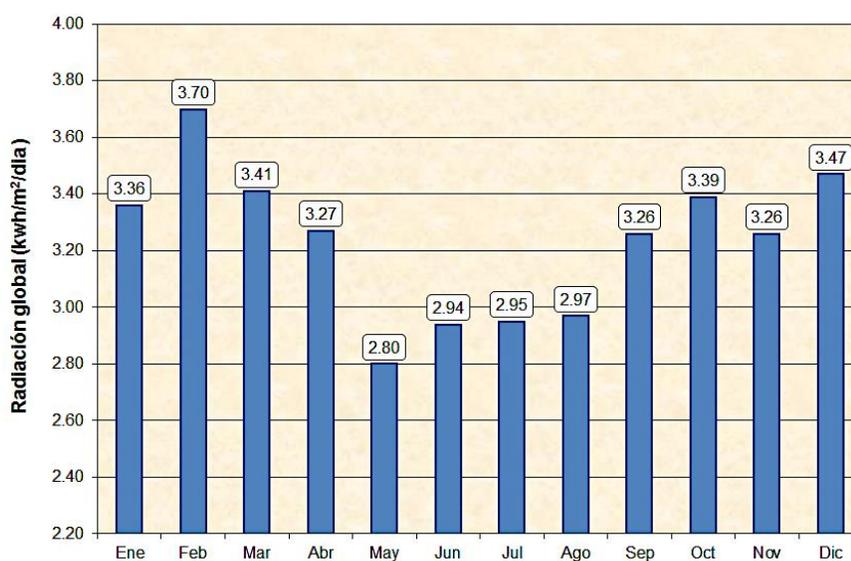
Fuente: propia

Las fuentes de incertidumbre que están asociadas al este tipo de sistemas y que impactan el despacho de la generación, están relacionadas con el recurso de energía solar fotovoltaica, gracias a la volatilidad de la fuente y la probabilidad de obtener cierta cantidad de radiación necesaria para la producción de energía.

Para disminuir la incertidumbre, no será asumido el promedio de radiación solar en la zona sino una serie temporal horaria de radiación solar global horizontal para un año consecutivo (2019). Este perfil solar depende del comportamiento característico observado y de su distribución de probabilidad.

Los datos fueron extraídos de las estaciones meteorológicas Naval Málaga y Juanchaco del IDEAM (Figura 59), así como de fuentes satelitales.

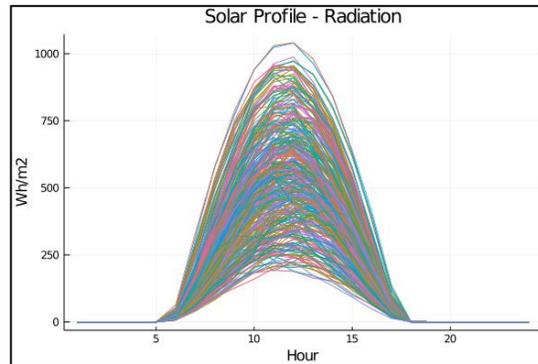
Figura 59 Radiación global diaria promedio en Bahía Málaga para cada mes del año



Fuente: INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). Datos de la estación hidrometeorológica de Juanchaco. Bogotá D.C., 2014.

A partir del análisis de la serie histórica de radiación solar en la zona caso de estudio, se pudo obtener la gráfica de su comportamiento horario como se muestra en la Figura 60 para 365 días al año. El máximo valor encontrado en la región fue de 1041 Wh/m^2 en el segundo día del año a las 12:00 horas. La radiación comienza a las 6:00 horas, con mínimo y máximo valor de 7 Wh/m^2 y 64 Wh/m^2 . La radiación finaliza a las 18:00 horas, con mínimo y máximo valor de 3 Wh/m^2 y 0 Wh/m^2 .

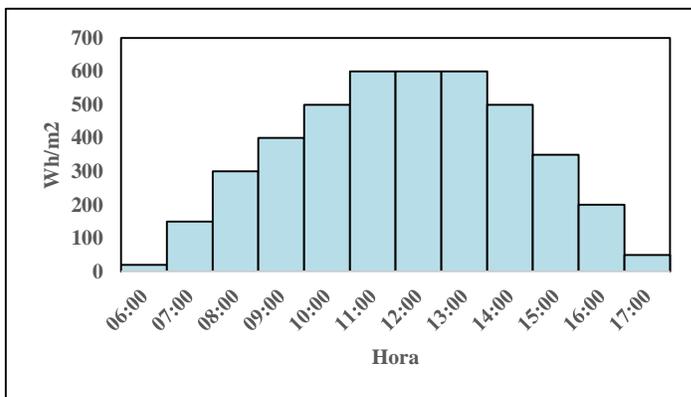
Figura 60. Perfil de radiación solar en La Plata



Fuente: propia

También fueron elaboradas curvas de distribución de frecuencia para encontrar los valores de radiación más probables por hora. En la Figura 61 se muestran los valores más frecuentemente hallados para cada hora durante todo el año, de esta manera se ilustra como los datos más altos se encuentran después de las 11:00 horas hasta las 13:00 horas con un promedio de 600 Wh/m^2 , lo cual es bajo para la zona si lo comparamos con el promedio reportado por el IDEAM de 3.4 kWh/m^2 . Esto se debe a que el comportamiento de la radiación solar en la zona presenta picos altos al inicio del año, entre los meses de enero a abril, así como a final de año entre los meses de septiembre a diciembre, mientras que a mitad del año estos datos son los más bajos y esto afecta el promedio global.

Figura 61. Distribución de frecuencia para datos de radiación solar global en La Plata, año 2019

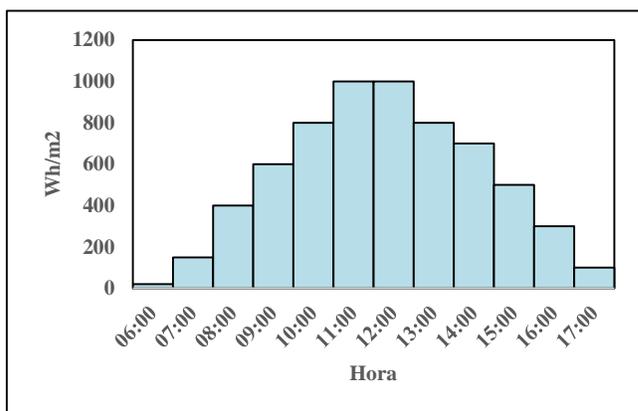


Fuente: propia

Hora	Radiación Wh/m^2	% Frecuencia
6:00	15 a 20	18%
7:00	100 a 150	37%
8:00	250 a 300	25%
9:00	300 a 400	27%
10:00	400 a 500	21%
11:00	500 a 600	22%
12:00	500 a 600	20%
13:00	500 a 600	23%
14:00	400 a 500	29%
15:00	300 a 350	22%
16:00	150 a 200	33%
17:00	40 a 50	19%

La gráfica de distribución de frecuencias para el mes de enero (Figura 62) muestra valores mucho más altos que el promedio anual, alcanzando un pico de 1000 Wh/m^2 entre las 11:00 y 12:00 horas.

Figura 62. Distribución de frecuencia para datos de radiación solar global en La Plata, enero de 2019



Hora	Radiación	% de frecuencia
6:00	10 a 20	0%
7:00	100 a 150	0%
8:00	300 a 400	29%
9:00	500 a 600	26%
10:00	600 a 800	35%
11:00	800 a 1,000	39%
12:00	800 a 1,000	48%
13:00	600 a 800	45%
14:00	600 a 700	29%
15:00	400 a 500	39%
16:00	250 a 300	26%
17:00	80 a 100	29%

Fuente: propia

De este apartado se puede concluir que la fuente de radiación solar es suficiente para la generación de energía en la región, adicional a ello ya se ha comprobado su potencial a través de dos sistemas solares que posee la comunidad, los cuales están ubicados en la zona del restaurante o cocina comunitaria y en la cabaña ecoturística que se utiliza para albergar a los turistas.

Figura 63. Sistema solar individual – Restaurante o cocina comunitaria en La Plata



Tomada por los autores en La Plata

Vale la pena resaltar que en una comunidad cercana a La Plata llamada Punta Soldado, ha sido puesta en operación una microrred desde el año 2016. El proyecto de energización rural con un sistema híbrido solar – diésel – baterías, es un proyecto cofinanciado y desarrollado por la empresa EPSA Celsia y la USAID, dado en donación a la comunidad. El sistema cuenta con 288 paneles solares, 6 inversores, 96 baterías, 13 controladores, y una planta diésel de respaldo. El sistema tiene una potencia pico de 74 kW y cubre la demanda de 114 viviendas por más de 8 horas diarias continuas [24] [25]. Este proyecto aumenta la confianza de que en la región es posible la instalación de este tipo de sistemas.

Adicional a estas aplicaciones, las ventajas que trae el análisis de la fuente natural para la generación de energía con la utilización de series históricas horarias de radiación solar en este trabajo son la reducción de la incertidumbre de la volatilidad de la fuente, puesto que han sido analizados 365 escenarios correspondientes a todos los días de un año, más no los promedios que pueden generar mayor irresolución.

5.2.2 Caracterización de la demanda de energía

La demanda de energía fue hallada a partir de los datos obtenidos en el trabajo de campo, con la aplicación de encuestas a sus habitantes. De estos documentos se pudieron extraer la cantidad de electrodomésticos y equipos eléctricos que posee cada vivienda. Con la capacidad instalada se asumió un perfil diario actual (para cuatro horas de energía) y un perfil diario proyectado asumiendo un tiempo de servicio de energía de 24 horas del día.

En la Tabla 23 se puede observar el número y potencia de los electrodomésticos encontrados. En algunas encuestas no se encontró la potencia del equipo debido a falta de información en la etiqueta de este, por lo que se reemplazaron los datos erráticos por los datos del equipo de mayor potencia encontrado, con el objetivo de que se cubra la demanda si la potencia del dato desconocido fuera mayor.

Tabla 23. Número y capacidad en potencia de electrodomésticos por vivienda – La Plata

Electrodoméstico EQUIPO DE SONIDO			Total equipos	5	Asumiendo datos erráticos
Nº de equipos/Vivienda	Potencia [W]	Conteo Viviendas	Porcentaje de equipos en la comunidad	Potencia total [W]	Potencia total [W]
1	0	1	6%	0	300
1	115	1	6%	115	115
1	250	1	6%	250	250
1	300	2	11%	600	600
0	0	13	72%	0	0
Total		18	100%	965	1,265

Electrodoméstico BOMBILLOS			Total equipos	8	Asumiendo datos erráticos
N° de equipos/Vivienda	Potencia [W]	Conteo Viviendas	Porcentaje de equipos en la comunidad	Potencia total [W]	Potencia total [W]
2	0	1	6%	0	200
2	100	1	6%	200	200
3	100	1	6%	300	300
3	100	1	6%	300	300
4	100	1	6%	400	400
4	100	1	6%	400	400
5	100	1	6%	500	500
6	100	1	6%	600	600
0	0	10	56%	0	0
Total		18	100%	2,700	2,900
Electrodoméstico LICUADORA			Total equipos	12	Asumiendo datos erráticos
N° de equipos/Vivienda	Potencia [W]	Conteo Viviendas	Porcentaje de equipos en la comunidad	Potencia total [W]	Potencia total [W]
1	0	8	44%	0	4,000
1	100	1	6%	100	100
1	400	1	6%	400	400
1	500	2	11%	1,000	1,000
0	0	6	33%	0	0
Total		18	100%	1,500	5,500
Electrodoméstico LAVADORA			Total equipos	7	Asumiendo datos erráticos
N° de equipos/Vivienda	Potencia [W]	Conteo Viviendas	Porcentaje de equipos en la comunidad	Potencia total [W]	Potencia total [W]
1	0	4	22%	0	2,000
1	330	1	6%	330	330
1	340	1	6%	340	340
1	500	1	6%	500	500
0	0	11	61%	0	0
Total		18	100%	1,170	3,170

Electrodoméstico CD/DVD			Total equipos	6	Asumiendo datos erráticos
Nº de equipos/Vivienda	Potencia [W]	Conteo Viviendas	Porcentaje de equipos en la comunidad	Potencia total [W]	Potencia total [W]
1	0	4	22%	0	400
1	100	1	6%	100	100
1	80	1	6%	80	80
0	0	12	67%	0	0
Total		18	100%	180	580
Electrodoméstico TV			Total equipos	12	Asumiendo datos erráticos
Nº de equipos/Vivienda	Potencia [W]	Conteo Viviendas	Porcentaje	Potencia total [W]	Potencia total [W]
1	0	10	56%	0	1,000
1	100	1	6%	100	100
1	55	1	6%	55	55
0	0	6	33%	0	0
Total		18	100%	155	1,155
Electrodoméstico CONGELADOR			Total equipos	2	Asumiendo datos erráticos
Nº de equipos/Vivienda	Potencia [W]	Conteo Viviendas	Porcentaje de equipos en la comunidad	Potencia total [W]	Potencia total [W]
1	0	1	6%	0	130
1	130	1	6%	130	130
0	0	16	89%	0	0
Total		18	100%	130	260

Fuente: propia

Una vez se tuvo esta información fue calculada la potencia instalada y efectiva total, así como la curva de carga para el perfil actual con 4 horas de suministro de energía al día y para un perfil proyectado de 24 horas al día.

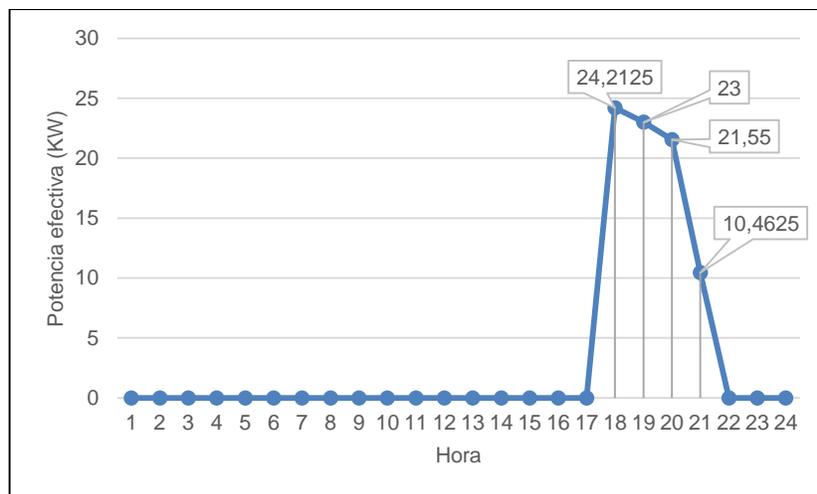
Tabla 24. Potencia instalada y efectiva total en La Plata

Electrodomésticos en la comunidad	Potencia Nominal (W)	Potencia Total Instalada (W)	Factor de Carga	Factor de Utilización	Potencia Efectiva Total	Potencia Total Instalada (W) 45 Viviendas
Equipos SON (115W-300W)	1,265	1265	1	0.083	105.42	3163
Circuitos de alumbrado (100W-700W)	2900	2900	1	0.167	483.33	7250
Licuadoras (100-500W)	5,500	5500	1	0.042	229.17	13750
Lavadoras (330-500W)	3,170	3170	1	0.083	264.17	7925
CD/DVD (8-10W)	580	580	1	0.042	24.17	1450
TV (55-100W)	1155	1155	1	0.167	192.50	2888
Congelador (130W)	260	260	0.5	0.167	21.67	650
Total	14830	14830			1320.42	37075
					9%	

Fuente: propia

Considerando un perfil de 4 horas de suministro de energía para 45 viviendas, se obtuvo una potencia total instalada por comunidad de 37.08 kW y 79.23 kWh/día de energía consumida por toda la comunidad. Esto indica una potencia instalada promedio por vivienda de 0.82 kW y 1.76 kWh/día de consumo de energía por hogar.

Figura 64. Perfil de carga o demanda de energía para 4 horas de servicio de energía al día - La Plata

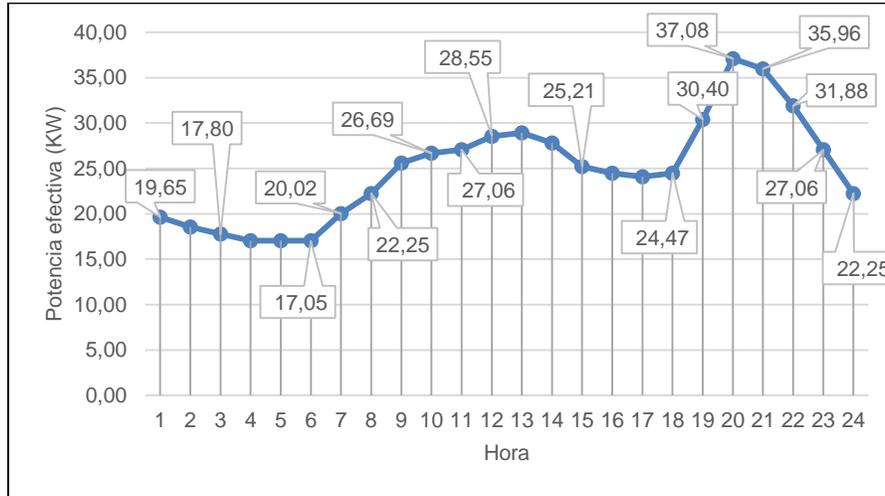


Fuente: propia

La curva de carga o demanda para el perfil, asumiendo y adaptando la curva característica de suministro de 24 horas/día para una ZNI en Colombia [111] se observa en la Figura 65. De

este análisis se pudo concluir que el total de la energía consumida al día por la comunidad es de 596.91 kWh/día o 13.26 kWh/día por vivienda.

Figura 65. Perfil de carga o demanda de energía para 24 horas de servicio de energía al día – La Plata



Fuente: adaptado de CREG 2014 considerando la carga instalada en la Comunidad de La Plata [111]

Se crearon tres escenarios de carga (bajo, medio y alto) relacionado con la realidad de la comunidad, para evaluar un escenario en donde la generación de energía no se realice con una microrred sino con sistemas solares individuales y una planta diésel comunitaria. Fue necesario evaluar esta otra configuración con las mismas fuentes de energía por restricciones en la capacidad física del terreno que tiene habitada la comunidad, así como, por la necesidad de evaluar si un sistema solar individual diseñado a la medida del cliente en términos de su capacidad instalada y financiera es más asequible que un sistema centralizado. La carga de cada escenario se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25. Escenarios de carga y demanda diaria por vivienda – La Plata

EQUIPO	Bajo		Medio		Alto	
	Potencia W	Energía [Wh/día]	Potencia W	Energía Wh/día	Potencia W	Energía Wh/día
Equipo de sonido	0	0	250	500	300	600
Bombillos	200	800	400	1,600	600	2400
Licudora	100	25	400	100	500	125
Lavadora	0	0	340	170	500	250
CD/DVD	0	0	0	0	100	200
Tv	55	110	100	200	100	200

Congelador	0	0	0	0	130	520
TOTAL [W]	355	935	1,490	2,570	2230	4295
TOTAL [KW]	0.355	0.935	1.49	2.57	2.23	4.295

Elaboración propia

5.2.3 Variables del modelo para el dimensionamiento y operación

Fue realizado un análisis técnico-económico para identificar el tamaño óptimo del sistema híbrido solar-diésel para la generación de energía. Se consideraron los valores del potencial de la fuente natural en sitio en un año completo para suplir la demanda específica de la comunidad. Algunos parámetros han sido definidos de acuerdo con las condiciones reales en sitio para un proyecto de generación a partir de microrredes.

365 escenarios de radiación solar fueron considerados en la optimización. Estos escenarios (N_j) indican todos los días del año 2019. Es importante analizar el comportamiento de la fuente natural ya que en países como Colombia (sin estaciones) la radiación puede variar durante todo el año.

5.2.3.1 Arreglo solar

Como resultado del fenómeno fotoeléctrico, los fotones provenientes de la radiación solar son transformados en energía en DC a través de las tecnologías solares fotovoltaicas. Esta energía es identificada en el problema de optimización a resolver como ($p_0(t,j)$) y es calculada a través de las ecuaciones Eq 1,

obtenidas de [118]. Las ecuaciones son usadas para determinar la potencia de salida del panel solar en kW a partir de la radiación de la zona.

Eq 1

$$p_0(t, j) = \begin{cases} \frac{I_{i(t,j)}}{I_{ref}} * P_{DC} * (1 + g(T - T_0)), I_i \geq 125W/m^2 \\ \frac{0.008(I_{i(t,j)})^2}{I_{ref}} * P_{DC} * (1 + g(T - T_0)), I_i < 125W/m^2 \end{cases} \quad \text{for } t\{1,24\} \text{ horas, } j\{1,365\} \text{ días}$$

Eq 2

$$P_{DC} = A_s * \eta_s * \hat{\Gamma}$$

Donde, I_i es la radiación incidente en la zona, I_{ref} la radiación referente ($1000W/m^2$), γ el coeficiente de temperatura de máximo poder, $(T - T_o)$ la temperatura de la celda y la temperatura de referencia. La capacidad del módulo solar P_{DC} (

), fue calculada con el área total efectiva del panel A_s , el número de paneles y la eficiencia nominal (potencia de 0.3 kW, área de $2m^2$ y eficiencia de n_s : 20%).

5.2.3.2 Variables de decisión y capacidad de las tecnologías

En esta sección se muestra las restricciones de capacidad de las tecnologías y las variables de decisión del modelo, las cuales están relacionadas con la potencia que cada tecnología necesita entregar.

El número máximo de paneles solares está definido por la Eq 3, la capacidad de la planta diésel es de 12 kW (

Eq 4) y la cantidad de combustible disponible al día es hallado con

Eq 5, a partir de los datos iniciales de 200gal/mes, subsidiados a la comunidad para cubrir 4 horas de energía al día y la relación de generación para una planta diésel de estas características.

Eq 3

$$N_{\min} \leq N \leq N_{\max}$$

$$N_{\min} \leq 0$$

$$N_{\max} = 350$$

Eq 4

$$g_{\max} = 12$$

$$g_{\min} = 0$$

Eq 5

$$diesel_{\max/día} = \frac{gal / día}{0.0974 gal / kWh}$$

La capacidad de combustible es usada para proveer energía cuando las otras tecnologías no la pueden entregar. Si la capacidad de la planta es de 12 kW, esta puede suministrar 1 kWh

por cada 0.0974 galones de combustible. La planta de generación diésel es una tecnología complementaria que incrementa la confiabilidad del sistema.

Las baterías fueron modeladas dependiendo del comportamiento de la fuente renovable. Si la energía solar que entrega el sistema es mayor que la carga, entonces las baterías son cargadas, pero si la carga es mayor, las baterías son descargadas para cubrir la demanda. El estado de carga (*SOC State of Charge*) de las baterías es una variable de decisión en el problema de optimización, y fue calculado a partir de las ecuaciones Eq 6, Eq 7, Eq 8, Eq 9, Eq 21 [120].

Eq 6 SOC [kWh]

$$SOC(t, j) \geq 0$$

Eq 7 Máximo SOC dependiendo de las características de las baterías [kWh]

$$0 \leq SOC_{\max} \leq SOC_{\max \max}$$

Eq 8 Potencia de descarga [kW]

$$P_{Disc\max} \geq 0$$

Eq 9 Potencia de carga [kW]

$$P_{Char} \geq 0$$

$$P_{Char\max} \geq 0$$

Las variables de decisión del problema corresponden con la energía producida por cada tecnología cada hora de un año, como se muestra en las ecuaciones Eq 10, Eq 11 y Eq 12. P_1 , representa la energía que puede entregar la fuente solar, esta energía depende de la radiación solar en la zona y las características de los paneles solares. P_2 , es la energía producida por la planta diésel, esta depende de la capacidad de galones de combustible por día. P_{Disc} , es la potencia descargada que puede suministrar el banco de baterías, esta energía depende de la capacidad de esta tecnología, su eficiencia y la capacidad del sistema solar para cubrir la carga y cargar las baterías.

Eq 10 Potencia suministrada por el sistema solar FV cada t hora en cada j escenario.

$$P_1(t, j) \geq 0 [kW]$$

Eq 11 Potencia entregada por la planta diésel cada t hora en cada j escenario.

$$g_{\min} \leq P_2(t, j) \leq g_{\max} [kW]$$

Eq 12 Potencia suministrada por el banco de baterías, cada t hora en cada j escenario.

$$P_{\text{Disc}}(t, j) \geq 0 [kW]$$

$$t = \{1, 24\} \text{ horas por día}$$

$$j = \{1, 365\} \text{ escenarios que corresponden a los días de un año}$$

En este problema de optimización fue conveniente definir dos variables que representan el deslastre de energía o la cantidad de energía no cubierta por el sistema $x(t, j)$ [kWh] que se da a lugar cuando la demanda sobrepasa la capacidad del sistema; y el vertido de renovables $y(t, j)$ [kWh] que toma valores cuando la capacidad del sistema solar sobrepasa la demanda.

5.2.3.3 Costo nivelado de energía

El objetivo del modelo es encontrar la factibilidad tecno-económica del sistema y para esto es necesario considerar el costo de cada una de las tecnologías. Para calcular el costo nivelado de energía [\$/kWh] del panel solar (LCOE) y del almacenamiento en baterías (LCOS) es necesario conocer el costo de la inversión, operación y mantenimiento en relación con la energía generada anualmente. Este costo se obtiene con las ecuaciones Eq 13 y Eq 14 respectivamente [119].

Eq 13

$$LCOE = \frac{\sum_{j=0}^{N^{PV}} \left[\frac{I_j^{PV} + C_j^{PV}}{(1+r)^j} \right]}{\sum_{j=0}^{N^{PV}} \left[\frac{E_j^{PV}}{(1+r)^j} \right]}$$

Eq 14

$$LCOS = \frac{\sum_{j=0}^{N^{STO}} \left[\frac{I_j^{STO} + C_j^{STO}}{(1+r)^j} \right]}{\sum_{j=0}^{N^{STO}} \left[\frac{E_j^{OUT-STO}}{(1+r)^j} \right]}$$

Donde I_j^{PV} , I_j^{STO} es el costo de inversión anualizado, C_j^{PV} , C_j^{STO} es el costo anualizado de la operación y mantenimiento. r , tasa de descuento. j y N tiempo de vida útil del sistema, desde $j=0$ años. E_j^{PV} es la energía solar producida anualmente y $E_j^{OUT-STO}$ es la energía liberada por el almacenamiento.

El costo nivelado de la energía térmica fue calculado usando los costos logísticos que son asumidos por la comunidad para obtener el subsidio gubernamental (transporte para gestionar el diésel en la cabecera municipal), en relación con la energía que genera esta planta anualmente. Además, un costo C_4 fue asumido como un costo de penalidad del modelo, más alto que los costos de la generación con otras tecnologías, cuando el sistema no puede cubrir la demanda.

5.2.4 Modelo de optimización estocástico

Fue elaborado un modelo de optimización estocástico para determinar el dimensionamiento y la operación óptima de un sistema híbrido de generación de energía para una zona aislada. En el apartado anterior se establecieron las variables de decisión y los datos de entrada del modelo con sus respectivas capacidades que representan adecuadamente el comportamiento del sistema.

En este apartado se encuentran definidas las restricciones que tiene el modelo y la función objetivo que fue resuelta mediante software de optimización.

5.2.4.1 Restricciones

Algunas restricciones fueron diseñadas dependiendo del comportamiento deseado en la generación del sistema. Las inequaciones matemáticas son expresadas como se muestra a continuación.

El número de paneles solares requeridos por el sistema está limitado por la potencia que es capaz de extraer un panel solar a partir de la radiación de la zona $P_0(t, j)$, por lo tanto, la potencia entregada por la fuente solar $P_1(t, j)$ en cada hora y cada escenario será la multiplicación entre el número de paneles y $P_0(t, j)$.

Eq 15 Número de paneles.

$$P_1(t, j) = P_0(t, j) * N$$

La potencia de carga y descarga del banco de baterías también está restringida por la potencia máxima de carga y descarga, donde esta última está ligada al SOC máximo o la potencia máxima que puede ser descargada por las baterías dependiendo de la cantidad y potencia de las mismas. La potencia con la que se carga la batería será igual a la capacidad máxima de la batería, mientras que la potencia de descarga será un tercio de la capacidad máxima de las baterías.

Como ya es sabido, el modelamiento del estado de carga de las baterías es característico ya que depende de la eficiencia de carga y descarga, así como de la energía que tenía almacenada en el momento antes. Este comportamiento se muestra en la Eq 21.

Por otro lado, se incluyeron restricciones para determinar la capacidad del banco de baterías a la 1:00 y 24:00 horas, en orden de garantizar la disponibilidad de energía al inicio (Eq 22) y al final (Eq 23) del día, horas nocturnas en las cuales es requerida la electricidad.

Eq 16 Potencia máxima de carga.

$$P_{Char}(t, j) \leq P_{Char\ max}$$

Eq 17 Potencia máxima de descarga.

$$P_{Disc}(t, j) \leq P_{Char\ max}$$

Eq 18 Máxima energía en baterías.

$$SOC(t, j) \leq SOC_{\max}$$

Eq 19 Relación de carga.

$$P_{Char\ max} = SOC_{\max}$$

Eq 20 Relación de descarga.

$$P_{Disc\ max} * \frac{1}{3} = SOC_{\max}$$

Eq 21 Potencia de la batería.

$$SOC(t, j) = SOC_{(t-1, j)} + n_c * P_{Char(t-1, j)} - \left(\frac{1}{n_d} \right) * P_{Disc(t-1, j)}$$

Eq 22 Energía inicial.

$$SOC(1, j) = 0.5 * SOC_{max}$$

Eq 23 Energía final.

$$SOC(24, j) + n_c * P_{Char(24, j)} - \left(\frac{1}{n_d} \right) * P_{Disc(24, j)} \geq 0.3 * SOC_{max}$$

El límite de combustible es restringido por la Eq 24, donde el total de la energía liberada por la planta diésel P_2 debe ser menor o igual que la capacidad máxima de diésel ($diesel_{max}$) a través del año. Este límite es necesario para minimizar el uso de esta tecnología, las emisiones de CO_2 y para considerar la cantidad de combustible fósil disponible en la comunidad.

Eq 24 Límite de combustible.

$$\sum_{j=1}^{24} \sum_{s=1}^{N_s} P_2(t, j) \leq (diesel_{max} * N_j)$$

5.2.4.2 Ecuación de balance

La ecuación de balance Eq 25 representa la suma del total de la energía generada por las fuentes solar, diésel y las baterías, las cuales deben ser iguales a la demanda d del sistema. Sin embargo, como es conocido, este balance no es viable en todos los casos, por lo tanto, dos variables fueron adicionadas. El deslastre de energía o la energía no cubierta $x(t, j)$, cuando la potencia generada por el sistema no es suficiente para cubrir la carga y el vertido de renovables $y(t, j)$ cuando la energía generada es mayor que la demanda del sistema. Cabe resaltar que esta última energía es desperdiciada.

Eq 25

$$P_1(t, j) + P_2(t, j) + P_{Desc}(t, j) + x(t, j) - y(t, j) = d(t) + P_{Carga}(t, j)$$

Donde d es la carga o demanda de potencia horaria por día, que depende del perfil de carga.

5.2.4.3 Restricción de cobertura horaria $\geq \alpha$

La cobertura horaria mínima se refiere al porcentaje mínimo de energía que se espera que cubra la carga en un momento determinado del día, esta es representada por la Eq 26.

Eq 26

$$\frac{d(t) - x(t, j)}{d(t)} * 100 \geq \alpha$$

5.2.4.4 Restricción de cobertura diaria $\geq \alpha$

La cobertura diaria se refiere al porcentaje mínimo esperado de energía en relación con la carga y se muestra en la Eq 27.

Eq 27

$$\sum_1^{24} \frac{d(t) - x(t, j)}{d(t)} * 100 \geq \alpha$$

5.2.4.5 Restricciones de presupuesto

Gracias al presupuesto limitado y las condiciones socioeconómicas para este tipo de población, se incorporó una restricción al presupuesto de inversión para las tecnologías utilizadas en el sistema, como paneles solares y baterías. Dependiendo de este presupuesto máximo β , el sistema elige la configuración tecno-económica más baja posible para ofrecer la máxima cobertura.

Eq 28

$$(N * I_{iPV}) + \left(\frac{SOC_{\max}}{2.4} * I_{iB} \right) \leq b$$

5.2.4.6 Función objetivo

Considerando que el despacho económico y el dimensionamiento del sistema es el objetivo de la solución del sistema de generación híbrido, la función objetivo se representa en la Eq 29. Esta función minimiza el costo de generación con cada tecnología, en cada hora y cada día del año en la vida útil del sistema. La energía generada por el sistema solar FV, la planta diésel y las baterías son las variables a encontrar. La minimización está ligada a restricciones de capacidad del módulo solar, capacidad de combustible, capacidad del banco de baterías, cobertura mínima y presupuesto máximo de inversión.

Eq 29

$$\min f(\bar{P}, t, j) = \sum_1^{24} \sum_1^{Nj} \rho_j * (C_1 P_1(t, j) + C_2 P_2(t, j) + C_3 P_{Disc}(t, j) + C_4(j, t) x(t, j))$$

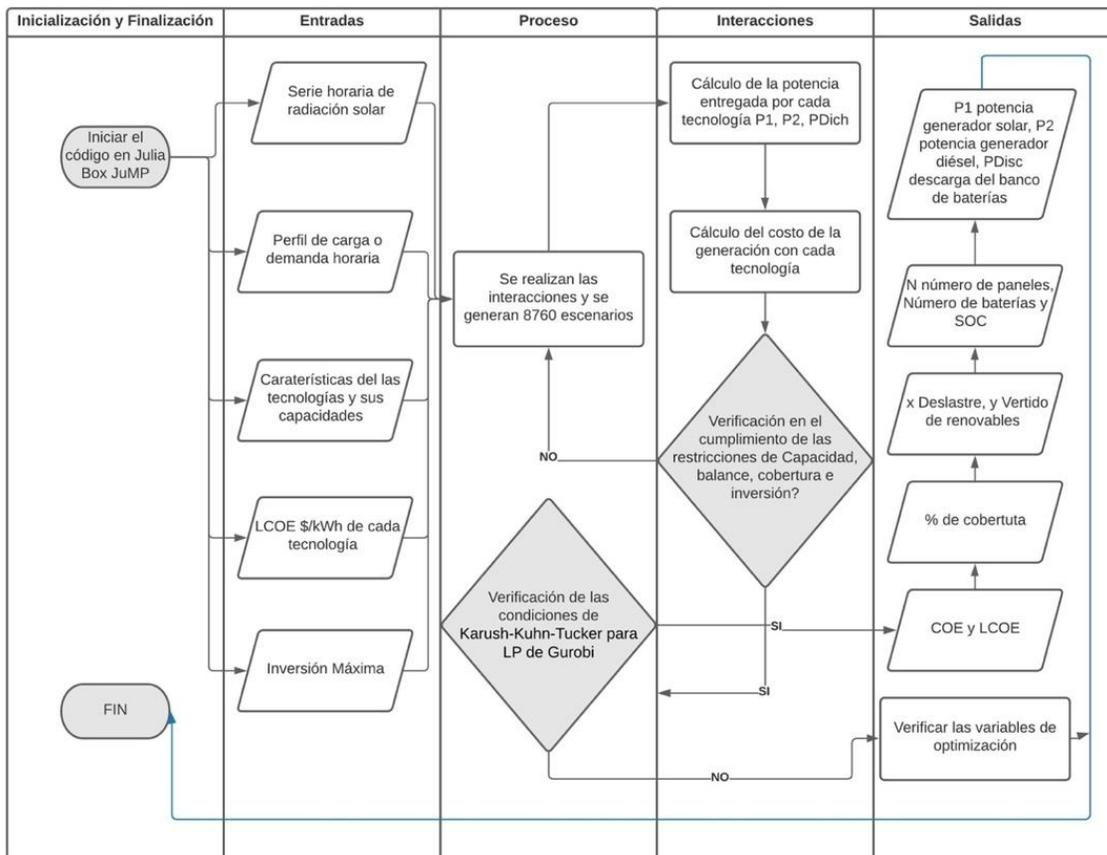
$$P \hat{=} \square +$$

Las fuentes de incertidumbre para el problema de optimización están asociadas a la fuente de energía renovable solar fotovoltaica, ya que uno de los grandes retos en la generación de este tipo de energía está ligado a la volatilidad de la fuente y la probabilidad de obtener una

determinada cantidad de radiación necesaria para la producción de energía. Por lo tanto, se utilizaron 365 escenarios para cada perfil solar diario (variable con incertidumbre), donde π es la probabilidad del escenario. Las probabilidades se calcularon asumiendo que cada escenario tiene la misma probabilidad entre el total de los días del año.

El algoritmo de optimización diseñado para el dimensionamiento y la operación óptima de un sistema híbrido aislado de generación solar FV, diésel y baterías, para el abastecimiento de energía a una comunidad en una ZNI en Colombia, se puede observar en el diagrama de flujo de la Figura 66.

Figura 66. Diagrama de flujo del algoritmo de optimización



Fuente propia

5.2.4.7 Solución del Modelo

Se obtuvo el dimensionamiento y operación óptima del sistema al mínimo costo al solucionar el problema de optimización. Los resultados del modelo se dividieron en 4 análisis de sensibilidad diferentes, como se muestra en la Tabla 26. En esta tabla se compara el costo

total de energía generada por año, el porcentaje de cobertura promedio, el costo nivelado de energía y la cantidad de equipos (energía solar PV y baterías) para cubrir la demanda. Este análisis se realizó para observar cómo las restricciones reales a las que está expuesta la comunidad tienen efectos sobre el costo de la energía y el valor de la inversión.

Tabla 26. Análisis de sensibilidad para las diferentes restricciones

Características	COE [\$/año]	COE [\$/Usuario al año]	% Cobertura promedio [%/año]	LCOE [\$/kWh]	Tamaño Sistema Solar	Tamaño banco de baterías
Restricción para el tamaño del sistema	34,975,681	777,237	82.66%	151.07	250	105
Número ilimitado de paneles y baterías	46,749,740	1,038,883	100%	205.21	195	703
Restricción de presupuesto hasta \$COP350 millones de pesos	45,258,171	1,005,737	95.75%	156.31	322	139
Restricción de cobertura horaria $\alpha \geq 69\%$	47,273,483	1,050,521	82.30%	152.44	250	105
Restricción de cobertura diaria $\alpha \geq 90\%$.	47,215,642	1,049,236	100%	206.31	232	1459

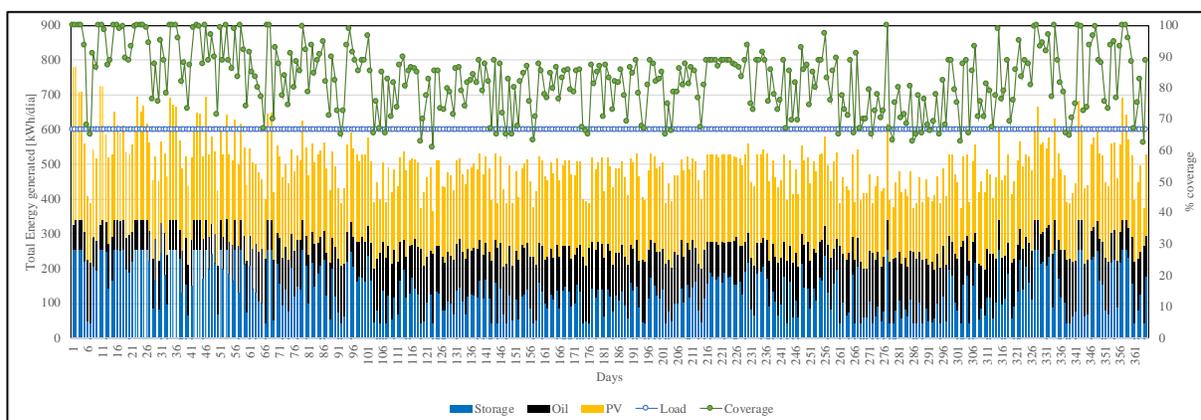
Fuente: propia

5.2.4.8 Resultados para la restricción del tamaño del sistema

El primer análisis corresponde con el modelo original donde se ha dispuesto una capacidad máxima del número de paneles y baterías debido a las restricciones del tamaño del terreno. La máxima capacidad del número de paneles fue $N_{max} = 250$ de 400 W40 V, que cuentan con un área de $2m^2$ y una eficiencia del 20%. La capacidad máxima para las baterías fue de 250kWh, que corresponde con 105 baterías de 12 V 200Ah. El valor máximo de combustible por día es de 12 galones, que permiten suplir 596.91kWh/día.

Después de realizar la optimización se pudo observar que la generación del sistema cubre un promedio del 82% de la carga con un costo nivelado de \$151.07/kWh. En la Figura 67 se puede ver la energía producida por el sistema con cada tecnología (solar FV, planta diésel y almacenamiento), así como la demanda diaria de energía en la comunidad y el porcentaje de cobertura para los 365 días del año.

Figura 67 Potencia generada por cada tecnología, carga y % de cobertura



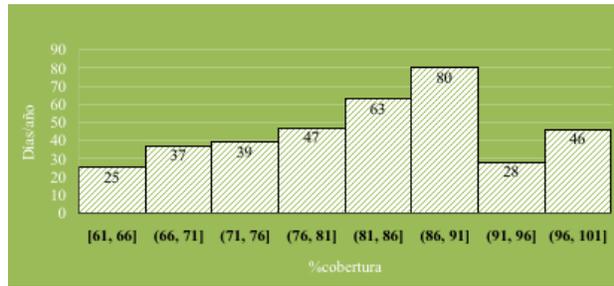
Fuente: propia

Gracias a que la fuente principal del sistema es solar FV, su comportamiento depende en gran medida de los cambios en la radiación solar. Al inicio del año, la cobertura presenta los valores más altos llegando en algunos días al 100%, lo mismo sucede al final del año. Sin embargo, a mediados del año, aproximadamente desde el día 101 hasta antes del 280 se presentan los valores más bajos de cobertura a causa de la baja radiación solar que la zona experimenta en estas fechas.

La energía producida por el sistema es mayor que la energía necesaria para cubrir la demanda al comienzo y al final del año, y se produce lo que se llama, el derrame o vertido de renovables. A mediados del año, la radiación es más baja y la cobertura es menor que los otros meses del año.

La gráfica de distribución de frecuencias de cobertura (Figura 68) muestra que en el 20% de los días del año, la cobertura excede el 90%, el 40% de los días está entre el 71% y 86% de cobertura, y el 16% del tiempo, la cobertura está entre el 61% y el 70%. La frecuencia de aparición de baja cobertura (no menos del 61%), es muy baja (6.8%), así como la frecuencia de aparición de alta cobertura es buena con un 12.6%. Es importante notar que en el 59% de los escenarios la cobertura superar el 81%, mientras que en el 41% de los escenarios la cobertura es menor, no menos del 61%.

Figura 68. Gráfico de distribución de frecuencias de cobertura, por año.

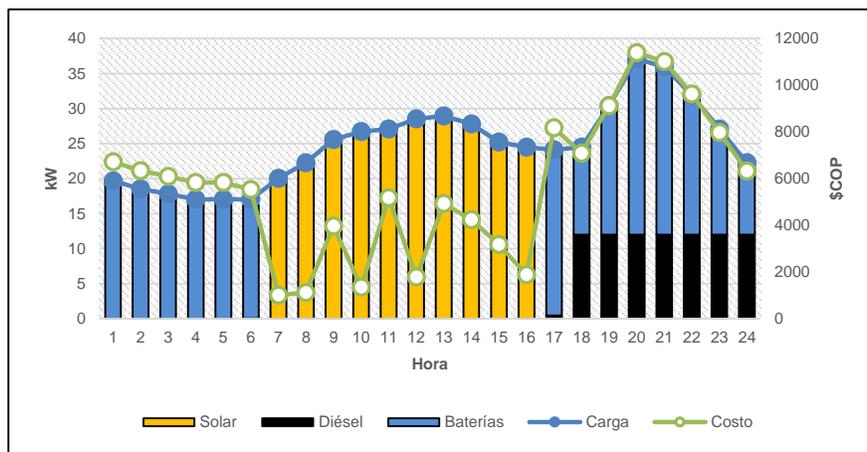


Fuente: propia

El bajo costo del sistema fotovoltaico comparado con las otras dos tecnologías (diésel y baterías) hace que el modelo de optimización privilegie esta tecnología para generar energía en el momento en el que está disponible. Se ha comprobado que en el lapso de 7:00 a 16:00 horas, el sistema fotovoltaico produce un excedente que es utilizado para cargar el sistema de almacenamiento de energía.

Los resultados de la optimización arrojaron un escenario diferente para cada día del año. Los resultados del funcionamiento del sistema varían cada día debido a la estocasticidad de la radiación solar, mientras que las otras fuentes tienen valores más fiables. Al revisar los escenarios, el día 2 del año presenta los valores más altos de cobertura diaria y horaria (Figura 69) (Tabla 27), a excepción de las 6:00 horas donde hay un valor del 95% cubierto con baterías.

Figura 69. Escenario 2. Cobertura media 99.8%. Mejor escenario



Fuente: propia

Tabla 27. Resultados del modelo de optimización escenario de cobertura más alta – Esc 2

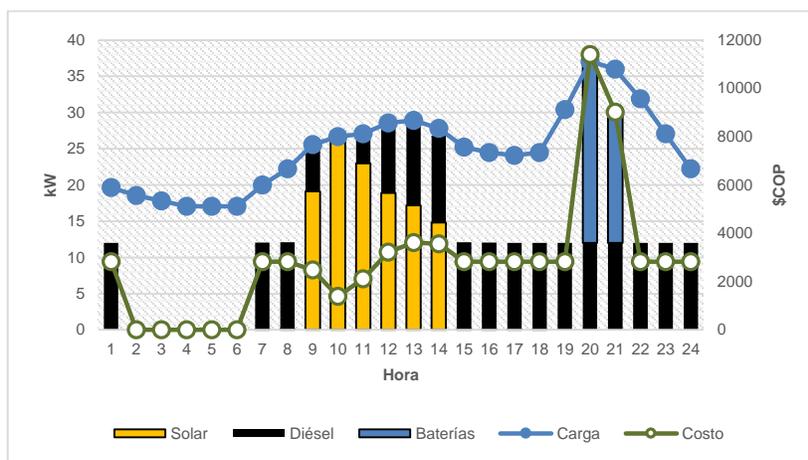
<i>Hora</i>	<i>Generación Total</i>	<i>Costo [\$/h]</i>	<i>Carga [kWh]</i>	<i>Deslastre [kW/h]</i>	<i>Vertido</i>	<i>Carga de Batería</i>	<i>SOC</i>	<i>%Cobertura</i>
1	19.65	6721.29	19.65	0.00	0.00	0.00	125.00	100
2	18.54	6340.84	18.54	0.00	0.00	0.00	101.88	100
3	17.80	6087.21	17.80	0.00	0.00	0.00	80.07	100
4	17.05	5833.57	17.05	0.00	0.00	0.00	59.14	100
5	17.05	5833.57	17.05	0.00	0.00	0.00	39.07	100
6	16.21	5529.41	17.05	0.85	0.00	0.00	19.01	95.04
7	20.02	1006.71	20.02	0.00	13.08	0.00	0.00	100
8	22.24	1118.57	22.25	0.00	35.66	0.00	0.00	100
9	25.58	3962.39	25.58	0.00	0.00	53.22	0.00	100
10	26.69	1342.29	26.69	0.00	67.41	0.00	42.57	100
11	27.06	5179.27	27.06	0.00	0.00	75.94	42.57	100
12	28.55	1790.09	28.55	0.00	68.50	7.05	103.32	100
13	28.92	4932.88	28.92	0.00	0.00	69.18	108.96	100
14	27.81	4233.93	27.81	0.00	0.00	56.39	164.31	100
15	25.21	3167.90	25.21	0.00	0.00	37.79	209.42	100
16	24.47	1880.63	24.47	0.00	0.00	12.93	239.66	100
17	24.10	8177.59	24.10	0.00	0.00	0.00	250.00	100
18	24.47	7085.25	24.47	0.00	0.00	0.00	222.18	100
19	30.40	9114.32	30.40	0.00	0.00	0.00	207.51	100
20	37.08	11397.02	37.08	0.00	0.00	0.00	185.86	100
21	35.96	11016.57	35.96	0.00	0.00	0.00	156.36	100
22	31.88	9621.59	31.88	0.00	0.00	0.00	128.17	100
23	27.06	7972.97	27.06	0.00	0.00	0.00	104.78	100
24	22.25	6324.35	22.25	0.00	0.00	0.00	87.05	100

Fuente: propia

El peor escenario es el día 123 (Figura 70) (Tabla 28), en el cual la media de cobertura alcanza el 60,8%, debido a la baja radiación. La energía solar producida se utiliza para suplir la demanda, gracias a esto las baterías no se cargan y la generación depende principalmente de la fuente térmica. El costo nivelado de energía en el pico de consumo a las 20 horas es de 37.08kWh a un costo de \$11,397.02, lo que en un cálculo directo nos arroja \$307.36 el kWh, lo cual muy económico para este tipo de poblaciones.

El combustible se distribuye durante todo el año, hasta su finalización. Los periodos privilegiados son entre las 18:00 y las 24:00 horas, después de esto la demanda se complementa con el almacenamiento de las baterías.

Figura 70. Escenario 123. Cobertura promedio = 60.8%. Escenario más bajo



Fuente: propia

Tabla 28. Resultados del modelo de optimización escenario de cobertura más baja – Esc 123

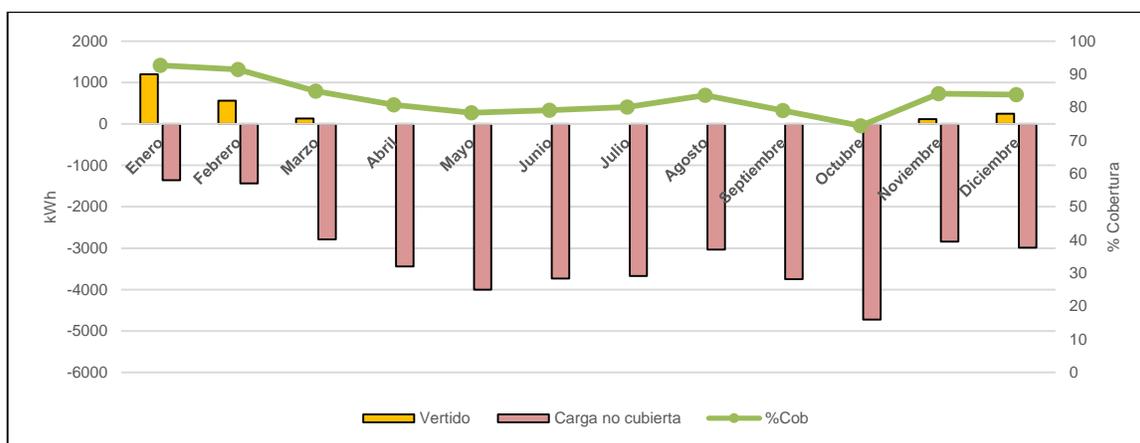
<i>Hora</i>	<i>Generación Total</i>	<i>Costo [\$ /h]</i>	<i>Carga [kWh]</i>	<i>Deslastre [kW/h]</i>	<i>Vertido</i>	<i>Carga de Batería</i>	<i>SOC</i>	<i>%Cobertura</i>
1	12.00	2820.00	19.65	7.65	0.00	0.00	125.00	61.07
2	0.00	0.00	18.54	18.54	0.00	0.00	125.00	0.00
3	0.00	0.00	17.80	17.80	0.00	0.00	125.00	0.00
4	0.00	0.00	17.05	17.05	0.00	0.00	125.00	0.00
5	0.00	0.00	17.05	17.05	0.00	0.00	125.00	0.00
6	0.01	0.52	17.05	17.04	0.00	0.00	125.00	0.06
7	12.05	2822.53	20.02	7.97	0.00	0.00	125.00	60.19
8	12.09	2824.55	22.25	10.15	0.00	0.00	125.00	54.35
9	25.58	2483.64	25.58	0.00	0.00	0.00	125.00	100.00
10	26.69	1392.87	26.69	0.00	0.00	1.01	125.00	100.00
11	27.06	2111.75	27.06	0.00	0.00	0.00	125.80	100.00
12	28.55	3217.59	28.55	0.00	0.00	0.00	125.80	100.00
13	28.92	3618.74	28.92	0.00	0.00	0.00	125.80	100.00
14	26.80	3564.21	27.81	1.01	0.00	0.00	125.80	96.38
15	12.08	2823.98	25.21	13.13	0.00	0.00	125.80	47.91

16	12.05	2822.66	24.47	12.42	0.00	0.00	125.80	49.26
17	12.02	2820.89	24.10	12.08	0.00	0.00	125.80	49.87
18	12.00	2820.04	24.47	12.47	0.00	0.00	125.80	49.04
19	12.00	2820.00	30.40	18.40	0.00	0.00	125.80	39.47
20	37.08	11397.02	37.08	0.00	0.00	0.00	125.80	100.00
21	30.11	9014.30	35.96	5.85	0.00	0.00	96.30	83.72
22	12.00	2820.00	31.88	19.88	0.00	0.00	75.00	37.64
23	12.00	2820.00	27.06	15.06	0.00	0.00	75.00	44.34
24	12.00	2820.00	22.25	10.25	0.00	0.00	75.00	53.94

Fuente: propia

Los resultados del modelo muestran un aumento en la cobertura energética para la comunidad del 61%. En el 59% de los escenarios la cobertura es superior al 81%, sin embargo, la variabilidad de la fuente solar hace que dicha cobertura disminuya en otros días. La Figura 71 muestra el comportamiento del vertido fotovoltaico y el deslastre de energía durante un año, así como la cobertura mensual promedio. En enero se produce un vertido de renovables de 1.197 kWh, así como una carga no cubierta de 1.358 kWh, esto se debe a que en algunos días del mes la energía solar no alcanza para cubrir la demanda y otros días es mayor que la demanda del sistema.

Figura 71. Vertido total de renovables, energía no cubierta y % de cobertura



Fuente: propia

5.2.4.9 Número ilimitado de paneles y baterías

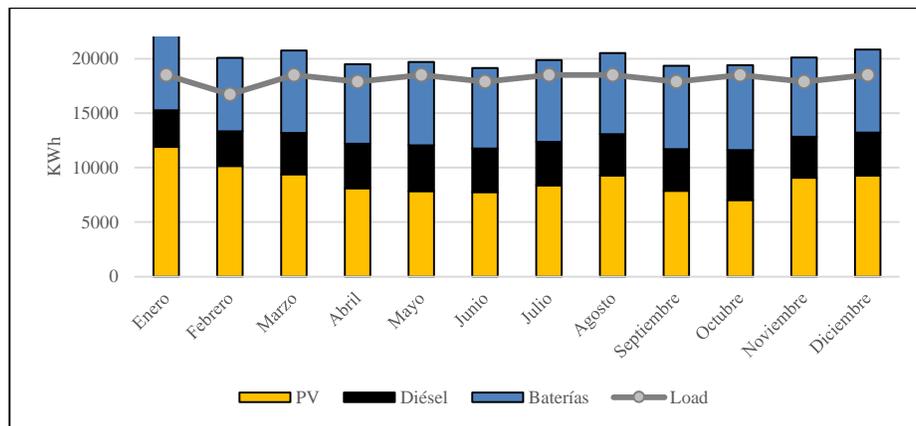
Se realizó un análisis para definir el dimensionamiento y funcionamiento óptimo del sistema de generación híbrida, sin límites de capacidad en el número de paneles solares y baterías para almacenamiento. Este caso se llevó a cabo con el objetivo de encontrar el tamaño del

sistema necesario para abastecer el 100% de la demanda de energía sin restricciones de cobertura y presupuesto máximo.

Los resultados mostraron un porcentaje de cobertura total del 100% con 195 paneles solares de 400W y 703 baterías de 200Ah, un COE (costo total de energía) anual de COP 46,749,740 y un costo nivelado de \$205/kWh, 35% más costoso que el caso anterior.

La energía producida anualmente se puede ver en la Figura 72. El sistema solar aporta el mayor porcentaje, seguido por las baterías y por último el combustible. La energía producida es superior a la demandada durante todos los meses, generando suficiente vertido de renovables o pérdida de energía por sobredimensionamiento del sistema para cubrir los días de más baja radiación.

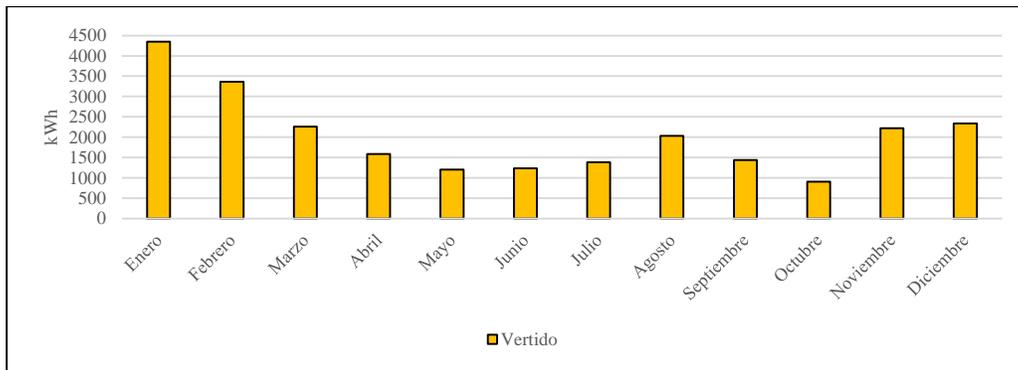
Figura 72. Generación total de energía por tecnología y, carga



Fuente: propia

Si bien este escenario es positivo debido a la cobertura total de suministro, el derrame fotovoltaico es muy elevado durante todos los meses del año (Figura 73), esto se debe a que el sistema está sobredimensionado y la energía que se produce no se puede utilizar. Este escenario es positivo si se considera un aumento en la carga del sistema, debido al crecimiento de la comunidad.

Figura 73. Vertido de renovables total



Fuente: propia

5.2.4.10 Restricción de presupuesto

Dadas las condiciones socioeconómicas de este tipo de comunidades, fue necesario incluir restricciones presupuestales para el diseño del sistema.

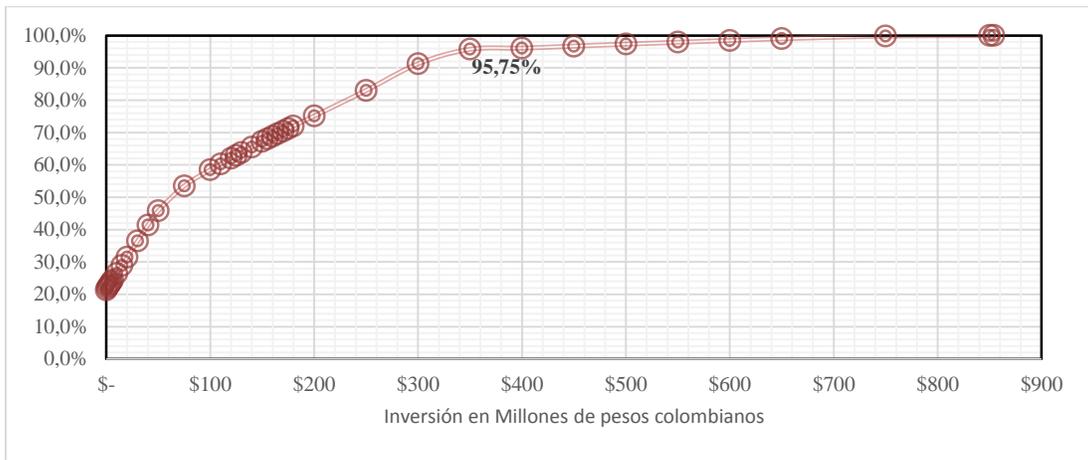
A partir de los resultados de la restricción de presupuesto se construyó una curva de inversión vs cobertura (Figura 74) para observar el comportamiento del modelo por cada millón de pesos adicional en inversión, en términos del incremento en la cobertura del sistema y las preferencias del modelo con respecto al uso de esa inversión.

En la Figura 74 se muestra como al inicio de la simulación, el aumento de la cobertura es el más alto, pasando de 21.9% a 58.5% con una inversión total de 100 millones de pesos. Posterior a esto, el aumento sigue creciendo con menor potencia (16.6 puntos porcentuales), llegando al 75.1% de cobertura, con la misma inversión. El tercer intervalo tiene un comportamiento similar al anterior, donde con una inversión adicional de 100 millones de pesos, se alcanza una cobertura del 91.3%, con 16.2 puntos porcentuales más que en el lapso anterior.

En el cuarto intervalo, la pendiente de la curva se vuelve más pequeña, con un incremento en cobertura de 4.8 puntos porcentuales (pp), pasando de un 91.3% a 96.1%, con una inversión adicional de 100 millones de pesos. A partir de entonces, los incrementos son muy bajos, requiriendo el doble de la inversión realizada hasta ahora (400 millones), para llegar al 100% de la cobertura.

Este análisis nos deja como conclusión que un nivel de cobertura asequible corresponde al 95,75%, con una inversión de 350 millones de pesos, lo que corresponde a un buen nivel de cobertura, ya que para alcanzar un nivel de cobertura del 100% se requeriría el doble de la inversión inicial para subir tan solo 4.25 pp y el sistema quedaría sobredimensionado generando desperdicio de energía en gran parte del año.

Figura 74. Relación entre inversión y % cobertura

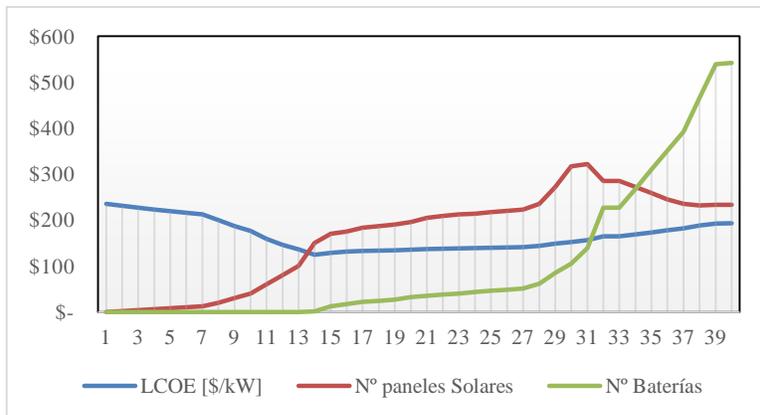


Fuente: propia

La Figura 75 muestra la evolución del dimensionamiento de los equipos (baterías y paneles solares) y el costo nivelado de energía. Inicialmente el modelo opta por invertir sólo en paneles solares para cubrir la demanda en horas con energía solar con un costo nivelado bajo. Posteriormente, cuando alcanza 150 paneles solares, se realiza la primera inversión en baterías con un costo nivelado constante. En el eje horizontal se presenta el número de escenarios de inversión y en el eje vertical se encuentra el costo nivelado de energía.

Una vez que el sistema alcanza un total de 300 paneles, se experimenta una disminución en la adquisición de estos y la inversión en baterías aumenta en gran proporción. El costo nivelado comienza a aumentar hasta alcanzar un valor de \$193/kWh. El LCOE más bajo que obtiene es de \$124kWh.

Figura 75. Relación entre el tamaño del Sistema solar, el almacenamiento en baterías y el costo nivelado de energía



Fuente: propia

5.2.4.11 Restricciones de cobertura diaria y horaria $\geq \alpha$

Se agregó una restricción de cobertura mínima tanto horaria como diaria al problema de optimización, para garantizar un suministro mínimo en determinado momento.

Los resultados arrojaron que, la restricción de cobertura horaria se vuelve inviable cuando asume valores superiores a $\alpha = 69\%$. Para la restricción de cobertura diaria, el rango es mayor, cuando el límite del tamaño del sistema es ilimitado, en cuyo caso alcanza el 100% de la cobertura, con derrame de renovables en el 92% de los escenarios.

En este último caso, la energía generada se desperdicia porque el sistema está sobredimensionado. El costo nivelado y el costo de la energía son más altos que en todos los casos anteriores en donde no hay restricciones de cobertura.

El escenario más costoso es en el que se pretende alcanzar un nivel de cobertura horario de 69%, dado que al asumir este nivel de cobertura los días en el año en el que la energía solar es insuficiente, agotaría la fuente de respaldo en recursos fósiles para cubrir la demanda a costos más elevados y obteniendo los niveles más bajos de cobertura con un total de 82.30%.

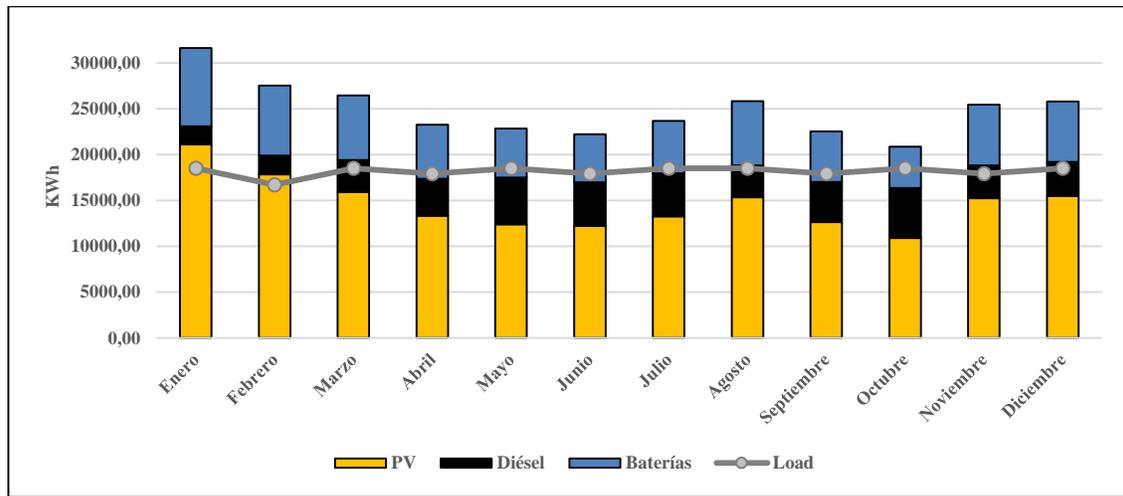
De los resultados del modelo de optimización y los diversos escenarios analizados sobre la configuración de la microrred, se puede concluir que abastecer el 100% de la demanda en la comunidad si es posible, sin embargo, en estos casos, el sistema solar estaría sobredimensionado, generando gran cantidad de vertido de renovables durante todos los meses del año, lo que se traduciría en desperdicio de energía, un costo más elevado de inversión inicial, la adecuación de un terreno de 1 km^2 para la instalación del sistema y los impactos medioambientales que traería el área de intervención del proyecto.

Por otro lado, las configuraciones en la que hay un número limitado de paneles y baterías gracias a las restricciones de terreno y el área a intervenir, así como a las restricciones de presupuesto, nos entregan escenarios mucho más realistas, en los que se abastecería entre el 82.66% y el 95.7% de la demanda de energía, con una inversión inicial (únicamente en paneles y baterías con su respectiva AOM) de COP\$268 millones de pesos y COP\$350 millones de pesos, respectivamente.

Por lo tanto, en esta investigación fue seleccionada la configuración de Microrred que podría abastecer a la comunidad en el 95.75% (Figura 76, Figura 77) de la energía demandada, a un costo nivelado de energía (en 25 años de funcionamiento) de $\$156.31/kWh$, con un total de 322 paneles, 139 baterías, una planta diésel de respaldo de $12kW$ de potencia y un límite de combustible de 200 gal/mes .

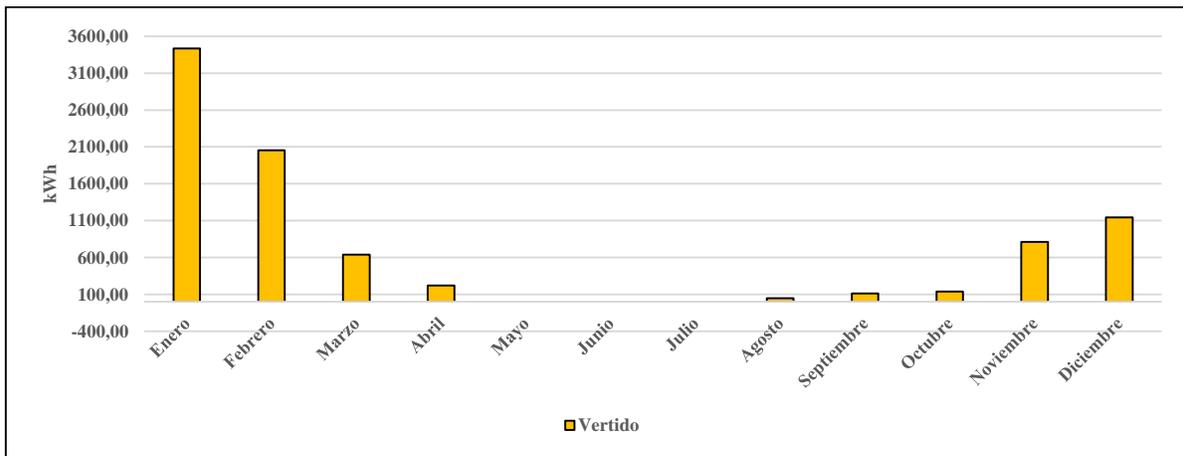
Esta selección se realizó considerando los requerimientos de la comunidad de lograr cubrir el mayor porcentaje de carga posible, sin embargo el modelo financiero que se plantea en el subcapítulo de resultados sobre el Modelo Financiero (5.4), determinará con mayor fiabilidad si este modelo técnico de Microrred es realmente asequible para la comunidad, considerando los costos adicionales de la topología de la red, el retorno de la inversión, las tasa de interés, la AOM y las tarifas para los usuarios, en el marco de los modelos financieros adaptados.

Figura 76. Generación total de energía por tecnología y, carga – Escenario 95.75% de cobertura



Fuente: propia

Figura 77. Vertido de renovables total – Escenario 95% de cobertura



Fuente: propia

5.2.5 Topología de la red

La topología de la red eléctrica para La Plata se realizó en dos contextos. El primero corresponde a la Microrred expuesta en el modelo de optimización técnico de la sección anterior, y el segundo corresponde a tres escenarios adicionales con sistemas solares individuales para cada vivienda y una planta diésel centralizada para abastecer las horas a las que están acostumbrados.

Se seleccionaron estos modelos individuales gracias a que, en los análisis económicos de la población estudiada, se pudo concluir que los individuos tienen situaciones económicas diferentes, así como una carga eléctrica también diferente. Unos habitantes poseen ingresos más bajos que otros y por lo general la carga de los equipos eléctricos en su vivienda es baja, por el contrario, hay habitantes que tienen ingresos más altos y su carga eléctrica es más alta.

Estos escenarios se llevaron a cabo en este análisis, con el ánimo de encontrar cual es la configuración técnica, económica y financiera que más se adapta a la comunidad y que es asequible para dar la mayor cobertura de energía posible.

Los datos para la definición de los escenarios bajo, medio y alto se extrajeron de las encuestas realizadas en el trabajo de campo, y fueron dimensionadas a partir de los equipos comerciales con potencias requeridas y características idóneas para implementar en la zona. El cálculo se describe a continuación.

5.2.5.1 Topología para sistemas solares individuales

En el escenario bajo, medio y alto los habitantes de La Plata poseen una demanda de energía total de $0.935kWh/día$, $2.57kWh/día$ y $3.6kWh/día$ (respectivamente) como se muestra en la Tabla 25. Con esta información se procedió a realizar el dimensionamiento de los equipos necesarios para suministrar la energía.

Para seleccionar la referencia de los equipos a utilizar, se hizo una búsqueda y cotización de equipos comerciales con excelente calidad, precio bajo, e idóneos para instalar en este tipo de zonas.

El número de paneles necesario (N) se calculó a partir de la Eq 30 y Eq 31 [121], considerando paneles de las marcas y características como se muestra en la Tabla 29.

Tabla 29. Paneles solares FV comerciales utilizados para el dimensionamiento

Escenario	Tipo de panel solar
Bajo	Panel solar FV de 140W a 18.50V de marca RESUN proveedor <i>Solartex</i> .
Medio	Paneles 200W 12 V Policristalino EGE – Fabricante <i>Ecogreen</i>
Alto	Paneles 400W 40 V Marca <i>Seraphin</i> proveedor <i>Aprotec</i>

Fuente propia

Eq 30

$$N = \frac{\text{Energía requerida o carga}}{\text{Potencia nominal panel} * \text{HEP}}$$

Eq 31

$$HEP = \frac{\text{Índice de radiación solar } (W/m^2)}{1000W/m^2}$$

Donde HEP es el número teórico de horas equivalentes de potencia que se calcula con la Eq 31. Los resultados para los tres sistemas se pueden observar en la Tabla 33 y en las Figura 78, Figura 79 y Figura 80.

La capacidad de las baterías (C) necesaria para almacenar la energía entregada por los paneles y asegurar los días de autonomía, se calculó a partir de Eq 32.

Eq 32

$$C = \frac{E_t}{V_{Bat}} * n$$

Donde E_t , es la energía total requerida en wh , V_{Bat} es la tensión nominal de la batería y n es el número días de autonomía del sistema elegido. En este caso fueron seleccionadas las baterías comerciales (Tabla 30) teniendo en cuenta la cantidad de energía que debería almacenar, en cada escenario.

Tabla 30. Baterías solares comerciales utilizadas para el dimensionamiento

Escenario	Tipo de batería solar
Bajo	Batería MTEK 12 v 155Ah
Medio	Batería MTEK 12 v 150Ah
Alto	Batería MTEK 12 v 150Ah

Fuente propia

Se procedió a calcular el número de paneles en serie N_s y paralelo N_p del sistema con las Eq 33 y Eq 34.

Eq 33

$$N_s = \frac{V_{bat} \text{ (tensión nominal de la batería)}}{Vm \text{ (tensión nominal de los módulos)}}$$

Eq 34

$$N_p = \frac{Nt \text{ (Número de paneles)}}{Ns \text{ (Número de paneles en serie)}}$$

Se calcula la potencia del inversor P_{inv} a partir de la Eq 35, donde P_{AC} es potencia total del sistema en AC.

$$Eq\ 35$$

$$P_{inv} = 1.25P_{AC}$$

Con estos resultados se seleccionaron los siguientes inversores comerciales en la Tabla 31.

Tabla 31. Inversores solares comerciales utilizados para el dimensionamiento

Escenario	Tipo de Inversor
Bajo	Inversor 600W 12V SolarTech Proveedor Ferragro
Medio	Inversor 2000 W Onda Pura 110V 24V PS Solartex
Alto	Inversor 3000 W 24 V PS Onda Pura Solartex

Fuente propia

Finalmente se calculó la corriente que debe soportar el regulador I_G , comenzando con la corriente que producen los módulos solares (Eq 36), donde I_r es la corriente producida por cada panel y N_r es el número de ramas en paralelo del generador solar. Los reguladores seleccionados se encuentran en la Tabla 32.

$$Eq\ 36$$

$$I_G = I_r N_r$$

Tabla 32. Reguladores solares comerciales utilizados para el dimensionamiento

Escenario	Tipo de regulador
Bajo	Regulador Ferragro 12 V 20A
Medio	Regulador MPPT-30 12-24 V ML2430 Solartex
Alto	Regulador MPPT-30 12-24 V ML2430 Solartex

Fuente propia

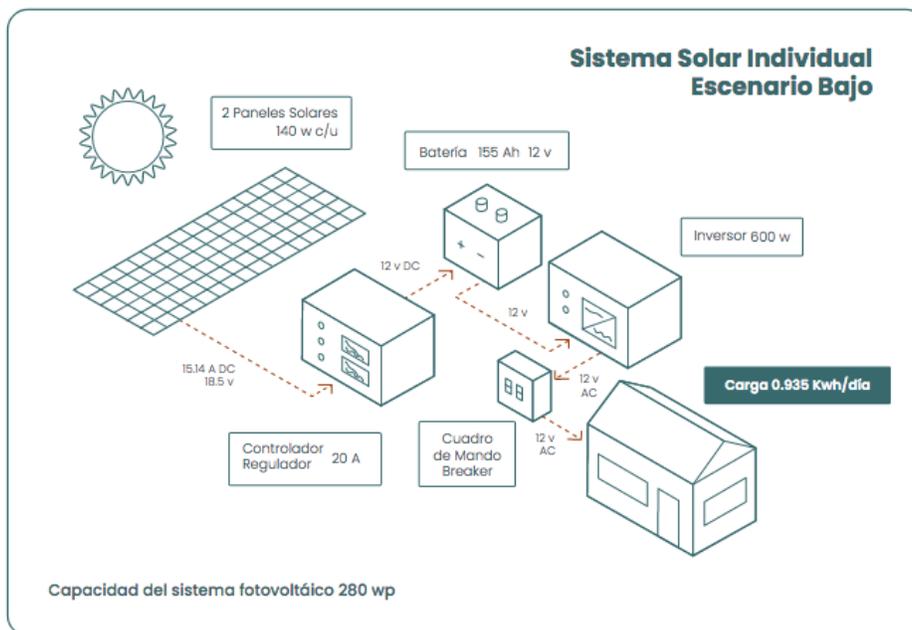
Tabla 33. Dimensionado para sistemas solares individuales (SSI) en La Plata

Dimensionado	Bajo	Medio	Alto
HEP	3.5		
N	$\frac{935Wh/día}{140W * 3.5} = 2\text{ paneles}$	$\frac{2158.8Wh/día}{200W * 3.5} = 3$	$\frac{3607.8Wh/día}{400W * 3.5} = 3$
C	$\frac{935Wh/día}{12v} * 2días = 155.83Ah$	$\frac{2158.8Wh/día}{12v} * 2 = 359.8Ah$	$\frac{3607Wh/día}{12v} * 1días = 300.65Ah$
Baterías	1 batería de 155 Ah	2 baterías de 150 Ah	2 baterías de 150 Ah

N_s	$\frac{12\text{ v}}{18.5\text{ v}} = 1 \text{ panel en serie}$	$\frac{12\text{ v}}{12\text{ v}} = 1$	$\frac{12\text{ v}}{40\text{ v}} = 1$
N_p	$\frac{2 \text{ paneles}}{1\text{ panel}} = 3 \text{ paneles en paralelo}$	$\frac{3\text{ p}}{1\text{ p}} = 3$	$\frac{3\text{ p}}{1\text{ p}} = 3$
P_{inv}	$355\text{ W} * 1.25 = 443.75\text{ W}$ Se necesita un inversor con una potencia superior a 443.75W	$1490\text{ W} * 1.25 = 1862.5\text{ W}$	$2787.5\text{ W} * 1.25 = 443.75\text{ W}$
I_G	$7.75\text{ A} * 2 = 15.14\text{ A}$	$8.21\text{ A} * 3 = 24.63\text{ A}$	$9.61\text{ A} * 3 = 28.83\text{ A}$

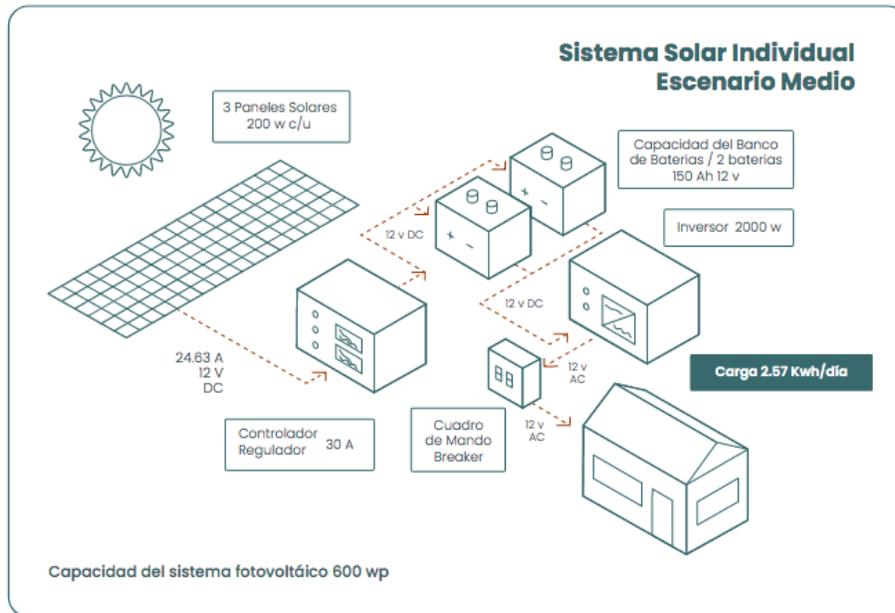
Fuente: propia

Figura 78. Topología sistema solar individual – Escenario bajo



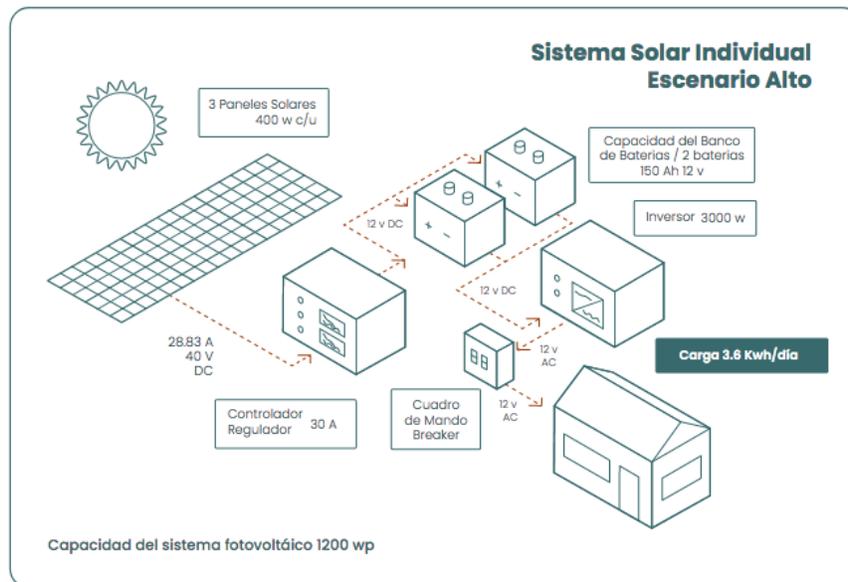
Fuente propia

Figura 79. Topología sistema solar individual – Escenario medio



Fuente propia

Figura 80. Topología sistema solar individual – Escenario alto



Fuente propia

5.2.5.2 Topología para microrred

Según los resultados del modelo de optimización para cubrir un total 95.75% de la demanda de energía en La Plata son necesarios 322 (se aproximó a 320 para facilitar los cálculos) paneles solares policristalinos de 400W a 40 V con un área de $2m^2$ y una eficiencia del 20%. También se requieren 139 (se aproximó a 140 para facilitar los cálculos) baterías solares en gel de 200Ah a 48V.

Asimismo, es necesario dimensionar el resto de los equipos que debe tener la Microrred para su correcto funcionamiento, y establecer el costo total de su implementación. Entre los equipos a dimensionar, están los reguladores e inversores.

Al tratarse de una Microrred que maneja altas tensiones y corrientes en su diseño, es necesario considerar equipos que soporten eficientemente dicha cantidad de paneles y baterías, por lo tanto, para este dimensionamiento fueron consideradas tecnologías comercialmente reconocidas para este tipo de sistemas. Los proveedores *Fronius* y *Victron*, son proveedores muy reconocidos en el mercado por producir este tipo de tecnologías de alta capacidad, gran rendimiento y eficiencia.

Primero se calculó el número de arreglos solares en serie y en paralelo que soporte la corriente y voltaje de los equipos comerciales (regulador e inversor). Por lo anterior se definió un arreglo solar FV de 10 paneles en serie y 32 *strings* en paralelo (Figura 81), para un total de 128 *kWp* de potencia del sistema, una corriente de salida de 331.52 A (Eq 37) y un voltaje de 400V (Eq 38).

$$Eq\ 37$$

$$i_{SalFV} = 10.36\ A * 32 = 331.52\ A$$

$$Eq\ 38$$

$$V_{SalFV} = 40V * 10_{PanelSerie} = 400V$$

Figura 81. Arreglo Solar FV – Microrred

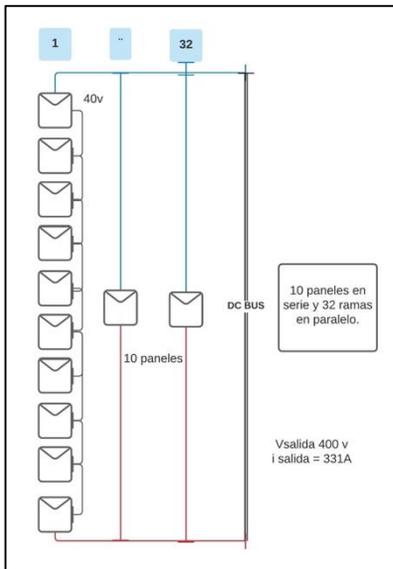
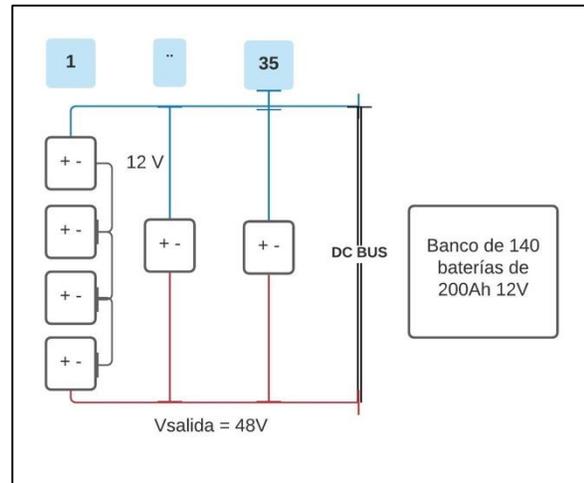


Figura 82. Arreglo de banco de baterías



Fuente: propia

Con la corriente y el voltaje de salida del sistema solar FV, se buscó un regulador comercial con dicha capacidad, encontrando uno de marca *Victron* de 450W a 200A para potencias FV de hasta 7200Wp por seguidor, con 4 seguidores. Por lo que se necesitarían 5 unidades en la microrred. Dichos reguladores tienen un costo de EU1600 más impuestos, cada uno.

Eq 39

$$N^{\circ} \text{ Reguladores} = \frac{128000Wp}{28800W / \text{regulador}} = 5 \text{ reguladores}$$

Eq 40

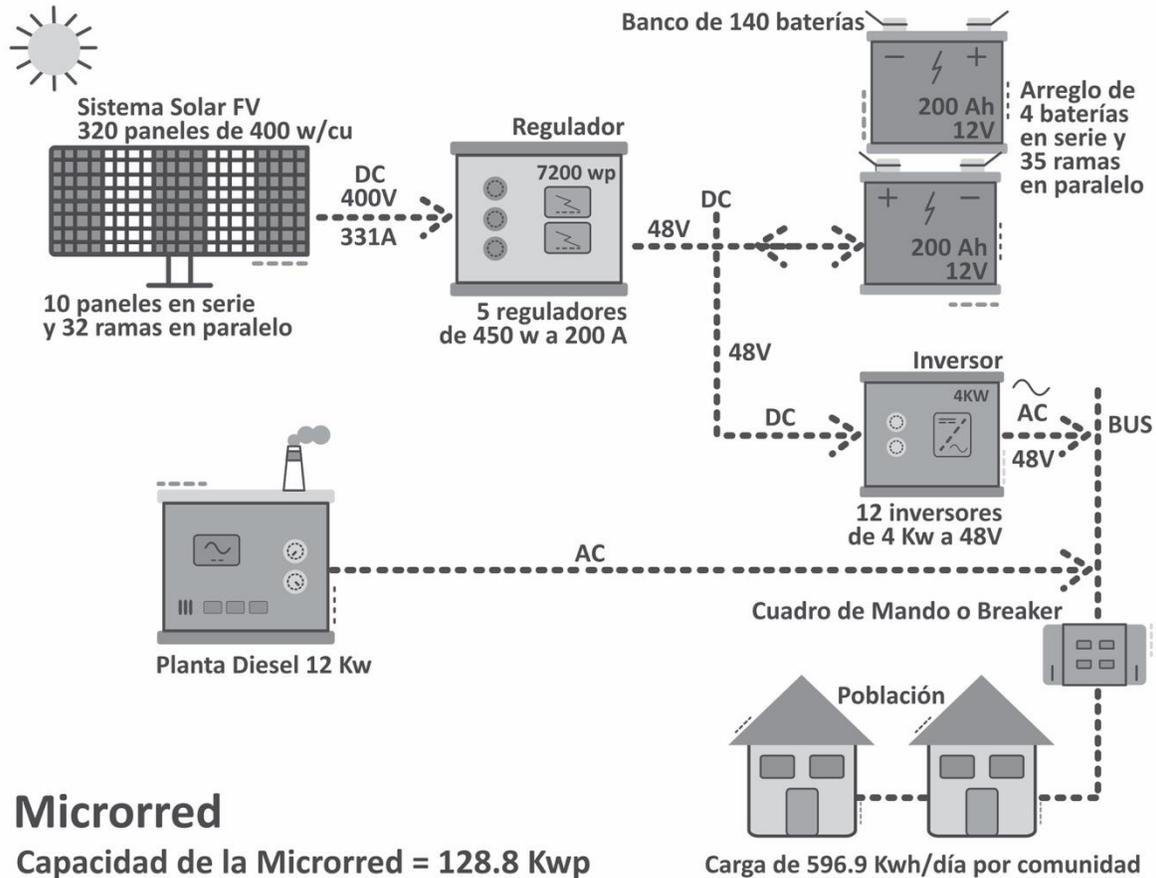
$$V_{\text{SalFV}} = 40V * 10_{\text{PanelSerie}} = 400V$$

El regulador entrega 48V al sistema que se encontraría conectado a un banco de baterías y a los inversores del sistema; por lo tanto, para que el sistema de almacenamiento entregue 48V, se configuró un arreglo de 4 baterías de 12V en serie, con 35 ramas en paralelo (Figura 81), para obtener el voltaje deseado con las 140 baterías necesarias en la microrred.

Para calcular el número de inversores se aplicó la ecuación Eq 39, para una potencia instalada AC de 37.8kW en la población, por lo que se concluye que la potencia del inversor debe ser superior a 45.36 kW. Con esta información se realizó la búsqueda de inversores comerciales que soporten dicha potencia y se encontró un inversor marca *Must* de referencia híbrido de 4 kW a 48V Lmpk 120V Mppt 80 a 4000W con un costo aproximado de COP 3,863,000/cu, por lo que se necesitarían 12 inversores en la microrred.

De esta manera se obtiene la configuración o topología para la microrred tal como se observa en la Figura 83.

Figura 83. Topología Microrred – La Plata



Fuente: propia

5.2.6 Monitoreo y control del sistema

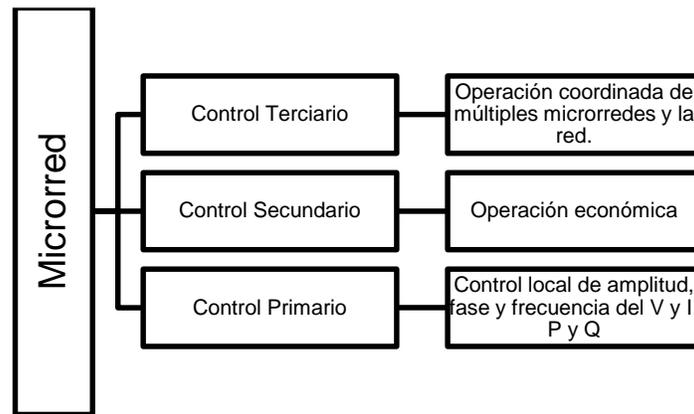
Gracias al auge que han tenido las microrredes como nueva forma de integrar las energías renovables a la matriz energética [124], se ha visto la necesidad de establecer un control más riguroso pues estos sistemas tienen muchas fluctuaciones debido a los múltiples generadores de energía que la conforman.

El sistema de control de una microrred es el encargado de regular la frecuencia y las tensiones en los nodos de la red (amplitud, fase y frecuencia), el corte o desplazamiento de cargas cuando una de las fuentes no la puede abastecer, el despacho económico, la interacción con el sistema de potencia y la toma de decisiones cuando el sistema está operando interconectado

o aislado. El sistema de control es un software que se encarga de la toma de decisiones y tiene integrado elementos de medición y comunicación [125].

Gracias a las múltiples funciones del control de una microrred se ha establecido una estructura jerárquica para este propósito, el control primario, el control secundario y el control terciario. Es importante resaltar que el nivel jerárquico más alto para una microrred aislada es el control secundario [124], mientras que las microrredes distribuidas deben tener contemplado en su diseño toda la estructura jerárquica.

Figura 84. Estructura jerárquica de monitoreo y control de una Microrred



Adaptado de: [124] y [126]

En este proyecto de investigación, el monitoreo y control de la Microrred aislada para la comunidad de La Plata es considerado en el diseño, en especial aquel que se deriva del despacho o la operación económica que fue modelada en la sección de resultados 5.2.4 modelo de optimización estocástico. Este despacho óptimo de la generación se realizó a través de un modelo de optimización estocástico para cada hora de un año. No fue considerado en este algoritmo el flujo de potencia óptimo, debido a los alcances y objetivos del proyecto.

El control primario es considerado a partir de la inclusión en el diseño de inversores trifásicos que controlan, a nivel operativo, los niveles de voltaje y corriente a través de todos los nodos, con un *slack* en la fuente Diésel. Las microrredes aisladas son débiles porque no hay máquinas rotativas que den tiempo suficiente para solucionar los problemas (a través de la inercia) de desfase a nivel primario, por lo tanto, para robustecer un sistema no rotativo, se deben considerar inversores trifásicos. La microrred para La Plata cuenta con 12 inversores trifásicos DC/AC de 4 kW a 48V, los cuales están diseñados para realizar el control primario en este tipo de redes eléctricas. Adicional a ello, se consideró una frecuencia de salida de 60Hz para garantizar que la población pueda usar sin ningún problema sus electrodomésticos.

Adicional a esto la microrred fue diseñada para que a través de un sistema de comunicación (considerado en los costos) se obtenga una correcta inter-operatividad entre los diferentes componentes del sistema.

5.3 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA POBLACIÓN CASO DE ESTUDIO Y POSIBLE IMPACTO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN

El presente capítulo describe las características económico-productivas de la comunidad del archipiélago de La Plata a través del cálculo de indicadores productivos y económicos que fueron elaborados a partir de la tabulación de la información recolectada en la comunidad. El objetivo es definir el posible impacto en el comportamiento económico de la población, al poseer y utilizar un sistema de generación de energía (diseñado en esta investigación) que aumente el porcentaje de cobertura actual el cual tiene un promedio de 4 horas diarias.

Gracias a las dificultades socio-económicas de este tipo de comunidades con bajos ingresos, bajo logro educativo y precaria cobertura de servicios públicos vitales como la salud, fuente de agua mejorada y energía, la sostenibilidad de los proyectos se convierte en un factor fundamental para garantizar que éstos cuenten con análisis detallados que garanticen que la tecnología esté bien administrada y que los habitantes gocen de este tipo de servicios con mínimos inconvenientes, así como endosar la AOM del sistema para darle continuidad al servicio y cumplir con las expectativas de los usuarios.

La sostenibilidad de los proyectos de electrificación rural se ha convertido en el eje central de las preocupaciones del diseño novedoso de sistemas de generación como las microrredes, tecnologías idóneas para garantizar el suministro de energía a poblaciones rurales dispersas y con nulas posibilidades de interconexión al sistema nacional.

El desarrollo de este capítulo permite dar cumplimiento al objetivo específico número dos (2) del proyecto de investigación en el cual se buscó, “determinar el impacto económico del sistema de generación de microrredes para la ZNI del caso de estudio.”

Este capítulo se organiza en 2 secciones: primero se encuentra la descripción y el cálculo de los indicadores socio-económicos con el índice de pobreza multidimensional y el índice de pobreza monetaria. Posterior a ello se desarrollan los indicadores productivos de la comunidad de La Plata.

5.3.1 Indicadores socio-económicos

Los indicadores socio – económicos calculados se dividen en dos, índice de pobreza multidimensional con 15 indicadores independientes y, el índice de pobreza monetaria.

5.3.1.1 Indicadores de pobreza - índice de pobreza multidimensional (IPM)

Se utilizó la metodología del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) como guía para el cálculo del dicho indicador en la población de La Plata [59]. Dicho instituto calcula el IPM basado en el método de *Alkire-Foster*.

Las dimensiones de educación, condiciones de la niñez y la juventud, trabajo, salud, servicios públicos y vivienda, se calcularon a partir de la información recolectada en la comunidad, la cual se encuentra definida en la Tabla 34. Los hogares son considerados pobres multidimensionalmente cuando tienen privación en por lo menos el 33% de los indicadores definidos.

La fuente de información para el cálculo de IPM para la población de La Plata, fueron 40 encuestas aplicadas a los habitantes en el año 2018 y 2020 (elaboración y aplicación propia), puesto que no se encontró información del DANE específica para esta comunidad, a excepción del indicador de las NBI (Necesidades Básicas Insatisfechas) para el Municipio de Buenaventura y su zona rural, calculada a partir del censo 2005, con un porcentaje de 47.32% (NBI para la zona rural) [62].

Tabla 34. Dimensiones e indicadores del índice de pobreza multidimensional - La Plata

Dimensión y ponderación	Indicador y ponderación	Descripción	Puntos de corte para la privación	Fuente de los resultados	Resultado
1. Condiciones educativas del hogar (0.2)	1.1 Bajo logro educativo (0.1)	Escolaridad promedio de las personas de 15 años y más del hogar	Menor a 9 años	Resultados encuesta aplicada. Pregunta n°5 ¿Cuál es su nivel de escolaridad?	El 50% de la población está privada
	1.2 Analfabetismo (0.1)	Porcentaje de personas del hogar de 15 años y más que no saben leer y escribir	Mayor 0 (al menos una persona no sabe leer y escribir)	Resultados Censo 2018 DANE – IPM Buenaventura centros poblados y rural disperso.	26.5%
2. Condiciones de la niñez y la juventud (0.2)	2.1 Inasistencia escolar (0.05)	Proporción de niños, niñas y adolescentes (NNA) entre 6 y 16 años en el hogar que no asisten al colegio	Mayor a 0 (al menos un NNA no asiste al colegio)	Resultados Censo 2018 DANE – IPM Buenaventura centros poblados y rural disperso.	7.8%
	2.2 Rezago escolar (0.05)	Proporción de NNA (7-17 años) dentro del hogar con rezago escolar (según la norma nacional)	Mayor a 0 (al menos un NNA tiene rezago escolar)	Resultados Censo 2018 DANE – IPM Buenaventura centros poblados y rural disperso.	32.5%
	2.3 Barreras a servicios para cuidado de la primera infancia (0.05)	Proporción de niños de cero a cinco años en el hogar sin acceso a servicios de salud o que pasa la mayor parte del tiempo con su padre o madre en el trabajo, en casa solo, o está al cuidado de un pariente menor de 18 años	Mayor a 0 (al menos un niño(a) tiene barreras de acceso a salud o cuidado)	Resultados Censo 2018 DANE – IPM Buenaventura centros poblados y rural disperso.	10.5%
	2.4 Trabajo infantil (0.05)	Proporción de niños, niñas y adolescentes entre 12 y 17 años en el hogar que se encuentran ocupados	Mayor a 0 (al menos un NNA se	Resultados Censo 2018 DANE – IPM Buenaventura	3.7%

			encuentra ocupado)	centros poblados y rural disperso.	
3. Trabajo (0.2)	3.1 Tasa de dependencia económica (0.1)	Número de personas por miembro ocupado en el hogar	Mayor o igual a 3	Resultados Censo 2018 DANE – IPM Buenaventura centros poblados y rural disperso.	13.40%
	3.2 Trabajo informal (0.1)	Proporción de la Población Económicamente Activa (PEA) del hogar que son ocupados y no cotizan a fondo pensiones. Para la construcción del indicador se utilizó información del registro de la PILA teniendo en cuenta que el CNPV 2018 no contó con información de afiliación en pensiones	Mayor a 0 (al menos una persona ocupada que no está afiliada a pensión)	Resultados encuesta aplicada. Pregunta n°35 ¿Cuáles son las actividades productivas de su hogar, de las cuales obtiene un ingreso? Y Resultados Censo 2018 DANE – IPM Buenaventura centros poblados y rural disperso.	94.2%
4. Salud (0.2)	4.1 Sin aseguramiento en salud (0.1)	Proporción de miembros del hogar mayores de cinco años sin aseguramiento a Seguridad Social en Salud. Para el cálculo de este indicador se tomó la información de registros administrativos del BDUA-BDEX3teniendo en cuenta que el CNPV 2018 no incluyó dicha información. El indicador genera privación para los estados de afiliación: desafiliado, retirado e interrumpido por viaje al exterior. Para las personas que no fue posible extraer la información del estado de afiliación desde la BDUA y BDEX no se genera privación con excepción de aquellos que cuentan con documento de identificación consistente registrado en el CNPV 2018.	Mayor a 0 (al menos una persona que no está asegurada en el SSS)	Resultados encuesta aplicada. Pregunta n°14. ¿Existe una institución de salud que atienda ocasionalmente La Plata?	100%
				Resultados Censo 2018 DANE – IPM Buenaventura centros poblados y rural disperso.	27.7%
	4.2 Barreras de acceso a servicios de salud (0.1)	Proporción de personas del hogar que no acceden a servicio institucional de salud ante una enfermedad que no requiere hospitalización en los últimos 30 días	Mayor a 0 (al menos una persona que tuvo un problema de salud que no requiere hospitalización en los últimos 30 días y no recurrió a	Resultados encuesta aplicada. Pregunta n°14. ¿Existe una institución de salud que atienda ocasionalmente La Plata?	6.9%
				Resultados Censo 2018 DANE – IPM Buenaventura	100%

			servicio institucional)	centros poblados y rural disperso.	
5. Vivienda y Servicios públicos (0.2)	5.1 Sin acceso a fuente de agua mejorada (0.04)	Hogar urbano: se considera como privado si no tiene servicio público de acueducto en la vivienda Hogar rural: se considera privado cuando obtiene el agua para preparar los alimentos de pozo sin bomba, agua lluvia, rio, manantial, carro tanque, aguatero, agua embotellada o en bolsa		Resultados encuesta aplicada. Pregunta n°12. ¿De dónde obtiene principalmente este hogar el agua para beber o preparar alimentos?	100%
	5.2 Inadecuada eliminación de excretas (0.04)	Hogar urbano: se considera como privado si no tiene servicio público de alcantarillado Hogar rural: se considera como privado si tiene inodoro sin conexión, letrina, bajamar o no tiene servicio sanitario		Resultados encuesta aplicada. Pregunta n°11. Como es el servicio sanitario	8.3%
	5.3 Material inadecuado de pisos (0.04)	Se consideran en privación los hogares que tienen pisos en tierra		Resultados encuesta aplicada. Pregunta n°8. ¿Cuál es el material predominante de los pisos?	0%
	5.4 Paredes exteriores inadecuadas (0.04)	Hogar urbano: se considera privado si el material de las paredes exteriores es madera burda, tabla, tablón, guadua, otro vegetal, zinc, tela, cartón, deshechos o sin paredes Hogar rural: se considera privado si el material de las paredes exteriores es guadua, caña, otro vegetal, zinc, tela, cartón, deshechos o sin paredes		Resultados encuesta aplicada. Pregunta n° 7. ¿Cuál es el material predominante de las paredes exteriores?	0%
	5.5 Hacinamiento crítico (0.04)	Número de personas por cuarto para dormir excluyendo cocina, baño y garaje e incluyendo sala y comedor	Urbano: 3 o más personas por cuarto Rural: Más de 3 personas por cuarto	Resultados encuesta aplicada. Pregunta n°2. Número de habitantes en el hogar, 6. ¿Cuántas familias viven en su casa?, 36 ¿Qué otros usos tienen su vivienda?	8.9%

Fuente: elaboración propia a partir de [60] [127]

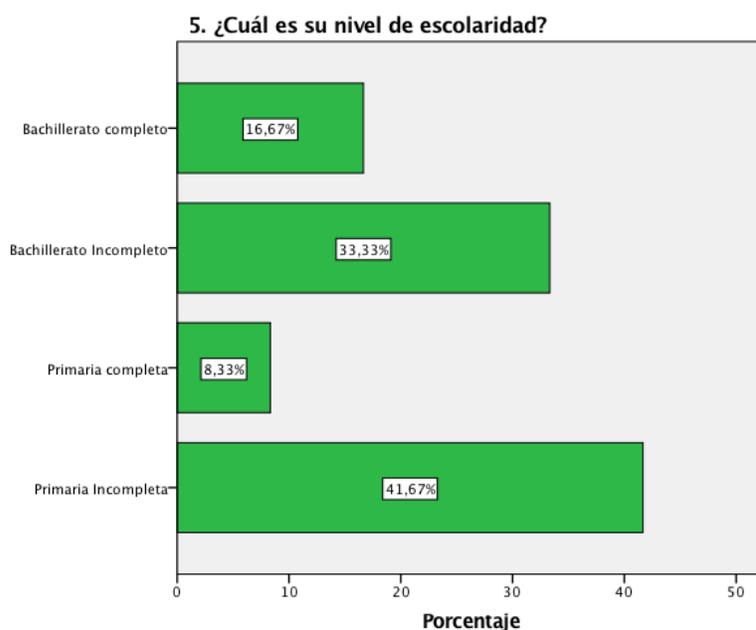
Los indicadores sobre trabajo infantil, analfabetismo, rezago escolar, inasistencia escolar, barreras a servicios para cuidado de la primera infancia, desempleo de larga duración, no fue posible calcularlos debido a que no se contó con información de la comunidad, por tal razón fueron tomados del reporte del DANE censo 2018, para el municipio de Buenaventura centros poblados y área rural dispersa. El resto de los indicadores que superan el 33% sí fueron calculados. A continuación, se compartirán los resultados asociados a cada indicador.

Indicador 1.1. Bajo logro educativo

El logro educativo mide el nivel de escolaridad alcanzada por una persona de 15 años o más. La privación del logro educativo considera a una persona si pertenece a un hogar donde la educación promedio de las personas que lo habitan es menor a 9 años de educación formal, que por lo general corresponde a 9° de bachillerato.

Para dar respuesta a este indicador, se formuló una pregunta con única respuesta a los habitantes de la comunidad caso de estudio. Los resultados se encuentran en la Figura 85.

Figura 85. Pregunta n°5 del instrumento aplicado. ¿Cuál es su nivel de escolaridad?



Elaboración propia

A partir de los resultados se puede inferir que la población de La Plata tiene un bajo logro educativo, puesto que el 41,67% de los habitantes ha alcanzado un nivel de escolaridad de básica primaria incompleta. Debido a la baja cobertura de los servicios educativos, los habitantes de La Plata alcanzan un nivel máximo educativo de bachiller completo con un 16,67%. Uno de cada 2 habitantes logra un nivel máximo de primaria completa con máximo 6 años de educación.

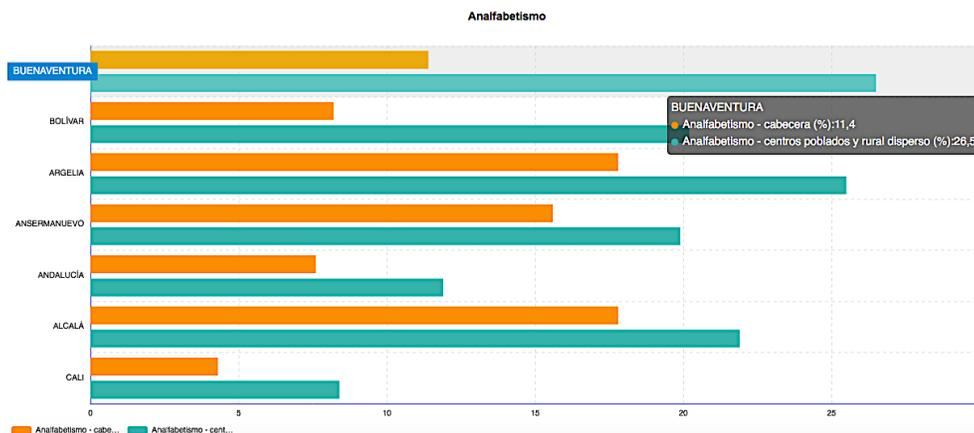
Indicador 1.2. Analfabetismo

El analfabetismo considera las personas mayores de 15 que no saben leer ni escribir. Si en un hogar al menos uno de sus miembros mayor de 15 años no sabe leer ni escribir, se puede asumir ese hogar como privado en este indicador.

Este indicador fue calculado a partir de los resultados del censo 2018 para el municipio de Buenaventura, en donde el 26,5% de la población en centros poblados y rural disperso no

sabe leer ni escribir. Es decir que, suponiendo que ese es el comportamiento de La Plata, 3 de cada 4 mayores de 15 años sí saben leer y escribir.

Figura 86. Indicador de analfabetismo Buenaventura y otros municipios

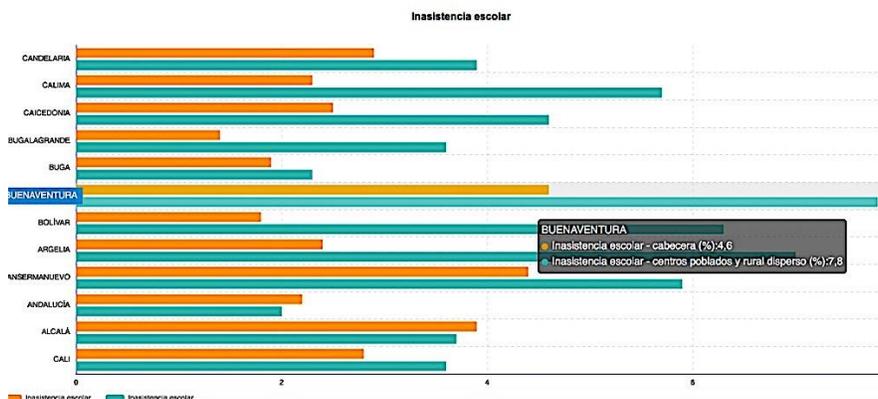


Fuente: DANE Censo 2018

Indicador 2.1. Inasistencia escolar

Se consideran privados aquellos hogares en los que al menos un niño, niña o adolescente (NNA) en edad escolar (6-16 años) no asiste a un centro educativo. En el caso de Buenaventura, particularmente sus centros poblados y rural disperso, el 7.8% de los niños y jóvenes no asisten a la escuela. Esto quiere decir que, de 100 niños y jóvenes posiblemente matriculados en el sistema educativo, al menos hay 8 que se encuentran sin asistir a la educación formal. Este indicador es problemático, a partir de la Figura 87 se deduce que Buenaventura es el municipio del Valle del Cauca donde se presenta con mayor fuerza esta problemática, seguido de los municipios de Argelia, Bolívar y Anserma nuevo.

Figura 87. Indicador de inasistencia escolar Buenaventura y otros municipios



Fuente: DANE Censo 2018

Indicador 2.2. Rezago escolar

Se considera que un hogar tiene privación en la variable si alguno de los niños entre 7 y 17 años tiene rezago escolar. Rezago escolar se define como la diferencia entre el número de años normativos y los aprobados por un niño entre las edades mencionadas, definido por el Ministerio de Educación Nacional.

El rezago escolar se entiende como la diferencia existente entre el número de años aprobados esperados según la edad del estudiante sobre el número de años efectivamente aprobados. Este indicador cercano a la tasa de cobertura neta, permite identificar cuáles estudiantes de los efectivamente matriculados en el sistema escolar son asumidos como extra edad. Es decir, aquellos estudiantes que tiene una edad superior a la esperada para ser matriculado en el grado correspondiente.

En el caso particular de Buenaventura, el rezago en centros poblados y rural disperso es del 32.5%, esto quiere decir que al menos 1 de cada 3 estudiantes se encuentran matriculados en un grado inferior al esperado según la edad teórica prevista en educación básica y media. Este condición podría suponer, por tanto, mayor probabilidad de sufrir algún tipo de deserción escolar en el ciclo educativo normal, en tanto la expectativa de producción del estudiante podría verse acelerada por la dificultad de avanzar en su proceso educativo como es lo esperado [128].

Indicador 2.3. Barreras a servicios para cuidado de la primera infancia

Un hogar tiene privación en este indicador cuando al menos uno de los niños de 0 a 5 años en el hogar no tiene acceso simultáneo a los servicios para el cuidado integral de la primera infancia, tales como, estar asegurados a una entidad de seguridad social de salud, asistir la mayor parte del tiempo a una guardería o preescolar o estar bajo el cuidado de un adulto responsable, y recibir almuerzo en el establecimiento que permanece mayor tiempo. En la zona de estudio el porcentaje de hogares con barreras para acceder a los servicios de cuidado de la primera infancia es del 10.5, siendo uno de los mayores comparado con otros municipios del valle del cauca.

Es de resaltar que en La Plata no existe una institución de salud que atienda ocasionalmente a los habitantes. La comunidad manifestó que, al presentarse una emergencia, el paciente era llevado a la estación Naval Málaga donde podían encontrar asistencia médica, y cuando alguna persona requería un tratamiento médico, se conseguían algunos servicios gratuitos con especialistas de la cabecera municipal. Sin embargo, en términos educativos, en La Plata existen dos instituciones que atienden las necesidades de los niños de la comunidad: un jardín y la Institución Educativa Rosa Zarate de Peña (sede de primaria), por lo que los niños entre 0 y 11 años pueden acceder a estos servicios en la misma zona.

Indicador 2.4. Trabajo infantil

Se considera trabajo infantil entre los 5 y 17 años realizan oficios del hogar por más de 15 horas a la semana. En Buenaventura, centros poblados y rural disperso el 3.7% de los hogares con niños entre 5 y 17 años cuentan con trabajo infantil.

Indicador 3.1. Tasa de dependencia económica

La tasa de dependencia económica mide el número de personas a cargo por miembro de la familia ocupado, es decir que se considera privado a un hogar en donde el aportante económicamente tenga a su cargo más de 3 personas en su hogar. A partir de los resultados del Censo del DANE 2018, la tasa de dependencia económica para Buenaventura centros poblados rural disperso es del 13.40%.

Indicador 3.2. Trabajo Informal

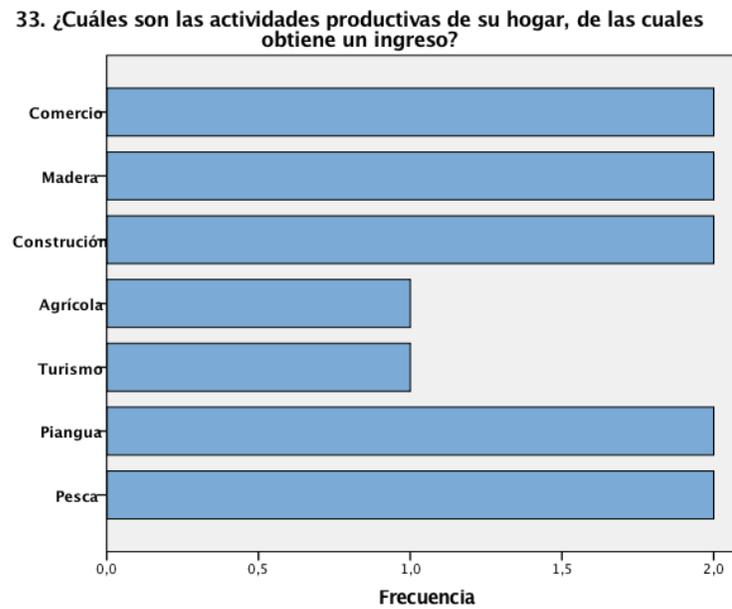
La privación por trabajo o empleo informal mide la proporción de la población activa económicamente en el hogar que son ocupados, pero que no cotizan al fondo de pensiones. Un hogar se encuentra privado en este indicador, cuando al menos una persona ocupada no está afiliada al fondo de pensiones.

Todas las actividades productivas de los habitantes de La Plata son de tipo informal. Cada familia trabaja para sí misma, sin cotizar a pensión como persona independiente, ya que los ingresos por familia están en mayor proporción entre los \$400,001 y \$700,000 pesos mensuales (Figura 89).

Las principales actividades productivas son, la pesca y piangua (33.34%), construcción de viviendas y lanchas, elaboración de productos de madera, comercio en tiendas y ventas de productos de primera necesidad, agrícola y turismo en menor proporción. También se encontraron ocupaciones como elaboración de artesanías, en un habitante de La Plata, sin ser su actividad principal.

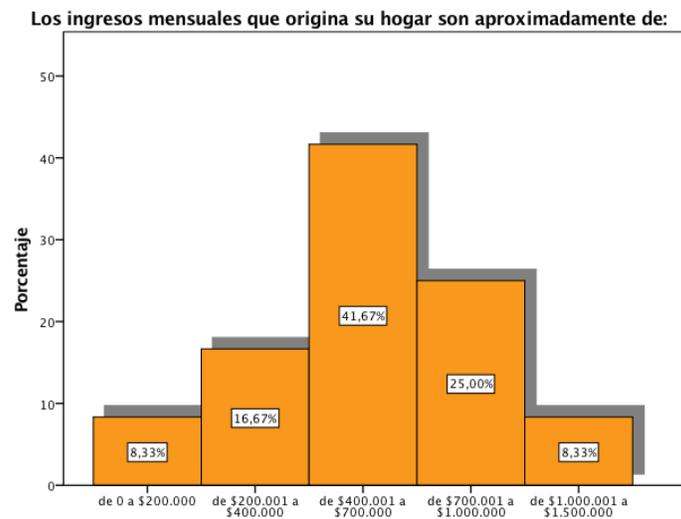
Es importante resaltar que los habitantes tienen más de una actividad productiva por hogar, dedicando parte del tiempo a pesca, ecoturismo, y otra parte a actividades comerciales, tales como la venta de productos básicos de la canasta familiar, en sus viviendas. Como resultado se obtuvo que el 41% de los habitantes utilizan su vivienda para alguna actividad comercial.

Figura 88. Pregunta n°33 del instrumento aplicado. ¿Cuáles son las actividades productivas de su hogar, de las cuales obtiene un ingreso?



Elaboración propia

Figura 89. Pregunta n°35 del instrumento aplicado. ¿ Los ingresos mensuales que origina su hogar son aproximadamente?



Elaboración propia

Figura 90. Pregunta n°36 del instrumento aplicado. ¿Qué otros usos tienen su vivienda?



Elaboración propia

Indicador 4.1. Sin aseguramiento en salud

Son privados aquellos hogares en los que al menos una persona no se encuentre afiliada al Sistema de Seguridad Social en Salud

Como se mencionó anteriormente, La Plata está privada en este servicio vital puesto que no cuentan con afiliación, así como tampoco pueden acceder a un centro de salud cercano que preste servicios ocasionales a los habitantes. Sin embargo, los resultados del censo 2018 y el cálculo del indicador del DANE, indica que el 27.7% de los hogares de los centros poblados y rural disperso de Buenaventura están sin aseguramiento en salud, y los demás se encuentran en régimen subsidiado Sisbén.

Indicador 4.2. Barreras de acceso a servicios de salud

Este indicador es la proporción de personas del hogar que, dada una necesidad, no accedieron a servicio institucional de salud.

A partir del indicador calculado por el DANE, la proporción de hogares con privación en este indicador es del 6.9% (centros poblados y rural disperso CPRD), sin embargo, a partir de la recolección de información en La Plata, no se prestan ni se frecuentan este tipo de servicios.

Indicador 5.1. Sin acceso a fuente de agua mejorada

Se consideran privados los hogares de la zona rural que obtienen el agua para cocinar de pozo sin bomba, agua lluvia, río, manantial, pila pública, carro tanque, aguatero u otra fuente. Los

habitantes de La Plata se encuentran privados de este servicio ya que 100% de la población obtiene el líquido vital para cocinar, del agua lluvia.

Indicador 5.2. Inadecuada eliminación de excretas

En el área rural se encuentran en privación los hogares que tienen inodoro sin conexión, letrina o bajamar, o simplemente no cuentan con servicio sanitario.

En La Plata el 8.3% de los hogares tienen inadecuada eliminación de excretas.

Pregunta n°11. Como es el servicio sanitario

	Porcentaje
Inodoro conectado a pozo séptico	91,7
Inodoro sin conexión, bajamar	8,3
Total	100,0

Fuente: propia

Indicador 5.3. Material inadecuado de pisos

Se consideran como privados los hogares que tienen pisos en tierra. Los materiales de los pisos de La Plata son en un 100% en madera, tabla o tablón, el cual es conseguido fácilmente en el ecosistema de la zona, por lo tanto, no se consideran privados.

Indicador 5.4. Material inadecuado de paredes exteriores

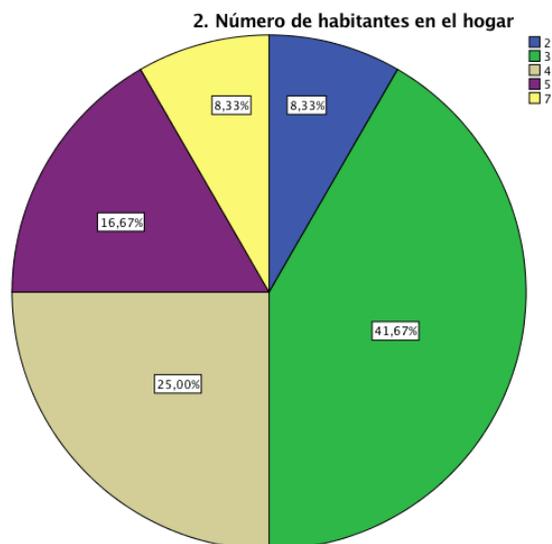
Un material inadecuado para las paredes exteriores en zona rural es considerado si se encuentra en algunos de los siguientes materiales: guadua u otro vegetal, zinc, tela, cartón, deshechos o no tiene paredes. El 100% de las viviendas de la comunidad están fabricadas con paredes en madera, tabla y tablón. A pesar de que en la zona urbana este material es inadecuado para el albergue de personas, en la zona rural no se considera de esta manera.

Indicador 5.5. Hacinamiento crítico

Se considera un hogar con hacinamiento crítico, cuando hay más de 3 personas por habitación. Los resultados de las encuestas arrojaron que en La Plata hay entre 3 y 4 personas por vivienda, con mayor proporción de hogares con 3 personas (41.7%), sin embargo, se encontraron viviendas con más de un hogar y de hasta 7 personas por vivienda (8.3%).

Con los datos encontrados no se puede establecer si hay hacinamiento crítico en la población caso de estudio, sin embargo, los resultados del cálculo del indicador a partir de los resultados del censo 2018, en los centros poblados y rural disperso del municipio de Buenaventura hay un hacinamiento crítico del 8.9%.

Figura 91. Pregunta n°2 del instrumento aplicado. ¿Número de habitantes en el hogar?



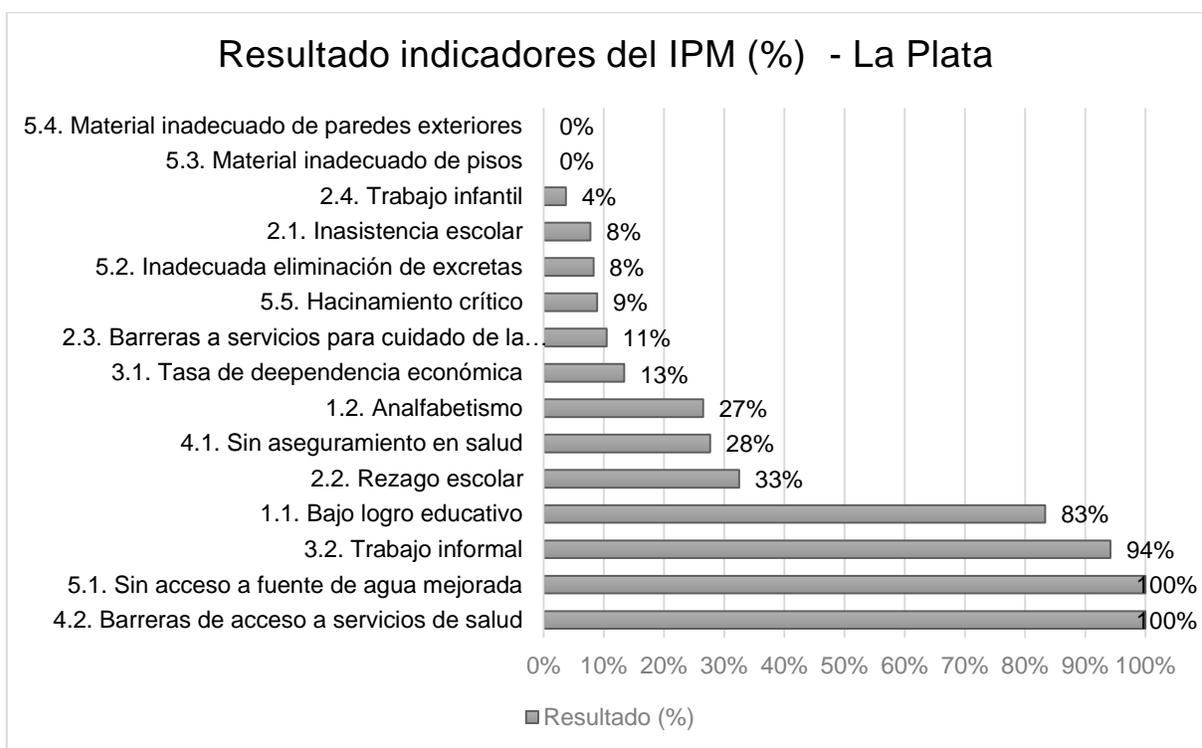
Elaboración propia

Es importante mencionar que, aunque no están considerados en el cálculo del IPM de la metodología adoptada por el DANE, en la comunidad de la Plata no existen servicios públicos de alcantarillado, acueducto, ni telefonía fija e internet, así como tampoco cuenta con servicio de gas natural domiciliario, ni servicio de energía eléctrica.

Una vez calculados cada uno de los 15 indicadores que componen el IPM, se realiza una ponderación anidada, en donde cada dimensión tiene el mismo peso (0.2), así como cada indicador al interior de la dimensión. El punto de corte es definido en el indicador dependiendo de la característica analizada, por ejemplo, el bajo logro educativo tiene un límite de al menos 9 años de educación para no considerarse privado en este indicador. Y el segundo punto de corte k está definido con el número o porcentaje mínimo para considerar un hogar multidimensionalmente pobre, definido por el DANE como 5 indicadores de 15 (5/15) o cuando en este hogar hay privación en al menos 5 (33%) indicadores.

Al realizar el cálculo del H (tasa de incidencia de la pobreza multidimensional), considerando las ponderaciones establecidas en la metodología de cálculo del DANE, se obtiene como resultado que el 42.01% de los habitantes de La Plata son multidimensionalmente pobres, es decir, 4 de cada 10 habitantes de La Plata son multidimensionalmente pobres.

Figura 92. Porcentaje de hogares que enfrentan privación por indicador – La Plata - 2020



Fuente propia

De todas las variables analizadas en el IPM, se observan concentraciones en aquellos que tiene que ver con el trabajo formal, y el acceso a los servicios públicos vitales tales como, la salud y la fuente de agua mejorada (Figura 92). Lo anterior se debe a que los habitantes de la comunidad tienen actividades productivas independientes tales como la pesca y piangua, el turismo y la elaboración de productos derivados de la madera, siendo estas actividades de tipo informal y de limitadas utilidades.

Los habitantes de la comunidad no se encuentran afiliados a un sistema de pensiones, la mayoría se encuentran afiliados al Sisbén, y poseen grandes barreras para acceder a los servicios que ofrece este tipo de afiliación subsidiada, ya que no cuentan con un centro médico de atención cercano, siendo el más asequible en el municipio de Buenaventura a una hora de trayecto en lancha con un costo elevado, debido a que no es un medio de transporte convencional.

El bajo logro educativo también es un indicador llamativo con una privación del 83% en los hogares de la comunidad.

A diferencia de esto, se observan bajos porcentajes de hogares privados en materiales de pisos y paredes de la vivienda, trabajo infantil, inasistencia escolar e inadecuada eliminación de excretas.

5.3.1.2 Indicadores de pobreza – pobreza monetaria

La pobreza monetaria es un indicador que mide la capacidad de adquisición de bienes y servicios de una persona o un hogar [129]. En Colombia la pobreza monetaria sigue una metodología de cálculo actualizada a 2020, en donde un comité de expertos en pobreza del país calcula dicho índice a nivel nacional, departamental y municipal, tanto para el sector urbano como para el rural.

La pobreza monetaria se divide en dos categorías, pobreza monetaria y pobreza monetaria extrema. La primera de ellas, hace referencia a las personas que cuyos ingresos en el hogar no alcanzan para cubrir una canasta mínima de bienes y servicios, mientras que la pobreza monetaria extrema da cuenta de las personas a quienes no les alcanza sus ingresos ni para una canasta básica de alimentos [130].

En Colombia la línea de la pobreza monetaria para el año 2020 fue de \$331,688 (por persona) mientras que la línea de la pobreza extrema nacional fue de \$145,004. De otra parte, la línea de la pobreza para centros poblados y rural disperso (CPRD) tiene otro comportamiento, en donde una persona cuyos ingresos sean iguales o inferiores a \$199,828 es considerada en condición de pobreza monetaria e ingresos menores a \$112,394 en pobreza monetaria extrema.

Una vez analizada la información recolectada sobre los ingresos netos de los habitantes de La Plata, se puede concluir que el 80% de las personas (ingresos del hogar dividido número de habitantes del hogar) o el 75% de los hogares están en condición de pobreza monetaria, ya que sus ingresos mensuales se encuentran por debajo de la línea de la pobreza. En la Tabla 35 se da cuenta del promedio de los ingresos totales por vivienda y por habitante de la vivienda, así como la incidencia de la pobreza monetaria de la población.

Tabla 35. Resultados promedio de ingresos netos e incidencia de la pobreza monetaria de los habitantes de La Plata

Línea de la pobreza monetaria en Colombia 2020 CPRD	\$199,828
Promedio de ingresos totales por vivienda	\$ 675,000
Promedio de ingresos por habitante	\$ 167,500
Personas con incidencia de pobreza monetaria	80%
Hogares con incidencia de pobreza monetaria	75%

Fuente: elaboración propia

Si el ingreso por familia en La Plata, se encuentra en el rango \$400,001 - \$700,000 pesos mensuales y así mismo como 4 personas es el número promedio de habitantes por vivienda, esto quiere decir que 2 de cada 3 habitantes de la población de se encuentra por debajo de la *línea de pobreza monetaria*, en tanto el valor pactado por el DANE para el 2020 correspondía a un ingreso mensual mínimo esperado por núcleo familiar de aproximadamente \$ 800,000. 1 de cada 4 se encuentran por debajo de la *línea de pobreza extrema*. Sólo 1 de cada 3 se

encuentra por encima de la línea de pobreza monetaria, ubicándoles como población vulnerable según los estándares definidos por el Banco Mundial.

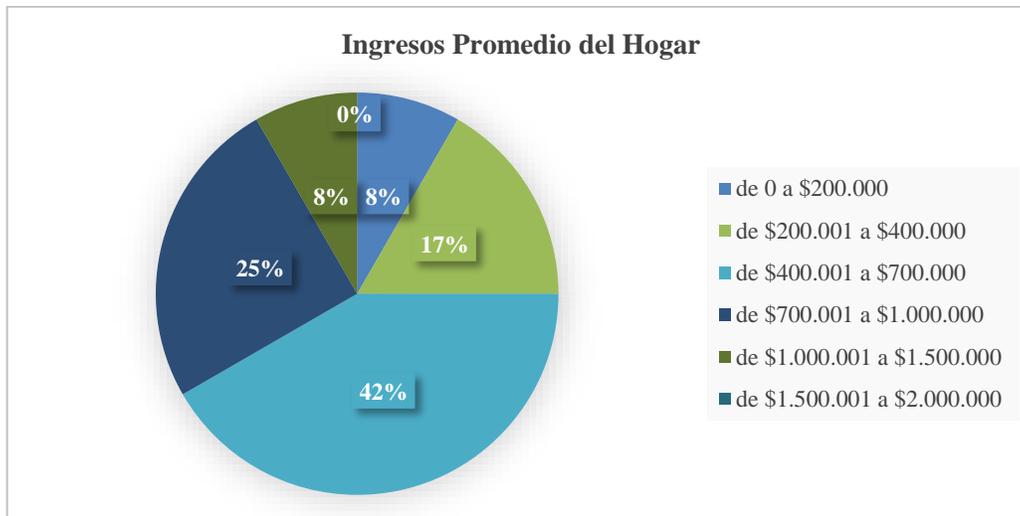
5.3.2 Indicadores productivos

En los indicadores productivos de esta sección se analizan los resultados obtenidos acerca del tipo de actividad productiva, ingresos promedio por actividad, tipo de gastos por familia, entre otros; para identificar el perfil económico y productivo de la comunidad en el marco del comportamiento energético (consumo de energía), así como la relación entre los ingresos promedio dedicados a cubrir el servicio de energía eléctrica.

Como actividad fundamental para diseñar un modelo de electrificación que se adapte a las condiciones sociales, económicas y productivas de la población, es indispensable conocer y cuantificar información técnica, económica y productiva como marco de un modelo exitoso centrado en el usuario o cliente.

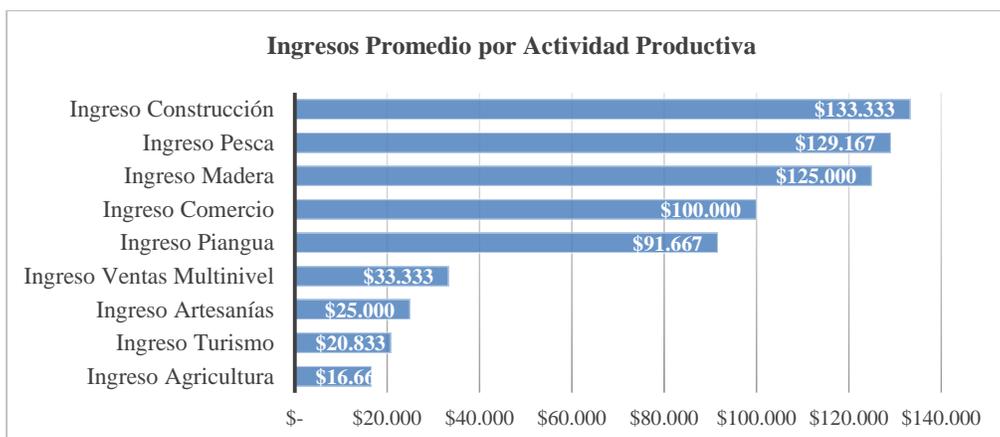
Una vez analizados los datos recolectados se pudo encontrar que los hogares de la comunidad reciben en mayor proporción (42%) un ingreso promedio entre \$400,001 a \$700,000 mensuales (Figura 93) donde las actividades productivas que más ingresos generan en el hogar son construcción, pesca, madera y comercio (Figura 94).

Figura 93. Ingresos promedio del hogar – La Plata



Fuente: elaboración propia

Figura 94. Ingresos promedio por actividad en el hogar – La Plata

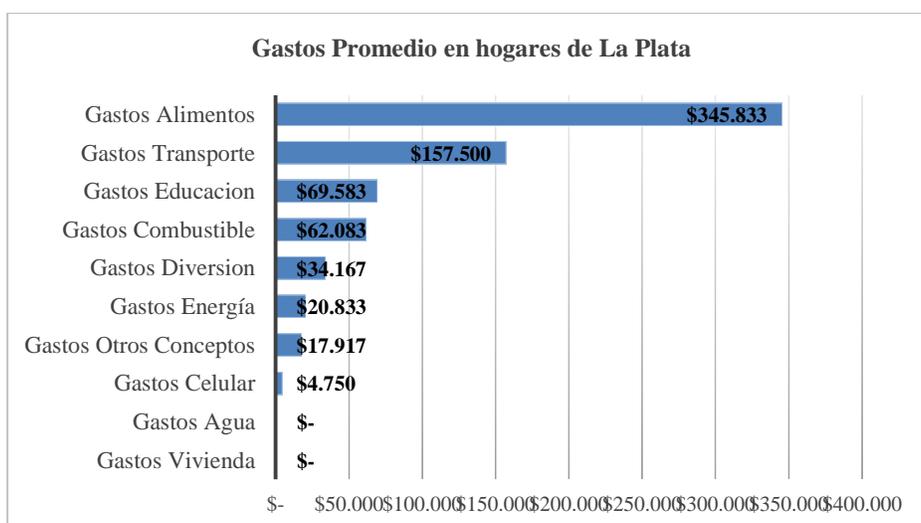


Fuente: elaboración propia a partir de las encuestas aplicadas

Los gastos promedio en un hogar de La Plata son de \$712,667 mensuales, los cuales están invertidos principalmente en alimentos, transporte, educación y combustible para cocinar. Es importante resaltar que estas personas deben hacer un gasto mensual de aproximadamente \$20,800 en combustible para alimentar la planta diésel que les brinda energía eléctrica y \$62,000 en combustible para cocinar (cilindros de gas).

Los habitantes no tienen que incurrir en costos de vivienda ya que son propias y fabricadas por ellos mismo, así como tampoco en servicios de agua mejorada ya que no poseen este servicio.

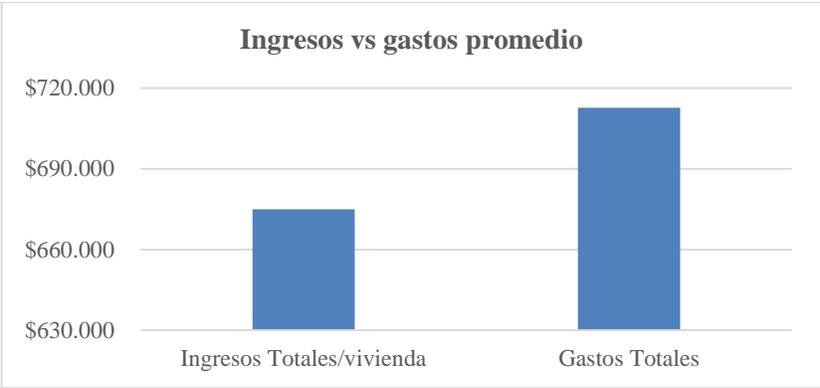
Figura 95. Gastos mensuales promedio en hogares de La Plata



Fuente: elaboración propia

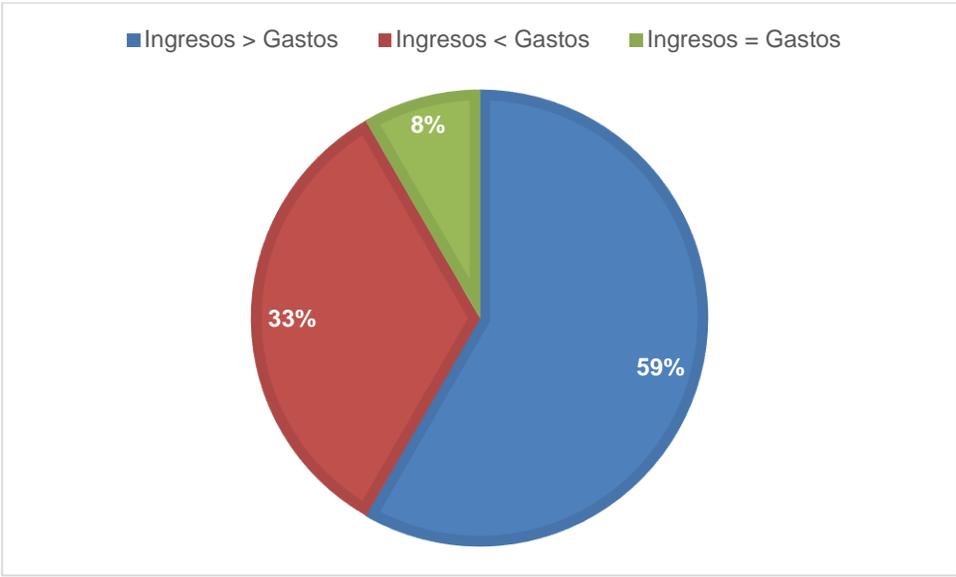
Es importante resaltar que en promedio los habitantes de la comunidad tienen mayores gastos que ingresos (Figura 96), sin embargo, en el 59% de los casos los habitantes tienen ahorro, en el 8% los egresos son iguales a sus ingresos y en el 33% sus gastos son mayores a sus ingresos (Figura 97 y Figura 98). El promedio del ahorro de los habitantes cuyos ingresos son mayores a sus gastos es de \$50,429.

Figura 96. Ingresos vs gastos promedio



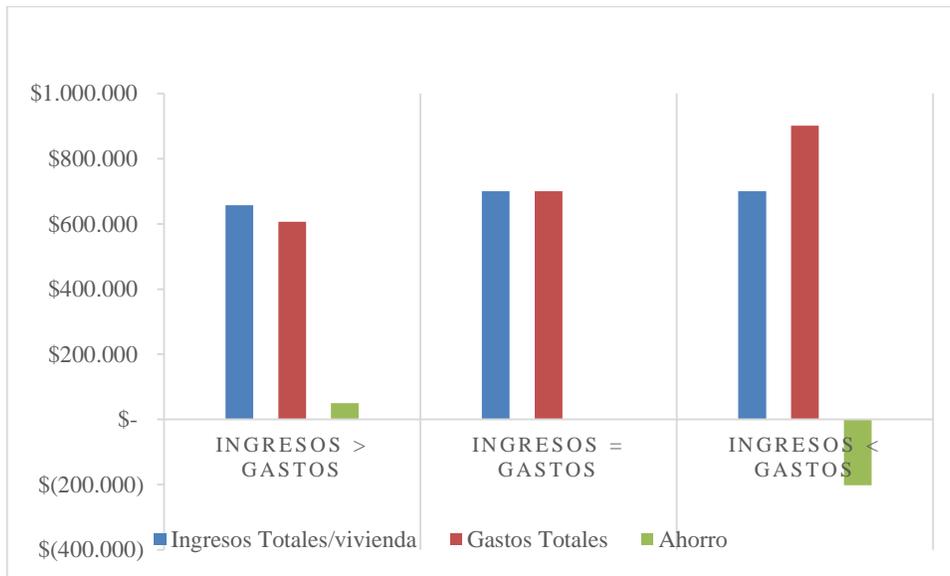
Fuente: elaboración propia

Figura 97. Porcentaje de hogares con ingresos > gastos, ingresos < gastos e ingresos = gastos



Fuente: elaboración propia

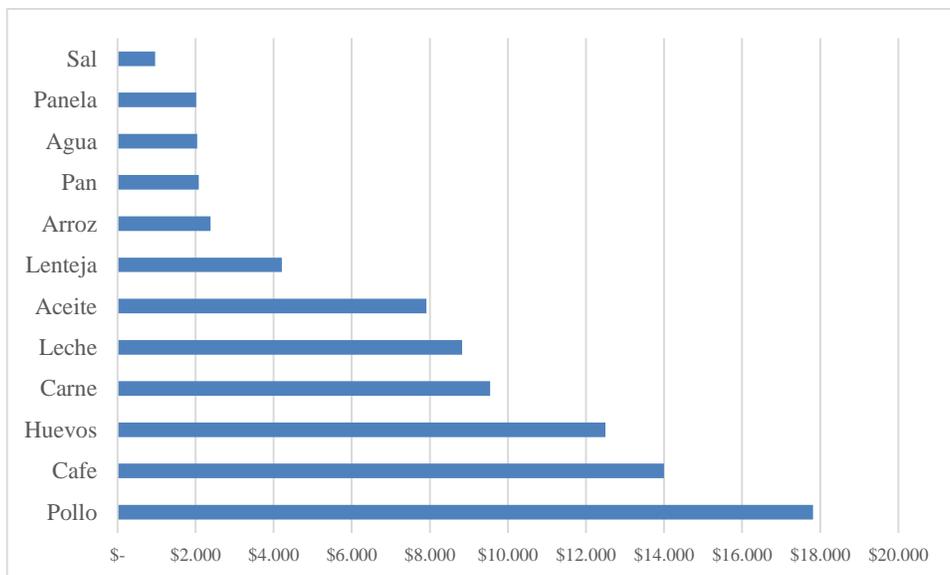
Figura 98. Niveles de ingresos vs gastos



Fuente: elaboración propia

Otro dato importante para resaltar de los resultados obtenidos con las encuestas corresponde al valor de la canasta básica familiar en la zona de estudio, la cual equivale en promedio a \$84,307 pesos, siendo las proteínas como el pollo, la carne, y los huevos, los productos más costosos en la zona.

Figura 99. Costo promedio de artículos de la canasta familiar en la región de La Plata



Fuente: elaboración propia

Los resultados de esta sección permiten concluir que los habitantes de La Plata se encuentran en una importante condición de vulnerabilidad debido a sus altos índices de pobreza multidimensional (42.01%) y pobreza monetaria (75%), la cual se debe a la privación de servicios esenciales como la salud, el agua, el trabajo, la educación, así como la baja productividad de sus actividades económicas. Esta condición limita el desarrollo económico y productivo, así como la calidad de vida de sus habitantes, la cual se ve reflejada en sus ingresos mensuales que se encuentran por debajo de 1SMMLV.

También es importante resaltar que a pesar de que en promedio el nivel de gastos de una familia sobrepasa sus ingresos mensuales, un 59% de la población puede a tener un ahorro promedio de \$50,429, lo cual sumado a los gastos en energía eléctrica (\$20,833) puede significar un presupuesto de \$71,262 pesos mensuales para realizar una inversión en un sistema de generación, que podría mejorar su calidad de vida y productividad laboral.

Para el resto de la comunidad (42%) la cual tiene una condición desfavorable, un presupuesto de \$20,000 mensuales que gasta actualmente en el sistema de generación actual, significaría un aporte a un nuevo sistema que garantice más horas de servicio y que pueda mejorar sus condiciones económicas.

5.4 MODELO FINANCIERO

El presente capítulo tiene el propósito de mostrar el desarrollo de un modelo financiero con actuación desde el inversionista que desembolsará los recursos a una comunidad, quienes van a pagar una tarifa para la AOM del sistema, así como el retorno de la inversión.

El desarrollo de este modelo se encuentra enmarcado en el objetivo específico número 3 de la tesis doctoral, el cual tiene como propósito “Desarrollar un modelo financiero sostenible y asequible para el usuario de microrredes dentro de la ZNI caso estudio.”

Después de darle solución a los criterios técnicos, económicos y ambientales del sistema en los capítulos anteriores, se desarrolló el modelo financiero con un esquema tarifario para la utilización de la energía bajo el menor costo unitario, que permita la administración operación y mantenimiento del activo de generación a partir de estrategias de agrupación comunitaria y de desarrollo productivo mediante el uso eficiente de la energía.

Las fases del modelo financiero se desarrollaron bajo uno de los principios rectores definidos por empresas del sector de la energía a nivel mundial, los cuales involucran diseñar esquemas de financiamiento y pago, que se ajusten a los presupuestos energéticos de los consumidores.

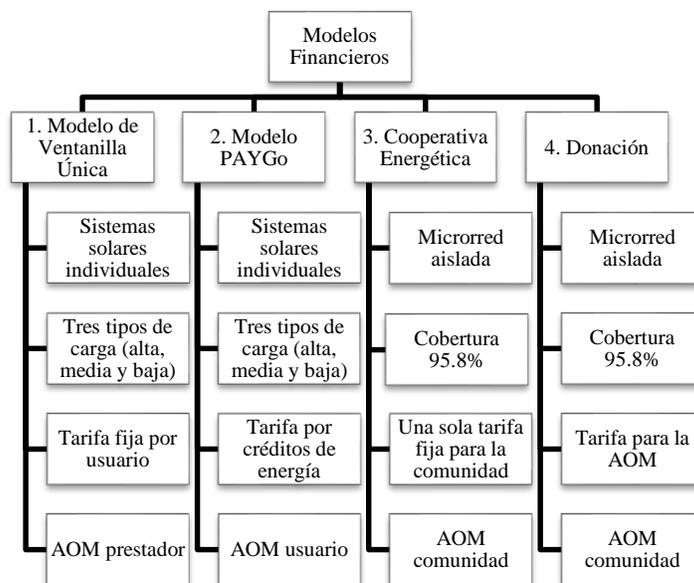
Los resultados se dividieron en dos subsecciones. En la primera se detallan cuatro modelos financieros para el pago del sistema y su mantenimiento, el esquema tarifario, el modelo para la AOM y la evaluación financiera para el inversionista. En la segunda subsección, se realiza un ejercicio de integración de todos los criterios necesarios para evaluar proyectos de generación de energía para zonas rurales aisladas o ZNI en Colombia, bajo un esquema auto sostenible, entendiendo la sostenibilidad desde los enfoques económicos (garantía de rentabilidad financiera), ambientales (mínimo impacto sobre el medio ambiente), sociales (inclusión de la población local, asistencia técnica, formación y capacitación), tecnológicos (diseños compatibles con el entorno social y económico).

Finalmente se recomienda cual es el modelo más apropiado para la comunidad desde la visión de los expertos y los investigadores.

5.4.1 Modelos financieros para mantenimiento y pago del sistema

Para desarrollar un modelo financiero con el cual una población de características similares a las del caso de estudio analizado, pueda acceder a un servicio completo de energía y aumentar su desarrollo económico y productivo, fue necesario generar cuatro casos de análisis en los que se mezclaron y adaptaron esquemas financieros nacionales e internacionales a las condiciones generales de la comunidad. En la Figura 100 se puede observar la generalidad de los cuatro casos de estudio.

Figura 100. Modelos financieros para inversión y AOM de sistema de generación en La Plata - Colombia



Elaboración propia

5.4.1.1 Modelo de ventanilla única (*One-Stop-Shop Model*)

El modelo de ventanilla única es un tipo de esquema financiero en donde el proveedor de energía y el financiador son la misma organización. Este modelo ha sido implementado por empresas como *Bright Green Energy Foundation* (BGEF) en *Bangladesh* con productos como sistemas solares individuales, bombas de riego solar, plantas de biogás y estufas solares. Esta organización brinda créditos para adquirir sistemas solares FV a sus clientes, con plazos de 3 años e intereses del 6%, adicional a ello el cliente debe pagar el 15% del valor del sistema como cuota inicial [12]. La compañía fue fundada en 2011 y desde entonces ha instalado más de 145 mil sistemas solares individuales en el área rural de *Bangladesh*.

Las ventajas de este modelo son que, el vendedor tiene control total sobre ambos aspectos del negocio y la desventaja es que debe adquirir experiencia suficiente en dos áreas muy importantes. El modelo involucra servicio post-venta en locales de servicio técnico solar para los clientes, que ha instalado en territorio *Bangladesh*. También capacita técnicamente a personas de la comunidad (especialmente a mujeres), para prestar los servicios en los quioscos de servicio al cliente promoviendo la generación de empleo.

Otra compañía muy reconocida a nivel internacional por la implementación de este modelo es *Grameen Shakti*, una empresa sin ánimo de lucro del *Grameen Bank*, entidad financiera creadora y líder de los modelos de microfinanzas o microcréditos para personas de bajos recursos. *Grameen Shakti* es considerada la empresa líder en el modelo de ventanilla única, siendo la empresa con la red más grande de oficinas en 64 distritos de *Bangladesh*. Esta

empresa ha brindado sus servicios a más del 70% de la población rural de este país con sistemas solares pequeños de entre 30 a 100W (Grameen Shakti, 2021).

Grameen Shakti recibe fondos de la Fundación Holandesa *Stichting Gilles* y del Banco Mundial a través de *Infrastructure Development Company Limited (IDCOL)* del Ministerio de Finanzas de Banglades, y ha recibido apoyo de la USAID. Cabe resaltar que las empresas generadoras de energía renovable en el área rural no gozan de ninguna exención fiscal.

El modelo de ventanilla única tiene dos maneras de darse a lugar en las organizaciones, una en donde una entidad financiera decide vender productos energéticos a través de programas financieros asequibles o, cuando la empresa de energía proporciona financiamiento al usuario final. Este modelo es reconocido a nivel mundial como uno de los más exitosos, generando gran impacto en la generación de energía para zonas rurales con bajos ingresos [101]. Así mismo, ha sido uno de los modelos seleccionados en este trabajo, para adaptar y simular a través de un análisis financiero que sea capaz de entregar información útil para los posibles usuarios y el posible financiador en términos de rentabilidad y asequibilidad.

En la simulación de este modelo para La Plata, se parte del supuesto que una entidad generadora de energía en el país decida ofrecer servicios de financiamiento a este tipo de comunidades a través de un modelo con bajas tasas de interés. Empresas como Celsia y Empresas de energía del Pacífico, prestadoras del servicio en esta zona del país, podrían emprender esta unidad de negocio social, el cual le brindaría electricidad y desarrollo a los más necesitados, sin perder dinero.

Para este modelo se consideró un sistema solar individual aislado para cada vivienda en la comunidad de La Plata, desde tres posibles escenarios de carga o demanda de energía, extraída de las encuestas realizadas en campo. Los tres tipos de escenarios analizados se encuentran en la Tabla 25.

En cada escenario se realizaron búsquedas y cotizaciones de los equipos y tecnologías (actualizados a 2021) y se elaboró una tabla de costos de inversión inicial, mano de obra e instalación, costos logísticos e imprevistos (Tabla 36, Tabla 37 y Tabla 38).

Tabla 36. Costo sistema solar individual escenario bajo – La Plata

EQUIPO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	SUBTOTAL
Conductores (DC + AC)	Cableados DC y AC para la conexión alámbrica de todo el sistema	1	\$ 100,000	\$ 100,000
Protecciones	Protectores para conductores	1	\$ 100,000	\$ 100,000
Tablero	Cuadro de mando o <i>breaker</i>	1	\$ 300,000	\$ 300,000
Mano de obra	\$160.000 un ingeniero y un ayudante por día	2	\$ 160,000	\$ 320,000
Transporte Terrestre	Transporte intermunicipal de equipos	1	\$ 500,000	\$ 500,000
Lancha	Transporte fluvial desde la cabecera municipal hasta el archipiélago	1	\$ 450,000	\$ 450,000

Viáticos	Viáticos en la isla por dos días de instalación por persona	4	\$ 100,000	\$ 400,000
Paneles	Paneles 140W 18.50 V Marca RESUN proveedor <i>Solartex</i>	2	\$ 247,000	\$ 494,000
Baterías	1 batería MTEK 12 v 155Ah	1	\$ 875,000	\$ 875,000
Controlador	Regulador <i>Ferragro</i> 12 V 20A	1	\$ 52,500	\$ 52,500
Inversor	Regulador <i>Ferragro</i> 12 V 20A	1	\$ 151,403	\$ 151,403
Soportes de panel solar para techo	Estructura perfiles de aluminio para techo	1	\$ 50,000	\$ 50,000
Imprevistos	El 10% de los costos	1	\$ 379,290	\$ 379,290
COSTO TOTAL DEL SISTEMA para una vivienda con carga de 0.935 kWh/día				\$ 4,172,193

Elaboración propia

Tabla 37. Costo sistema solar individual escenario medio – La Plata

EQUIPO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	SUBTOTAL
Conductores (DC + AC)	Cableados DC y AC para la conexión alámbrica de todo el sistema	1	\$ 100,000	\$ 100,000
Protecciones	Protectores para conductores	1	\$ 100,000	\$ 100,000
Tablero	Cuadro de mando o <i>breaker</i>	1	\$ 300,000	\$ 300,000
Mano de obra	\$160.000 un ingeniero y un ayudante por día	2	\$ 160,000	\$ 320,000
Transporte Terrestre	Transporte intermunicipal de equipos	1	\$ 500,000	\$ 500,000
Lancha	Transporte fluvial desde la cabecera municipal hasta el archipiélago	1	\$ 750,000	\$ 750,000
Viáticos	Viáticos en la isla por dos días de instalación por persona	4	\$ 100,000	\$ 400,000
Paneles	Panel solar de 200W 12 V Policristalino EGE - Fabricante <i>Ecogreen</i>	3	\$ 250,800	\$ 752,400
Baterías	Batería <i>Kaise</i> 12v 150Ah	2	\$ 800,000	\$1,600,000
Controlador	Regulador MPPT-30 12-24 V ML2430 <i>Solartex</i>	1	\$ 421,000	\$ 421,000
Inversor	Inversor 2000 W Onda Pura 110V 24V PS <i>Solartex</i>	1	\$ 1,060,000	\$1,060,000
Soportes de panel solar para techo	Estructura perfiles de aluminio para techo	3	\$ 50,000	\$ 150,000
Imprevistos	El 10% de los costos	1	\$ 645,340	\$ 645,340
COSTO TOTAL DEL SISTEMA para una vivienda con carga de 2.57 kWh/día				\$7,098,740

Elaboración propia

Tabla 38. Costo sistema solar individual escenario alto – La Plata

EQUIPO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	SUBTOTAL
Conductores (DC + AC)	Cableados DC y AC para la conexión alámbrica de todo el sistema	1	\$ 100,000	\$ 100,000
Protecciones	Protectores para conductores	1	\$ 100,000	\$ 100,000
Tablero	Cuadro de mando o <i>breaker</i>	1	\$ 300,000	\$ 300,000
Mano de obra	\$160.000 un ingeniero y un ayudante por día	2	\$ 160,000	\$ 320,000
Transporte Terrestre	Transporte intermunicipal de equipos	1	\$ 500,000	\$ 500,000
Lancha	Transporte fluvial desde la cabecera municipal hasta el archipiélago	1	\$ 750,000	\$ 750,000
Viáticos	Viáticos en la isla por dos días de instalación por persona	4	\$ 100,000	\$ 400,000
Paneles	Panel solar de 400W 40 V Marca <i>Seraphin</i> proveedor <i>Aprotec</i>	3	\$ 450,000	\$ 1,350,000
Baterías	Batería <i>Kaise</i> 12v 150Ah	2	\$ 800,000	\$ 1,600,000
Controlador	Regulador MPPT-30 12-24 V ML2430 <i>Solartex</i>	1	\$ 421,000	\$ 421,000
Inversor	Inversor 3000 W 24 V PS Onda Pura <i>Solartex</i>	1	\$ 1,584,000	\$ 1,584,000
Soportes de panel solar para techo	Estructura perfiles de aluminio para techo	3	\$ 50,000	\$ 150,000
Imprevistos	El 10% de los costos	1	\$ 757,500	\$ 757,500
COSTO TOTAL DEL SISTEMA para una vivienda con carga de 4.295 kWh/día				\$ 8,332,500

Elaboración propia

En el modelo se tuvo en consideración la resolución CREG 166 de 2020 (vigencia 5 años) “por la cual se define una tarifa transitoria para el servicio de energía eléctrica en la ZNI con sistemas solares individuales AC superiores a 500Wp”, para definir la tarifa o el costo unitario que deben pagar los usuarios.

En el modelo de ventanilla única adaptado a las condiciones colombianas en este apartado, se asume que la empresa que presta el servicio es una empresa del sector de la energía que integra en su negocio un modelo de financiamiento para vender productos energéticos a consumidores finales bajo un esquema de pago a cuotas y tarifa fija. La empresa productora en este caso será el dueño de los activos de generación (sistemas solares individuales) durante toda su vida útil, y los usuarios pagarán por la venta del servicio más no por la venta del activo.

El modelo financiero se simuló a 25 años (300 meses de servicio) considerando el promedio de la vida útil de este tipo de tecnologías (según los *pers* planes de energización rural sostenible en Colombia). La tasa de interés se precisó en un 4%, por debajo de las tasas de interés de los bancos colombianos para proyectos de libre inversión. En la simulación financiera, los costos se dividieron en cuatro categorías, las inversiones en equipos y materiales, inversión en capital de trabajo, gastos preoperativos e imprevistos, por usuario. Los imprevistos fueron asumidos como el 10% del total de los costos.

Los resultados del cálculo de la inversión inicial para cada sistema se pueden observar en la Tabla 39 y en el anexo n°3.

Tabla 39. Resumen de resultados simulación financiera, por usuario – Modelo 1

Modelo 1	SSI - Demanda de energía baja 280Wp	SSI - Demanda de energía media 600Wp	SSI - Demanda de energía alta 1200Wp
1. Inversiones en equipos y materiales	\$ 2,096,903.00	\$4,483,400.00	\$ 5,605,000.00
2. Inversiones en capital de trabajo	\$ 106,666.00	\$ 106,666.00	\$ 106,666.00
3. Gastos preoperativos	\$ 342,000.00	\$ 342,000.00	\$ 342,000.00
4. Imprevistos (10%)	\$ 229,856.90	\$ 353,046.60	\$ 425,366.60
5. Inversión inicial x unidad	\$ 2,775,425.90	\$5,285,112.60	\$ 6,679,032.60
6. Gastos por Mantenimiento y Administración /año	\$ 163,200.00	\$ 163,200.00	\$ 163,200.00
CU	\$ 44,549.12	\$ 72,661.98	\$ 78,676.88
Costo Nivelado de Energía [\$/kWh]	\$ 1,559.84	\$ 1,187.29	\$ 642.78

Elaboración propia. SSI (Sistema solar individual)

En los costos de inversión en equipos y materiales se asumen todos aquellos que corresponden a la compra de los equipos que conforman el sistema solar. En las inversiones de capital de trabajo se consideró el costo de las personas que instalan el sistema (ingeniero y ayudante); los gastos preoperativos totalizan los costos logísticos para transportar los equipos y las personas gracias a la ubicación geográfica de la comunidad, por lo tanto, la inversión inicial supone la suma de estos conceptos.

Es importante resaltar que, para fines prácticos y económicos, se consideró que el capital de trabajo es apto para instalar 4 sistemas FV en una salida de campo de 2 días a La Plata, por lo tanto, los gastos preoperativos se dividieron entre el número de sistemas que se pueden instalar para repartir dichos costos entre los usuarios atendidos.

5.4.1.1.1 Modelo para la AOM

En este modelo financiero, el responsable de la administración, operación y mantenimiento (AOM) es la empresa prestadora del servicio, puesto que es la propietaria de los equipos y la responsable del cobro de la tarifa a los usuarios. Este modelo es similar al modelo que se emplea para los usuarios del SIN, sin embargo, debido a que este es un sistema de generación aislado y renovable, no se incurren en costos adicionales de consumo, redes de transmisión, distribución ni comercialización.

Los gastos por mantenimiento y administración al año fueron calculados asumiendo que una persona designada por la empresa prestadora del servicio se traslade una vez cada mes para realizar un proceso de mantenimiento (limpieza, inspección (revisión termo gráfica y de variables eléctricas), facturación y cobro de la tarifa mes vencido). El gasto de esta actividad

incluye el costo de capital humano, viáticos, transporte y papelería, para un total de \$612,000/mes, el cual es asumido por los habitantes de la población que en el momento hayan adquirido el servicio. El costo que asume cada usuario por la administración y mantenimiento del sistema es de aproximadamente \$13,600/mes.

Es importante aclarar que el proceso de facturación y pago no puede realizarse de manera electrónica, ya que la comunidad no tiene acceso a internet ni red telefónica, así como tampoco cuentas bancarias que les permitan realizar la transferencia del dinero. Según las encuestas realizadas, todos los pagos se efectúan en efectivo.

No se consideró necesario integrar un contador de energía para cada sistema, ya que, por el tipo de características tecnológicas de estos sistemas renovables, no se refleja un consumo, sino la utilización de la potencia instalada, el cual se tiene en cuenta en el costo de inversión inicial. Dicho costo, sumado al costo de reemplazo de las baterías (asumido por la empresa y transferido en cuotas a la comunidad), más el costo de la AOM es amortizado a 300 meses.

En este modelo hay una enorme responsabilidad entre el usuario y el prestador del servicio, quienes se deben comprometer a pagar fielmente la factura del mes y a brindar los medios necesarios para hacer el pago; dicha responsabilidad deberá definirse en un contrato entre las partes, incluyendo las cláusulas por incumplimiento.

El modelo 1 genera algunas ventajas para la comunidad como, el que las personas puedan ir adquiriendo su sistema individual en tiempos diferentes al resto de la población, así como adquirir el sistema que más se adapte a sus necesidades y su capacidad de pago, ya sea el de carga baja, media o alta. En un sistema de microrred, todos los usuarios deben adquirir el servicio y la deuda al mismo tiempo, sin importar el tipo de carga que posean en sus casas, ni la capacidad financiera disímil entre los habitantes.

5.4.1.1.2 Esquema tarifario – Costo unitario (CU)

Como ya se mencionó anteriormente, para el cálculo de la tarifa mensual a pagar por los usuarios, se tuvo en cuenta la normativa colombiana en el marco de la resolución CREG 166 de 2020 para el cálculo de la tarifa de prestación del servicio con sistemas solares individuales en las ZNI [27]. Las tarifas en Colombia son reguladas por la Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG, a través de resoluciones particulares para usuarios regulados, que en principio tienen 5 años de vigencia.

El costo de prestación del servicio de energía eléctrica para usuarios regulados, atendidos con sistemas solares fotovoltaicos individuales AC con potencia mayor a 0.5 kW, se determina mediante la fórmula tarifaria de la ecuación Eq 41.

Eq 41

$$CU_m = G_m + C_m$$

Donde G_m es el cargo máximo de generación en \$/usuario al mes, y C_m es el cargo máximo de comercialización en \$/usuario al mes. Dicha resolución CREG establece un costo máximo de comercialización de \$23,181 por usuario al mes y se pide actualizar a través de la fórmula de la Eq 42.

Eq 42

$$C_m = C_0 * \frac{IPC_{m-1}}{IPC_0}$$

Donde C_0 es el cargo máximo de comercialización en la fecha base (junio de 2020). IPC_{m-1} es el índice de precios al consumidor del mes anterior, y el IPC_0 es el índice de precios al consumidor en la fecha base.

El otro componente de la fórmula tarifaria G_m , se solicita actualizar a través de la Eq 43, donde G_0 es el cargo máximo de generación de energía eléctrica en pesos de la fecha base, IPP_{m-1} es el índice de precios al productor del mes anterior, y IPP_0 es el índice de precios al productor de la fecha base.

Eq 43

$$G_m = G_0 * \frac{IPP_{m-1}}{IPP_0}$$

El cargo máximo de generación es calculado a partir de la Eq 44, donde G_{I0} es el componente que remunera los costos de inversión de sistemas solares FV expresado en pesos por usuario al mes, de la fecha base, y el G_{AOM0} equivale al componente que remunera los costos de AOM en pesos por usuario al mes, de la fecha base.

Eq 44

$$G_0 = G_{I0} + G_{AOM0}$$

Cabe resaltar que la resolución CREG, establece el componente de remuneración de inversión al mes por usuario, con un valor de \$229,293, este incluye el costo por modulo solar, controlador, inversor y batería, y un costo de \$86,525/mes para remunerar el costo de la AOM. Los anteriores componentes generan CU aproximado de \$338,990/usuario mes, sin embargo, consideramos que este valor es muy alto y excede la capacidad financiera de los habitantes de La Plata, por lo tanto, las fórmulas tarifarias de la resolución CREG, fueron aplicadas al modelo financiero propuesto (ventanilla única) a través de un ejercicio financiero.

En la Tabla 40 se puede observar el flujo de egresos para el sistema solar individual del escenario bajo (capacidad de 280Wp) en 25 años de vida útil. En dicha tabla se encuentra la inversión inicial, los costos de AOM y los costos de reemplazo del sistema de almacenamiento (batería solar) con una vida útil de 5 años. A partir de esta tabla de egresos

se calculó el G_{IO} y el G_{AOM0} anual y mensual, dividiendo el costo de la inversión inicial en 25 años y el costo de las baterías entre 5 años de vida útil, como se observa en la Tabla 41. Los demás escenarios (medio y alto) se encuentran en el anexo n°3.

Tabla 40. Flujo de egresos Modelo 1 – SSI escenario bajo

Periodo	Inversión inicial	Gastos administrativos y mantenimiento	Otras inversiones
0	\$ 2,746,093.30	\$ -	\$ -
1	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
2	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
3	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
4	\$ -	\$ 163,200.00	\$ 849,000.00
5	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
6	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
7	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
8	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
9	\$ -	\$ 163,200.00	\$ 849,000.00
10	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
11	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
12	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
13	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
14	\$ -	\$ 163,200.00	\$ 849,000.00
15	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
16	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
17	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
18	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
19	\$ -	\$ 163,200.00	\$ 849,000.00
20	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
21	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
22	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
23	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -
24	\$ -	\$ 163,200.00	\$ 849,000.00
25	\$ -	\$ 163,200.00	\$ -

Fuente: propia

Tabla 41. Cálculo del G_{10} , G_{AOM} , G_0 y G_m – primeros 5 años – SSI escenario bajo

Periodo	0	1	2	3	4	5
Inversión inicial	\$ -	\$ 109,843.73	\$ 109,843.73	\$ 109,843.73	\$ 109,843.73	\$ 109,843.73
Inversión baterías	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 169,800.00
Total G_{10} x año	\$ -	\$ 109,843.73	\$ 109,843.73	\$ 109,843.73	\$ 109,843.73	\$ 279,643.73
Total G_{10} x mes	\$ -	\$ 9,153.64	\$ 9,153.64	\$ 9,153.64	\$ 9,153.64	\$ 23,303.64

Gaom x año	\$ -	\$ 163,200.00	\$ 163,200.00	\$ 163,200.00	\$ 163,200.00	\$ 163,200.00
Gaom x mes	\$ -	\$ 13,600.00	\$ 13,600.00	\$ 13,600.00	\$ 13,600.00	\$ 13,600.00
Cálculo G_0 mes	\$ -	\$ 22,753.64	\$ 22,753.64	\$ 22,753.64	\$ 22,753.64	\$ 36,903.64
Calculo del G_m x mes	\$ -	\$ 22,837.83	\$ 22,922.33	\$ 23,007.15	\$ 23,092.27	\$ 37,040.19

Elaboración propia

De esta manera, el cargo máximo de generación G_0 equivaldría a la suma de los costos de inversión más los costos de AOM (Eq 44), que se actualizan a partir del índice de precios al productor (Eq 43), para obtener el cargo máximo de generación en \$/usuario al mes (G_m).

Con el objetivo de establecer la tarifa para los usuarios proyectada al futuro (tiempo de duración del proyecto), no es posible tener los datos del IPP de los meses venideros, ya que estos son publicados por el Banco de la República mes venido. Sin embargo, al día de hoy tenemos disponibilidad del registro histórico mensual del IPP y del IPC desde el año 1970 para oferta interna y desde el año 1999 para producción nacional. Por lo tanto, para actualizar el cargo máximo de generación (G_m), fue necesario calcular el promedio de incremento mensual que ha tenido el IPP a partir de la serie histórica disponible. Después de realizar el cálculo se obtiene un promedio en el incremento mensual del 0.37%, el cual es utilizado para actualizar el valor de G_m como se muestra en la Tabla 41.

Para calcular el cargo máximo de comercialización C_m que complementa la fórmula tarifaria para hallar CU_m , consideramos más conveniente hallar el retorno de la inversión (ROI) asumiendo una tasa de interés baja, en lugar de tomar el cargo máximo de generación definido por la resolución tarifaria CREG166, con el ánimo de obtener un valor más bajo y asequible para los usuarios.

El ROI fue calculado en dos secciones, uno para la inversión en el sistema solar individual y el otro para el reemplazo de las baterías, debido a que es la empresa prestadora del servicio quien adquiere las baterías cada 5 años y las financia a los usuarios a través de la factura del servicio. La tasa de interés anual (i) utilizada fue del 4%, muy por debajo de las tasas ofrecidas por los bancos para créditos de libre inversión. La tasa de liquidación fue de 0.33% mensual (Eq 45) y el tiempo de la financiación fue de 300 meses para el sistema inicial y 240 meses para el reemplazo de las baterías. La cuota mensual es calculada a partir de la fórmula financiera de la Eq 46, donde n es el tiempo del crédito. Los resultados de la simulación del

capital compuesto (interés sobre los intereses) de la inversión inicial del SSI escenario bajo y su reemplazo de baterías, se puede observar en la Tabla 42 y Tabla 43.

Eq 45

$$\text{Tasa de liquidación mensual} = (1 + i)^{(1/12)} - 1$$

Eq 46

$$\text{Cuota mensual} = \frac{\text{Valor del crédito}}{\frac{(1 + i)^{n-1}}{i(1 + i)^n}}$$

Tabla 42. Simulación de capital compuesto (intereses sobre los intereses) inversión inicial – SSI escenario bajo

Periodo	Cuota	Intereses	Abono	Saldo
0	\$ -	\$ -	\$ -	\$2,746,093.30
1	\$ 14,386.68	\$ 8,989.99	\$ 5,396.69	\$2,740,696.61
2	\$ 14,386.68	\$ 8,972.33	\$ 5,414.35	\$2,735,282.26
3	\$ 14,386.68	\$ 8,954.60	\$ 5,432.08	\$2,729,850.18
4	\$ 14,386.68	\$ 8,936.82	\$ 5,449.86	\$2,724,400.32
5	\$ 14,386.68	\$ 8,918.98	\$ 5,467.70	\$2,718,932.62
6	\$ 14,386.68	\$ 8,901.08	\$ 5,485.60	\$2,713,447.02
7	\$ 14,386.68	\$ 8,883.12	\$ 5,503.56	\$2,707,943.46
8	\$ 14,386.68	\$ 8,865.10	\$ 5,521.58	\$2,702,421.88
9	\$ 14,386.68	\$ 8,847.03	\$ 5,539.65	\$2,696,882.22
10	\$ 14,386.68	\$ 8,828.89	\$ 5,557.79	\$2,691,324.43
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
299	\$ 14,386.68	\$ 93.74	\$14,292.94	\$ 14,339.74
300	\$ 14,386.68	\$ 46.94	\$14,339.74	-\$ 0.00

Elaboración propia

Tabla 43. Simulación de capital compuesto (intereses sobre los intereses) reemplazo de las baterías – SSI escenario bajo

Periodo	Cuota	Intereses	Abono	Saldo
0	\$ -	\$ -	\$ -	\$4,245,000.00
1	\$ 25,564.19	\$13,897.03	\$11,667.16	\$4,233,332.84
2	\$ 25,564.19	\$13,858.83	\$11,705.36	\$4,221,627.48
3	\$ 25,564.19	\$13,820.51	\$11,743.68	\$4,209,883.81
4	\$ 25,564.19	\$13,782.06	\$11,782.12	\$4,198,101.68
5	\$ 25,564.19	\$13,743.49	\$11,820.69	\$4,186,280.99
6	\$ 25,564.19	\$13,704.79	\$11,859.39	\$4,174,421.60
7	\$ 25,564.19	\$13,665.97	\$11,898.22	\$4,162,523.38
8	\$ 25,564.19	\$13,627.02	\$11,937.17	\$4,150,586.21
9	\$ 25,564.19	\$13,587.94	\$11,976.25	\$4,138,609.97
10	\$ 25,564.19	\$13,548.73	\$12,015.45	\$4,126,594.51
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
239	\$ 25,564.19	\$ 166.56	\$25,397.62	\$ 25,480.77
240	\$ 25,564.19	\$ 83.42	\$25,480.77	-\$ 0.00

Elaboración propia

La sumatoria de los intereses de los 12 primeros meses tanto de la inversión inicial del SSI y de las baterías, proporcionaría el retorno de la inversión del primer año el cual equivaldría al costo de comercialización C_m anual. Al sumar el costo de comercialización mensual C_m más el cargo de generación G_m , se obtiene el costo unitario de la prestación del servicio CU_m en pesos por usuario al mes, como se muestra en la Tabla 44.

Tabla 44. Resultado cargo de generación G_m , costo de comercialización C_m y costo tarifario CU_m , mensual – SSI escenario bajo – La Plata

Periodo	0	1	2	3	4	5
Calculo del GM x mes	\$ -	\$22,837.83	\$ 22,922.33	\$23,007.15	\$23,092.27	\$37,040.19
Cálculo del Cm mes	\$ -	\$22,576.40	\$21,881.42	\$21,158.64	\$20,406.95	\$19,625.20
Calculo del Cu	\$ -	\$45,414.23	\$44,635.06	\$43,912.29	\$43,160.60	\$56,528.84

Elaboración propia

Este análisis fue realizado para los escenarios bajo, medio y alto, del cual se obtienen las tarifas que se muestran en la Tabla 45, durante todos los periodos del proyecto (25 años). Allí se observa que la tarifa es proporcional a la capacidad del sistema y que éstas van

disminuyendo en la medida del tiempo, ya que a pesar de que aumenta la inflación y el valor del dinero, los intereses son cobrados sobre el saldo de la deuda más no sobre el valor de la inversión. Esta tarifa reflejaría el pago que cada habitante de la Plata debería pagar durante cada mes del año durante 25 años para tener un suministro de energía renovable y limpia las 24 horas del día. Es importante resaltar que, en el año 5 el valor de la tarifa aumenta debido al primer reemplazo de baterías.

Tabla 45. Tarifas modelo financiero 1 ventanilla única, para los tres tipos de escenarios.

Periodo año	Tarifa Mensual		
	SSI - Demanda de energía baja 280Wp	SSI - Demanda de energía media 600Wp	SSI - Demanda de energía alta 1200Wp
0	\$ -	\$ -	\$ -
1	\$ 45,414.23	\$ 74,235.23	\$ 82,095.56
2	\$ 44,635.06	\$ 72,801.19	\$ 80,551.23
3	\$ 43,912.29	\$ 71,429.92	\$ 79,080.58
4	\$ 43,160.60	\$ 70,003.79	\$ 77,551.09
5	\$ 56,528.84	\$ 95,187.29	\$ 102,627.09
6	\$ 55,715.81	\$ 93,644.79	\$ 100,972.80
7	\$ 54,870.27	\$ 92,040.59	\$ 99,252.34
8	\$ 53,990.90	\$ 90,372.23	\$ 97,463.06
9	\$ 53,076.35	\$ 88,637.13	\$ 95,602.21
10	\$ 52,125.23	\$ 86,832.62	\$ 93,666.92
11	\$ 51,136.05	\$ 84,955.94	\$ 91,654.23
12	\$ 50,107.32	\$ 83,004.19	\$ 89,561.02
13	\$ 49,037.43	\$ 80,974.37	\$ 87,384.09
14	\$ 47,924.74	\$ 78,863.35	\$ 85,120.08
15	\$ 46,767.55	\$ 76,667.90	\$ 82,765.51
16	\$ 45,564.08	\$ 74,384.63	\$ 80,316.75
17	\$ 44,312.46	\$ 72,010.02	\$ 77,770.05
18	\$ 43,010.78	\$ 69,540.44	\$ 75,121.48
19	\$ 41,657.03	\$ 66,972.06	\$ 72,366.96
20	\$ 40,249.13	\$ 64,300.96	\$ 69,502.27
21	\$ 39,250.27	\$ 62,400.01	\$ 67,399.98
22	\$ 38,768.67	\$ 61,473.12	\$ 66,263.71
23	\$ 38,267.80	\$ 60,509.15	\$ 65,081.98
24	\$ 37,746.90	\$ 59,506.63	\$ 63,852.99
25	\$ 37,205.16	\$ 58,464.01	\$ 62,574.83

Elaboración propia

5.4.1.1.3 Evaluación financiera para el prestador

En la evaluación financiera para el prestador, se analiza el valor presente neto (VPN) el cual trae al presente los flujos de efectivo y refleja cuanto le deja a la empresa el negocio que ha realizado.

Ante una inversión de COP 38,445,306 (para el escenario bajo) y el reflejo de unos flujos de caja durante los próximos 25 años, se obtiene hoy un valor presente neto de COP 3,296,640 (escenario bajo), lo que significa una ganancia de este valor a pesos de hoy para el inversionista. Adicional a ello, se observa que los inversionistas recuperarían la inversión inicial en un tiempo estimado de 10 años.

Igualmente, bajo el parámetro TIR (tasa interna de retorno), el proyecto es rentable para los inversionistas ya que esta (4.27%) supera el costo de financiación del proyecto (3%). En la Tabla 46 y Tabla 47 se muestra el flujo de caja del inversionista en los primeros 5 periodos del proyecto y el resumen de la TIR y el VPN, así como el tiempo de recuperación de la inversión para los tres escenarios, los cuales corresponden al total de la población.

Tabla 46. Flujo de caja del inversionista – Modelo 1 escenario bajo

Nº Usuarios	14					
Periodo	0	1	2	3	4	5
Inversión inicial	-\$38,445,306.20	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Gastos administración y mantenimiento	\$ -	\$ 2,284,800	\$ 2,353,344.00	\$2,423,944.32	\$ 2,496,662.65	\$2,571,562.53
Ingresos	\$ -	\$ 7,629,590	\$ 7,498,690.75	\$7,377,264.06	\$ 7,250,980.31	\$9,496,845.21
Compra Baterías	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$11,886,000.00	\$ -
Flujo de caja	-\$38,445,306.20	\$ 5,344,790	\$ 5,145,346.75	\$4,953,319.74	-\$ 7,131,682.34	\$6,925,282.68

Elaboración propia

Tabla 47. TIR, VPN y Retorno de la inversión – Escenario bajo, medio y alto – Modelo 1

Sistema	SSI - Demanda de energía baja 280Wp	SSI - Demanda de energía media 600Wp	SSI - Demanda de energía alta 1200Wp	Total
Usuarios	14	4	27	45
TIR	4.3%	6.2%	5.8%	17.2%
VPN	\$ 3,296,639.99	\$ 5,793,033.04	\$ 43,465,799.46	\$ 52,555,472.49
Recuperación de la Inversión	10 años	10 años	10 años	10 años

Elaboración propia

Al final del ejercicio podemos concluir que el modelo financiero es rentable para el inversionista, con una TIR de 17.2%, y una ganancia de COP 52,555,472.49 en 25 años, es decir COP 2,102,218.90 anual, con unas tarifas promedio de COP 46,177 mensuales, COP 75,568 y COP 81,823 para los escenarios bajo, medio y alto, respectivamente.

5.4.1.2 Modelo PAYGo

El modelo financiero Pay As You Go, es un esquema innovador que ha sido utilizado por múltiples empresas (Simpa Networks, Husk Power Systems, Mera Gao Power, M-KOPA Solar) a nivel internacional (Kenia e India) especialmente en África, para financiar productos energéticos a poblaciones rurales sin acceso a la energía y con bajos ingresos económicos.

La empresa PAYGo financia productos como sistemas solares individuales, a usuarios que pueden pagar el sistema a cuotas (entre uno y tres años), de manera prepagada a través de créditos de energía y un sistema de bloqueo remoto, que activa o desactiva el sistema solar. Las empresas más exitosas en la implementación de este modelo utilizan un software de administración y pago, a través del teléfono móvil para comunicarse constantemente con el usuario, informándolo sobre el estado de su crédito, recepción de pagos, y control del sistema.

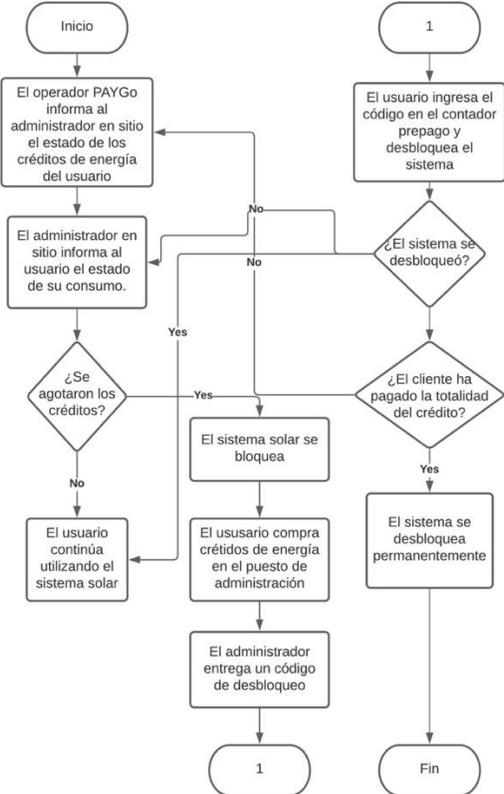
En la actualidad es el modelo financiero más utilizado para proyectos de energización rural. En el 2019 la cuarta parte de las inversiones en sistemas solares fuera de red a nivel mundial se realizaron a través del PAYGo [17]. En los últimos años las empresas PAYGo se han asociado con otro tipo de empresas para proveer no solo productos energéticos sino productos de consumo como televisores, computadores, sistemas de riego, biodigestores, entre otros. Adicionalmente las asociaciones con empresas de telecomunicaciones han emergido en el desarrollo de este negocio.

El modelo de PAYGo fue adaptado en el diseño de un esquema financiero asequible para la electrificación rural de la comunidad de La Plata, a través de sistemas solares individuales con tres capacidades diferentes (280Wp, 600Wp y 1200Wp), al igual que en el primer modelo financiero de ventanilla única.

El periodo de financiación se simuló a 3 años, con una tasa de interés del 4% EA. Los componentes de los SSI se describen en las Tabla 36, Tabla 37 y Tabla 38. Adicionalmente

fue incluido un contador prepago, utilizado para leer un código de barras que desbloquea y habilita el sistema solar una vez se hayan adquirido los créditos de energía. En la Figura 101 se muestra la operación del modelo diseñado para la comunidad de La Plata.

Figura 101. Diagrama de flujo de la operación del modelo PAYGo en La Plata



Elaboración propia

El funcionamiento del modelo PAYGo para la comunidad de La Plata, implica la implementación de un sistema de recaudo por código o tarjeta de lectura, la cual es adquirida en un puesto de administración del sistema solar centralizado en la comunidad, ya que la red telefónica y de internet no favorece la implementación de un sistema de app móvil, tal y como es implementado en otros países. En futuros proyectos de desarrollo para este tipo de comunidades es importante el aumento de la cobertura en este otro servicio público indispensable para las personas hoy en día.

Una de las principales diferencias de este modelo con el modelo 1 de ventanilla única, es que una vez se termine el periodo de financiación y el usuario ha pagado la totalidad del crédito, el sistema solar pasa a ser propiedad del usuario, quienes podrán disfrutar gratuitamente de la generación de energía, por los 22 años restantes de vida útil. También es importante resaltar

que el reemplazo de las baterías y el mantenimiento del sistema correrá por cuenta del usuario una vez se dé por finalizado el contrato de compraventa.

5.4.1.2.1 Modelo para la AOM

La administración, operación y mantenimiento para este modelo financiero consiste en la adecuación de una oficina de administración en sitio, la cual tiene la labor de tener una comunicación constante con el operador o empresa PAYGo a través de un software de operación y facturación de los sistemas solares. Adicional a ello, el administrador debe recargar las tarjetas o vender los códigos de recarga de créditos de energía, que se pueden realizar diario, semanal o mensualmente. El administrador del sistema solar recolecta el dinero y cada mes se dirige a la cabecera municipal y hace la transferencia del dinero a la empresa PAYGo.

El administrador debe ser una persona de la comunidad de La Plata, quien es bonificada por prestar sus servicios a la empresa PAYGo y a la comunidad. Esta persona debe ser capacitada para todas las funciones que debe desempeñar.

Los costos de AOM se estimaron en COP 4,500,000 al año, los cuales incluyen el costo de la contratación de internet satelital para el uso del administrador y el software de comunicación. Este costo es asumido por todos los usuarios activos del servicio y por la empresa PAYGo.

El modelo financiero tiene un valor adicional en el marco de la sostenibilidad social, gracias a que genera empleo y mayor dinámica económica para los habitantes de La Plata.

5.4.1.2.2 Esquema Tarifario

La tarifa para este modelo fue calculada a partir de los conceptos de, 1. Inversión en equipos y materiales, 2. Inversiones en capital de trabajo, 3. Gastos preoperativos, y 4. Imprevistos. Una vez calculados dichos costos, se halló el costo de la inversión inicial por unidad, tal como se observa en Tabla 48.

Tabla 48. Resumen de resultados simulación financiera por usuario – Modelo 2

Modelo 2	SSI - Demanda de energía baja 280Wp	SSI - Demanda de energía media 600Wp	SSI - Demanda de energía alta 1200Wp
1. Inversiones en equipos y materiales	\$ 2,166,903.00	\$ 4,553,400.00	\$ 5,675,000.00
2. Inversiones en capital de trabajo	\$ 106,666.00	\$ 106,666.00	\$ 106,666.00
3. Gastos preoperativos:	\$ 342,000.00	\$ 342,000.00	\$ 342,000.00
4. Imprevistos (10%)	\$ 236,856.90	\$ 360,046.60	\$ 432,366.60

5. Inversión inicial x unidad:	\$ 2,852,425.90	\$ 5,362,112.60	\$ 6,556,032.60
6. Gastos x Mantenimiento y Administración /año	\$ 100,000.67	\$ 100,000.67	\$ 100,000.67
CU	\$ 92,565.66	\$ 166,667.78	\$ 201,919.99
Costo Nivelado de Energía [\$/kWh]	\$ 3,241.09	\$ 2,723.33	\$ 1,649.67

Elaboración propia

Los costos de inversión por unidad, sumados a los conceptos de AOM por unidad, y el retorno de la inversión, amortizado a tres años, entrega la tarifa del costo unitario para el usuario en \$/mes, tal como se observa en la Tabla 49 para el SSI de 280Wp. Los demás cálculos se pueden consultar en el anexo n°3.

Tabla 49. Flujo de egresos del proyecto – Modelo 2 – SSI escenario bajo

Periodo	0	1	2	3
Inversión inicial	\$ 2,852,425.90	\$ -	\$ -	\$ -
Gastos administrativos y mantenimiento	\$ -	\$ 73,334.00	\$ 73,334.00	\$ 73,334.00
Sistema Prepago	\$ -	\$ 1,200,000.00	\$ 1,200,000.00	\$ 1,200,000.00
Total Gio x mes	\$ -	\$ 79,234.05	\$ 79,234.05	\$ 79,234.05
Gaom x año	\$ -	\$ 100,000.67	\$ 100,000.67	\$ 100,000.67
Gaom x mes	\$ -	\$ 8,333.39	\$ 8,333.39	\$ 8,333.39
Calculo Go mes	\$ -	\$ 87,567.44	\$ 87,567.44	\$ 87,567.44
Cálculo del GM x mes	\$ -	\$ 87,891.44	\$ 88,216.64	\$ 88,543.04
Cálculo del CM retorno de la inversión % x año	\$ -	\$ 95,720.75	\$ 59,169.93	\$ 21,157.08
Pago mes intereses	\$ -	\$ 7,976.73	\$ 4,930.83	\$ 1,763.09
Cálculo del Cu	\$ -	\$ 95,868.17	\$ 92,498.27	\$ 89,330.53
Costo Nivelado de Energía [\$/kWh]	\$ -	\$ 3,356.73	\$ 3,238.73	\$ 3,127.82

Elaboración propia

El cargo de generación G_m se actualizó cada año a partir del incremento del IPC hallado para el modelo 1 de ventanilla única, de esta manera se involucra la inflación en los cálculos.

El retorno de la inversión se realizó a través de la simulación del capital compuesto intereses sobre los intereses, tal como es realizado por las entidades financieras, a una tasa de interés del 4% EA, una tasa de liquidación de 0.33% mensual, por un periodo de 36 meses (Tabla 50).

Tabla 50. Simulación de capital compuesto (intereses sobre los intereses) inversión inicial – SSI escenario bajo – Modelo 2

Periodo	Cuota	Intereses	Abono	Saldo
0	\$ -	\$ -	\$ -	\$2,852,425.90
1	\$ 84,124.27	\$ 9,338.10	\$74,786.17	\$2,777,639.73
2	\$ 84,124.27	\$ 9,093.27	\$75,031.00	\$2,702,608.73
3	\$ 84,124.27	\$ 8,847.64	\$75,276.63	\$2,627,332.10
4	\$ 84,124.27	\$ 8,601.20	\$75,523.07	\$2,551,809.03
5	\$ 84,124.27	\$ 8,353.96	\$75,770.31	\$2,476,038.72
6	\$ 84,124.27	\$ 8,105.91	\$76,018.36	\$2,400,020.36
7	\$ 84,124.27	\$ 7,857.04	\$76,267.23	\$2,323,753.14
8	\$ 84,124.27	\$ 7,607.36	\$76,516.91	\$2,247,236.23
9	\$ 84,124.27	\$ 7,356.87	\$76,767.40	\$2,170,468.83
10	\$ 84,124.27	\$ 7,105.55	\$77,018.72	\$2,093,450.11
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
35	\$ 84,124.27	\$ 548.11	\$83,576.16	\$ 83,849.77
36	\$ 84,124.27	\$ 274.50	\$83,849.77	-\$ 0.00

Elaboración propia

De tal manera que las tarifas mensuales para los SSI de los tres escenarios corresponden a los mostrados en la Tabla 51.

Tabla 51. Tarifas modelo financiero 2 PAYGo, para los tres tipos de escenarios.

Periodo	Tarifas 4% interés		
	SSI - Demanda de energía baja 280Wp	SSI - Demanda de energía media 600Wp	SSI - Demanda de energía alta 1200Wp
0	\$ -	\$ -	\$ -
1	\$ 95,868.17	\$ 172,857.90	\$ 209,483.82
2	\$ 92,498.27	\$ 166,550.14	\$ 201,778.45
3	\$ 89,330.53193	\$ 160,595.2938	\$ 194,497.7027
Promedio	\$ 92,565.66	\$ 166,667.78	\$ 201,919.99

Elaboración propia

5.4.1.2.3 Evaluación financiera para el prestador

En este modelo financiero el inversionista recupera la inversión a los tres años de la financiación, lo que implica menor riesgo financiero gracias al tiempo de contrato y la forma de pago pre-pagada, sin embargo, las cuotas fijas son mucho más altas que en el modelo 1, lo que hace que sea inviable para el 40% de las familias de La Plata quienes poseen los menores ingresos de la población.

El modelo PAYGo también arroja resultados positivos para el inversionista, con una tasa interna de retorno total de 12.5% y un valor presente neto de COP 3,845,798.26 a tres años (Tabla 52). A pesar de ello los resultados para el inversionista son un 27.32% más bajos que en el modelo financiero 1.

Tabla 52. TIR, VPN y Retorno de la inversión – Escenario bajo, medio y alto – Modelo 2 – 4% interés

Sistema	SSI - Demanda de energía baja 280Wp	SSI - Demanda de energía media 600Wp	SSI - Demanda de energía alta 1200Wp	Total
Usuarios	14	4	27	45
TIR	4.4%	3.8%	3.7%	12.5%
VPN	\$ 1,094,150.85	\$ 342,619.14	\$ 2,409,028.28	\$ 3,845,798.26
Recuperación de la Inversión	3 años	3 años	3 años	3 años

Elaboración propia

Al aumentar la tasa de interés a 6% (tomando como referencia la misma tasa que utilizan las empresas de PAYGo a nivel internacional) los resultados se vuelven mucho más atractivos para los inversionistas con una TIR total de 17.6%, y un VPN de COP 10,87,215.62 a tres años (Tabla 55); por otro lado, las tarifas para los usuarios incrementan solo en un 2.8% con respecto a las tarifas con tasa de interés menor (Tabla 53 y Tabla 54).

Tabla 53. Tarifas modelo financiero 2 PAYGo, para los tres tipos de escenarios. 6% interés

Periodo	Tarifas 6% interés		
	SSI - Demanda de energía baja 280Wp	SSI - Demanda de energía media 600Wp	SSI - Demanda de energía alta 1200Wp
0	\$ -	\$ -	\$ -
1	\$ 99,797.91	\$ 180,245.20	\$ 218,515.96
2	\$ 94,994.04	\$ 171,241.80	\$ 207,514.74
3	\$ 90,245.37	\$ 162,315.05	\$ 196,600.37
Promedio	\$ 95,012.44	\$ 171,267.35	\$ 207,543.69

Elaboración propia

Tabla 54. Comparativo tarifas del 4% y 6% de interés – Modelo financiero 2

Periodo	Tarifas promedio 4% interés	Tarifas promedio 6% interés	Diferencia	Incremento
1	\$ 92,565.66	\$ 95,012.44	\$2,446.78	2.6%
2	\$ 166,667.78	\$ 171,267.35	\$4,599.57	2.8%
3	\$ 201,919.99	\$ 207,543.69	\$5,623.70	2.8%

Elaboración propia

Tabla 55. TIR, VPN y Retorno de la inversión – Escenario bajo, medio y alto – Modelo 2 – 6% interés

Sistema	SSI - Demanda de energía baja 280Wp	SSI - Demanda de energía media 600Wp	SSI - Demanda de E energía alta 1200Wp	Total
Usuarios	14	4	27	45
TIR	6.0%	5.4%	5.3%	17.6%
VPN	\$ 2,270,989.33	\$ 974,696.70	\$ 7,625,529.59	\$ 10,871,215.62
Recuperación de la Inversión	3 años	3 años	3 años	3 años

Elaboración propia

5.4.1.3 Cooperativa Energética

Una cooperativa de energía es una asociación sin ánimo de lucro de personas naturales que buscan el bienestar y beneficio de todos sus socios, a través de la comercialización de energía renovable [131]. Las cooperativas de energía han surgido como una nueva estructura organizacional que promueve la transición energética hacia las energías renovables, en países líderes como Alemania, España, Bélgica, Holanda, Austria y Dinamarca. Los países industrializados y desarrollados han venido desarrollando estrategias para facilitar el acceso a la explotación de las energías renovables a través de la descentralización, la desregulación y el suministro de energía poli-céntrico.

Las cooperativas de energía son consideradas un modelo de gestión eficiente que permite proveer energía a sus socios a precios económicos y competitivos [132]. El modelo es considerado una gran oportunidad en Colombia, para ampliar la cobertura de energía eléctrica y para diversificar la matriz energética.

En este proyecto de investigación se propone un modelo de cooperativa de energía para lograr la electrificación de la población de La Plata, mediante la inversión en una microrred aislada.

Para lograr este cometido, los platences deben conformar jurídicamente una cooperativa ante la cámara de comercio y tramitar un microcrédito en la entidad bancaria más conveniente para las condiciones de la población.

La cooperativa se debe registrar como una entidad sin ánimo de lucro, siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

- Presentar un acta de reunión donde los integrantes de la cooperativa aprueban la decisión de la creación.
- Presentar el estatuto del funcionamiento de la empresa, donde se identifiquen los representantes legales.
- Diligenciamiento del formulario de Registro Único Empresarial y Social (RUES).
- Registrar la entidad en la cámara de comercio con la presencia del presidente y el secretario.
- Solicitar un pre RUT en la DIAN.

Los derechos o costos de matrícula de la entidad sin ánimo de lucro son aproximadamente \$161,600 más los costos del registro único tributario por los activos de propiedad de la cooperativa, que inicialmente no poseería.

Una vez creada la cooperativa, esta debe realizar los trámites para acceder a un microcrédito a través de una entidad bancaria, el cual sería utilizado en la implementación de la microrred ya diseñada en este trabajo de investigación.

El crédito debe pagarse con los recursos de cada uno de los usuarios u hogares de La Plata, puesto que la microrred sería un sistema centralizado que utilizaría toda la comunidad.

5.4.1.3.1 Modelo para la AOM

Una vez conformada la cooperativa de energía y otorgado el crédito, esta deberá seguir funcionando durante toda la vida útil del sistema y aún después de este periodo al reemplazar algunos componentes obsoletos. Esta cooperativa es una entidad sin ánimo de lucro, sin embargo, debe generar el dinero suficiente para pagar las cuotas del crédito de energía y para retribuir el trabajo de los empleos que se generen en la AOM del sistema y de la cooperativa. Dichos costos fueron asumidos para el cálculo de la tarifa mensual que asumen los habitantes de La Plata.

Como mínimo para el funcionamiento del modelo, se deben considerar dos personas, una encargada de la administración y gestión de la cooperativa de energía y otra persona capacitada técnicamente de las labores de operación y mantenimiento de la microrred. Al ser este un sistema más moderno y tecnológico, se requiere mayor capacitación de parte del operador.

La cooperativa de energía debe funcionar en el marco legal de este tipo de formas jurídicas, donde su principal objetivo es suministrar energía eléctrica a sus asociados. Dentro de las funciones que debe desempeñar están, 1. Administrar, operar y hacer mantenimiento a la microrred, 2. Administrar la cooperativa de energía, 3. Facturar la cuota mensual y recolectar el dinero de los asociados, 4. Gestionar los subsidios del gobierno en el marco del combustible para la planta diésel, 5. Gestionar los incentivos tributarios que apliquen en su funcionamiento, 6. Entregar o consignar la cuota mensual en la entidad bancaria.

En este modelo financiero, no hay intervención de terceros en la implementación y administración del sistema de generación, por lo tanto, toda la responsabilidad recae en los habitantes.

5.4.1.3.2 Esquema Tarifario

Para calcular la tarifa o cuota mensual a pagar por cada uno de los hogares de La Plata, se implementó la misma metodología de los dos modelos anteriores. Primero se totalizó la inversión en equipos y materiales, resultante de la topología de la microrred elaborada en el capítulo de resultados “Modelo técnico”. De esta se obtuvo la información de la Tabla 56.

Tabla 56. Inversión en equipos y materiales para la microrred

Equipos	Unidades	Costo unitario	Costo total
Paneles	320	\$ 450,000.00	\$144,000,000.00
Baterías	140	\$ 1,362,000.00	\$190,680,000.00
Controlador	5	\$ 7,200,000.00	\$ 36,000,000.00
Inversor	12	\$ 3,863,000.00	\$ 46,356,000.00
Soportes paneles	320	\$ 100,000.00	\$ 32,000,000.00
Interruptor de corriente alterna uno por vivienda. <i>Breaker (DPS)</i>	45	\$ 100,000.00	\$ 4,500,000.00
Conductores DC	135	\$ 10,000.00	\$ 1,350,000.00
Conductores AC	135	\$ 7,000.00	\$ 945,000.00
Conductores para comunicaciones	1	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00
Contador prepago	1	\$ 70,000.00	\$ 70,000.00
Estructura o soporte metálico para baterías	140	\$ 80,000.00	\$ 11,200,000.00
Sistema de comunicaciones	1	\$ 1,000,000.00	\$ 1,000,000.00
Voltímetro	1	\$ 300,000.00	\$ 300,000.00
Estación meteorológica	1	\$ 3,500,000.00	\$ 3,500,000.00
Cuarto técnico	1	\$ 2,000,000.00	\$ 2,000,000.00
Capacitación del personal administrativo y técnico	1	\$ 1,000,000.00	\$ 1,000,000.00
Totales:		\$13,342,000.00	\$475,001,000.00

Elaboración propia

Los costos para la instalación de la microrred incluyeron las inversiones en capital de trabajo de un ingeniero y un ayudante durante aproximadamente un mes de trabajo de instalación en campo, los gastos pre-operativos que incluyen los costos de transporte de equipos y materiales y los viáticos para el personal técnico. También se asumió el costo de la constitución legal de la cooperativa de energía y los imprevistos, tal como se observa en la Tabla 57.

Tabla 57. Inversión inicial para instalar microrred

Concepto	Valor
1. Inversiones en equipos y materiales:	\$ 475,001,000.00
2. Inversiones en capital de trabajo:	\$ 5,500,000
3. Gastos preoperativos:	\$ 9,500,000.00
4. Conformación Cooperativa	\$ 161,600.00
5. Imprevistos (10%)	\$ 2,254,200.00
6. Inversión inicial	\$ 492,416,800.00

Elaboración propia

Los gastos de AOM del sistema y la cooperativa de energía se estimaron en COP 5,700,000 anuales, los cuales incluyen, el pago de las dos personas (administrador y técnico) por la prestación de sus servicios, más los costos de traslado a la cabecera municipal para realizar pagos y consignaciones a la entidad bancaria y para gestionar el subsidio de combustible. Adicional a ello también se consideró un costo de mantenimiento anual de la planta diésel de COP 250,000.

Para poder calcular la cuota mensual del microcrédito, se consultó en las diversas entidades financieras que ofrecen microfinanzas a este tipo de población y encontramos que la entidad Banco W, es la más conveniente debido a que hace el préstamo por valores superiores a COP 100 millones de pesos, el tiempo de pago es uno de los más amplios (60 meses) y tiene una de las tasas de interés más bajas del mercado con un valor de DTF+12.20% EA. Por esta razón se consideraron estos datos para la simulación del crédito y el esclarecimiento de la cuota mensual a pagar. No fueron simulados otras entidades bancarias ya que no cumplían con el monto a solicitar (COP 492,416,800), o las tasas de interés superaban la del Banco W. La simulación del crédito se puede observar en la Tabla 58.

Tabla 58. Simulación de capital compuesto (intereses sobre los intereses) inversión inicial microrred – Modelo 3

Inversión

Crédito	\$492,416,800
Tasa EA	14.3%
Tasa Liquidación Mensual	1.12%
Tiempo Meses	60
Cuota Mensual	\$11,319,923.47

Periodo	Cuota	Intereses	Abono	Saldo
0	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 492,416,800.00
1	\$ 11,319,923.47	\$ 5,522,681.94	\$ 5,797,241.53	\$ 486,619,558.47
2	\$ 11,319,923.47	\$ 5,457,663.19	\$ 5,862,260.27	\$ 480,757,298.19
3	\$ 11,319,923.47	\$ 5,391,915.24	\$ 5,928,008.23	\$ 474,829,289.96
4	\$ 11,319,923.47	\$ 5,325,429.88	\$ 5,994,493.58	\$ 468,834,796.38
5	\$ 11,319,923.47	\$ 5,258,198.87	\$ 6,061,724.60	\$ 462,773,071.78
6	\$ 11,319,923.47	\$ 5,190,213.83	\$ 6,129,709.64	\$ 456,643,362.14
7	\$ 11,319,923.47	\$ 5,121,466.30	\$ 6,198,457.17	\$ 450,444,904.97
8	\$ 11,319,923.47	\$ 5,051,947.74	\$ 6,267,975.73	\$ 444,176,929.25
9	\$ 11,319,923.47	\$ 4,981,649.50	\$ 6,338,273.97	\$ 437,838,655.28
10	\$ 11,319,923.47	\$ 4,910,562.82	\$ 6,409,360.64	\$ 431,429,294.63
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
59	\$ 11,319,923.47	\$ 249,707.66	\$ 11,070,215.81	\$ 11,194,373.40
60	\$ 11,319,923.47	\$ 125,550.07	\$ 11,194,373.40	\$ 0.00

Elaboración propia

El flujo de egresos del proyecto se realizó a 5 años (durante el periodo de financiación); en este se encuentran contemplados los valores anuales de inversión inicial y pago del crédito, tal como se muestra en la Tabla 59. Con esta información se obtiene el costo total anual del modelo cooperativista y al dividirlo entre 12 meses y entre el número de usuarios, obtenemos la cuota mensual a pagar por cada hogar de La Plata, durante el tiempo del crédito.

Tabla 59. Flujo de egresos y cuota de crédito – Modelo 3

Periodo	Inversión inicial	Gastos administrativos y mantenimiento	Pago crédito	Cálculo del costo total modelo Cooperativa	Cálculo del costo total mensual modelo cooperativa	Cálculo del costo por usuario mensual modelo cooperativa
0	\$ 492,416,800	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
1	\$ -	\$ 5,950,000.00	\$135,839,081.6	\$141,789,081.61	\$ 11,815,756.80	\$ 262,572.37
2	\$ -	\$ 6,128,500.00	\$135,839,081.6	\$141,967,581.61	\$ 11,830,631.80	\$ 262,902.93

3	\$	-	\$ 6,312,355.00	\$135,839,081.6	\$142,151,436.61	\$ 11,845,953.05	\$263,243.40
4	\$	-	\$ 6,501,725.65	\$135,839,081.6	\$142,340,807.26	\$ 11,861,733.94	\$263,594.09
5	\$	-	\$ 6,696,777.42	\$135,839,081.61	\$142,535,859.02	\$ 11,877,988.25	\$ 263,955.29

Elaboración propia

Los resultados arrojan que la comunidad debe pagar una cuota mensual de COP11,846,412.77 a la entidad bancaria, esto determina que cada usuario debe pagar mensualmente durante cinco años una cuota de COP 263,253.62. Inicialmente la tarifa es muy alta para los habitantes de La Plata, no obstante, una vez se finalice el crédito, la cooperativa deberá continuar su funcionamiento para garantizar la AOM del sistema de generación, y en este caso solamente se incurrirán en los costos de este concepto, los cuales corresponderían aproximadamente con COP 6,696,777.42 anuales por toda la comunidad o COP 12,401.44 mensuales por usuario.

En este modelo no es necesario analizar la evaluación financiera para el prestador, puesto que el proyecto se realiza a través de un préstamo con una entidad microfinanciera y la cooperativa de energía es una entidad sin ánimo de lucro.

5.4.1.4 Donación

El modelo financiero cuatro es un modelo muy común en los proyectos de electrificación rural, en donde una entidad de cooperación nacional o internacional, entrega en donación el sistema de generación a los habitantes de una comunidad. En Colombia este modelo es ampliamente utilizado e impulsado por las organizaciones como el IPSE y los fondos de apoyo financiero como el FENOGE, FAZNI, entre otros. Sumado a estas empresas, la USAID ha invertido miles de millones de pesos en la electrificación de poblaciones en Colombia y en el mundo.

El modelo es una opción muy interesante para los habitantes de las poblaciones con carencia en este servicio público, sin embargo, los recursos de la nación (a través de estos programas) y de las ONGs no son suficientes para lograr la electrificación en un corto plazo. El ministerio de minas y energía a declarado que con la estrategia actual, no se logrará la universalización de la energía en Colombia sino hasta el año 2050, periodo extremadamente largo si se desea cumplir con los ODS a los que se comprometió el país, al año 2030; por lo tanto en el decreto 1623 de 2015, se reformuló el marco de lineamientos de política para la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica, invitando e incentivando la inversión privada en proyectos de electrificación rural en las ZNI de Colombia.

A pesar de esto, el modelo financiero 4 diseñado para la comunidad de La Plata, se elaboró en el marco de una posible donación de la microrred a los habitantes de la comunidad, donde una entidad sin ánimo de lucro entrega instalada y en operación el sistema a la población, mientras que los habitantes se asocian comunitariamente para garantizar la AOM del sistema.

5.4.1.4.1 Modelo para la AOM

La AOM del sistema de energía debe adjudicarse a la comunidad de La Plata, a través de una asociación comunitaria energética, quien estará encargada de garantizar el funcionamiento del sistema durante todo el tiempo de vida útil.

El esquema de AOM de este modelo financiero es muy similar al de la cooperativa de energía, no obstante, no hay que conformar legalmente ante la cámara de comercio la asociación, sino que la misma comunidad debe elegir las personas idóneas para realizar esta labor y la estructura de su funcionamiento.

En este modelo se debe conformar un grupo de líderes, quienes se capaciten técnicamente en la operación y mantenimiento de la microrred, también debe haber un administrador del sistema, todos ellos recibirán una remuneración por las actividades que realice.

Dentro de las obligaciones de esta asociación comunitaria están, 1. Administrar, operar y hacer mantenimiento a la microrred, 2. Administrar la asociación comunitaria energética, 3. Facturar el aporte mensual y recolectar el dinero de los usuarios, 4. Gestionar los subsidios del gobierno en el marco del combustible para la planta diésel, 5. Gestionar los incentivos tributarios que apliquen en su funcionamiento, 6. Hacer los pagos de prestación de servicio a el personal técnico y administrativo del sistema de generación.

Los costos de la AOM, están asociados a la generación de mínimo 2 empleos, uno para la parte administrativa y otro para la parte técnica, un transporte mensual a la cabecera municipal para gestionar los subsidios del gobierno, el mantenimiento anual de la planta diésel y un valor por eventuales imprevistos para mantenimientos correctivos, compra de materiales o reemplazo de equipos. El costo anual de AOM en la comunidad se estima en COP 8,204,200.

5.4.1.4.2 Esquema Tarifario

En el modelo en donación, la organización financiadora deberá asumir los costos de inversión inicial, los cuales están calculados en COP 495,255,200, tal como se observa en la Tabla 60 y en el anexo n°3.

Tabla 60. Inversión inicial microrred – Modelo financiero 4

Concepto	Valor
1. Inversiones en equipos y materiales	\$ 475,001,000.00
2. Inversiones en capital de trabajo	\$ 8,500,000
3. Gastos preoperativos	\$ 9,500,000.00
4. Imprevistos (10%)	\$ 2,254,200.00
5. Inversión inicial	\$ 495,255,200.00

Elaboración propia

En el concepto de capital de trabajo se incluyó el costo de un ingeniero quien formula y presenta el proyecto para la donación ante la ONG, valorado en COP 3,000,000.

Es importante resaltar que esta microrred fue diseñada considerando la mayor cobertura posible, capacidad del sistema, calidad en las tecnologías, adaptación de las tecnologías al tipo de región, y con los costos más asequibles del mercado, por lo tanto, es un excelente diseño a ser considerado e implementado a través de uno de los modelos financieros seleccionados. La ONG o empresa financiadora, puede tener total seguridad de que los costos son bajos con respecto a otras instalaciones como, por ejemplo, la microrred de Punta Soldado (comunidad cercana), la cual tiene una capacidad instalada de 74kWp y tuvo un costo de inversión inicial de COP 1,725,781,184; tres veces y medio más costosa que la microrred diseñada para La Plata, con una capacidad instalada mayor (128kWp).

Una vez definidos estos valores iniciales, se procedió a realizar el flujo de egresos del proyecto y a calcular la cuota mensual que deben pagar los habitantes para garantizar la AOM del sistema de generación. Dichos resultados se observan en Tabla 61, donde la tarifa mensual promedio proyectada a 25 años de uso del sistema es de COP 997,063.65 por comunidad o COP 22,156.97 por usuario a un costo nivelado promedio de \$54/kWh.

Tabla 61. Flujo de egresos – Modelo 4

Periodo	0	1	2	3
Gastos administrativos y mantenimiento	\$ -	\$ 8,204,200.00	\$ 8,450,326.00	\$8,703,835.78
Cálculo del Costo total mensual - modelo donación	\$ -	\$ 683,683.33	\$ 704,193.83	\$ 725,319.65
Cálculo del costo por usuario mensual modelo donación	\$ -	\$ 15,192.96	\$ 15,648.75	\$ 16,118.21

Elaboración propia

El modelo 4 no incluye evaluación financiera, puesto que el sistema es una donación y no hay retorno de la inversión.

5.4.2 Integración de los criterios analizados

Con el propósito de integrar los criterios analizados en busca de la auto sostenibilidad de un proyecto de electrificación rural para una comunidad en una ZNI colombiana, se utilizó una herramienta de toma de decisiones, más específicamente la técnica de método de factores ponderados (variación de análisis costo – beneficio) utilizada ampliamente por la ingeniería industrial en la administración de operaciones.

Esta técnica consiste en la comparación de diversas alternativas en el marco de unos criterios o factores definidos por los interesados. En este caso se evaluaron cuatro alternativas que corresponden con los modelos financieros desarrollados y cuatro criterios que corresponden con los componentes de sostenibilidad de estos proyectos (técnico, económico, social y ambiental).

El procedimiento para aplicar la técnica consiste en asignar una ponderación relativa a cada factor dependiendo de las preferencias o jerarquía de unos sobre otros. La suma de las ponderaciones de los factores debe dar 100%. La ponderación que se asignó a los factores analizados se extrajo del análisis multicriterio que se realizó en el programa de investigación para ZNI en Colombia, en donde un grupo de expertos multidisciplinarios definieron qué factores o criterios eran más importantes y en qué porcentaje, con el ánimo de garantizar su sostenibilidad. Dicho análisis arrojó que el criterio más importante es el social con un 41%, seguido del ambiental con un 23%, el técnico 19% y por último el financiero 17%.

Una vez se definió la ponderación se sometió a evaluación de expertos en este tipo de proyectos, los cuatro modelos financieros, por medio de una encuesta digital, para que bajo su concepto se otorgara una calificación entre 1 y 4, donde 4 corresponde con la calificación más alta, es decir el modelo que más recomienda y 1 para el modelo menos recomendado.

El instrumento se aplicó de manera virtual a través de un cuestionario de google con la siguiente dirección <https://forms.gle/HMHjqC2VEuXvo7QaA>. De 11 convocados, se obtuvo respuesta positiva de 8 expertos, 2 del área técnica, 3 del área financiera, 1 ambiental, y 2 social. Los resultados fueron promediados por área de experticia y de allí se obtuvieron los puntajes que se encuentran en la Tabla 62. Las calificaciones fueron relacionadas con la ponderación asignada de tal manera que se obtuvieron los resultados de la Tabla 63.

Tabla 62. Método de factores ponderados – calificación de expertos

Factores/Alternativas	Ponderación	Modelo1	Modelo2	Modelo3	Modelo4
Técnico	19%	2.5	2	2.5	2.5
Financiero	17%	3.3	2.7	1.3	2.7
Social	41%	2	2	3.5	2.5
Ambiental	23%	4	3	2	2

Fuente propia

Tabla 63. Método de factores ponderados – ponderación

Factores/Alternativas	Modelo1	Modelo2	Modelo3	Modelo4
Técnico	0.5	0.4	0.5	0.5
Financiero	0.6	0.4	0.2	0.4
Social	0.8	0.8	1.4	1.0
Ambiental	0.9	0.7	0.5	0.5
Total	2.8	2.3	2.6	2.4

Fuente propia

Los puntajes finales son sumados, de tal manera que el modelo con mayor puntuación será el más recomendado desde la opinión de los expertos y las ponderaciones asignadas en la investigación previa. En la Tabla 64 se puede observar que el modelo 1 de ventanilla única es el modelo que más puntaje recibió al tener valores altos en casi todos los factores, mientras que el modelo 2 PAYGo recibió la calificación más baja.

Tabla 64. Método de factores ponderados – resultado

Modelo	Promedios
Modelo1 - Ventanilla Única	2.8
Modelo3 - Cooperativa Energía	2.6
Modelo4 - Donación	2.4
Modelo2 - PAYGo	2.3

Fuente propia

Adicional a la calificación, los expertos, dieron sus justificaciones y opiniones frente a cuál modelo es el más recomendado para esta comunidad y el por qué. En la siguiente tabla se muestran las principales opiniones por área de experticia.

Tabla 65. Método de factores ponderados – opinión de expertos

Justificación expertos técnicos	<p>Los expertos técnicos se han inclinado por el modelo 1 ya que se considera prioritario, mantener el servicio eléctrico, atender los eventos, reducir los tiempos de caída y reponer las baterías. Cuando es la familia o la asociación comunitaria quien garantiza esto, es menos sostenible que cuando lo hace el prestador del servicio; por lo tanto, la venta del servicio de energía de parte de un tercero es la garantía de la prestación.</p> <p>Adicionalmente, consideran que el modelo 4 es una opción muy interesante al tratarse de una microrred, un sistema más robusto, centralizado y con mayor capacidad de generación, sin embargo, se menciona que financieramente el modelo 1 y 2 sería la mejor opción.</p>
Justificación expertos financieros	<p>Los expertos financieros se han inclinado por el modelo 1 y modelo 2, ya que el primero (ventanilla única) genera la posibilidad de crear un servicio público en beneficio de la comunidad a costos bajos y el segundo (PAYGo) tiene menores erogaciones, pero exige, en los primeros tres años, asumir una cuota mensual de más del doble de la opción 1.</p>
Justificación expertos sociales	<p>Los expertos en el área social han manifestado preferencia por los modelos 3 y 4, gracias a que, por el nivel de organización de la comunidad de La Plata, las estrategias de agrupación comunitaria son muy viables y beneficiosas para ellos. Sin embargo, se considera que adquirir un préstamo a través de la cooperativa tiene un gran riesgo para la comunidad.</p>
Justificación expertos ambientales	<p>El experto ambiental considera que los modelos 1 y 2 son los más asequibles para la comunidad de La Plata, conociendo su contexto socio – económico ya que este genera una tarifa que puede ser parada por lo habitantes, adicional a ello al ser financiado y manejado por un tercero garantiza la continua prestación del servicio y el mantenimiento y menor impacto medio ambiental.</p>

Elaboración propia a partir de las encuestas realizadas

Los resultados de la integración de los criterios, arroja por lo tanto, que según los expertos los modelos más convenientes para la comunidad son el de ventanilla única en primer lugar y modelo de PAYGo, sin embargo al hacer la ponderación de los factores y al considerarse que el factor social es el más importante con un 41% de prioridad, la metodología prioriza en segundo y tercer lugar los modelo 3 y 4 (cooperativa de energía y donación) debido a la bondades que estos dos modelos presentan en términos de las estrategias de agrupación comunitaria, la generación de empleos y la dinámica económico-social que podrían traer.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La comunidad de La Plata es un asentamiento que se encuentran en una importante condición de vulnerabilidad debido a sus altos índices de pobreza multidimensional (42.01%) y pobreza monetaria (75%), causadas por carencias en múltiples servicios públicos, aspectos que retrasan su crecimiento económico y limitan su calidad de vida la cual se ve reflejada en los ingresos mensuales que se encuentran por debajo de 1SMMLV. 4 de cada 10 habitantes de la comunidad son multidimensionalmente pobres con altas privaciones en indicadores como el trabajo formal, y el acceso a servicios públicos vitales tales como, la salud, fuente de agua mejorada y educación.

En esta región existe un gran potencial de explotación turístico y de comercialización de productos marinos, que la comunidad podría aprovechar mejor si tuviera acceso a servicios como energía eléctrica; por ejemplo, el pescado y la piangua podrían conservarse mejor mediante una cadena de frío para su posterior explotación.

Los platences se caracterizan por ser una población muy organizada, optimista, social, religiosa y emprendedora de proyectos que puedan mejorar sus ingresos y bienestar, por lo tanto, son conscientes de las bondades de la generación de energía renovable en especial a través de los sistemas solares FV para este tipo de regiones. Ellos están dispuestos a pagar un poco más por obtener este servicio ya que traería muchos beneficios para sí mismos.

Es importante resaltar que a pesar de que en promedio el nivel de gastos de una familia sobrepasa sus ingresos mensuales, un 59% de la población puede tener un ahorro promedio de \$50,429, lo cual sumado a los gastos en energía eléctrica actual (\$20,833) puede significar un presupuesto de \$71,262 pesos mensuales para realizar una inversión en un sistema de generación, que podría mejorar su calidad de vida y productividad laboral.

Para el resto de la comunidad (42%) la cual tiene una condición menos favorable a nivel monetario, un presupuesto de \$20,000 mensuales que gasta actualmente en el sistema de generación, significaría un aporte a un nuevo sistema que garantice más horas de servicio y que pueda mejorar sus condiciones económicas y obtener más ingresos.

Después de los cálculos realizados en términos del potencial de la generación de energía renovable y la demanda, se puede observar que La Plata tiene un excelente potencial solar y una demanda total de energía de 596.91 *kWh/día*, la cual puede ser suplida por un sistema híbrido centralizado o por sistemas solares individuales, no obstante para cubrir el total de la demanda al año se requeriría una inversión inicial de \$854 millones de pesos, con 195 paneles y 703 baterías, generando un vertido de renovables de 24.31kW al año, lo cual es muy elevado y expone un sobre dimensionamiento del sistema. Una opción más interesante se obtiene cuando se limita el presupuesto de inversión a \$492,416,800, donde se alcanzaría una cobertura de 95.75% y un vertido anual de 8.59kW. Este diseño es más realista y su costo es relativamente bajo para un sistema tan robusto como lo es una microrred comparada con el de otras aplicaciones en el país.

La topología de la microrred diseñada constaría de 320 paneles solares policristalinos de 400W a 40 V con un área de $2m^2$ y una eficiencia del 20%, 140 baterías solares en gel de 200Ah a 48V, 5 reguladores de 450W a 200A, 12 inversores de 4kW a 48V y una planta diésel de 12 kW, para una capacidad total de 128.8kWp.

Adicional al sistema de microrred, fueron analizados 3 escenarios, con un perfil de carga bajo, medio y alto, relacionado con la realidad de la comunidad. Fue necesario evaluar un caso en donde la generación de energía no se realice con una microrred, sino con sistemas solares individuales y una planta diésel comunitaria. Esta otra configuración se analizó por restricciones en la capacidad física del terreno que tiene habitada la comunidad, así como, por la necesidad de evaluar si un sistema solar individual diseñado a la medida del cliente en términos de su capacidad instalada y financiera es más asequible que un sistema centralizado. De acuerdo a nuestra geografía y estructura socio-cultural no se puede definir un solo modelo técnico (microrred) para todas las comunidades.

Para acceder a este sistema, ya sea individual o centralizado, fueron planteadas cuatro opciones de financiamiento para el pago, administración, operación y mantenimiento, ya que una de las principales problemáticas a nivel nacional e internacional en la universalización de la energía es la carencia de modelos financieros, de negocio y de estrategias de agrupación comunitaria para garantizar la sostenibilidad de los proyectos en este tipo de comunidades vulnerables [14] [13] [98] [65].

Los modelos financieros desarrollados en esta investigación generaron resultados interesantes para las comunidades de las ZNI y para los posibles inversionistas, con ventajas y desventajas desde puntos de vista técnicos, financieros, sociales y ambientales. En la Tabla 66 se elaboró un cuadro con los principales resultados de los cuatro modelos, considerando los factores que suscitan la sostenibilidad de los proyectos.

Tabla 66. Cuadro comparativo de resultados modelos financieros

Factores	Modelo financiero	Modelo 1			Modelo 2			Modelo 3	Modelo 4
		Ventanilla única			Pay As You Go			Cooperativa de energía	Donación
Información del modelo	Características del modelo	Un productor de energía financia productos energéticos a las comunidades. Cada usuario adquiere su sistema solar individual dependiendo de la carga instalada y su capacidad de pago.			La empresa PAYGo financia productos energéticos a usuarios de comunidades de bajos ingresos que pueden pagar a cuotas, de manera prepagada a través de créditos de energía y un sistema de bloqueo remoto, que activa o desactiva el sistema solar.			Los habitantes conforman jurídicamente una cooperativa de energía y tramitan un microcrédito en la entidad bancaria.	Una entidad de cooperación nacional o internacional, entrega en donación el sistema de generación a los habitantes de una comunidad.
Técnico	Tipo de sistema	Sistema solar individual	Sistema solar individual	Sistema solar individual	Sistema solar individual	Sistema solar individual	Sistema solar individual	Microrred (Sistema híbrido conformado por arreglo de paneles solares, banco de baterías y planta diésel)	Microrred (Sistema híbrido conformado por arreglo de paneles solares, banco de baterías y planta diésel)
Técnico	Capacidad del sistema de generación	280Wp	600Wp	1200Wp	280Wp	600Wp	1200Wp	128.8kWp	128.8kWp
Técnico	Cobertura de energía/carga	100%	100%	100%	100%	100%	100%	95.80%	95.80%
Técnico	LCOE \$/kWh	\$ 1,554.67	\$ 1,187.29	\$ 642.78	\$ 3,241.09	\$ 2,723.33	\$ 1,649.67	\$ 650.80	\$ 54.92

Financiero	Inversión Inicial del sistema	\$ 2,746,093.30	\$5,285,112.60	\$6,479,032.60	\$2,852,425.90	\$5,362,112.60	\$6,556,032.60	\$ 492,416,800.00	\$ -
Financiero	Tarifa promedio mensual por usuario	\$ 46,177.40	\$ 75,568.46	\$ 81,823.95	\$ 95,012.44	\$ 171,267.35	\$ 207,543.69	\$ 263,253.62	\$ 22,156.97
Financiero	TIR	17.2%			17.6%			No incluye evaluación financiera, ya que es una entidad bancaria quien hace el préstamo a la cooperativa conformada por la comunidad. La cooperativa es una entidad sin ánimo de lucro.	No incluye evaluación financiera, puesto que el sistema es una donación y no hay retorno de la inversión.
Financiero	VPN	\$ 52,555,472.49			\$ 10,871,215.62				
Financiero	Recuperación de la Inversión	10 años			3 años				
Financiero	Tiempo de financiación	25 años			3 años				
Financiero	Tasa de interés EA	4%			6%			DTF+12.20%	0%
Social	Propiedad del activo de generación	Propiedad del prestador del servicio (empresa de energía)			Propiedad del usuario una vez finalice la financiación			Propiedad del banco mientras se paga el crédito. Una vez se pague en su totalidad pasará a ser propiedad de la comunidad.	Propiedad de la comunidad.
Social	Facturación	Retroactiva por medio de la tarifa mes vencido			Prepago, por créditos de energía que dependerá de la tarifa mensual			La tarifa refleja la cuota mensual que se debe pagar al banco por el tiempo del crédito. Facturación mes vencido.	Mes vencido. La tarifa solamente incluye los costos de AOM e imprevistos.

Social	AOM	A cargo del prestador del servicio. Un trabajador se desplaza mensualmente a la comunidad para hacer mantenimiento del sistema, hacer el cobro de la facturación y entregar la facturación del mes siguiente.	A cargo de la empresa PAYGo y la comunidad. Un habitante de la comunidad ejerce la labor de administrador del sistema, hace los cobros, vende los códigos de desbloqueo del sistema, tiene contacto directo con el operador PAYGo y hace mantenimiento a los SSI.	La comunidad conforma legalmente una cooperativa de energía. La comunidad se encarga de la AOM de la cooperativa y del sistema de generación. Es autónoma e independiente de terceros.	La AOM del sistema de energía debe adjudicarse a la comunidad, a través de una asociación comunitaria energética, quien estará deberá garantizar el funcionamiento del sistema durante todo el tiempo de vida útil.
Social	Generación de empleo	Genera un empleo para el prestador del servicio, mas no en la comunidad.	Genera empleo para la comunidad mediante la AOM del sistema	Generación de empleos a través de la cooperativa de energía.	Generación de empleos a través de la asociación comunitaria de energía.
Ambiental	Área a intervenida	2m2 por vivienda	2m2 por vivienda	240m2 en el territorio	240m2 en el territorio
Ambiental	Cambio climático: Vulnerabilidad	La vulnerabilidad para todos los tipos de sistemas es considerada media (3) a partir de los datos del mapa del instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, gracias a que los componentes electrónicos pueden sufrir oxidación en la estructura, por la salinidad del ambiente.			
Ambiental	Afectación especies	15.04%	15.04%	96.33%	96.33%
Ambiental	Generación CO2	28.54 kgCO2/año	28.54 kgCO2/año	28.54 kgCO2/año + 21201.7 kgCO2/año tecnología diésel	28.54 kgCO2/año + 21201.7 kgCO2/año tecnología diésel

Información Adicional	El usuario siempre pagará por la prestación del servicio, pero el sistema nunca será de su propiedad.	Una vez el usuario pague el sistema de generación individual, después de 3 años, disfrutará gratuitamente del sistema por el resto de su vida útil.	Una vez se pague el crédito al banco, los usuarios solamente pagarán el costo de la AOM del sistema. La tarifa mensual promedio cambiaría a \$12.400/usuario.	A pesar de que este modelo sea tan atractivo para la comunidad en términos de los costos, es un modelo que es muy poco probable de acceder ya que los recursos del estado no han sido suficientes para garantizar el suministro de energía a todos los habitantes del país.
	Comunidad afrodescendiente, de actividad pesquera. Población de 225 personas aprox, 45 viviendas. Demanda de 596 kWh/día. Ingresos mensuales promedio por vivienda de \$ 675,000. La zona hace parte del Parque Natural Nacional Uramba.			

Elaboración propia

Las tarifas del modelo 1 son más asequibles para la comunidad de La Plata, puesto que corresponden con los ahorros promedio que pueden generar los habitantes a partir de sus actividades económicas. Sin embargo, en este modelo, la tarifa debe ser pagada por todo el tiempo de vida útil del sistema (25 años) y no pasará en ningún momento a ser propiedad del usuario, aunque este goce totalmente de su servicio.

Las tarifas del modelo 2 son más elevadas que las tarifas del modelo 1, sin embargo, hay que reconocer que este sistema será pagado en tan solo 3 años y una vez se finalice este periodo, el sistema solar pasará a ser propiedad del usuario, quien lo utilizará “gratuitamente” por el resto de su vida útil. Adicional a ello posee valor agregado en el marco de la sostenibilidad social, al generar empleo para la comunidad y una mayor dinámica económica.

El modelo financiero 1 es más rentable para el inversionista que el modelo financiero 2, debido a que la tasa interna de retorno es mayor en un 27.32% a una tasa de interés del 4%. No obstante, si se incrementa la tasa de interés al 6% (al igual que las empresas PAYGO internacionales) el negocio se vuelve más rentable que el modelo 1 con una TIR del 17.6% (2.3% mayor que la TIR del modelo 1), mientras que las tarifas para el usuario incrementarían solamente en un 2.8% en promedio, es decir, que si un usuario del escenario bajo paga una tarifa mensual de COP 90,340.69, a una tasa de interés del 6% pagará COP 92,787.48.

El costo nivelado del modelo financiero 1 es más bajo, que el costo nivelado del modelo financiero 2; sin embargo, el costo que asume el usuario de la comunidad en el modelo 1 es por un periodo de 25 años, mientras que el costo del modelo 2, es asumido por solamente 3 años.

En términos de los riesgos de inversión, el modelo financiero 2 genera menor riesgo al tener un retorno de la inversión en 3 años, mientras que el modelo 1 tiene un retorno a 10 años, no obstante, los periodos de recuperación son menores que en los artículos revisados en donde este supera los 12 años [92]. Los compromisos entre el usuario y la empresa financiadora son más extensos para el modelo 1 (25 años), mientras que para el modelo 2 es de solo 3 años. La estrategia de pago a través de créditos de energía prepagados minimiza el riesgo de atraso en las cuotas del crédito, sin embargo, en este modelo 2 las tarifas son dos veces más altas que en el modelo 1.

En las Tabla 67 y Tabla 68 se pueden observar las principales ventajas y desventajas de los modelos financieros 1 y 2.

Tabla 67. Ventajas y desventajas del modelo financiero 1. Modelo de ventanilla única

Ventajas	Desventajas
La empresa prestadora del servicio puede acceder a incentivos tributarios como, exención del IVA en productos renovables y deducción especial sobre el impuesto de renta.	La empresa prestadora del servicio asume el riesgo de inversión.

Por un valor de COP 46,177, COP 75,568 y COP 81,823 (escenario bajo, medio y alto) los habitantes de la comunidad pasan de tener servicio de 4 horas de energía a 24 horas al día.	A pesar de que el modelo está diseñado para tres escenarios de carga baja, medio y alta, inclusive el sistema de carga baja genera una tarifa mensual que no puede ser pagada por el 31% de la población.
Conciencia frente al impacto ambiental, al generar energía renovable y limpia. Disminución de las emisiones de CO2.	El usuario paga una tarifa fija por la presentación del servicio de energía eléctrica, más no es el dueño del activo o del sistema.
Seguridad e independencia energética para cada habitante.	La AOM la realiza el prestador del servicio, por lo tanto, el modelo no implica la generación de empleos para la comunidad.

Fuente propia

Tabla 68. Ventajas y desventajas del modelo financiero 2. Modelo PAYGo

Ventajas	Desventajas
La empresa prestadora del servicio puede acceder a incentivos tributarios como, exención del IVA en productos renovables y deducción especial sobre el impuesto de renta.	La empresa prestadora del servicio asume el riesgo de inversión.
Por un valor de COP 90,340.69, COP 164,442.82 y COP 199,695.03 (escenario bajo, medio y alto) los habitantes de la comunidad pasan de tener servicio de 4 horas de energía a 24 horas al día.	A pesar de que el modelo está diseñado para tres escenarios de carga baja, medio y alta, el modelo produce una tarifa mensual que no puede ser pagada por el 40% de la población.
Conciencia frente al impacto ambiental, al generar energía renovable y limpia. Disminución de las emisiones de CO2.	Se debe incrementar la tasa de interés para hacer más atractivo el negocio para un inversionista.
Seguridad e independencia energética para cada habitante.	
El usuario paga una tarifa por la adquisición del SSI y en un periodo de 3 años pasará a ser propietario de su sistema.	
La AOM la realiza el prestador del servicio, por lo tanto, el modelo genera empleos para la comunidad.	
El modelo financiero 2 tiene una TIR de 17.6% y un VPN de COP 10,871,215.62 a tres años. Este modelo es más rentable para el inversionista, si lo comparamos con el modelo 1.	

Fuente propia

Como conclusión podemos interpretar que el modelo financiero 1 de ventanilla única es más asequible para la comunidad, puesto que genera unas tarifas más bajas que pueden ser pagadas por el 69% de la población, así como un LCOE menor; sin embargo, el modelo financiero 2 PAYGo es más atractivo y rentable para un inversionista al generar una utilidad mayor en mucho menos tiempo. Esto es importante ya que, si el modelo de negocio es atractivo, promueve y alienta a los inversionistas a destinar sus recursos en este tipo de operaciones comerciales, lo que a su vez es beneficioso para las comunidades y el país, al convertirse en un mercado más atendido.

El modelo financiero 2 es socialmente más sostenible al generar empleo y mayor dinámica económica para la comunidad, además, existe el incentivo de que en tan solo 3 años el usuario será propietario de su propio sistema y no tendrá que volver a pagar por este servicio hasta que las tecnologías cumplan con su vida útil.

El modelo financiero 3 en donde se conforma una cooperativa de energía en la comunidad, fue simulado para la implementación de una microrred, porque la esencia del proyecto es la solicitud de un microcrédito a una entidad bancaria para comprar las tecnologías y realizar la implementación del sistema de generación comunitario. La microrred es un sistema mucho más costoso que la electrificación de la población a través de SSI; esto se debe a que una microrred es un sistema mucho más robusto, con tecnologías de potencia y calidad más elevadas para garantizar el control y monitoreo de la misma. En la Tabla 69 se elaboró un cuadro comparativo donde se observa el costo de la inversión inicial de la microrred vs el costo de la implementación de sistemas solares individuales para toda la comunidad, el cual es 68% más costoso.

Tabla 69. Comparativo inversión inicial microrred y sistemas solares individuales para toda la comunidad

Inversión inicial Microrred Capacidad sistema 128kWp	Inversión inicial SSI para toda la población Capacidad SSI 1200Wp
\$ 492,416,800.00	\$ 291,556,440

Elaboración propia

A pesar de esto, una microrred es un sistema de generación que brinda mayor seguridad y confiabilidad en el suministro de energía gracias a las diversas fuentes y tecnologías de generación, mientras que el sistema solar solo posee una fuente y un periodo de autonomía de 2 días. Asimismo, si el usuario del SSI desea incrementar su consumo de energía tendría que invertir en nuevas tecnologías como paneles o baterías.

Otra ventaja que brinda este modelo en comparación con el modelo 1 y 2, es que una vez se finalice el periodo de financiación (5 años), la comunidad ya no pagará por el sistema; solamente deberá mantener la estrategia de agrupación comunitaria para la AOM bajo una tarifa de \$12,400/usuario al mes; dicho valor es más bajo que el que actualmente paga la comunidad por adquirir el subsidio del gobierno en combustible diésel (\$20,000/usuario mes) por solo 4 horas de servicio al día. Adicionalmente el modelo posee un potencial de sostenibilidad social más alto que los demás modelos, al implementarse una estrategia de agrupación comunitaria moderna y novedosa, en donde la población gestiona, maneja y administra su sistema, sin intermediación, lo cual genera mayor dinámica económica y compromiso social.

Al ser un sistema costoso pero robusto, este modelo financiero genera las tarifas más altas para la comunidad, en comparación con los otros tres modelos financieros. Dichas tarifas no

podrían ser pagadas por los usuarios de La Plata, considerando que sus ingresos mensuales son aproximadamente \$675,000 por vivienda.

El modelo 3 tiene un riesgo financiero alto gracias al alto costo de inversión inicial, las altas tarifas que debe asumir el usuario y el tiempo del crédito, aspecto que ha sido resaltado por los principales autores en esta problemática [30] [12]. Cabe destacar que si la comunidad incumple con las cuotas se generarán intereses de mora y en el peor de los casos el embargo de la microrred.

El modelo 4 es el modelo con las tarifas más bajas a pagar por la comunidad con un valor promedio de \$22,156/usuario al mes que solo sufragaría los costos de AOM, sin embargo, es un modelo con muy baja probabilidad de realización puesto que depende de la voluntad de un donante externo.

En términos del componente social es un modelo similar al modelo 3, en donde la comunidad debe asociarse comunitariamente y generar unos empleos para garantizar la AOM del sistema. Esto produce una dinámica social y económica muy positiva para los habitantes. En este modelo no se hace evaluación para el inversionista ya que este no recuperará la inversión y por lo tanto no es un negocio.

Es importante destacar que esta microrred fue diseñada considerando la mayor cobertura posible, capacidad del sistema, calidad en las tecnologías, adaptación de las tecnologías al tipo de región, y con los costos más asequibles del mercado, por lo tanto, es un excelente diseño a ser considerado e implementado a través de uno de los modelos financieros seleccionados. La ONG o empresa financiadora, puede tener total seguridad de que los costos son bajos con respecto a otras instalaciones.

En conclusión, el modelo que genera las tarifas más bajas para la comunidad es el modelo 4 (donación), sin embargo, los modelos más asequibles considerando todos los factores, son el modelo 1 (ventanilla única), segundo modelo con las tarifas y tasa de interés más bajas para la población y el modelo 2 (PAYGo). El modelo más rentable para el inversionista es el modelo 2 (PAYGo) con la TIR más elevada y un periodo de recuperación de la inversión muy corto (3 años). El modelo menos asequible financieramente para la población es el 3 (cooperativa energética) puesto que genera las tarifas más altas, imposibles de pagar por los habitantes de esta comunidad considerando sus ingresos promedio. Los modelos 1 y 3, son los que poseen mayor riesgo financiero, al tener los periodos más altos de financiamiento. Los modelos 1 y 2 son los ambientalmente más responsables al tener muy bajo impacto sobre el área a intervenir, la afectación a especies y las emisiones de gases contaminantes. Los modelos 2, 3 y 4 son los socialmente más sostenibles, por que requieren la implementación de una estrategia de agrupación comunitaria para la AOM del sistema y la generación de empleos para la comunidad. El modelo 1 es el único en donde el usuario no será propietario o copropietario del sistema de generación. El sistema de generación técnicamente más robusto y seguro es la microrred contemplada en los modelos financieros 3 y 4. Los LCOE más bajos se obtienen con los modelos 4, 3 y 1, respectivamente.

Como se mencionó al inicio de los análisis frente a los modelos financieros, cada uno de los resultados muestra ventajas y desventajas desde los cuatro criterios analizados (técnico, económico financiero, social y ambiental), por lo tanto, la integración de los criterios a través de una técnica para la toma de decisiones fue necesaria en este ejercicio investigativo.

Los resultados del método de factores ponderados elaborado a partir de la opinión de los expertos frente a los modelos financieros simulados, muestra que hay una preferencia por el modelo de ventanilla única, y las razones son argumentadas en términos de la sostenibilidad técnica en la garantía de la prestación del servicio a cargo de un tercero, las tarifas bajas y asequibles para la población y el menor impacto medio ambiental, sacrificando un poco el impacto social que es mayor en los otros modelos.

Los expertos se han inclinado por el modelo 1 ya que se considera prioritario mantener el servicio eléctrico, atender los eventos, reducir los tiempos de caída y reponer las baterías. Cuando es la familia o la asociación comunitaria quien garantiza esto, es menos sostenible que cuando lo hace el prestador del servicio; por lo tanto, la venta del servicio de energía de parte de un tercero es la garantía de la prestación. Esta justificación concuerda con uno de los principios rectores de las empresas que han desarrollado modelos de negocio para proveer energía a zonas rurales de bajos ingresos, en donde construir y mantener la confianza entre el consumidor y el productor a través de una cadena de suministro es indispensable para la sostenibilidad y asequibilidad de los proyectos [12] [101], beneficio que brindan los modelos 1 y 2 de la investigación.

Según los expertos, los modelos de cooperativa de energía y donación son en segundo y tercer lugar más interesantes, gracias a sus bondades sociales en la generación de empleo y la modificación de la dinámica socio-económica para la población, sin embargo, estos modelos, en el primer caso (cooperativa) genera un gran riesgo financiero para la población al adquirir un crédito de tan alto valor para los habitantes y unas tarifas que difícilmente podrían ser pagadas por los hogares. En el segundo caso (donación) se es muy consciente de que es un modelo con muy bajas posibilidades de realización.

El modelo de PAYGo a pesar de que posee los mayores beneficios para el inversionista, es el menos valorado en el método de factores ponderados, gracias a las altas tarifas y menor impacto social que los modelos 3 y 4. Pese a ello, este modelo genera menos erogaciones en el largo plazo puesto que el periodo de financiación es de solo 3 años y el sistema se convertiría en propiedad privada del usuario, así mismo, según el Grupo Consultivo de Ayuda a los Pobres (CGAP) del Banco Mundial, las empresas proveedoras que quieren vender energía solar como un servicio a este segmento de clientes, pueden tener dificultades para lograr un cambio de mentalidad [108], puesto que estas comunidades consideran la energía como un dispositivo o un activo, más que un servicio.

En concordancia con la opinión de los expertos y las organizaciones internacionales como *World Resources Institute* [12] [101], *Bright Green Energy Foundation* (BGEF) y *Grameen Shakti*, esta investigación considera que el modelo de ventanilla única es el modelo más asequible para estas comunidades rurales aisladas de bajos ingresos (en especial para la zona caso de estudio, ya que genera las tarifas más bajas, mayor confiabilidad técnica y ambiental,

así como la garantía de una cadena de suministro que asegure el funcionamiento de los sistemas a través de una relación estrecha entre el usuario y el prestador.

También es importante mencionar que el modelo PAYGo es una opción muy positiva gracias a que incentiva la inversión privada, impulso que necesita el sector para lograr la universalización de la energía, e igualmente, en concordancia con los antecedentes internacionales, este modelo ha recibido los mayores niveles de inversiones para poblaciones en vía de desarrollo [104] con la gran motivación de que cada usuario es propietario de sus sistema renovable en el corto plazo [108]. Este modelo es muy positivo a nivel social ya que modificaría la dinámica de la comunidad y genera empleos para la población.

A pesar de que el modelo de cooperativa energética sea un modelo socialmente muy sostenible, las altas tarifas y responsabilidades financieras hace que sea muy riesgoso y muy poco asequible para la comunidad de La Plata y para las comunidades de las ZNI; lo anterior se ve reflejado en la baja percepción de la demanda (0.6% y 0.7% para el 2020) de las 47 entidades bancarias que ofrecen microcréditos [99] a sectores con dificultades financieras y bajos ingresos en el país, a consecuencia de la baja capacidad de pago de los solicitantes [100].

En contravía con los autores [132], el modelo de cooperativa de energía no es un modelo que provea precios económicos y competitivos para generar energía a través de soluciones renovables en la comunidad de La Plata, porque este modelo implica un enorme riesgo de inversión para los usuarios a través de un crédito de aproximadamente \$500 millones de pesos que es obtenido de una entidad bancaria.

Los resultados de esta investigación han arrojado que la tarifa que un habitante debería pagar en este modelo (cooperativa energética) es de aproximadamente \$263,000/ mes, y considerando que el promedio de los ingresos de esta población es de tan solo \$675,000, dicha tarifa es improbable de pagar. Las tasas de interés que ofrecen las entidades bancarias para microcréditos son muy altas, encontrando que el de menor tasa es el Banco W con una tasa DTF+12.20%, adicional a ello la mayoría de los bancos ofrecen microcréditos de hasta \$100 millones de pesos, lo cual no es viable para la adquisición de la microrred. El modelo de cooperativa es un modelo novedoso en países industrializados y desarrollados como Alemania, España, Bélgica, Holanda, Austria y Dinamarca [132], lo que dista de las condiciones de países como Colombia y aún más, de las condiciones socio económicas de las ZNI, por lo tanto se concluye que el modelo de cooperativa energética es el modelo menos asequible y sostenible para esta comunidad y para comunidades similares en las ZNI colombianas.

Para poder implementar los modelos 2 y 3, el gobierno nacional tendría que proveer un subsidio a la tarifa o un subsidio por tecnologías renovables, con lo cual los usuarios podrían acceder a los sistemas, en concordancia con los estudios realizados por algunos autores, en donde se ha manifestado el impacto de los subsidios para este tipo de poblaciones [96].

Cualquier modelo financiero adaptado en esta investigación al contexto colombiano, en especial una ZNI del país, trae consigo el aumento del presupuesto que cada familia tiene

para cubrir este servicio, del mismo modo como lo han experimentado los usuarios de estos sistemas en modelos como PAYGo en Gambia, Kenia y Tanzania, en donde han pasado de pagar entre USD\$2 a USD\$4 por mes por la compra de Keroseno, a pagar entre USD\$6 a USD\$15 por mes en el sistema solar individual [108]. En los análisis aquí realizados los habitantes de La Plata incrementarían su presupuesto energético entre un 130% a 309% para el modelo 1.

Para finalizar, un sistema de electrificación podría mejorar la productividad de las actividades económicas brindando mejor conservación de los productos marinos que explotan en la región, la producción de artesanías, productos derivados de la madera y el servicio turístico, lo cual redundaría en un mayor ingreso mensual para las familias y a su vez la disminución de la pobreza monetaria y la pobreza multidimensional. Adicional a ello, la energía eléctrica mejoraría la calidad de vida de las personas, permitiéndoles a los niños y adolescentes culminar sus estudios de educación básica y media al lado de sus familias y no migrar de la población hacia otros municipios a temprana edad o no culminar sus estudios. Los habitantes podrían acceder a puestos de salud en la misma comunidad, incrementar las posibilidades de acceder a redes de internet y telecomunicaciones que generaría mayor conectividad con el mundo y las opciones que presenta, así como mayor nivel de capacitación y formación para sus actividades económicas básicas.

Este proyecto podría hacerse realidad a través de la implementación de un modelo financiero que sufrague un sistema de generación solar individual o una microrred por medio de los modelos de ventanilla única y PAYGo, los cuales han resultado los más asequibles en términos técnicos, económico financieros, ambientales y sociales.

La electrificación de la población traería grandes beneficios en la calidad de vida, el desarrollo productivo, social y comunitario, no solo por las bondades que proporciona poseer electricidad, sino porque modificaría la dinámica socio-económica y la generación de empleo con la implementación de las estrategias de AOM que supone el sistema.

7. CONCLUSIONES

El este capítulo se exponen las principales conclusiones por cada subcapítulo de resultados, así como las conclusiones generales del proyecto de investigación doctoral.

Actualmente La Plata cuenta con servicio de energía eléctrica desde las 6 de la tarde hasta las 10 de la noche, por lo que las actividades turísticas nocturnas están limitadas a este horario, así como la venta y comercialización de bienes al detal. La ampliación de la cobertura de energía a través de un sistema de generación impactaría de manera positiva las actividades principales de los habitantes, aumentando la productividad y los ingresos. La pesca se optimizaría al utilizar congeladores y centros de acopio que mantengan el pescado fresco apto para su comercialización, lo que ocurriría también con la piangua. Este sistema no solo traería beneficios para las actividades económicas, sino que aumentaría la calidad de vida de los platences al acercarlos a la tecnología, la diversión, la educación, entre otros.

Este tipo de proyectos de generación de energía en ZNI, deben considerar el cálculo y análisis multicriterio para determinar la alternativa que genere el menor impacto en la comunidad. Entre los factores analizados están los técnicos, económicos, financieros, sociales y ambientales.

Conclusiones de la caracterización del modelo técnico

La generación de energía en La Plata a partir de fuentes renovables es posible únicamente a través de sistemas solares fotovoltaicos, ya la velocidad del viento, la capacidad de residuos como biomasa y la fuente hídrica son escasas en la zona. La radiación promedio en la región es de 3-4 kWh/m^2 día, y su comportamiento anual es variante, con valores altos entre los meses de enero a abril y septiembre a diciembre. Los meses de mayo a agosto son los más bajos en el potencial de la fuente natural.

La demanda de energía en la comunidad, asumiendo un consumo de 24 horas es de 596.91 $kWh/día$ o 13.26 $kWh/día$ por vivienda.

Los datos de entrada requeridos por el modelo de optimización para calcular el dimensionamiento y la operación son, serie histórica horaria anual de radiación solar global en la zona, el perfil de carga o demanda de energía de la comunidad, las características de los paneles solares y las baterías, las limitaciones de combustible mensual y las capacidades de los equipos. El modelo de optimización estocástico del sistema de generación híbrido tiene asociadas cinco variables de decisión que corresponden con la potencia que cada tecnología necesita entregar y el número de componentes en paneles y baterías que se requieren para generar esa energía (P_1 , P_2 , P_{Disc} , N , y SOC).

De los resultados del modelo de optimización se puede concluir que cubrir el 100% de la demanda de energía en la comunidad de La Plata si es posible, pero en este caso el sistema quedaría sobredimensionado, generando gran cantidad de vertido de renovables, un alto costo de inversión inicial y mayor área de intervención. Por lo tanto, se opta por elegir los escenarios en donde se ha limitado el número de componentes tecnológicos y el presupuesto

de inversión, de los cuales se obtienen coberturas anuales del 82.66% y 95.8%, con inversiones de \$268 millones de pesos y \$350 millones de pesos, respectivamente.

El dimensionamiento óptimo de la microrred contiene 320 paneles solares policristalinos de 400W a 40 V con un área de $2m^2$ y una eficiencia del 20%, 140 baterías solares en gel de 200Ah a 48V, una planta diésel de respaldo de 12kW, con 200gal/mes, para una capacidad total de 128.8kWp, la cual acarrearía un costo de inversión inicial de \$492,416,800 de pesos para cubrir el 95.8% de la demanda de energía de la comunidad.

Conclusiones del análisis económico e impacto del sistema de generación

Los habitantes de La Plata se encuentran en una condición de vulnerabilidad ya que poseen un índice de pobreza multidimensional alto, en donde más del 42% de los habitantes están privados en más de 5 indicadores de las dimensiones analizadas. Los indicadores del IPM donde existe mayor privación son, barreras de acceso a servicios de salud, sin acceso a fuente mejorada de agua, trabajo informal, y bajo logro educativo. Adicionalmente, también se encuentran por debajo de la línea de la pobreza monetaria nacional recibiendo un ingreso promedio mensual promedio por habitante del hogar de \$167,500 y a nivel de hogar de menos de un SMMLV.

En el 59% de la población los ingresos superan los gastos y generan un ahorro de aproximadamente \$50,000 mensuales. En el 8% sus ingresos igualan sus gastos y en el 33% los gastos superan los ingresos.

Las actividades económicas que más generan ingresos para la comunidad son, la construcción y los productos derivados de la madera, la pesca, la recolección de piangua, y la actividad comercial en sus viviendas con la venta de productos de la canasta familiar y productos alimenticios. Los gastos con valores más altos corresponden a la alimentación, transporte, educación y combustible y el valor de una canasta familiar con artículos alimentarios básicos en la comunidad tiene un costo promedio de \$84,307.

El 59% de los habitantes de La Plata podrían tener un presupuesto de aproximadamente \$71,262 (ahorro mensual más gasto actual en energía eléctrica) para invertir en un sistema de generación de energía.

Conclusiones del Modelo Financiero

Los modelos de ventanilla única y PAYGo son los modelos más asequibles multidimensionalmente ya que generan mayor impacto financiero, social, técnico y ambiental, así como proporcionan las tarifas y tasas de interés más bajas para la población.

El modelo menos asequible financieramente para la población es el cooperativista puesto que concibe las tarifas más altas, imposibles de pagar por los habitantes considerando sus ingresos promedio. El modelo de donación crea las tarifas más bajas a pagar mensualmente (muy similar a las que se cobran actualmente), sin embargo, este no es un modelo de negocio y sus probabilidades de realización son supremamente bajas.

El modelo más rentable para el inversionista es el modelo PAYGo, con la TIR más elevada y un periodo de recuperación de la inversión muy corto (3 años). Los modelos de ventanilla única y cooperativa de energía son los que poseen mayor riesgo financiero, al tener los periodos más altos de financiamiento.

Los modelos de ventanilla única y PAYGo son los ambientalmente más responsables al tener muy bajo impacto sobre el área a intervenir, la afectación a especies y las emisiones de gases contaminantes.

Los modelos PAYGo, cooperativa de energía y donación, son los socialmente más sostenibles, por que requieren la implementación de una estrategia de agrupación comunitaria para la AOM del sistema y la generación de empleos para la comunidad.

El modelo de ventanilla única es el único en donde el usuario no será propietario o copropietario del su sistema de generación.

El sistema de generación técnicamente más robusto y seguro es la microrred contemplada en los modelos financieros cooperativa de energía y donación.

Los LCOE más bajos se obtienen con los modelos donación, cooperativa y ventanilla única, respectivamente.

A partir de la opinión de expertos temáticos en las áreas técnica, económica-financiera, social y ambiental, el modelo más recomendado por sus amplias bondades para los usuarios y para el sistema, es el modelo de ventanilla única. Para poder implementar los modelos 2 y 3, el gobierno nacional tendría que proveer un subsidio a la tarifa o un subsidio por tecnologías renovables, con lo cual los usuarios podrían acceder a los sistemas.

Conclusión General

La electrificación de las zonas no interconectadas en Colombia sigue siendo un reto para el país. Actualmente existen alrededor de 500,000 hogares sin servicio de energía eléctrica y 200,000 hogares con baja calidad en el servicio, por lo tanto, los esfuerzos están enfocados en mejorar y ampliar la cobertura.

Para poder construir un modelo de electrificación rural que aborde todos los componentes necesarios que puedan garantizar la sostenibilidad, fue necesario realizar un trabajo de campo amplio en donde se indagó por las actividades productivas y económicas, condiciones sociales, ambientales, culturales y técnicas en la comunidad. Fue importante tener cercanía y escuchar la opinión de la población frente a las tecnologías renovables y cuáles eran sus principales expectativas para diseñar un sistema acorde con sus necesidades.

El diseño del modelo técnico, económico y financiero se pudo llevar a cabo a través de la caracterización inicial del sistema de generación (híbrido o SSI), donde se halló la cantidad de componentes y equipos necesarios, así como la combinación operativa más eficiente, considerando el recurso energético local. De este análisis inicial se pudo concluir principalmente, el costo óptimo de inversión inicial para el sistema de generación, donde se

optó por un sistema híbrido que cubriera hasta el 95.8% de la demanda de energía, ya que el 100% se lograría con el doble de la inversión y un sobredimensionamiento del sistema.

Una vez se obtuvieron los datos de salida de la caracterización técnica del sistema, fue necesario identificar si la población caso de estudio podía pagar por este sistema, conociendo a fondo sus indicadores productivos y económicos, para lo cual se halló el balance ingresos vs gastos, ahorros, principales actividades productivas, e indicadores de pobreza. De esta sección se resalta la vulnerabilidad de la población al estar privados en la mayoría de los componentes que mide la pobreza. Es de resaltar que para el cálculo de estos indicadores la fuente de información fue propia, a través de las encuestas realizadas en el trabajo de campo, ya que los resultados del censo nacional excluyen a esta población.

La información que brindó el análisis económico fue indispensable para realizar los análisis financieros con la adaptación de modelos internacionalmente exitosos al contexto colombiano en especial el de la comunidad caso de estudio. Dichos modelos financieros se adaptaron considerando la legislación colombiana para la regulación de las tarifas de electricidad emitidas por la CREG, y a partir de los datos de salida del modelo técnico (inicialmente realizado) donde se tuvieron en cuenta componentes tales como, inversión en equipos y materiales, capital de trabajo, gastos pre-operativos e imprevistos. Complementario a esto, la simulación y el cálculo de los gastos de AOM son fundamentales para completar los cálculos, ya que dependiendo de la dinámica del modelo y las condiciones actuales de la población (si posee internet, telecomunicaciones, sistemas de recaudo de dinero, conformación socio-comunitaria), este valor puede ser mayor o menor.

Simular las tasas de interés del mercado y la inflación es otro factor relevante a la hora de elaborar los análisis financieros; esto para garantizar sentido de realidad en los cálculos y una tarifa muy aproximada a la que se generaría realmente.

Finalmente, comparar los resultados financieros como tarifas, TIR, VPN, riesgos, entre otros con las condiciones de los habitantes (ingresos promedio, capacidad de pago, capacidad de asociación, etc) permite obtener una visión completa del proyecto, identificar qué modelo financiero es más asequible y sostenible para la comunidad, y tomar una decisión más segura y confiable para el usuario y el inversionista.

Fue muy interesante encontrar que la implementación de un modelo financiero para la electrificación de comunidades pobres de las ZNI colombianas puede ser un negocio social rentable para un inversionista privado, que a su vez brinde a la población acceso a tecnologías limpias y alternativas que mejoren su calidad de vida y productividad, a través de tarifas eléctricas asequibles y transitorias.

Es importante mencionar que cada uno de los componentes analizados (técnico, económico y financiero) brindaron información suficiente y necesaria para el modelo general y que la integración de los factores a la luz de expertos permitió seleccionar los enfoques más asequibles y sostenibles para la comunidad de La Plata.

Esta investigación propone como una primera opción la implementación de un modelo financiero de ventanilla única en donde un inversionista (empresa del sector energético) financia productos energéticos a las comunidades de las ZNI, donde cada usuario adquiere su sistema solar individual dependiendo de la carga instalada en su vivienda y su capacidad de pago. El modelo genera tarifas de aproximadamente \$67,000/ usuario al mes con un LCOE promedio de \$1,127/kWh, un periodo de recuperación de la inversión de 10 años, la prestación del servicio por 25 años, una TIR de 17.2% a una tasa de interés del 4%EA, donde el prestador es el responsable de la AOM y es propietario del sistema, la facturación es retroactiva mes vencido y tiene los menores impactos ambientales para la región.

Como segunda opción, el modelo PAYGo (aun no implementado en Colombia) es considerado sostenible y asequible para la comunidad de La Plata. La empresa PAYGo financia productos energéticos a usuarios de comunidades de bajos ingresos que pueden pagar el sistema a cuotas, de manera prepagada a través de créditos de energía y un sistema de bloqueo remoto que activa o desactiva el sistema solar. A pesar de que este modelo genera tarifas más altas que las del modelo de ventanilla única, tiene grandes beneficios en términos del retorno de la inversión, la TIR más alta (17.6%), un periodo de financiación de solo 3 años a una tasa de interés del 6%EA. El usuario del sistema será propietario en un corto plazo y la comunidad es la que garantizaría la AOM del sistema, generando empleo y mayor dinámica económica en la población. Al ser un modelo más rentable para el inversionista, fomentaría el interés de terceros en atender este mercado, sin embargo, el modelo sería aún más sostenible si el gobierno nacional generara un subsidio a la tarifa o a las tecnologías para que los habitantes puedan acceder al financiamiento.

Con estos resultados presentados, se pueden validar las hipótesis de investigación propuestas donde se afirma que la formulación de proyectos de energización para las ZNI que consideran gran variedad de factores y criterios técnicos, ambientales, sociales y financieros, genera impactos positivos en la evaluación de su sostenibilidad, así como mayor confianza para la toma de decisiones en su implementación. El diseño de modelos técnico, económico y financieros de electrificación rural para ZNI, ofrece tarifas asequibles y un negocio rentable para el inversionista y finalmente, es posible diseñar modelos de electrificación rural a partir de fuentes renovables, asequibles para las comunidades rurales en situación de vulnerabilidad y pobreza.

8. RECOMENDACIONES

Las mayores dificultades que se presentaron en el desarrollo de esta investigación estuvieron asociadas a la disponibilidad de series temporales de radiación solar para la zona caso de estudios y zonas aledañas, debido a la deficiencia en estaciones meteorológicas cercanas, la ejecución del trabajo en campo, debido a las restricciones de la pandemia por covid-19 lo cual impidió recolectar un mayor número de encuestas; y las limitaciones en tecnologías de la información y comunicación en la zona caso de estudio lo que dificulta el diseño de modelos financieros como PAYGo, los cuales han tenido gran éxito internacional, gracias a sus bondades en tecnología móvil y mensajes de texto.

En este trabajo se consideró el monitoreo y control de la microrred desde la calidad de las tecnologías como inversores y controladores para el control primario, así como también el control secundario en el diseño del modelo de optimización para el despacho económico de energía, sin embargo, es importante incluir el flujo óptimo de potencia en los análisis de este componente, lo que por el alcance de la investigación no se realizó.

Se recomienda la puesta en marcha de una prueba piloto del modelo financiero de ventanilla única y Pay As You go, para evaluar y ajustar diseño de los modelos en las comunidades de las ZNI en Colombia.

9. REFERENCIAS

- [1] UPME and BID, *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. 2015.
- [2] UPME, Ana María Macías Parra, and Jaime Andrade, “Estudio de generación eléctrica bajo escenario de cambio climático | UPME,” p. 107, 2014.
- [3] U. de P. M. E. UPME, “Plan de Acción Indicativo De Eficiencia Energética 2017-2022 - PAI PROURE,” 2016.
- [4] M. B. López, L. C. R. Sarmiento, and P. J. R. Sánchez, “Análisis de costos de la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables en el sistema eléctrico colombiano.,” *Costs Anal. Electr. Gener. from Renew. sources Colomb. Electr. Syst.*, vol. 34, no. 2, pp. 394–419, 2016.
- [5] IPSE, “Soluciones Energéticas Para Las Zonas No Interconectadas De Colombia,” 2014.
- [6] Superservicios, “Zonas No Interconectadas-Zni Diagnóstico De La Prestación Del Servicio De Energía Eléctrica 2018 Superintendencia Delegada Para Energía Y Gas Dirección Técnica De Gestión De Energía,” no. 1, 2018.
- [7] UPME, “Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica PIEC 2016-2020,” pp. 0–48, 2016.
- [8] UPME, “Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica PIEC 2019-2023,” *UPME, Colomb.*, no. 69, pp. 1–58, 2019.
- [9] U. de P. M. E. UPME, “Resultados de la estimación del Índice de Cobertura de Energía Eléctrica – ICEE-,” no. 69, 2019.
- [10] UPME, “Plan Indicativo de Expansión de Cobertura del Servicio de Energía Eléctrica 2002-2005,” 2002.
- [11] R. Cuevas, O. Masera, and R. Diaz, “Calidad y competitividad de la agroindustria rural de América Latina y el Caribe,” Mexico, 2004.
- [12] World Resources Institute and S. A. Athena Ballesteros, Emily Norford, Tom Nagle, Logan YonavJak, “Implementation Strategies for Renewable Energy Services in Low - Income Rural Areas,” 2012.
- [13] UPME and USAID, *Guía para elaboración de un plan de energización rural sostenible*. 2015.
- [14] M. de M. y E. ; M. de H. y C. P. MME, *Cnpes 3108. Programa de energización para zonas no interconectadas*. 2001.

- [15] BID, “Consultoría para apoyo en Asociaciones Público Privadas (APP) para Zonas No Interconectadas en Colombia,” 2017.
- [16] IPSE, “Plan de Acción 2021,” 2021.
- [17] REN21, “Renewables 2020 Global Status Report,” 2020.
- [18] REN21, “Energías Renovables 2016 - reporte de la situación mundial,” p. 18, 2016.
- [19] UPME, “Plan Energetico Nacional 2020-2050,” 2019.
- [20] IDEAM, “ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR, ULTRAVIOLETA Y OZONO DE COLOMBIA. EVALUACIÓN DEL BRILLO SOLAR EN COLOMBIA,” 2005.
- [21] C. Sánchez, F. Rodríguez, E. Collante, and O. Simbaqueva, *Atlas de radiación solar de Colombia*. 2005.
- [22] C. García Arbeláez, G. Vallejo, M. L. Higgings, and E. M. Escobar, *El Acuerdo de París. Así actuará Colombia frente al cambio climático*, 1 ed. Cali, Colombia, 2016.
- [23] CAFAZNI. MINMINAS, “Acta 067 Comité de Administración del Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas No Interconectadas -FAZNI,” 2017.
- [24] Superservicios - Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, *Diagnóstico De La Prestación Del Servicio De Energía Eléctrica*. 2018.
- [25] USAID, *Perfiles De Proyectos*. 2017.
- [26] H. Rodríguez-Murcia, “Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas Development of Solar Energy in Colombia and its Prospects,” *Rev. Ing.*, vol. 28, pp. 83–89, 2009.
- [27] MINMINAS and Comisión de Regulación de Energía y Gas GREG, *Resolución N°166 de 2020*. Colombia, 2020, p. 15.
- [28] Ministerio de Minas y Energía - UPME - IPSE, “Plan Nacional de Electrificación Rural PNER,” p. 96, 2018.
- [29] Practical Action, “Poor Peoples Energy Outlook,” Unated Kingdom, 2019.
- [30] International Energy Agency (IEA), “WEO-2017 Special Report: Energy Access Outlook,” 2017.
- [31] M. J. Cardona and Y. U. López, “Modelos Técnico-Económicos de Electrificación Rural con Energías Renovables : Revisión Sistemática de Literatura,” *IEEE Xplore*, 2018.
- [32] J. C. Rojas-Zerpa and J. M. Yusta, “Methodologies, technologies and applications for electric supply planning in rural remote areas,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 20, no. 1,

pp. 66–76, 2014.

- [33] E. Strantzali and K. Aravossis, “Decision making in renewable energy investments: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 885–898, 2016.
- [34] A. Chauhan and R. P. Saini, “Renewable energy based off-grid rural electrification in Uttarakhand state of India: Technology options, modelling method, barriers and recommendations,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 662–681, 2015.
- [35] J. D. Garzón-Hidalgo and A. J. Saavedra-Montes, “Una metodología de diseño de micro redes para zonas no interconectadas de Colombia,” *TecnoLógicas*, vol. 20, no. 39, p. 15, 2015.
- [36] L. M. Carrillo Medrano, “Generación de energía con un sistema híbrido renovable para abastecimiento básico en vereda sin energización de Yopal - Casanare,” *H*, p. 202, 2015.
- [37] World Resources Institute, “Implementation Strategies for Renewable Energy Services in Low Income Rural Areas,” 2013.
- [38] Congreso de la República de Colombia, “Ley 855 de 2003,” *D. Of. No. 45.405, 18 diciembre 2003*, pp. 1–2, 2003.
- [39] Superintendencia delegada para energía y gas combustible, “Zonas no interconectadas – ZNI diagnóstico de La prestación del servicio de energía eléctrica,” *Supt. Serv. públicos Domic.*, 2020.
- [40] M. F. Hernández, L. F. Aguado, and H. Duque, “Índice de pobreza energética multidimensional por regiones para Colombia, ipem_rc 2013,” *Econ. Coyunt.*, vol. 3(3), pp. 35–72, 2018.
- [41] Andrés Fernández Roa, “Método para localización óptima de centrales de energías renovables,” 2011.
- [42] B. Wu, Y. Lang, and et.al, *Power conversion and control of wind energy systems*, no. 29. Piscataway, NJ : Hoboken, N.J: IEEE Press ; Wiley, 2011.
- [43] MINMINAS, UPME, and IDEAM, *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia*, vol. 53, no. 9. Bogotá, 2010.
- [44] Energy Sector Management Assistance Program, “Mini Grids for Half a Billion People: Market Outlook and Handbook for Decision Makers. ESMAP Technical Report;014/19,” *World Bank Gr.*, 2019.
- [45] J. P. Fossati, “Revisión bibliográfica sobre micro redes inteligentes. Literature review of microgrids,” *Mem. Trab. Difusión Científica y Técnica*, vol. 9, pp. 13–20, 2011.
- [46] E. J. Ng and R. A. El-Shatshat, “Multi-microgrid control systems (MMCS),” in *IEEE*

PES General Meeting, 2010, pp. 1–6.

- [47] G. Strbac, N. Hatziaargyriou, J. P. Lopes, C. Moreira, A. Dimeas, and D. Papadaskalopoulos, “Microgrids: Enhancing the resilience of the European megagrid,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 13, no. 3, pp. 35–43, 2015.
- [48] A. Alsaadi and B. Gholami, “An effective approach for distribution system power flow solution,” *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 37, no. august, pp. 220–224, 2009.
- [49] M. Abbas and N. K. Merzouk, “Techno economic study of solar thermal power plants for centralized electricity generation in Algeria,” in *2nd International Symposium on Environment Friendly Energies and Applications, EFEA 2012*, 2012, pp. 179–183.
- [50] A. M. Abdilahi, A. H. M. Yatim, M. W. Mustafa, O. T. Khalaf, A. F. Shumran, and F. M. Nor, “Feasibility study of renewable energy-based microgrid system in Somaliland’s urban centers,” *Renew. Sustain. ENERGY Rev.*, vol. 40, pp. 1048–1059, Dec. 2014.
- [51] T. Adefarati, R. C. Bansal, and J. J. Justo, “Techno-economic analysis of a {PV}-wind-battery-diesel standalone power system in a remote area,” *J. Eng.*, 2017.
- [52] A. Aghahosseini, D. Bogdanov, and C. Breyer, “A techno-economic study of an entirely renewable energy-based power supply for North America for 2030 conditions,” *Energies*, vol. 10, no. 8, 2017.
- [53] M. Tovar Ramirez and Y. . Lopez, “Diseño, prototipo y análisis hidro-mecánico de una midro turbina de eje vertical para ZNI,” in *V CIUREE. Congreso de Eficiencia y Gestión Energética*, 2015, vol. 20, no. 10, p. 2015.
- [54] A. Ataei *et al.*, “Techno-economic feasibility study of autonomous hybrid wind and solar power systems for rural areas in Iran, A case study in Moheydar village,” *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 34, no. 5, pp. 1521–1527, 2015.
- [55] A. Ataei, M. Nedaei, R. Rashidi, and C. Yoo, “Optimum design of an off-grid hybrid renewable energy system for an office building,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 5, Sep. 2015.
- [56] M. Baneshi and F. Hadianfard, “Techno-economic feasibility of hybrid diesel/PV/wind/battery electricity generation systems for non-residential large electricity consumers under southern Iran climate conditions,” *ENERGY Convers. Manag.*, vol. 127, pp. 233–244, Nov. 2016.
- [57] S. Bhakta, V. Mukherjee, and B. Shaw, “Techno-economic analysis and performance assessment of standalone photovoltaic/wind/hybrid power system in Lakshadweep islands of India,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 6, 2015.
- [58] L. Tom, P. Gilman, and P. Lilienthal, *Micropower System Modeling With HOMER*. 2006.

- [59] DANE, “Pobreza Multidimensional Colombia - 2018,” *Boletín Técnico Anu.*, 2019.
- [60] DANE, “Nota metodológica dedida de pobreza multidimensional municipal con información censal,” p. 6, 2020.
- [61] Gobernación del Valle del Cauca, “Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) del Valle del Cauca,” pp. 1–39, 2016.
- [62] DANE, “Boletín Censo general 2005, perfil Buenaventura, Valle del Cauca,” p. 9, 2010.
- [63] H. Altomonte, M. Coviello, and W. F. Lutz, *Energías renovables y eficiencia energética en América Latina y el Caribe. Restricciones y perspectivas. (in Spanish)*. 2003.
- [64] R. E. Ladino Peralta, “La energía solar fotovoltaica como factor de desarrollo en zonas rurales de Colombia. Caso: vereda Carupana, municipio de Tauramena, departamento de Casanare,” pp. 1–136, 2011.
- [65] R. L. Ottinger and J. Bowie, *Innovative Financing for Renewable Energy*, vol. 1, no. 2008. 2014.
- [66] Ministerio de Desarrollo Social División de Evaluación Social de Inversiones Chile, “METODOLOGÍA DE FORMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE ELECTRIFICACIÓN RURAL,” 2015.
- [67] M. de E. de M. e Energia, *DECRETO No- 4.873, DE 11 DE NOVIEMBRE DE 2003*. 2003, pp. 4–6.
- [68] B. Kitchenham, O. Pearl Brereton, D. Budgen, M. Turner, J. Bailey, and S. Linkman, “Systematic literature reviews in software engineering - A systematic literature review,” *Inf. Softw. Technol.*, vol. 51, no. 1, pp. 7–15, 2009.
- [69] B. Kitchenham, “Procedures for performing systematic reviews,” *Keele, UK, Keele Univ.*, vol. 33, no. TR/SE-0401, p. 28, 2004.
- [70] C. Li *et al.*, “Techno-economic feasibility study of autonomous hybrid wind/PV/battery power system for a household in Urumqi, China,” *Energy*, vol. 55, pp. 263–272, 2013.
- [71] M. S. Ismail, M. Moghavvemi, and T. M. I. Mahlia, “Design of an optimized photovoltaic and microturbine hybrid power system for a remote small community: Case study of Palestine,” *ENERGY Convers. Manag.*, vol. 75, pp. 271–281, Nov. 2013.
- [72] S. M. Shaahid *et al.*, “Techno-economic potential of retrofitting diesel power systems with hybrid wind-photovoltaic-diesel systems for off-grid electrification of remote villages of Saudi Arabia,” *Int. J. Green Energy*, vol. 7, no. 6, pp. 632–646, 2010.

- [73] R. Hosseinalizadeh, H. G. Shakouri, M. S. Amalnick, and P. Taghipour, "Economic sizing of a hybrid (PV-WT-FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by an optimization-simulation model: Case study of Iran," *Renew. Sustain. ENERGY Rev.*, vol. 54, pp. 139–150, Feb. 2016.
- [74] S. Mandelli, J. Barbieri, R. Mereu, and E. Colombo, "Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive literature review," *Renew. Sustain. ENERGY Rev.*, vol. 58, pp. 1621–1646, May 2016.
- [75] B. Guinot *et al.*, "Techno-economic study of a PV-hydrogen-battery hybrid system for off-grid power supply: Impact of performances' ageing on optimal system sizing and competitiveness," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 1, pp. 623–632, 2015.
- [76] B. Dursun, C. Gokcol, I. Umut, E. Ucar, and S. Kocabey, "Techno-economic evaluation of a hybrid PV - Wind power generation system," *Int. J. Green Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 117–136, 2013.
- [77] S. Bhattacharjee and S. Acharya, "PV-wind hybrid power option for a low wind topography," *ENERGY Convers. Manag.*, vol. 89, pp. 942–954, Jan. 2015.
- [78] A. H. Mamaghani, S. A. A. Escandon, B. Najafi, A. Shirazi, and F. Rinaldi, "Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia," *Renew. ENERGY*, vol. 97, pp. 293–305, Nov. 2016.
- [79] K. Ubilla *et al.*, "Smart Microgrids as a Solution for Rural Electrification: Ensuring Long-Term Sustainability Through Cadastre and Business Models," *IEEE Trans. Sustain. ENERGY*, vol. 5, no. 4, pp. 1310–1318, Oct. 2014.
- [80] S. G. Sigarchian, R. Paleta, A. Malmquist, and A. Pina, "Feasibility study of using a biogas engine as backup in a decentralized hybrid (PV/wind/battery) power generation system - Case study Kenya," *ENERGY*, vol. 90, no. 2, pp. 1830–1841, Oct. 2015.
- [81] W. Margaret Amutha and V. Rajini, "Techno-economic evaluation of various hybrid power systems for rural telecom," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 553–561, 2015.
- [82] J. G. Castellanos, M. Walker, D. Poggio, M. Pourkashanian, and W. Nimmo, "Modelling an off-grid integrated renewable energy system for rural electrification in India using photovoltaics and anaerobic digestion," *Renew. ENERGY*, vol. 74, pp. 390–398, Feb. 2015.
- [83] A. Chauhan and R. P. Saini, "Techno-economic feasibility study on Integrated Renewable Energy System for an isolated community of India," *Renew. Sustain. ENERGY Rev.*, vol. 59, pp. 388–405, Jun. 2016.
- [84] N. M. Isa, H. S. Das, C. W. Tan, A. H. M. Yatim, and K. Y. Lau, "A techno-economic

assessment of a combined heat and power photovoltaic/fuel cell/battery energy system in Malaysia hospital,” *Energy*, vol. 112, pp. 75–90, 2016.

- [85] D. O. Akinyele and R. K. Rayudu, “Techno-economic and life cycle environmental performance analyses of a solar photovoltaic microgrid system for developing countries,” *ENERGY*, vol. 109, pp. 160–179, Aug. 2016.
- [86] A. Bhatt, M. P. Sharma, and R. P. Saini, “Feasibility and sensitivity analysis of an off-grid micro hydro-photovoltaic-biomass and biogas-diesel-battery hybrid energy system for a remote area in Uttarakhand state, India,” *Renew. Sustain. ENERGY Rev.*, vol. 61, pp. 53–69, Aug. 2016.
- [87] A. Shiroudi, S. R. H. Taklimi, S. A. Mousavifar, and P. Taghipour, “Stand-alone PV-hydrogen energy system in Taleghan-Iran using HOMER software: Optimization and techno-economic analysis,” *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 15, no. 5, pp. 1389–1402, 2013.
- [88] M. K. Shahzad, A. Zahid, T. U. Rashid, M. A. Rehan, M. Ali, and M. Ahmad, “Techno-economic feasibility analysis of a solar-biomass off grid system for the electrification of remote rural areas in Pakistan using HOMER software,” *Renew. ENERGY*, vol. 106, pp. 264–273, Jun. 2017.
- [89] M. M. Rahman, A. K. M. S. Islam, S. Salehin, and M. A. Al-Matin, “Development of a Model for Techno-economic Assessment of a Stand-alone Off-grid Solar Photovoltaic System in Bangladesh,” *Int. J. Renew. ENERGY Res.*, vol. 6, no. 1, pp. 140–149, 2016.
- [90] B. K. Das, N. Hoque, S. Mandal, T. K. Pal, and M. Abu Raihan, “A techno-economic feasibility of a stand-alone hybrid power generation for remote area application in Bangladesh,” *ENERGY*, vol. 134, pp. 775–788, Sep. 2017.
- [91] M. M. Rahman, M. A. H. Baky, and A. K. M. S. Islam, “Electricity from Wind for Off-Grid Applications in Bangladesh: A Techno-Economic Assessment,” *Int. J. Renew. ENERGY Dev.*, vol. 6, no. 1, pp. 55–64, Feb. 2017.
- [92] M. S. Islam, R. Akhter, and M. A. Rahman, “A thorough investigation on hybrid application of biomass gasifier and PV resources to meet energy needs for a northern rural off-grid region of Bangladesh: A potential solution to replicate in rural off-grid areas or not?,” *Energy*, vol. 145, pp. 338–355, 2018.
- [93] J. Ahmad *et al.*, “Techno economic analysis of a wind-photovoltaic-biomass hybrid renewable energy system for rural electrification: A case study of Kallar Kahar,” *Energy*, vol. 148, pp. 208–234, 2018.
- [94] G. Liu, M. Li, B. Zhou, Y. Chen, and S. Liao, “General indicator for techno-economic assessment of renewable energy resources,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 156, pp. 416–426, 2018.

- [95] A. López-González, L. Ferrer-Martí, and B. Domenech, “Sustainable rural electrification planning in developing countries: A proposal for electrification of isolated communities of Venezuela,” *Energy Policy*, vol. 129, pp. 327–338, 2019.
- [96] A. Kumar *et al.*, “A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, pp. 596–609, 2017.
- [97] E. Ilskog and B. Kjellström, “And then they lived sustainably ever after?-Assessment of rural electrification cases by means of indicators,” *Energy Policy*, vol. 36, no. 7, pp. 2674–2684, 2008.
- [98] R. L. Ottinger, “Getting at the true cost of electric power,” *Electr. J.*, vol. 3, no. 6, pp. 14–23, 1990.
- [99] S. Segovia and E. Yanquen, “Reporte de la situación actual del microcrédito en Colombia,” Bogotá-Colombia, 2017.
- [100] F. Clavijo, C. Sanchez, and S. Segovia, “Reporte de la situación del microcredito en Colombia,” Bogotá-Colombia, 2020.
- [101] J. Winięcki, “End-user finance : A guide for sustainable energy enterprises and NGOs Arc Finance Ltd End-user finance : a guide for sustainable energy enterprises and NGOs.”
- [102] X. Vallvé and T. Tecnoambiental, “Una microrred rural fotovoltaica con asignación energética individual , da suministro a 60 familias de un pueblo en Santo Antão (Cabo Verde),” *CIRCUTOR*, pp. 22–25, 2012.
- [103] Unidad de Planeación Minero Energética UPME, “Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014,” *Minist. Minas y Energ.*, vol. 1, p. 28, 2014.
- [104] REN21, “Renewables 2018 Global Status Report,” *REN21*, 2018.
- [105] C. Gabriel and J. Kirkwood, “Business models for model businesses : Lessons from renewable energy entrepreneurs in developing countries,” *Energy Policy*, vol. 95, pp. 336–349, 2016.
- [106] M. Hamwi and I. Lizarralde, “A review of business models towards service-oriented electricity systems,” *Procedia CIRP*, vol. 64, pp. 109–114, 2017.
- [107] A. von Hülsen, T. Huth, and S. Koch, “Village power scaling rural electrification in Uganda,” *F. Actions Sci. Rep.*, vol. 2016, no. Special Issue 15, pp. 104–113, 2016.
- [108] J. Zollmann, D. Waldron, A. Sotiriou, and A. Gachoka, “Salir de la oscuridad. La energía solar del modelo de financiamiento PAYGo para los consumidores. Foro de Acceso al Financiamiento.,” 2004.

- [109] CREG, *RESOLUCIÓN No. 091 (26 OCT. 2007)*. 2007.
- [110] L. S. Hoyos Gómez, “Impacto de la Ley 1715 de mayo 13 de 2014 sobre el sector eléctrico colombiano: análisis de los nuevos actores del mercado,” Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2016.
- [111] CREG, *D-002-14 MARCO REGULATORIO PRESTACIÓN SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ZONAS ZNI*. 2014, p. 255.
- [112] CREG, *Resolución 038-2018 Autogeneración en las ZNI*. 2018.
- [113] I. D. Hernández Umaña and R. A. Ávila Forero, “PARADIGMA TECNOCONÓMICO DEL SECTOR ELÉCTRICO EN COLOMBIA A TRAVÉS DE INNOVACIONES TECNOLÓGICAS , FINANCIERAS Y DE MERCADERO.CASO DE ANÁLISIS: ISA.S.A,” *Fac. Ciencias Económicas Investig. y Reflexión*, 2010.
- [114] R. Hernández Sampieri, *Metodología de la Investigación*, Sexta. 2014.
- [115] R. Sampieri Hernandez, C. Fernandez Collado, and P. Baptista Lucio, *Metodología de la Investigación*, Quinta. Mexico, 2010.
- [116] F. A. Gaviria Cataño and J. C. Gómez Leal, “METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN PARAMICRORREDES ELÉCTRICAS EN ZONAS NO INTERCONECTADAS,” Universidad Autónoma de Occidente, 2018.
- [117] M. L. Rodríguez Meza, “Evaluación ambiental de alternativas de suministro energético para una zona no interconectada del contexto colombiano: Caso Archipiélago De La Plata, Consejo Comunitario De Bahía Málaga,” 2018.
- [118] A. Molina Monje and F. Martínez, “Modelo de Generación Fotovoltaica,” 2017.
- [119] S. Bracco, F. Delfino, P. Laiolo, L. Pagnini, and G. Piazza, “Evaluating LCOE in sustainable microgrids for smart city applications,” *E3S Web Conf.*, vol. 113, pp. 1–6, 2019.
- [120] A. M. Abdel-hamed, K. Ellissy, A. R. Adly, and H. Abdelfattah, “Optimal Sizing and Design of Isolated Micro-Grid systems,” *Int. J. Environ. Sci. Sustain. Dev.*, vol. 4, no. 3, p. 1, 2019.
- [121] Y. U. López Castrillón and F. Fonthal Rico, *Energía Solar Fotovoltaica*, Primera Ed. Bogotá-Colombia, 2019.
- [122] MinAmbiente, “Resolución 1312 Agosto 2016.” Bogotá-Colombia, 2016.
- [123] Oficina Catalana del Canvi Climàtic, “Guía Practica para el cálculo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI),” 2013.
- [124] B. V. Solanki, K. Bhattacharya, and C. A. Canizares, “A Sustainable Energy Management System for Isolated Microgrids,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8,

no. 4, pp. 1507–1517, 2017.

- [125] J. M. Ramírez Scarpetta and E. Gómez Luna, “DOCUMENTO TÉCNICO Control en de A . C : Control Jerárquico, Tecnologías y Normativa.,” *CIGRE Colomb.*, pp. 1–41, 2020.
- [126] F. Perez and G. Damm, “Microgrids Design and Implementation,” in *Microgrids Design and Implementation*, no. January, 2018, pp. 447–476.
- [127] R. C. A. Salazar, Y. D. Cuervo, and R. Pardo, “Índice de Pobreza Multidimensional para Colombia,” *Arch. Econ.*, 2011.
- [128] Buenaventura cómo vamos, “Informe de calidad de vida de Buenaventura 2017-2019,” 2019.
- [129] DANE, “Boletín Técnico Pobreza Monetaria en Colombia - Año 2019,” pp. 1–29, 2020.
- [130] Manizales Como Vamos, *Informe de Calidad de Vida Manizales 2019*. Manizales, 2020.
- [131] Ö. Yildiz *et al.*, “Renewable energy cooperatives as gatekeepers or facilitators? Recent developments in Germany and a multidisciplinary research agenda,” *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 6, pp. 59–73, 2015.
- [132] V. M. Arnáez Arce, “La comercialización de energía eléctrica a través de cooperativas de consumo,” *Boletín la Asoc. Int. Derecho Coop.*, no. 45, p. 197, 2011.

10. ANEXOS

10.1.1 ANEXO 1 INSTRUMENTO ECUESTA 1

Instrumento para realizar la caracterización energética, técnica, económica, productiva, ambiental y socio-cultural de la comunidad caso de estudio.

10.1.2 ANEXO 2 INSTRUMENTO ENCUESTA 2

Instrumento utilizado para definir la capacidad productiva y financiera de los habitantes de la comunidad caso de estudio.

10.1.3 ANEXO 3 SIMULACIÓN FINANCIERA

Simulación financiera de los cuatro modelos desarrollados.

10.1.4 ANEXO 4 PROPUESTA CENTRO DE ACOPIO

Propuesta de centro de acopio comunitario para la conservación de la pesca.