

Propuesta para la implementación de una alternativa que permita mejorar la eficiencia energética en el edificio Rafael Arboleda de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá

Santiago Andrés Carrillo Fernández
Ronald Alberto Velandia Velandia

Trabajo de Investigación
Presentado como requisito para obtener el título de
Magister en Gestión Ambiental

Director
Ph.D., Ricardo Quijano Hurtado

Facultad de Estudios Rurales y Ambientales
Maestría en Gestión Ambiental
Bogotá D.C., junio de 2016

Agradecimientos

Queremos darle un sincero agradecimiento a Dios y a nuestras familias por su apoyo y motivación incondicional en nuestra formación como magíster en gestión ambiental y personas íntegras, capaces de afrontar los diferentes retos en nuestros proyectos de vida.

A nuestro director, Ricardo Quijano Hurtado, por su acompañamiento y consejería en búsqueda del correcto direccionamiento y consolidación de esta investigación.

Al personal de la oficina de servicios generales, la oficina de administración del campus y al área de infraestructura eléctrica de la Pontificia Universidad Javeriana, por su colaboración y prestación de herramientas de información, las cuales le proporcionaron la veracidad y solidez a esta investigación.

Por último, a nuestros compañeros, que nos acompañaron en este proceso de formación académica, en los buenos y malos momentos.

Resumen

En el mundo moderno la utilización de combustibles fósiles como fuente de energía eléctrica genera diversos problemas ambientales. Entre estos se encuentra el calentamiento global causado por la acumulación de los Gases de Efecto Invernadero, en adelante GEI, que a su vez afectan al propio ser humano y que de no ser controlados pueden llegar a niveles críticos de afectación. Es aquí donde se deben empezar a buscar alternativas que sean amigables con el ambiente para la producción de energía y mejorar la eficiencia en el uso de la misma. De esta forma se logra mejorar procesos y aportar a la sostenibilidad ambiental. Es con este objetivo que se deben llevar a cabo investigaciones que aporten a la solución de la problemática mencionada anteriormente.

La energía eléctrica es la forma de energía más empleada diariamente y su demanda aumenta día tras día. Los sitios con gran afluencia de gente presentan una mayor demanda energética para cubrir los servicios que prestan. El edificio Rafael Arboleda de la Pontificia Universidad Javeriana, en adelante PUJ, es un ejemplo claro de esto debido a su continuo funcionamiento durante el año, lo que exige el uso permanente de los sistemas de iluminación. La tecnología utilizada, es decir, las luminarias actuales en este edificio y la demanda de energía al Sistema Interconectado Nacional, en adelante SIN, impiden un uso eficiente de la misma, lo que se puede corregir mediante la implementación de alternativas enfocadas a la eficiencia energética. Lo anterior teniendo en cuenta que las transferencias tecnológicas son un aspecto que pueden aportar al ahorro y uso eficiente mencionado. El desarrollo de proyectos y programas de este tipo desde el marco de la gestión ambiental permitirá a la PUJ mostrar su compromiso y responsabilidad de gestión ambiental.

Para la investigación se trabajó con base en los términos de referencia planteados en la metodología de línea base de emisiones “AMS II.E: eficiencia energética y medidas de cambios de combustibles en edificios” para proyectos categorizados de “pequeña escala”. Esta metodología abarca proyectos que fomenten la eficiencia energética o que impliquen la sustitución de combustibles y estrategias que disminuyan la necesidad de utilización de energía eléctrica en iluminación. La misma está avalada por la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (United Nations Framework Convention on Climate Change), en adelante UNFCCC por sus siglas en inglés.

Dentro de esta investigación se planteó un escenario mejorado¹ como propuesta de eficiencia energética para el edificio Rafael Arboleda de PUJ, así mismo se realiza un análisis documental que nos permite evaluar la posibilidad de llevar a cabo una transferencia tecnológica mediante la implementación de dispositivos piezoeléctricos y paneles solares, en la entrada norte de la PUJ y en el último piso de del edificio Rafael Arboleda respectivamente; lo cual tiene como finalidad apoyar el suministro energético del edificio.

¹ Para el objeto de este proyecto, se entiende por escenario mejorado, como la aplicación de acciones de eficiencia energética para una infraestructura determinada, reduciendo así las emisiones de CO₂ generadas por la producción de energía eléctrica, frente a sus condiciones iniciales o línea base.

Adicionalmente se propone un balance costo-beneficio de las acciones propuestas que nos lleva a determinar la viabilidad de cada una de estas. Esto nos da como resultado la documentación del diseño de la propuesta para la implementación de una alternativa que permita mejorar la eficiencia energética en el edificio Rafael Arboleda de la PUJ.

El desarrollo de esta investigación deja un precedente para aquellas entidades de origen público o privado prestadoras de servicios que deseen iniciar proyectos de eficiencia energética, como Mecanismos de Desarrollo Limpio, en adelante MDL, teniendo en cuenta que se puede contribuir hasta con 11,6 % de la reducción de emisiones de CO₂, nivel nacional, con miras a cumplir la meta de reducción del 20 % de emisiones de CO₂ establecidas en el Acuerdo de París.

Tabla de Contenido

Agradecimientos.....	II
Resumen.....	III
Tabla de Contenido.....	V
Lista de Tablas.....	VII
Lista de Ilustraciones.....	IX
Lista de Ecuaciones.....	X
Lista de Fotografías.....	XII
Lista de Anexos.....	XIII
Palabras Clave.....	XIV
Siglas.....	XV
Glosario.....	XVI
1. INTRODUCCIÓN.....	18
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	20
3. JUSTIFICACIÓN.....	22
4. OBJETIVOS.....	24
4.1 GENERAL.....	24
4.2 ESPECÍFICOS.....	24
5. MARCO DE REFERENCIA.....	25
5.1 MARCO TEÓRICO.....	25
5.1.1 Calentamiento Global.....	25
5.1.2 Cambio Climático.....	26
5.1.3 Efecto Invernadero.....	27
5.1.4 Gases Efecto Invernadero.....	29
5.1.5 La iluminación y su importancia en la generación de Gases Efecto Invernadero (GEI).....	29
5.1.6 Eficiencia Energética.....	33
5.1.7 Uso de energía solar como medida para la reducción de emisiones.....	33
5.1.8 Uso de dispositivos piezoeléctricos y/o EKRR como medida para la reducción de emisiones.....	37
5.1.9 Transferencia tecnológica.....	38
5.1.10 Responsabilidad Ambiental.....	39
5.2 ANTECEDENTES.....	40
5.2.1 Contexto Internacional.....	40
5.2.2 Contexto Nacional.....	42
5.3 ESTADO DEL ARTE.....	45
5.3.1 Contexto Internacional.....	45
5.3.2 Contexto Nacional.....	49
5.4 MARCO GEOGRAFICO.....	54
5.5 MARCO LEGAL.....	57
5.5.4 Marco Legal Internacional.....	57
5.5.5 Marco Legal Nacional.....	59
6. ACCIONES METODOLÓGICAS.....	64

6.1	SELECCIÓN DEL MÉTODO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	64
6.2	MÉTODO PARA CALCULAR LAS EMISIONES DE CO ₂ PROCEDENTES DEL CONSUMO DE ELECTRICIDAD	66
7.	ENFOQUE METODOLÓGICO	67
7.1	DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACION	67
7.2	HERRAMIENTAS INVESTIGATIVAS	68
7.2.1	Recopilación de datos.....	68
7.2.2	Identificación de la demanda energética	69
8.	RESULTADOS	70
8.1	RESULTADOS LINEA BASE EDIFICIO RAFAEL ARBOLEDA	70
8.1.1	Demanda energética por iluminación convencional	70
8.1.2	Emisiones de CO ₂ generadas por iluminación convencional	72
8.1.3	Costo por iluminación convencional.....	72
9.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	74
9.1	ANÁLISIS LÍNEA BASE EDIFICIO RAFAEL ARBOLEDA	74
10.	ALTERNATIVAS PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA	75
10.1	ALTERNATIVAS PARA ILIMUNACIÓN DE EDIFICIO RAFAEL ARBOLEDA	75
10.1.1	Alternativa 1. Sustitución de luminarias por tecnología LED	75
10.1.2	Alternativa 2. Abastecimiento de la energía eléctrica para iluminación del edificio Rafael Arboleda a partir de energía solar	83
10.1.3	Alternativa 3. Abastecimiento de la energía eléctrica para iluminación del edificio Rafael Arboleda a partir de energía piezoeléctrica y/o EKRR.....	92
11.	DISCUSIÓN	114
11.1	DISCUSIÓN DE ALTERNATIVAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA 114	
11.1.4	Discusión alternativa 1: Sustitución de luminarias por tecnología LED	114
11.1.5	Discusión alternativa 2: Energía solar.....	115
11.1.6	Discusión alternativa 3: Energía por dispositivos piezoeléctricos	116
12.	ESCENARIO MEJORADO	120
13.	PROYECCIÓN A NIVEL NACIONAL	122
14.	CONCLUSIONES	125
15.	RECOMENDACIONES	128
16.	BIBLIOGRAFÍA	130

Lista de Tablas

Tabla 1. Teorías que explican el cambio Climático	26
Tabla 2. Comparativa de las fuentes de luz actualmente más usadas en iluminación....	32
Tabla 3. Tipos de Células fotovoltaicas.....	36
Tabla 4. Estado de los proyectos MDL ante las Naciones Unidas a nivel mundial	45
Tabla 5. Distribución mundial de proyectos MDL.....	45
Tabla 6. Proyectos Colombianos registrados ante la UNFCCC	50
Tabla 7. Investigaciones relacionadas en Colombia.....	51
Tabla 8. Sistemas de iluminación LED en Colombia.....	52
Tabla 9. Autoridades Ambientales Nacionales para el Cambio Climático	59
Tabla 10. Normatividad Nacional para el Cambio Climático	59
Tabla 11. Inventario de luminarias y demanda por iluminación edificio Rafael Arboleda	70
Tabla 12. Resultados de línea base por iluminación en edificio Rafael Arboleda	72
Tabla 13. Resumen Costo kWh en el 2015	73
Tabla 14. Número de luminarias LED necesarias	76
Tabla 15. Emisiones evitadas de CO ₂ por iluminación LED	79
Tabla 16. Resumen del costo de luminarias LED necesarias (COP).....	80
Tabla 17. Análisis para el cambio a luminarias LED	81
Tabla 18. Análisis de emisiones evitadas de CO ₂ por utilización de tecnología LED ...	82
Tabla 19. Análisis de costos por utilización de tecnología LED.....	82
Tabla 20. Emisiones evitadas de CO ₂ por iluminación con energía solar.....	86
Tabla 21. Características para el abastecimiento con energía solar para iluminación convencional.....	88
Tabla 22. Análisis para el abastecimiento con energía solar para iluminación convencional.....	88
Tabla 23. Análisis de reducción de emisiones de CO ₂ por el abastecimiento con energía solar para iluminación convencional	89
Tabla 24. Análisis de costos para el abastecimiento con energía solar para iluminación convencional.....	89
Tabla 25. Características para el abastecimiento con energía solar para iluminación LED	90
Tabla 26. Análisis para el abastecimiento con energía solar para iluminación LED	90
Tabla 27. Análisis de reducción de emisiones de CO ₂ por el abastecimiento con energía solar para iluminación LED.....	91
Tabla 28. Análisis de costos para el abastecimiento con energía solar para iluminación LED	91
Tabla 29. Energía generada por una (1) baldosa piezoeléctrica (Wh).....	95
Tabla 30. Emisiones evitadas de CO ₂ por iluminación con baldosas piezoeléctricas	97
Tabla 31. Características para el abastecimiento con baldosas piezoeléctricas para iluminación convencional.....	100
Tabla 32. Análisis para el abastecimiento con baldosas piezoeléctricas para iluminación convencional.....	100
Tabla 33. Análisis de reducción de emisiones de CO ₂ por el abastecimiento con baldosas piezoeléctricas para iluminación convencional	101
Tabla 34. Análisis de costos para el abastecimiento con baldosas piezoeléctricas para iluminación convencional.....	101

Tabla 35. Características para el abastecimiento con baldosas piezoeléctricas para iluminación LED	102
Tabla 36. Análisis para el abastecimiento con baldosas piezoeléctricas para iluminación LED	102
Tabla 37. Análisis de reducción de emisiones de CO ₂ por el abastecimiento con baldosas piezoeléctricas para iluminación LED	103
Tabla 38. Análisis de costos para el abastecimiento con baldosas piezoeléctricas para iluminación LED	103
Tabla 39. Energía generada por una (1) EKRR (kWh)	105
Tabla 40. Emisiones evitadas de CO ₂ por iluminación con EKRR.....	107
Tabla 41. Características para el abastecimiento con EKRR para iluminación convencional.....	109
Tabla 42. Análisis para el abastecimiento con EKRR para iluminación convencional	109
Tabla 43. Análisis de reducción de emisiones de CO ₂ por el abastecimiento con EKRR para iluminación convencional.....	111
Tabla 44. Análisis de costos para el abastecimiento con EKRR para iluminación convencional.....	111
Tabla 45. Características para el abastecimiento con EKRR para iluminación LED ..	112
Tabla 46. Análisis para el abastecimiento con EKRR para iluminación LED	112
Tabla 47. Análisis de reducción de emisiones de CO ₂ por el abastecimiento con EKRR para iluminación LED	113
Tabla 48. Análisis de costos para el abastecimiento con EKRR para iluminación LED	113
Tabla 49. Resumen comparativo de sistemas de iluminación	114
Tabla 50. Cuadro resumen comparativo de alternativas al 100% de implementación frente a iluminación convencional.....	118
Tabla 51. Cuadro resumen comparativo de alternativas al 100% de implementación frente a iluminación LED	119
Tabla 52. Escenario mejorado 1	120
Tabla 53. Escenario mejorado 2	120
Tabla 54. Escenario mejorado 3	120
Tabla 55. Escenario mejorado 4	121
Tabla 56. Escenario mejorado 5	121
Tabla 57. Proyección de la demanda de energía total nacional (GWh)	122
Tabla 58. Potencial de reducción de emisiones de CO ₂ generadas por la demanda de energía eléctrica total nacional	123

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Cambio climático.....	27
Ilustración 2. Efecto invernadero.....	28
Ilustración 3. Funcionamiento LED	32
Ilustración 4. Principio de funcionamiento de una célula fotovoltaica	35
Ilustración 5. Esquema de funcionamiento del sistema de energía solar fotovoltaica conectada a la red	36
Ilustración 6. Baldosas piezoeléctricas vehiculares.....	37
Ilustración 7. Esquema de una EKRR	38
Ilustración 8. Concentración de Gases Efecto Antropogénicas Invernadero del año 1850 a 2012	41
Ilustración 9. Porcentaje de emisiones GEI generadas en el mundo	42
Ilustración 10. Emisiones totales de GEI en CO ₂ eq por sector en Colombia, entre años 2010 y 2012	43
Ilustración 11. Inventario GEI para módulo de Energía en Colombia, año 2012	44
Ilustración 12. Proyectos MDL por sector Nivel Mundial	46
Ilustración 13. Proyectos MDL en Colombia 2016.....	49
Ilustración 14. Proyectos MDL por sector en Colombia.....	50
Ilustración 15. Ubicación de Bogotá, departamento de Cundinamarca	54
Ilustración 16. Mapa Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá	56
Ilustración 17. Modelo 3D Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá	56
Ilustración 18. Delimitación de la investigación	67
Ilustración 19. Dispositivos LED	75
Ilustración 20. Panasonic multicrystalline panel 255 W	84
Ilustración 21. Batería de respaldo BAE Secura PVS Block Solar Bornay para sistema solar	85
Ilustración 22. Baldosa piezoeléctrica	93
Ilustración 23. EKRR	104

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Emisiones de CO ₂ por consumo de electricidad	66
Ecuación 2. Demanda de energía eléctrica para iluminación convencional.....	70
Ecuación 3. Demanda de energía eléctrica para iluminación convencional al día SAC	71
Ecuación 4. Demanda de energía eléctrica para iluminación convencional al día OF...	71
Ecuación 5. Demanda total de energía eléctrica para iluminación convencional al día.	71
Ecuación 6. Demanda total de energía eléctrica para iluminación convencional al mes	71
Ecuación 7. Demanda total de energía eléctrica para iluminación convencional al año	72
Ecuación 8. Cálculo de emisiones de CO ₂ por uso de luminarias actuales edificio Rafael Arboleda	72
Ecuación 9. Costo teórico total de la iluminación convencional al día.....	73
Ecuación 10. Costo total de la iluminación convencional al mes	73
Ecuación 11. Costo total de la iluminación convencional al año	73
Ecuación 12. Demanda total LED	76
Ecuación 13. Demanda LED SAC al día.....	76
Ecuación 14. Demanda de energía eléctrica para iluminación LED OF al día	77
Ecuación 15. Demanda total de energía eléctrica para iluminación LED al día	77
Ecuación 16. Demanda total de energía eléctrica para iluminación LED al mes.....	77
Ecuación 17. Demanda total de energía eléctrica para iluminación LED al año	77
Ecuación 18. Cálculo de emisiones de CO ₂ por uso de luminarias LED edificio Rafael Arboleda	78
Ecuación 19. Ahorro energético con cambio a LED al año	78
Ecuación 20. Cálculo de emisiones evitadas de CO ₂ para luminarias LED edificio Rafael Arboleda al año	78
Ecuación 21. Costo teórico total de la iluminación LED al día	79
Ecuación 22. Costo teórico total de la iluminación LED al mes.....	79
Ecuación 23. Costo teórico total de la iluminación LED al año.....	79
Ecuación 24. Ahorro económico en energía eléctrica anual con cambio a LED	79
Ecuación 25. Ahorro económico porcentual del costo con tecnología LED.....	80
Ecuación 26. Recuperación de la inversión cambio luminarias LED	80
Ecuación 27. Potencia pico generada por panel al año.....	84
Ecuación 28. Número de paneles requeridos.....	84
Ecuación 29. Área total requerida para paneles solares	84
Ecuación 30. Cálculo de banco de batería.....	85
Ecuación 31. Ahorro energético con energía solar al año	85
Ecuación 32. Cálculo de emisiones evitadas de CO ₂ por sistema solar en el edificio Rafael Arboleda.....	86
Ecuación 33. Costo teórico total de la iluminación con energía solar al año	86
Ecuación 34. Ahorro económico en energía eléctrica anual con energía solar	87
Ecuación 35. Ahorro económico porcentual del costo con energía solar.....	87
Ecuación 36. Inversión en energía solar	87
Ecuación 37. Recuperación de la inversión en energía solar	87
Ecuación 38. Energía generada por una (1) baldosa piezoeléctrica en Wh.....	93
Ecuación 39. Energía generada por una (1) baldosa piezoeléctrica en 1 hora	94
Ecuación 40. Energía eléctrica producida por una (1) baldosa en la semana.....	96
Ecuación 41. Energía eléctrica producida por una (1) baldosa al mes	96
Ecuación 42. Energía eléctrica producida por una (1) baldosa al año.....	96
Ecuación 43. Número de baldosas requeridas al 100%	96

Ecuación 44. Área total requerida para baldosas piezoeléctricas	96
Ecuación 45. Ahorro energético con baldosas piezoeléctricas al año	97
Ecuación 46. Cálculo de emisiones evitadas de CO ₂ por baldosas piezoeléctricas en el edificio Rafael Arboleda.....	97
Ecuación 47. Costo teórico total de la iluminación con baldosas piezoeléctricas al año	98
Ecuación 48. Ahorro económico en energía eléctrica anual con baldosas piezoeléctricas	98
Ecuación 49. Ahorro económico porcentual del costo con energía solar.....	98
Ecuación 50. Inversión en baldosas piezoeléctricas	99
Ecuación 51. Recuperación de la inversión baldosas piezoeléctricas	99
Ecuación 52. Energía generada por una (1) EKRR en 1 hora	104
Ecuación 53. Número de EKRR requeridas al 100%	106
Ecuación 54. Área total requerida para EKRR.....	106
Ecuación 55. Ahorro energético con EKRR (kWh /año)	107
Ecuación 56. Cálculo de emisiones evitadas de CO ₂ por EKRR en el edificio Rafael Arboleda	107
Ecuación 57. Costo teórico total de la iluminación con baldosas EKRR al año	108
Ecuación 58. Ahorro económico en energía eléctrica anual con EKRR.....	108
Ecuación 59. Ahorro económico porcentual del costo con uso de EKRR	108
Ecuación 60. Inversión en EKRR.....	109
Ecuación 61. Recuperación de la inversión EKRR	109
Ecuación 62. Cálculo de emisiones de CO ₂ evitadas por la demanda de energía eléctrica total nacional.....	123
Ecuación 63. Potencial de reducción de emisiones de CO ₂ por demanda de energía eléctrica.....	124
Ecuación 64. Porcentaje de reducción de emisiones de CO ₂ por demanda de energía eléctrica. En el total de emisiones	124

Lista de Fotografías

Fotografía 1. Cubierta edificio Rafael Arboleda	148
Fotografía 2. Cubierta edificio Rafael Arboleda	148
Fotografía 3. Entrada vehicular norte – foto 1.....	155
Fotografía 4. Entrada vehicular norte – foto 2.....	156

Lista de Anexos

Anexo I. Símbolos químicos y unidades científicas.....	137
Anexo II. Emisiones mundiales de GEI antropógenas.....	138
Anexo III. Emisiones anuales por país de GEI en el mundo.....	139
Anexo IV. Distribución sectorial proyectos MDL en América Latina y el Caribe.....	140
Anexo V. Metodología AMS II. E.....	141
Anexo VI. Inventario de luminarias y demanda energética por iluminación del edificio Rafael Arboleda, PUJ.....	144
Anexo VII. Costos de luminarias LED.....	145
Anexo VIII. Mapa promedio multianual de radiación solar en Colombia.....	146
Anexo IX. Mapa promedio multianual de horas de sol en Colombia.....	147
Anexo X. Fotografías piso 9 edificio Rafael Arboleda (cubierta).....	148
Anexo XI. Diseño del piso 9 edificio Rafael Arboleda (cubierta).....	149
Anexo XII. Áreas del edificio Rafael Arboleda.....	150
Anexo XIII. Especificaciones de paneles solares Panasonic.....	151
Anexo XIV. Especificaciones batería de respaldo BAE Secura PVS Block Solar.....	152
Anexo XV. Flujo vehicular entrada norte del parqueadero de la PUJ.....	154
Anexo XVI. Fotografías de la entrada vehicular norte del parqueadero privado de la PUJ.....	155
Anexo XVII. Diseño de la entrada vehicular norte del parqueadero privado de la PUJ.....	157
Anexo XVIII. Especificaciones baldosas piezoeléctricas.....	158
Anexo XIX. Especificaciones EKRR.....	159

Palabras Clave

Acuerdo de París
Ahorro energético
Demanda energética
Dispositivo piezoeléctrico
Dióxido de carbono
Eficiencia energética
Emisiones evitadas
Emisiones de gases efecto invernadero
Energía eléctrica
Gestión ambiental
Iluminación
Mecanismos de desarrollo limpio
Paneles solares
Radiación solar
Rampas electroquinéticas
Responsabilidad ambiental
Tecnología LED
Transferencia tecnológica

Siglas

ACCEFYN	Asociación Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales
CC	Cambio Climático
COP	Conferencia de las Partes
ECDBC	Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono
EE	Eficiencia Energética
EKRR	Electro Kinetic Road Ramp, en ingles
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IEA	International Energy Agency, en inglés
IPCC	International Panel for Climate Change, en ingles
JE	Junta Ejecutiva
LED	Light Emiting Diode, en ingles
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MDL	Mecanismos de Desarrollo Limpio
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PUJ	Pontificia Universidad Javeriana
SIN	Sistema Interconectado Nacional de Colombia
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change, en ingles
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética

Glosario

Acuerdo de París: es un acuerdo dentro del marco de la UNFCCC que establece medidas para la reducción de las emisiones de dióxido de carbono desde el año 2020. El acuerdo fue negociado durante la XXI Conferencia sobre Cambio Climático y adoptado el 12 de diciembre de 2015.1 en París, Francia (UNFCCC, 2015).

Ahorro energético: Es cualquier acción que tienda a hacer más eficiente el consumo de energía sin disminuir la calidad del servicio obtenido por el uso de esta (Garper Energy Solution, 2015).

Calentamiento global: fenómeno que registra aumentos en las temperaturas promedio de la atmósfera terrestre y de los océanos, ocasionados fundamentalmente por acción del hombre (Torres & Gómez, 2008).

Cambio climático: alteración en las condiciones y patrones del clima, ligado de manera directa o indirecta a la actividad humana, la cual altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables (UNFCCC, 1992), (IPCC, 2014).

Capacidad instalada: La capacidad instalada es el potencial de producción de energía eléctrica que un sistema puede generar (Isagen, 2016).

CER: es una unidad de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, dada en toneladas de dióxido de carbono equivalente, que ha sido expedida de acuerdo con lo establecido en Artículo 12 del Protocolo de Kioto y las modalidades y procedimientos del MDL (Arce, 2009).

Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático: fue adoptada en Nueva York, el 9 de mayo de 1992 y firmada ese mismo año en la Cumbre de la Tierra (Río de Janeiro, Brasil) por 194 países más la Comunidad Europea. Su objetivo último es la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático. La Convención entró en vigor en marzo de 1994 a nivel mundial (UNFCCC, 2013).

Desarrollo sostenible: el concepto se basa en una idea de sociedad sostenible y en la gestión de los recursos renovables. Armoniza la explotación de los recursos, la dirección de las inversiones, la orientación del desarrollo tecnológico y el cambio institucional. El desarrollo sostenible integra dimensiones políticas, sociales, económicas y ambientales (IPCC, 2007).

Eficiencia energética: relación entre el producto de energía de un proceso de conversión o de un sistema y su insumo de energía (IPCC, 2001).

Eficacia luminosa: relación entre la cantidad de luz emitida y la potencia consumida (w) por una fuente de luz (Design LED company, 2012).

Gases-F: este término hace referencia a los grupos de gases hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre, contemplados en el Protocolo de Kioto (IPCC, 2007).

Sistemas de iluminación: son los sistemas para iluminar un sitio y se definen en base a la cantidad de luz directa, indirecta, difusa o una combinación de éstas, que llega al ambiente o área en particular (Estilo ambientación, 2015).

Mecanismo de Desarrollo Limpio: definido en el Artículo 12 del Protocolo de Kioto, persigue dos objetivos:

- 1) ayudar a las Partes “No Anexo I” a lograr un desarrollo sostenible y a contribuir al objetivo último de la Convención.
- 2) ayudar a las Partes del “Anexo I” a dar cumplimiento a sus compromisos de limitación y reducción de emisiones cuantificados. Las unidades de reducción de emisiones certificadas vinculadas a proyectos MDL emprendidos en países “No Anexo I” que limiten o reduzcan las emisiones de GEI, siempre que hayan sido certificadas por entidades operacionales designadas por la Conferencia de las Partes o por una reunión de las Partes, pueden ser contabilizadas en el haber del inversor (estatal o industrial) por las Partes incluidas en el “Anexo I” (IPCC, 2007).

Mitigación: medidas para reducir las fuentes o ampliar los sumideros de GEI (IPCC, 2001).

Protocolo De Kioto: el Protocolo de Kioto fue adoptado en 1997, en Kioto, Japón, en el 3er periodo de sesiones de la Conferencia de las Partes, en adelante COP por sus siglas en inglés, de la CMNUNCC. Contiene los compromisos jurídicamente vinculantes que vienen a sumarse a los contenidos en la UNFCCC. Los países señalados en el “Anexo I” del Protocolo de Kioto, la mayoría de los países del Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos, en adelante OCDE, y los países de economía de transición, acordaron reducir entre 2008 y 2012, sus emisiones antropógenas de GEI, en un 5% como mínimo respecto a los niveles de 1990. El Protocolo entró en vigor a nivel mundial el 16 de febrero de 2005 (IPCC, 2007).

Sumidero: todo proceso, actividad o mecanismo que extrae de la atmósfera un GEI, un aerosol, o alguno de sus precursores (IPCC, 2007).

Vatijaje: Cantidad de potencia necesaria para poner en funcionamiento un mecanismo, expresada en vatios (Parro, 2016).

1. INTRODUCCIÓN

A través de la historia, el desarrollo de la humanidad ha transcurrido por un sinnúmero de sucesos que le han permitido llegar al punto de establecerse como especie dominante sobre los distintos seres vivos que habitan el planeta. Hechos como la revolución industrial (Siglos XVIII y XIX) y el posterior desarrollo tecnológico a gran escala, le permitieron al hombre establecer sistemas productivos de mayor rendimiento, lo que le proporcionó a la población las condiciones necesarias para crecer a un ritmo acelerado². Esto lo ha llevado a diseminarse por las diferentes zonas del planeta, a tal punto de lograr colonizar todos los climas, gracias al desarrollo de herramientas y técnicas que le sirvieron para adaptarse a los diferentes sistemas naturales.

Lo anterior ha generado repercusiones en la demanda de recursos, en especial a la demanda energética y la producción de residuos más allá de lo que los ecosistemas son capaces de asimilar naturalmente.

Así mismo, el desarrollo de los países a costo de la demanda de energías no renovables como los combustibles fósiles, la explotación excesiva y cambio de uso de los suelos, la deforestación y una cultura de consumo sobre los cuales se construyó dicho proceso, ha traído como consecuencia la pérdida de la capacidad de carga del planeta³, afectando sus condiciones de regulación natural. Evidencia de esto se muestra en el Cambio Climático, en adelante CC, producto de llevar al límite la descarga de GEI, logrando que se incremente la absorción de la radiación solar y por ende el calentamiento global.

En vista a la preocupación mundial por el fenómeno de CC, la gran incidencia de este en la generación de desastres naturales y el deterioro de los recursos naturales, la comunidad internacional ha concertado y establecido mecanismos a través de la UNFCCC, que permitan tomar medidas de contingencia frente a dicha problemática.

La UNFCCC ha incentivado a los países desarrollados y en general a todos los países a la reducción de emisiones de GEI por medio acuerdos como el de París, el cual surgió mediante la Conferencia de las Partes o COP 21. Este marcará un antes y un después en la lucha contra el CC, gracias a la consecución de un compromiso vinculante y definitivo para la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera a partir del año 2020. Hasta esa fecha durará el aplazamiento que, desde la COP de Copenhague, se le hizo al Protocolo de Kioto, el cual marcaba un recorte en las emisiones de CO₂ del 15% para los países firmantes con respecto a lo emitido en 1990 (Fernández, 2015).

Dentro del marco del Acuerdo de París, se cuenta con un mecanismo para contribuir a la mitigación de las emisiones de GEI y apoyar el desarrollo sostenible. Este mecanismo es el MDL, el cual visto dentro de este marco se convierte en una herramienta de gran interés para acceder a los beneficios que se generen a partir del cumplimiento de dicho acuerdo.

² Según datos de Banco mundial (Banco Mundial, 2015) la población para el año 1750 era de 790'000.000 millones de personas mientras que para el año 2000 fue de alrededor de 6.100'000.000 millones de personas.

³ La capacidad de carga entendida como la población máxima de una especie dada que puede ser mantenida por tiempo indefinido en un hábitat dado, sin dañar permanentemente la productividad de ese hábitat (Creighton, 2016).

Estos GEI son producidos, principalmente, por la actividad industrial y la demanda de energías no renovables, trayendo como consecuencia la aceleración del aumento de la temperatura del planeta y posterior desencadenamiento de fenómenos que se traducen en el deterioro de la calidad de vida del hombre y los ecosistemas, afectando también la estructura social, económica y ambiental de los países en general.

En búsqueda de mejorar los sistemas productivos desde el punto de vista de la reducción de emisiones de GEI, diferentes sectores han contribuido con técnicas y métodos que han logrado disminuir la descarga de estas emisiones a la atmósfera; avances en proyectos de los sectores industrial, residuos, energético y forestal, han puesto las bases para lograr las metas de reducción a las cuales se han propuesto llegar los países en el Acuerdo de París.

Sin embargo, es necesario construir nuevos escenarios donde se logre cumplir metas más ambiciosas y transformar los sistemas de producción y consumo en formas más sostenibles y adecuadas de acuerdo a las condiciones que proporciona el medio sin que se vea afectada su capacidad de carga.

Bajo este contexto, la presente investigación tiene como objetivo proponer desde una perspectiva de responsabilidad ambiental y económica una alternativa que permita mejorar la eficiencia energética del sistema de iluminación del edificio Rafael Arboleda de la PUJ como un instrumento de reducción de emisiones de CO₂, basado en la metodología “AMS II.E: eficiencia energética y medidas de cambios de combustibles en edificios” aprobada por la UNFCCC, enmarcada en los lineamientos de las metodologías para proyectos MDL, de pequeña escala⁴.

Así mismo se pretende conocer las potencialidades de reducción de emisiones en el sector energético, evaluando la capacidad de producción de energía a través de sistemas alternativos que generen energía limpia aplicada a infraestructura, específicamente en institutos de educación superior, los cuales pueden mostrar un panorama de implementación de tecnologías alternativas que permitan la autosuficiencia energética en ciertas actividades asociadas con la infraestructura de dichas instituciones en la ciudad de Bogotá.

⁴ Por pequeña escala se entenderá como las actividades de proyecto de mejoramiento de la eficiencia energética, energía renovable o reducción de emisiones antropogénicas que reduzcan el consumo de energía hasta por un equivalente de 15 GWh por año (UNFCCC, 2016).

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Hoy en día, existen procesos de la sociedad que generan un impacto directo e indirecto sobre el ambiente, dentro de los cuales se pueden incluir los patrones poblacionales, de consumo y de producción, seguidos de la urbanización y crecimiento económico. Dichos procesos implican un crecimiento en la demanda energética y crean la necesidad de construir o mejorar las actuales fuentes de generación, lo que ha originado gran preocupación en la comunidad internacional. Esto ha impulsado el desarrollo de mecanismos que permitan tomar acciones de mejora en materia energética. En este contexto, se desarrollan nuevas tecnologías que tienen como finalidad crear alternativas para reducir los impactos generados a partir de la generación de energía eléctrica y al uso ineficiente que a esta se le pueda dar. Dentro de estas tecnologías se encuentran los dispositivos piezoeléctricos y los paneles solares.

La piezoelectricidad es un fenómeno que presentan algunos cristales que al ser sometidos a una tensión mecánica o presión, adquieren cierta polarización en su masa generando una diferencia de potencial y la aparición de cargas eléctricas en su superficie. Es gracias al uso de estos materiales que se puede aprovechar la energía mecánica que se genera cuando el suelo se deforma por las vibraciones que producen las máquinas o el tránsito de vehículos y personas; es así como surgen las baldosas piezoeléctricas o dispositivos piezoeléctricos productores de energía las cuales funcionan convirtiendo dicha energía mecánica generada por la presión a la que son sometidos los cristales en energía eléctrica, siendo esta una fuente de energía sostenible, renovable e inagotable (Hernández, 2013).

Otro dispositivo son las rampas electroquinéticas, en adelante EKRR por sus siglas en inglés, las cuales aprovechan la energía cinética que adquieren los vehículos con su movimiento para accionar el mecanismo interno de las mismas y de esta forma generar energía eléctrica. Esto las convierte en una fuente de energía limpia, renovable y sostenible (Fernandez Muerza, 2010).

Por otro lado, los sistemas de paneles solares, funcionan a partir de celdas fotovoltaicas, las cuales utilizan un material semiconductor que en el momento en que los fotones procedentes de la luz solar inciden sobre él, se encarga de capturar dicha energía para producir un movimiento de electrones, y por último la circulación de la corriente eléctrica (Shcheneider Electric, s.f).

Estas tecnologías han sido implementadas en varios países alrededor del mundo, en su mayoría países desarrollados. En Inglaterra, E.E.U.U., Francia, Japón, Israel, Holanda y Brasil, entre otros, se han instalado de manera permanente. La energía eléctrica producida mediante los dispositivos piezoeléctricas se utiliza para iluminar espacios abiertos y cerrados con Light-Emitting Diode, en adelante LED por sus siglas en inglés, funcionamiento de tableros electrónicos y estaciones de carga de dispositivos electrónicos, señalización y sistemas de publicidad (Pavegen Systems, 2014).

En Colombia, las principales fuentes de energía son las hidroeléctricas y las termoeléctricas, las cuales equivalen al 70,35% y al 18,45% de la producción total del país respectivamente (UPME, 2015); sin embargo, estas son causantes de diferentes

problemas ambientales que deben ser considerados antes de pensar en nuevos proyectos de este tipo. Las termoeléctricas, usan combustibles fósiles (carbón y/o gas) que generan emisiones de GEI y de lluvia ácida en la atmósfera, junto a partículas volantes (en el caso del carbón) que pueden contener metales pesados. Al ser los combustibles fósiles una fuente de energía no renovable, su uso está limitado a la duración de las reservas y/o su rentabilidad económica. Sus emisiones térmicas y de vapor pueden alterar el microclima local. Afectan negativamente a los ecosistemas fluviales debido a los vertidos de agua caliente en estos (Muerza, 2007).

Las hidroeléctricas ocasionan impactos tanto sociales como ambientales, sociales por el desplazamiento de las comunidades que se ven obligadas a movilizarse para dar paso a estos proyectos, ambientales por la alteración de los ecosistemas que provoca afectaciones a las dinámicas bióticas y abióticas (Gómez, s.f.).

Por otro lado, en Colombia, la escasa investigación e implementación en cuanto a estrategias de eficiencia energética entorpece el desarrollo en el campo del comercio de nuevas tecnologías que favorezcan al ambiente.

Más puntualmente, en el edificio Rafael Arboleda de la PUJ, en Bogotá, se consume una alta cantidad de energía eléctrica al año y opera con sistemas ineficientes de iluminación, lo que puede resultar en importantes problemas indirectos de contaminación. Debido a su ubicación frente a la entrada al parqueadero de la PUJ, existe un alto potencial para aprovechar la energía eléctrica generada mediante la implementación de los dispositivos piezoeléctricos. Allí se cuenta con un elevado número de vehículos que transitan concurridamente. Además, el edificio Rafael Arboleda tiene un espacio inutilizado en el piso superior, donde se pueden instalar los paneles solares.

Colombia, siendo un país rico en recursos naturales y con una posición geográfica privilegiada, debe tener en cuenta la generación alternativa de energía eléctrica, tal como se plantea en el Código Nacional de Recursos Naturales. A pesar de que el código se expidió hace 40 años, la generación de energía eléctrica a partir de fuentes alternativas sigue sin ser aprovechada e investigada a fondo. Esto propone un futuro con bajas probabilidades de avanzar en materia energética de una manera más sostenible.

Se han expedido leyes, como lo son los incentivos en materia económica mediante la exención de impuestos, que buscan impulsar este tipo de energías alternativas pero que no han tenido un impacto significativo y tampoco son muy claras en cómo lograr su objetivo.

Al generar estudios enfocados a la propuesta de implementación de una alternativa que permita la eficiencia energética, se podrá plantear un escenario mejorado y generar beneficios ambientales y económicos, frente al funcionamiento energético del edificio Rafael Arboleda de la PUJ.

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace necesario saber ¿en qué proporción se puede disminuir la demanda energética por iluminación, generar beneficios económicos y fortalecer la responsabilidad ambiental de la PUJ a partir de la implementación de medidas de eficiencia energética en el edificio Rafael Arboleda?

3. JUSTIFICACIÓN

La PUJ es una institución educativa privada de comunidad Jesuita ubicada en Bogotá, Colombia. Esta ciudad está a 4° 35' latitud norte y 74° 4' longitud oeste donde recibe una radiación solar promedio anual de 3.5 – 4.0 kWh/m²-día (UPME & IDEAM, 2005). En esta institución confluyen un gran número de personas de las cuales muchas utilizan automóvil, lo que genera un alto flujo vehicular en el parqueadero privado.

Por otro lado, se genera una alta demanda de energía eléctrica para la operación rutinaria de la universidad. Algunos edificios con un elevado número de salones y oficinas, como el edificio Rafael Arbolea, contribuyen en gran proporción a la demanda de energía eléctrica y más puntualmente a la necesaria para la iluminación. Esta energía utilizada proviene del sistema interconectado nacional, en adelante SIN. Es decir, que el abastecimiento eléctrico puede provenir desde una fuente generadora (hidroeléctrica o termoeléctrica) situada en cualquier parte del territorio nacional (UPME, 2014). Cabe mencionar que el petróleo, el gas natural y el carbón, los cuales emiten la mayor cantidad de carbono por unidad de energía suministrada, son el mayor insumo utilizado para producir la energía en las centrales termoeléctricas del país (UNFCCC; PNUMA, 2014).

El suministro y utilización de estos combustibles fósiles contribuye en aproximadamente un 80% a las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) producidas por el hombre y una significativa cantidad de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). También, genera óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos y monóxido de carbono (CO), que aunque no sean gases de invernadero influyen en los ciclos químicos en la atmósfera que crean o destruyen otros gases de efecto invernadero. (UNFCCC; PNUMA, 2014).

Al mejorar la eficiencia energética y generar procesos de transferencia tecnológica al edificio Rafael Arbolea de la PUJ, se pueden aplicar alternativas que disminuyan las emisiones de GEI a la atmósfera y así producir importantes resultados a corto, mediano y largo plazo, como es la reducción de dichos gases y el ahorro económico generado para iluminación. Dentro estas alternativas se encuentran la sustitución por tecnología LED, la cual es una forma de iluminación más eficiente, y la utilización de dispositivos piezoeléctricos y paneles solares.

De esta forma, no solo se comercializa un producto sino que también se genera conciencia ambiental. Se evidencia la posibilidad de pensar en la implementación de energías limpias que impulsan el uso de nuevas tecnologías amigables con el ambiente.

Con la implementación de estrategias de eficiencia energética se logra abrir las puertas al uso de tecnologías limpias que ayuden al cuidado del ambiente y que sirvan como herramienta para impulsar el uso de otras fuentes de energía no convencionales. Poco a poco, se pueden ir implementando con mayor eficacia y lograr así disminuir el uso de combustibles fósiles como el carbón y el gas usados en las termoeléctricas, o la energía hidráulica, que como se ha mencionado anteriormente, son las principales fuentes de energía usadas en Colombia. Con esto se busca disminuir los diferentes impactos ambientales que estas conllevan.

De igual forma, se incrementa el nivel de responsabilidad social, ambiental y empresarial de la PUJ, alineándose a las Estrategias Nacionales de Desarrollo Bajo en Carbono, en adelante ECDBC, y aportando al cumplimiento del Acuerdo de París, mediante la aplicación de MDL.

Cabe resaltar que lo más importante para realizar cualquier transferencia tecnológica es el interés y la disposición para llevarlo a cabo: la incertidumbre, la falta de conocimiento y apoyo a políticas, los costos, entre otros, son algunas de las barreras que se deben superar para lograr la implementación de una nueva tecnología. Solo así se puede evaluar y determinar el verdadero potencial de su uso al igual que otras posibles aplicaciones u opciones de mejora que se puedan hacer. También se puede evaluar la disminución en el impacto ambiental generado por la forma de producción de energía eléctrica hoy en día.

Por otro lado, este proyecto es importante para la Gestión Ambiental y para los autores del mismo, en cuanto a la formulación de alternativas que permitan hacer un uso eficiente de los recursos en aras de promover el Desarrollo Sostenible del objetivo a estudiar, es decir el edificio Rafael Arboleda, no solo en el contexto local - Bogotá, sino a nivel nacional - Colombia. Esto se traduce en un aporte para las estrategias de mitigación de emisiones de Gases Efecto Invernadero en el país.

Finalmente es pertinente hacer este proyecto ya que integra los conocimientos adquiridos durante la maestría y genera participación social por parte de la comunidad Javeriana, contribuyendo a mejorar la Gestión Ambiental en las actividades y procesos que requieren de energía eléctrica. Esto teniendo en cuenta que la investigación e innovación son procesos naturales del centro educativo PUJ.

4. OBJETIVOS

4.1 GENERAL

Proponer desde una perspectiva de responsabilidad ambiental y económica una alternativa que permita mejorar la eficiencia energética del sistema de iluminación del edificio Rafael Arboleda de la PUJ como un instrumento de reducción de emisiones de CO₂.

4.2 ESPECÍFICOS

- Elaborar una línea base de emisiones de CO₂ generadas por la demanda de energía eléctrica para iluminación del edificio Rafael Arboleda de la PUJ.
- Estimar el potencial de iluminación con tecnología LED.
- Estimar el potencial de producción de energía eléctrica de sistemas conformados con dispositivos piezoeléctricos ubicados en la entrada vehicular norte y paneles solares instalados en el piso superior del edificio Rafael Arboleda de la PUJ.
- Plantear escenarios mejorados como propuesta de eficiencia energética para el edificio Rafael Arboleda de la PUJ.
- Simular económicamente los escenarios mejorados.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 MARCO TEÓRICO

5.1.1 Calentamiento Global

El calentamiento global es analizado a simple vista como un aumento gradual en la temperatura de la tierra debido a cambios en la concentración de los GEI, principalmente de CO₂ y vapor de agua. Esta alteración ha sido ocasionada por el consumo energético de la humanidad desde la revolución industrial (IPCC, 2007).

Para el común o para las ideologías consumistas, desde una posición netamente antropocéntrica, los resultados de este aumento de temperatura quizá no alteren las condiciones de vida de nuestra especie, esto se podría argumentar afirmando nuestra gran capacidad de adaptación.

Un futuro incierto nos espera si se le ve con una visión consumista cuando hablamos de calentamiento global, teniendo en cuenta que unos pocos grados en el incremento de la temperatura media del planeta implican la alteración no solamente del clima sino de procesos naturales, procesos a los cuales nuestra especie está ligada (IPCC, 2007).

Aun teniendo herramientas que nos facilitan la predicción del clima, como la meteorología, no conocemos con certeza absoluta cómo responderán a este cambio los ecosistemas con el pasar de los años. Por esta razón y conociendo la relación directa con el medio ambiente, se tiene que adoptar una posición crítica, donde el ser humano no es el centro del ambiente sino un componente más de un gran sistema compuesto de procesos naturales, físicos, químicos y biológicos, que aseguran las condiciones mínimas para que el planeta tierra sea habitable.

El ser humano cumple un rol importante en el equilibrio de las condiciones y características naturales terrestres a tal punto que ha sido capaz de alterar el comportamiento natural de las variables que definen el clima.

Muchas formas de vida sobreviven dentro de las condiciones naturales de su hábitat, las cuales están relacionadas con el clima. En los últimos años, se han evidenciado los graves efectos del calentamiento global sobre el planeta: la disminución de los casquetes polares, el aumento leve del nivel del mar, el aumento de tornados y tormentas, el cambio de las estaciones y por lo tanto de ciclos biológicos, entre otros, afectando a todos los seres vivos.

Si el clima cambia, los ecosistemas también, y éstos a la vez, tienen relación directa como fuente de energía para el sustento de todas las formas de vida. Se puede pensar en una cadena de interacciones donde cada una de las variables están relacionada y sujeta a los cambios que las otras puedan tener (IPCC, 2014).

5.1.2 Cambio Climático

De acuerdo con el Panel Intergubernamental del Cambio Climático, en adelante IPCC por sus siglas en inglés, se refiere a “cualquier [CC] producido en el tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o a la actividad humana” (IPCC, 2007).

Dicho término difiere al presentado por la UNFCCC, para quién está definido como “un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad climática natural observada durante periodos de tiempo comparables” (IPCC, 2007). Este término toma por conjunto la actividad humana y la variabilidad natural.

Este fenómeno de CC esta soportado por varias teorías científicas, las cuales se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Teorías que explican el cambio Climático

Teoría	Concepto
1. Corrientes oceánicas	Estas corrientes, son un factor regulador del clima que actúa como moderador, suavizando las temperaturas de regiones como Europa.
2. GEI	La quema de combustibles fósiles, petróleo, carbón y gas natural, y por consiguiente la generación de CO ₂ , entre otros gases, es causante del incremento en la temperatura media del planeta Tierra.
3. Impactos de meteoritos	Estos fenómenos pueden provocar un efecto devastador sobre el clima al liberar grandes cantidades de CO ₂ , debido a la quema de grandes extensiones boscosas.
4. La deriva continental	La Tierra ha sufrido muchos cambios desde su origen hace 4.600 millones de años. Hace 225 millones todos los continentes estaban unidos, formando lo que se conoce como Pangea, y había un océano universal llamado Panthalassa.
5. Variaciones orbitales	La órbita terrestre oscila periódicamente, lo que hace que la cantidad media de radiación que recibe cada hemisferio varíe en el tiempo, lo que es otro causante de las glaciaciones.
6. Variaciones solares	La temperatura media de la Tierra depende, en gran medida, del flujo de radiación solar que recibe.

Fuente: (Arce, 2009)

Es muy probable que el CC no sea explicado por una sola de estas teorías, sino por varias de ellas. Sin embargo, los GEI tienen una representación significativa dentro de este fenómeno, debido al potencial de calentamiento que estos manejan, mencionados más adelante.

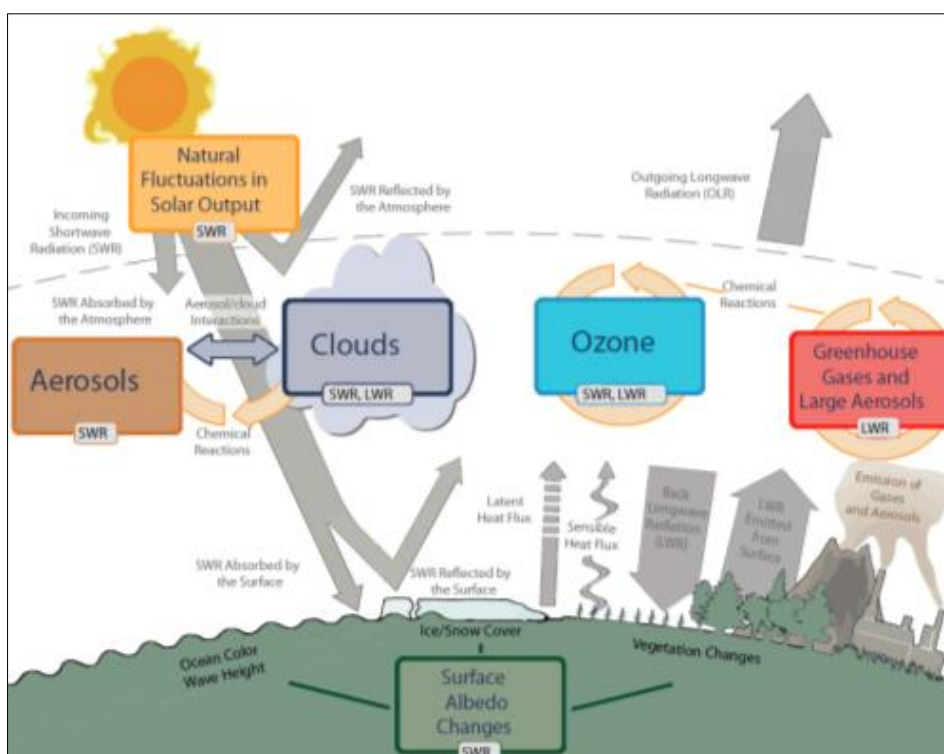
A diferencia del calentamiento global, el cual se refiere a los incrementos en la temperatura superficial, el CC incluye éste, y todos los otros aspectos sobre los que influye el incremento de los GEI.

Según el MAVDT (2003), el CC es un fuerte agravante frente a la escasez de agua en el mundo. Algunos de los factores relacionados con el CC incluyen entre otros:

“...aceleración de la evapotranspiración, disminución de las precipitaciones medias anuales en determinadas regiones (Mediterráneo, Asia Central, Sur de África y Australia), retroceso de los glaciares de montaña, salinización de las fuentes de agua por incremento del nivel del mar y alteración de la capacidad de retención del líquido en suelos, acuíferos y obras civiles debido a lluvias torrenciales y deslizamientos de tierra...” (IPCC, 2001).

Las variaciones en el clima debido a este fenómeno, han acarreado distintas consecuencias como las amenazas frente a los asentamientos humanos por la frecuencia y la creciente intensidad de eventos catastróficos. Dentro de estos eventos encontramos inundaciones y deslizamientos de tierra a causa de mayores precipitaciones y del aumento del nivel del mar, tormentas por el incremento de la temperatura de los océanos e incendios forestales por el aumento de la temperatura y disminución de la humedad en los distintos ecosistemas afectados (MAVDT, 2003).

Ilustración 1. Cambio climático



Fuente: (IPCC, 2014)

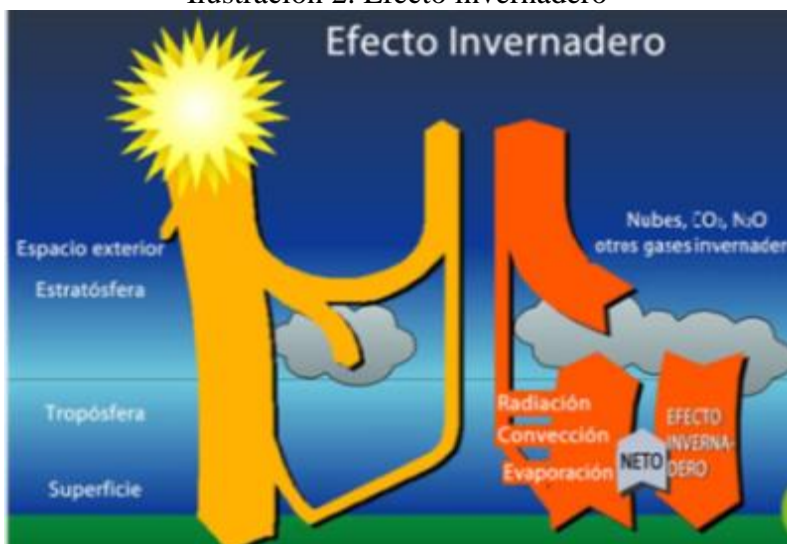
Una de las causas más importantes del CC es el efecto invernadero, el cual está relacionado directamente con la teoría 2 de la Tabla 1 mencionada anteriormente.

5.1.3 Efecto Invernadero

El efecto invernadero, es un proceso natural necesario para la existencia de vida en la Tierra, el cual permite que la atmósfera absorba parte de la radiación solar reflejada por la superficie terrestre, manteniendo así el equilibrio térmico. En este proceso se permite que durante la noche, el planeta no se enfríe demasiado, pues de lo contrario la vida en ella, como se conoce ahora no sería posible.

La absorción de radiación o retención de calor se incrementa con la presencia de los GEI, muchos de los cuales están presentes en nuestra atmósfera de manera natural (Arce, 2009). La Ilustración 2 muestra este proceso.

Ilustración 2. Efecto invernadero



Fuente: (Global, 2016)

Los GEI que están presentes en la atmósfera pueden absorber la radiación de onda larga emitida por la superficie de la Tierra. Este suceso impide que la energía emitida por el planeta abandone la atmósfera indirectamente, siendo transportada por las corrientes de aire y la formación de nubes.

La acción de estos gases hace que el proceso de intercambio de energía sea lento, permitiendo que la temperatura terrestre sea moderada, lo que ha permitido que se generen las condiciones óptimas para la evolución de la vida en la Tierra. Sin embargo, el exceso de GEI en la atmósfera generan un aumento en la temperatura media del planeta, afectando sus comportamientos naturales (UNEP, 2001).

Según la Organización de Estados Iberoamericanos (2009), en adelante OEI, el problema no está en el fenómeno del efecto invernadero como tal, sino en la alteración de los equilibrios existentes, debido al incremento de GEI, principalmente por la emisión creciente de CO₂ que se produce al quemar combustibles fósiles.

Desde la revolución industrial, los procesos y actividades que se desarrollan en el planeta han generado una mayor producción y concentración de GEI en la atmósfera terrestre. “Entre el año 1750 y 2000, los aumentos en la concentración en la atmósfera del CO₂ y del CH₄ han sido de 31% (±4%) y 151% (±25%) respectivamente, siendo estos dos gases junto con el vapor de agua, los tres principales GEI” (IPCC, 2011). Ver Anexo I. Símbolos químicos y unidades científicas.

Estas nuevas condiciones, las cuales cada día cambian con velocidad, son generadas por la acción humana frente a la capacidad reguladora de la atmósfera y tienen un gran potencial para afectar las fuentes del agua líquida en la Tierra, producto de una temperatura media de 15°C (IPCC, 2011).

5.1.4 Gases Efecto Invernadero

Hay muchos gases en el ambiente que tienen la capacidad de capturar la radiación, aumentando así la temperatura en la atmósfera. Sin embargo, no todos estos gases son representativos frente al fenómeno del Cambio Climático. Los nueve GEI más importantes son los clorofluorocarbonados (CFC), dióxido de carbono (CO_2), hexafluoruro de azufre (SF_6), hidrofluorocarbonados (HFC), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), perfloroetano (C_2F_6), perfluorocarbonados (PFC) y vapor de agua (H_2O).

Las emisiones de CO_2 producto de las acciones humanas, contribuyen con el 60% del incremento del efecto invernadero en el planeta (UNEP, 2001). La mayor fuente de emisiones de este gas proviene de la combustión de combustibles fósiles como el carbón, gas natural, petróleo y sus derivados, principalmente en la producción de energía y el transporte. Respecto a otros sectores, la deforestación, también es una fuente representativa de CO_2 , ya que libera el carbono contenido en la biomasa.

De acuerdo con el quinto reporte de evaluación respecto al CC desarrollado por el (IPCC, 2014), entre 1970 y 2010 las emisiones de gases GEI han incrementado continuamente, con registros absolutos mayores entre los años 2000 y 2010. A pesar de las políticas de mitigación frente al CC, en promedio, anualmente el aumento de GEI entre 2000 y 2010 fue del 2,2%. Para el año 2100, se estima que el incremento oscilará entre un 75% y un 350% (IPCC, 2014).

Según el (IPCC, 2014):

“Las emisiones antropógenas acumuladas de gases de efecto invernadero (GEI) desde la era preindustrial han experimentado grandes aumentos en las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O). Entre 1750 y 2011 las emisiones antropógenas de CO_2 a la atmósfera acumuladas fueron de $2.040 \pm 310 \text{ GtCO}$. Alrededor del 40% de esas emisiones han permanecido en la atmósfera ($880 \pm 35 \text{ GtCO}$) y el resto fueron removidas de la atmósfera y almacenadas en la tierra (en plantas y suelos) y en el océano. Los océanos han absorbido alrededor del 30% del CO_2 antropógeno emitido, provocando su acidificación. Alrededor de la mitad de las emisiones de CO_2 antropógenas acumuladas entre 1750 y 2011 se han producido en los últimos 40 años”.

5.1.5 La iluminación y su importancia en la generación de Gases Efecto Invernadero (GEI)

La iluminación hace referencia a la cantidad de luz con la que cuenta un lugar ya sea de forma natural o artificial, puede variar dependiendo de las condiciones ambientales, las necesidades de iluminación y la disponibilidad de fuentes de luz, y aunque estas condiciones pueden variar y ser específicas de un sitio a otro siempre se debe contar con la iluminación óptima para satisfacer las necesidades de cada sitio y de las personas de tal forma que les permita desarrollar las diferentes actividades con la mayor comodidad y seguridad (Estilo ambientación, 2015).

Desde la perspectiva ambiental, la producción y demanda de energía eléctrica para iluminación genera un impacto adverso a causa del uso de combustibles fósiles en las plantas termoeléctricas. Esto representa un incremento en la emisión de contaminantes atmosféricos tales como lo son material particulado PM₁₀, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono, entre otros. Se estima que el sistema de generación de energía a nivel mundial está estructurado y proviene en un 86% por este tipo de fuentes.

Al revisar la producción de GEI desde el sector energético, se puede notar que el sector de energía y electricidad contribuye con el 25% de generación de GEI mundial, A su vez las emisiones indirectas generadas por este sector están relacionadas en un 12% al uso final de la energía por el sector de las construcciones (IPCC, 2014).

5.1.5.1 Clases de Bombillas

El primer bombillo convencional fue inventado por Thomas Alva Edison en 1879, el cual consistía en un bulbo de cristal al que se le hacía vacío en su interior donde había un filamento de carbón que al ponerse incandescente por el paso de la corriente eléctrica daba como resultado la iluminación. Éste logró estar encendido por un periodo de 48 horas seguidas (Epec, 2015).

Según (Andrade, Ardila, Lopez, & Rico, 2011), en las últimas décadas sus partes siguen siendo casi las mismas:

- El Bulbo de vidrio transparente actúa como recipiente para una atmósfera gaseosa (sin aire) compuesta de un gas inerte que aumenta la duración del filamento.
- El gas inerte usado en los bombillos es Argón, es el encargado de aislar el filamento para evitar su evaporación.
- La entrada de corriente es un casquillo metálico hecho de aluminio ubicado en base del bombillo y al cual entran dos alambres de cobre, del contacto de ambos elementos se produce la corriente.
- El filamento (material conductor) es un hilo metálico muy fino de Tungsteno a través del cual circula la corriente eléctrica haciendo que se caliente y emita luz. El material por el que está compuesto puede aguantar los 3.000 grados sin fundirse.
- Los alambres de contacto son de cobre, y son los encargados de transmitir la corriente eléctrica al filamento.

Con el paso del tiempo y los avances tecnológicos las bombillas han ido evolucionando con el fin de aumentar su eficiencia, su calidad, su duración y disminuir sus impactos. Encontramos los siguientes tipos (Gil, 2009):

- Bombillas incandescentes: son las más comunes aunque están desapareciendo poco a poco, poseen un filamento de tungsteno que se ilumina al calentarse y emiten un halo luminoso ligeramente amarillento, poco eficientes debido a que gran parte de la energía producida es calórica (aproximadamente el 95%) y el restante es energía lumínica (aproximadamente el 5%).

- Bombillas incandescentes reflectoras: poseen un baño reflector plateado que impide que la luz salga por la parte delantera, previniendo así el deslumbramiento ocasionado por la luz directa. Producen una suave luz indirecta adecuada para lámparas bajas o zonas de lectura.
- Tubos fluorescentes: también muy comunes desde hace algunos años, emiten una luz muy blanca, radiante y muy fría, lo que los hace poco llamativos en zonas de descanso y relajación. Tienen una baja demanda de energía, siendo ideales para zonas de trabajo.
- Bombillas con ahorro de energía: basadas en un sistema semejante al de los tubos fluorescentes, también emiten una luz fría y blanca. Tiene la ventaja de tener una vida útil más larga que las bombillas ordinarias y una demanda de electricidad mucho menor.
- Bombillas halógenas: para su uso se recomienda el uso de reguladores de potencia, emiten una luz blanca, son de pequeño tamaño, bajo consumo y alta capacidad de iluminación por lo que se usan frecuentemente en las lámparas empotradas, de trabajo o luces ambientales.
- Bombillas LED: están tomando fuerza en su uso debido a las ventajas que presentan en comparación a las anteriores, debido a su vida útil mucho más prolongada, gran eficiencia luminosa, un consumo mucho menor lo que implica un mayor ahorro tanto económico como en el consumo de energía eléctrica, un tamaño pequeño, emiten luz fría.

5.1.5.2 Tecnología LED

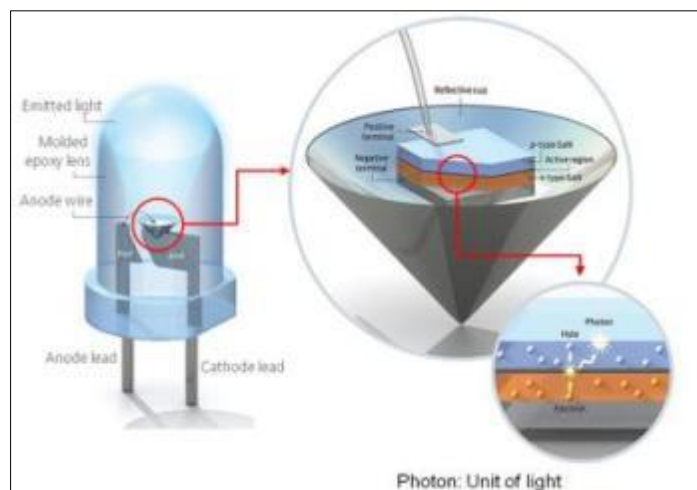
Los diodos luminiscentes LED aparecieron por primera vez y de forma comercial en 1962 y solo emitían una luz roja tenue, por lo que su uso se limitó únicamente para señalización del funcionamiento de dispositivos electrónicos (Herranz, Ollé, & Jáuregui, 2015).

No fue sino hasta finales de los ochenta y principios de los noventa que se empezaron a desarrollar además de los LED rojos los LED amarillos, verdes, azules y blancos, con esto también aumenta significativamente su rendimiento y en los años noventa la tecnología LED conquista la industria del automóvil y la industria de paneles luminosos (displays) para dispositivos electrónicos. Pero fue hasta la década pasada (2000 a 2010) cuando se extiende el rendimiento de los LED blancos de manera exponencial, de tal forma que entra con gran fuerza e inicia la conquista de la industria de la iluminación (Herranz, Ollé, & Jáuregui, 2015).

Los LED de luz blanca se basan en el LED de luz azul a los que se les hace una corrección de color mediante una capa de fósforo. Esto tiene una relación inversa entre la eficacia y la capa de fosforo, de tal forma que para obtener la máxima eficacia se debe tener la menor capa de fósforos posible (Herranz, Ollé, & Jáuregui, 2015).

La eficiencia energética de los LED radica en que sus valores de rendimiento se pueden alcanzar desde los 55 lm/W hasta 90-110 lm/W, lo que las hace más eficientes que muchas de los otros tipos de lámparas, aparte que todas las demás tienen una menor vida útil en comparación con la iluminación LED (Certificados energéticos, 2015).

Ilustración 3. Funcionamiento LED



Fuente: (Yuste, 2014)

La ventaja de la iluminación LED radica en su menor consumo y mayor eficiencia luminosa ya que demanda entre un 80 y 90% menos de electricidad que la iluminación incandescente y un 65% menos de electricidad que la iluminación de bajo consumo fluorescente. Por ende reduce las emisiones de CO₂ (Gutiérrez M. , 2014) (Design LED company, 2012). Esto sumado a su mayor vida útil, la cual no se ve afectada por el número de veces que se encienda (enciende en menos de 1 milisegundo), menor tamaño, emiten menos calor, no contienen sustancias peligrosas (mercurio), no crea campos magnéticos altos y son compatibles con las instalaciones fotovoltaicas (Certificados energéticos, 2015).

Aunque el principal inconveniente para su uso era su costo elevado, durante los últimos años este ha disminuido haciéndolas más asequibles, a esto sumándole su bajo consumo, fiabilidad, gran vida útil y el hecho de que han aumentado sus cualidades, su versatilidad y junto a su mejor eficiencia respecto a los otros sistemas de iluminación; hacen de la tecnología LED la mejor opción pues es práctica, funcional y lo más importante sostenible (Gutiérrez M. , 2014).

Tabla 2. Comparativa de las fuentes de luz actualmente más usadas en iluminación

Tipo de luminaria	Eficacia (lm/W)	Tiempo de vida (h)
Halógena	20	1.200
Halogenuros metálicos	70 - 108	15.000
Fluorescente	60 - 100	8.000
Sodio baja presión	120 - 200	16.000
Sodio alta presión	95 - 130	28.000
LED	90 - 120	>50.000

Fuente: (Herranz, Ollé, & Jáuregui, 2015)

5.1.6 Eficiencia Energética

La Eficiencia Energética, en adelante EE, es el conjunto de acciones que permiten optimizar la relación entre la cantidad de energía consumida y los productos y servicios finales obtenidos. Esto se puede lograr a través de la implementación de diversas medidas e inversiones a nivel tecnológico, de gestión y de hábitos culturales en la comunidad (CONAFE, 2013).

Podemos decir que la EE consiste simplemente en hacer buen uso de la energía sin que esto afecte la calidad de vida o los servicios que se prestan. Por el contrario esto puede mejorar estos aspectos causando una mayor eficiencia, un mayor ahorro tanto energético como económico, una reducción de la contaminación y de la dependencia energética. Esto se puede lograr simplemente con un cambio en las conductas y los hábitos de las personas adoptando conductas responsables, hasta la implementación de nuevas tecnologías para el ahorro y uso eficiente de la energía.

A través de la implementación de EE se pueden ahorrar los recursos naturales, energéticos y económicos, y puede llegar a brindar la solución al grave problema del agotamiento de nuestra principal fuente de energía, los combustibles fósiles de los cuales depende mayoritariamente el suministro energético mundial y que además son uno de los principales motores de la economía global; retrasando o por qué no evitando su agotamiento, igualmente es una de las mejores alternativas y/o soluciones para reducir las emisiones de CO₂ (Linares, 2009).

La clave para este ahorro radica en el hecho de que la energía que consumimos está dada en forma de servicios energéticos, por lo que es posible proveer los mismos servicios energéticos disminuyendo los niveles de consumo de energía. Aunque el ahorro y la EE no sean la solución para todos los problemas ambientales, su contribución si es de vital importancia para la mitigación o la solución de algunos de ellos, como el cambio climático (Linares, 2009). Prueba de esto se puede observar la relación entre la demanda energética y las emisiones de CO₂. Esta relación hace que muchas instituciones ambientales a nivel mundial promuevan esta medida como la alternativa con mejor potencial y rentabilidad para reducir las emisiones de CO₂, por ejemplo el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático IPCC en su cuarto informe de evaluación estima que se podrían ahorrar entre 7% y 14% de las emisiones de GEI globales para 2030 con diversas medidas de ahorro y EE.

La Agencia Internacional de la Energía, en adelante IEA por sus siglas en inglés, considera que el ahorro y la eficiencia energética deben ser capaces reducir la emisión de GEI en un 50% (Linares, 2009).

5.1.7 Uso de energía solar como medida para la reducción de emisiones

La energía solar, es una de las denominadas energías renovables, ya que se caracteriza por ser una fuente o recurso inagotable en relación al ciclo de vida del hombre, así mismo representa una opción interesante al ser una fuente abundante y no contaminante para el ambiente, aunque debe ser evaluada su viabilidad económica y de infraestructura técnica debido a su alto costo inicial de inversión (USDOE, FIRCO, SNL, 2001).

El desarrollo de tecnologías maduras a partir de fuentes de energía renovable, como la solar, tienen un gran potencial para la generación de energía eléctrica tanto en lugares apartados o sectores rurales, como en grandes ciudades centrales (USDOE, FIRCO, SNL, 2001).

Hoy en día tecnologías como la fotovoltaica, disponible comercialmente, es una alternativa real para la implementación en diferentes actividades de acuerdo a la demanda de energía ya sea doméstica, industrial o agropecuaria (USDOE, FIRCO, SNL, 2001).

La generación de energía solar a partir de sistemas fotovoltaicos, fue desarrollada a mediados del siglo XIX, más exactamente en 1839, por el científico Alexandre Edmond Becquerel quien el cual descubrió el efecto fotovoltaico en las células de silicio (Sanchez Pacheco, 2010).

La generación de energía solar empleando los sistemas fotovoltaicos, en países como Colombia surgió con el programa de Telecomunicaciones Rurales de Telecom a mediados de los años 80, llevado a cabo con la asistencia de la Universidad nacional de Colombia. Según afirma Murcia (2009), a través de dicho programa, se adecuó la infraestructura para instalar pequeños generadores fotovoltaicos de 60 vatios pico, para radioteléfonos rurales. Para 1983, habían instalados 2.950 de tales sistemas.

5.1.7.1 Células fotovoltaicas

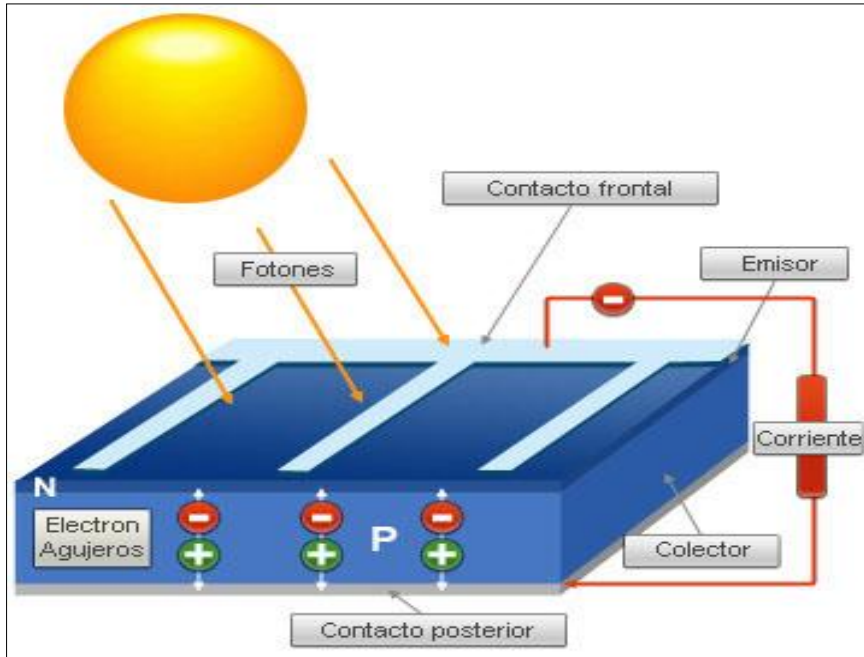
Estas son el elemento base de la estructura de un panel fotovoltaico, su función está relacionada con captar la energía solar incidente y poder transformarla en una corriente eléctrica (Shcheneider Electric, s.f). La célula fotovoltaica, puede estar constituida de varios materiales. Actualmente, los tipos de materiales más comercializados son el silicio mono cristalino, poli cristalino y silicio amorfo o de capa delgada.

Las células fotovoltaicas mono cristalinas, como su nombre lo indica, están compuestas por un solo cristal de silicio, mientras que las poli cristalinas, se constituyen por la unión de varios cristales, en cuanto al rendimiento de estos dispositivos, en la actualidad se ofrecen opciones con las mismas características en desempeño para los dos tipos de células mencionadas, lo que hace que la elección en el momento de adquirirlas sea más simple (Shcheneider Electric, s.f).

Su principio de funcionamiento se basa en el material semiconductor que la constituye, el cual en el momento en que los fotones procedentes de la luz solar inciden sobre dicho material, este se encarga de capturar dicha energía para producir un movimiento de electrones, y por último la circulación de la corriente eléctrica (Shcheneider Electric, s.f).

A continuación, en la Ilustración 4, se muestra el principio de funcionamiento de una célula fotovoltaica.

Ilustración 4. Principio de funcionamiento de una célula fotovoltaica



Fuente: (Dhamma Energy, s.f)

- Modulo fotovoltaico

Los módulos, se refieren a la unión en serie de varias células fotovoltaicas para poder obtener una tensión continua que puede ir de 12 a 36 voltios (Shcheneider Electric, s.f). Las agrupaciones de varias células en serie también pueden integrarse nuevamente a otros módulos para generar una potencia y una tensión final determinada.

- Panel fotovoltaico

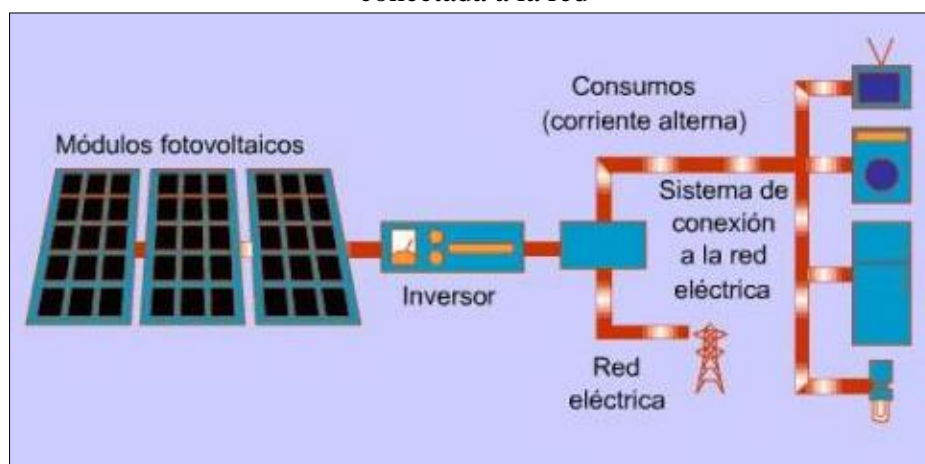
Finalmente, la agrupación de módulos constituye a los paneles solares. Estos pueden ir fijos, generalmente orientados al sur geográfico y con una inclinación según la latitud. En otros casos, también se puede utilizar tecnologías de seguimiento, las cuales consisten en la orientación e inclinación del panel que permita el máximo aprovechamiento de la incidencia de la luz.

- Sistemas fotovoltaicos conectados a la red

Los sistemas de generación de energía a partir de energía solar, normalmente, están diseñados para suplir necesidades de energía en sitios apartados donde se cubren demandas específicas para un sitio en especial. Sin embargo, dichos sistemas pueden conectarse a la red eléctrica convencional a través de un inversor que transforma la corriente continua generada por el sistema fotovoltaico en corriente alterna, la cual es análoga con las características de la red eléctrica convencional.

“Toda la energía que el sistema produce puede ser vendida a la red eléctrica aportando ingresos, diferenciación y compromiso ecológico por lo que el usuario sigue comprando la electricidad que consume de la red eléctrica al precio establecido, cobrando por otro lado los kilovatios verdes que su sistema produce a un precio superior” (Wordpress Energías Renovables, 2009).

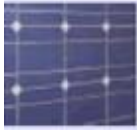

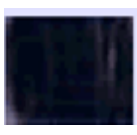
Ilustración 5. Esquema de funcionamiento del sistema de energía solar fotovoltaica conectada a la red



Fuente: (Wordpress Energías Renovables, 2009)

En la Tabla 3, se muestran los tipos de células fotovoltaicas usadas.

Tabla 3. Tipos de Células fotovoltaicas

Tipo de célula	Rendimiento en laboratorio	Rendimiento directo	Características	Fabricación
 Mono cristalinas	24%	15-18%	Es típico los azules homogéneos y la conexión de las células entre sí	Se obtiene de silicio puro fundido y dopado con boro
 Poli cristalina	19-20%	12-14%	La superficie está estructurada en cristales y contiene distintos tonos azules	Igual que el mono cristalino, pero se disminuye el número de fases de cristalización.
 Amorfo	16%	<10%	Tiene un color homogéneo (marrón) pero no existe conexión visible entre células	Tiene la ventaja de depositarse en forma de lámina delgada y sobre un sustrato como vidrio o plástico.

Fuente: (Universidad de Jaen, s.f)

5.1.8 Uso de dispositivos piezoeléctricos y/o EKRR como medida para la reducción de emisiones

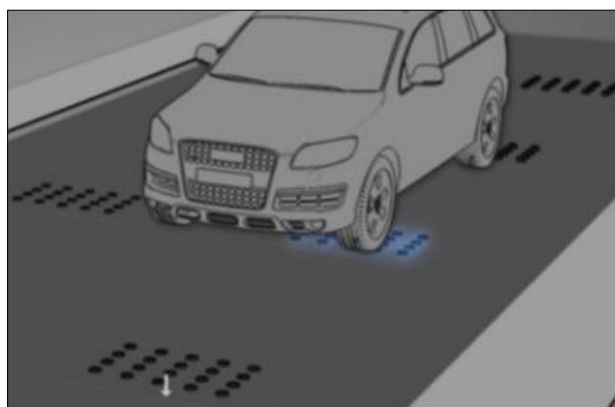
Actualmente se han promovido iniciativas empresariales tanto en entes públicos y privados que se centran en la aplicación de fuentes de energía alternativa que permitan reducir el uso de energía convencional. En este contexto se han desarrollado dispositivos piezoeléctricos. Como se cita en (Agatón, 2014) el fenómeno de la piezoelectricidad fue observado por primera vez por Pierre y Jacques Curie en 1881, este fenómeno ocurre:

“Cuando cristales como el cuarzo o la turmalina, entre otros, son sometidos a la acción mecánica de la compresión, de este hecho resulta una polarización eléctrica de su masa, apareciendo una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie, que se manifiesta en chispas” (Construdata, 2013).

Empresas como Innowattech han desarrollado métodos de generación de electricidad a través de la energía mecánica que se produce en el paso de automóviles, trenes y peatones convirtiendo dicho movimiento en electricidad (Esplandiú, 2009). El mismo autor afirma que dicha tecnología tiene la condición de instalarse debajo de las calles y aceras. Esta condición le permite a esta tecnología generar electricidad sin evidenciar modificaciones notorias en el ambiente respecto otro tipo de tecnologías alternativas de generación de energía.

Las primeras evidencias de implementación industrial de dispositivos piezoeléctricos en el ámbito de baldosas fueron desarrolladas en 2010 por Innowattech. En este proyecto se efectuó la inserción de los mencionados dispositivos en losas de hormigón a unos 20 cm de profundidad para una autopista, y las estimaciones realizadas afirman que con esta tecnología será posible la generación de hasta 500 kW en una hora de tráfico por cada kilómetro de cualquier autopista transitada (Paz, 2012).

Ilustración 6. Baldosas piezoeléctricas vehiculares

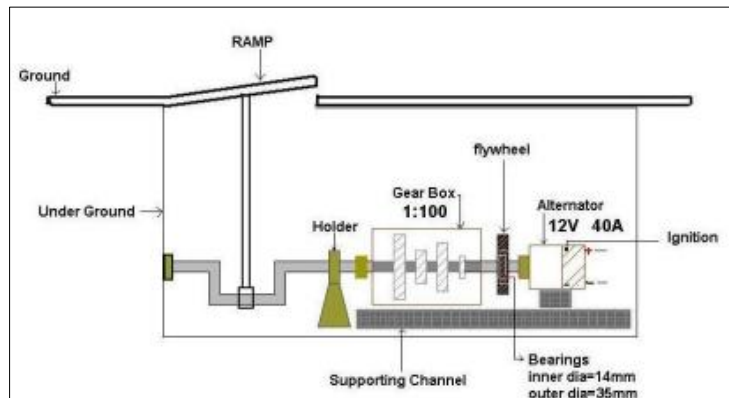


Fuente: (Treevolt, 2014)

En cuanto a las EKRR, son dispositivos desarrollados con el fin de aprovechar el paso de los vehículos para generar energía y a diferencia de las baldosas piezoeléctricas que usan la energía mecánica de sus materiales para producir energía, las EKRR aprovechan la energía cinética de los vehículos. Esta es transferida cuando hay compresión de la rampa y el movimiento del mecanismo que activa el alternador para así generar la energía eléctrica.

Una EKRR se compone de una losa, caja de cambios, un volante, un sistema de accionamiento y un alternador. Además debe contar con una batería que va conectada al alternador para almacenar la energía, un inversor y tres relés para controlar el sistema. El funcionamiento es simple, cuando un vehículo presiona la losa hacia abajo activa el mecanismo (caja de cambios y el volante) haciendo girar a su vez el alternador, produciendo así la energía, la cual se almacena en la batería (Tehseen, y otros, *Generating Electricity through Harnessing of Kinetic*, 2013).

Ilustración 7. Esquema de una EKRR



Fuente: (Jaiswal, Pundir, Saxena, & Gupta, 2015)

5.1.9 Transferencia tecnológica

La transferencia tecnológica es el proceso mediante el cual la ciencia y tecnología de países más avanzados se introduce a países menos desarrollados. Estas transferencias se pueden ver representadas en una unidad productiva que se incorporan a una actividad humana (INAPI, 2014).

Los dispositivos piezoeléctricos y/o las EKRR pueden hacer parte de las transferencias tecnológicas que se pueden realizar para lograr una mayor EE y que tienen un gran campo de aplicación que puede ir desde una autopista hasta unos zapatos.

Respecto a la implementación y transferencia de tecnología a través de dispositivos piezoeléctricos y/o EKRR, en la actualidad representa dificultades desde la perspectiva económica; tecnologías desarrolladas por empresas de Reino Unido respecto a baldosas peatonales tienen costos que aún no son factibles de implementación en países en vía de desarrollo. De acuerdo con (Agatón, 2014), el precio de una baldosa de tipo peatonal de empresas como *Pavegen* puede llegar a US \$3.850. En el caso de las EKRR su valor puede estar entre las £15.000 y las £ 55.000 (\$66'698.727,30 - \$ 244'562.000,10), (The Naked Scientists, University of Cambridge, 2006), (The Guardian, 2009), lo que constituye una disyuntiva al ser implementado a gran escala en proyectos públicos y privados.

A pesar que no son tecnologías tan favorables desde el punto de vista económico, debido a sus elevados precios, se espera reduzcan sus precios de forma rápida, generando así un mayor poder de adquisición de cantidades altas de éstas baldosas o

EKRR generando de ésta manera un mayor impacto en la mitigación de CO₂ en la generación de electricidad (Fernandez Muerza, 2010).

5.1.10 Responsabilidad Ambiental

La responsabilidad ambiental se puede ver como un concepto cultural donde los seres humanos tomamos una posición de cuidado con el ambiente, teniendo en cuenta que hacemos parte de este y que lo usamos como fuente de suministro para todas nuestras actividades. Es precisamente por este uso, algunas veces indiscriminado, que lo transformamos e impactamos negativamente.

La responsabilidad tiene un componente tanto ético como jurídico, pues implica el saber los impactos positivos o negativos que pueden llegar a tener sobre el ambiente y la salud de las personas las acciones que se hagan como parte de cualquier actividad ya sea productiva o personal. Por eso su objetivo es que el autor o los autores de dicha acción respondan por las consecuencias de la misma, pues tienen total conciencia de sus actos; sus efectos son particulares y generales y sus consecuencias pueden ser sociales, económicos, morales y políticos. (Comisión Europea, 2000).

Acciones simples que generen cambios en los hábitos y/o procesos enfocados a disminuir la contaminación mediante estrategias de mejora, son muestra de la responsabilidad y compromiso ambiental.

5.2 ANTECEDENTES

5.2.1 Contexto Internacional

El incremento en la concentración de GEI en la atmósfera produce como consecuencia el desequilibrio en el balance térmico del planeta, lo que se traduce en un aumento de su temperatura promedio a nivel mundial y la desestabilización del sistema climático. Según el IPCC (2011), se calcula que en el transcurso del Siglo XX, se produjo un incremento de la temperatura promedio de la superficie del planeta de $0,6^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,2^{\circ}\text{C}$). El mismo autor estima a futuro que entre 1990 y 2100, el aumento de la temperatura estará entre $1,4$ y $5,8^{\circ}\text{C}$. Si bien el clima del planeta ha cambiado a lo largo de la historia, se considera que la velocidad de este incremento no tiene precedentes en los últimos 10.000 años (IPCC, 2011).

Como se menciona anteriormente, el calentamiento global ha llegado a límites que a lo largo de la historia nunca se habían registrado. Se plantea que el efecto invernadero, el cual es el precursor del calentamiento global, no es el problema, sino la alteración de los equilibrios existentes en el incremento de los gases que producen el efecto invernadero (Arce, 2009).

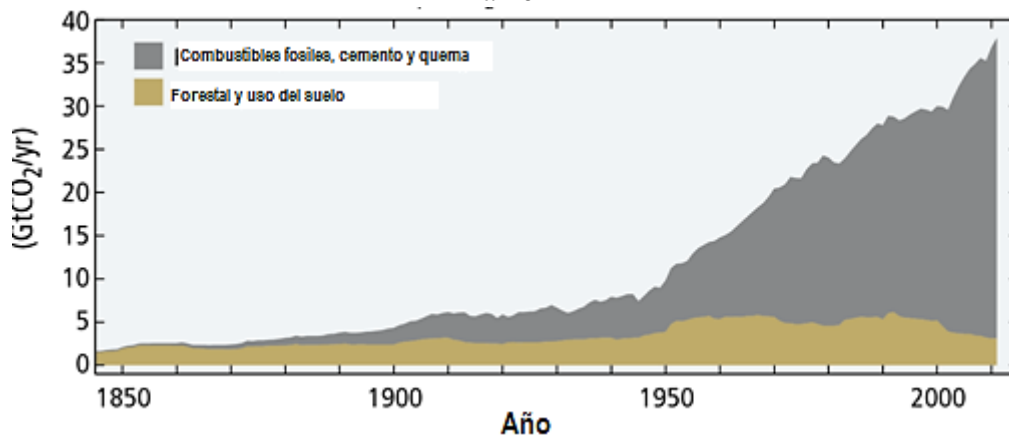
Sin embargo, existen otros gases emitidos al ambiente como el CH_4 , N_2O , SF_6 , CFC, HFC, H_2O y el O_3 , entre otros, que contribuyen también a ese efecto.

Haciendo una revisión histórica se observa como el clima ha variado continuamente. Sin embargo, la problemática del CC se refiere al último siglo, donde el ritmo de dichas variaciones ha sido muy acelerado y la tendencia dice que la aceleración será exponencial en el caso de que no se tomen medidas al respecto. Al buscar la causa de esta aceleración se encontró que existía una relación directa entre el calentamiento global y el aumento de las emisiones de GEI provocado por las sociedades humanas industrializadas (Arce, 2009).

Según el IPCC (2014), las concentraciones atmosféricas mundiales de CO_2 , CH_4 y N_2O , han aumentado notablemente por efecto de las actividades humanas desde 1750 y son actualmente muy superiores a los valores preindustriales, determinados a partir de núcleos de hielo que abarcan muchos milenios.

En la Ilustración 8, en la siguiente página, podemos observar el incremento en la concentración de GEI a lo largo de los últimos 150 años.

Ilustración 8. Concentración de Gases Efecto Antropogénicas Invernadero del año 1850 a 2012



Fuente: (IPCC, 2014)

De acuerdo al Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014), las emisiones de GEI en el mundo se han incrementado en un 780% entre 1970 y 2010; las concentraciones de CO₂ están aumentando a la tasa decenal más rápida observada ($2,0 \pm 0,1$ ppm / año) para 2002- 2011.

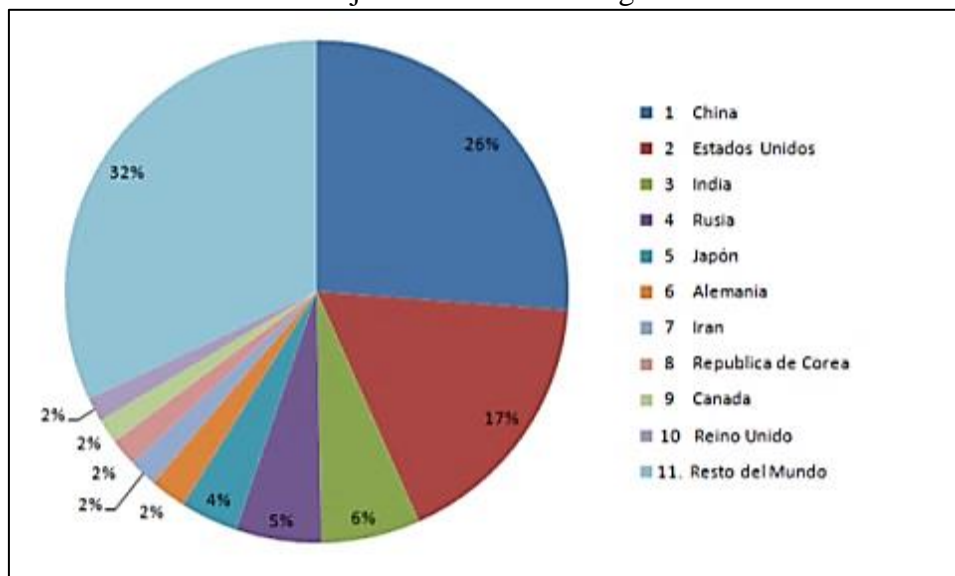
Revisando las siguientes cifras de la última década, se observa que el total emitido mundialmente en el año 2010 fue de 49 Gt de CO₂ eq. (49.000 millones de t), donde la emisión de CO₂ por el uso de combustibles fósiles alcanzó el 65%; seguido por la emisión de CO₂ por la deforestación y degradación de biomasa 11%. La emisión de metano, representa un 16%, óxido nitroso 6,2%, CO₂ y gases con flúor 2% (IPCC, 2014). Ver Anexo II. Emisiones mundiales de GEI antropógenas.

La participación sectorial, a nivel mundial, del total emitido se distribuyó de la siguiente forma: suministro de energía 25%, transporte 14%, edificios residenciales y comerciales 6,4%, industria 21%, agricultura, forestal y otros usos del suelo 24% (IPCC, 2014).

Según los porcentajes de emisiones anuales por país de GEI en el mundo, mostrados en la Ilustración 9, (ver Anexo III. Emisiones anuales por país de GEI en el mundo) es claro que los principales generadores de la problemática son Estados Unidos, China, con una participación de 17% y 26% respectivamente.

Al incluir a India y a Rusia dentro de los actores mencionados, junto con China y EE.UU. se tiene que más del 50% del problema de la generación de GEI en el mundo está concentrado en estos 4 actores, pues son las 3 economías más desarrolladas del mundo y sus bases están fundadas en el uso de los combustibles fósiles. Es por esto que resulta imperativo que se reestructuren los modelos de desarrollo utilizados actualmente y se busquen alternativas que coadyuven a minimizar y estabilizar la generación de GEI.

Ilustración 9. Porcentaje de emisiones GEI generadas en el mundo



Fuente: (CDIAC, 2013)

Si se menciona el panorama latinoamericano, se puede señalar a partir de datos del año 2010, que el país de la región que más contribuye con las emisiones de CO₂ es México (puesto 135 en el ranking) (CDIAC, 2013).

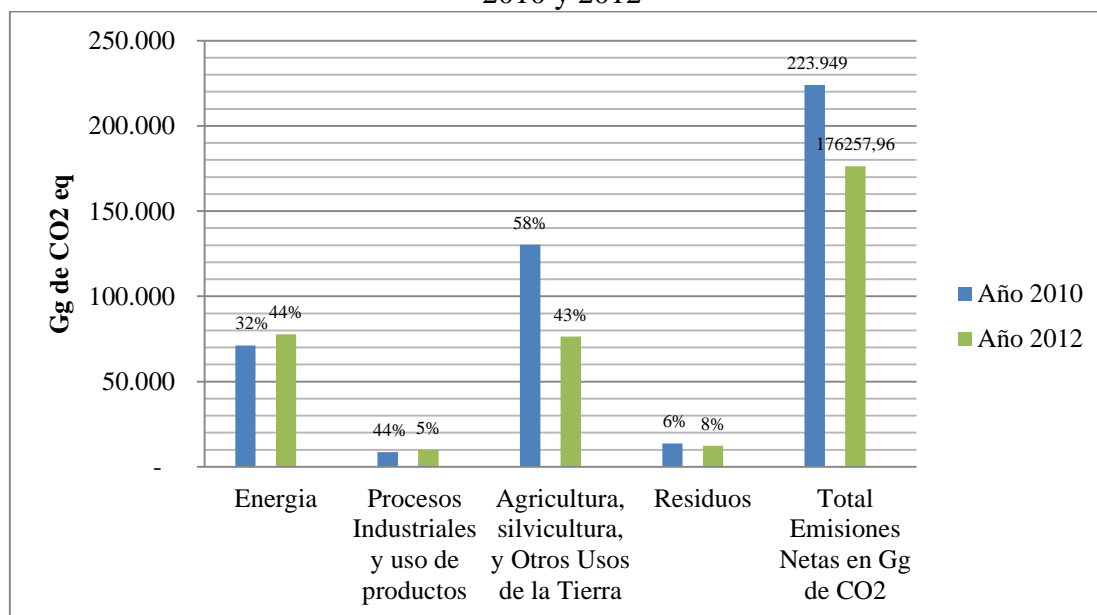
Al revisar la situación en otros países, como Ecuador, Colombia, Perú y Venezuela, se puede notar que la problemática de GEI está relacionada con el cambio en el uso del suelo; no obstante, al hacer un análisis general, se muestra que Latinoamérica no es una fuente que contribuya de forma importante en la problemática de GEI. La región sólo produce alrededor del 6% de las emisiones mundiales de GEI y un poco más del 10% si incluimos la deforestación. Sin embargo, ya sufre enormes pérdidas económicas debido al fenómeno (Pamela Cox, vicepresidenta para América Latina y el Caribe del Banco Mundial, citado por Arce (2009)).

5.2.2 Contexto Nacional

A través la Primera Comunicación Nacional ante la UNFCCC, preparada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, en adelante IDEAM, se publicó el primer inventario nacional de GEI en el país para los años 1990 y 1994. Allí se reportó que el total de emisiones de GEI fue de 129.368 Gg. CO₂ eq. y 149.867 Gg respectivamente para cada año. Así mismo, se presentaron los aportes sectoriales a la generación de GEI donde se mostró que los principales aportes se relacionan a los sectores de la energía con 40,9 % y la agricultura con 42,8 % para el año 1990. Para el año 1994 se reportaron resultados similares, energía con 41,2 % y agricultura con 41 % de representación.

En noviembre del año 2015, fue presentada la Tercera Comunicación Nacional ante la UNFCCC, donde a través del tercer inventario nacional de GEI para los años 2010 y 2012 se mostró un incremento de las emisiones generadas en sectores como energía, residuos con respecto a los años evaluados en el segundo inventario. Para el año 2004, sectores como energía representaban el 36,6 % (IDEAM, PNUD, 2015) mientras que para el año 2012 aumento al 44 %, ver Ilustración 10.

Ilustración 10. Emisiones totales de GEI en CO₂ eq por sector en Colombia, entre años 2010 y 2012



Fuente: (IDEAM, PNUD, 2015)

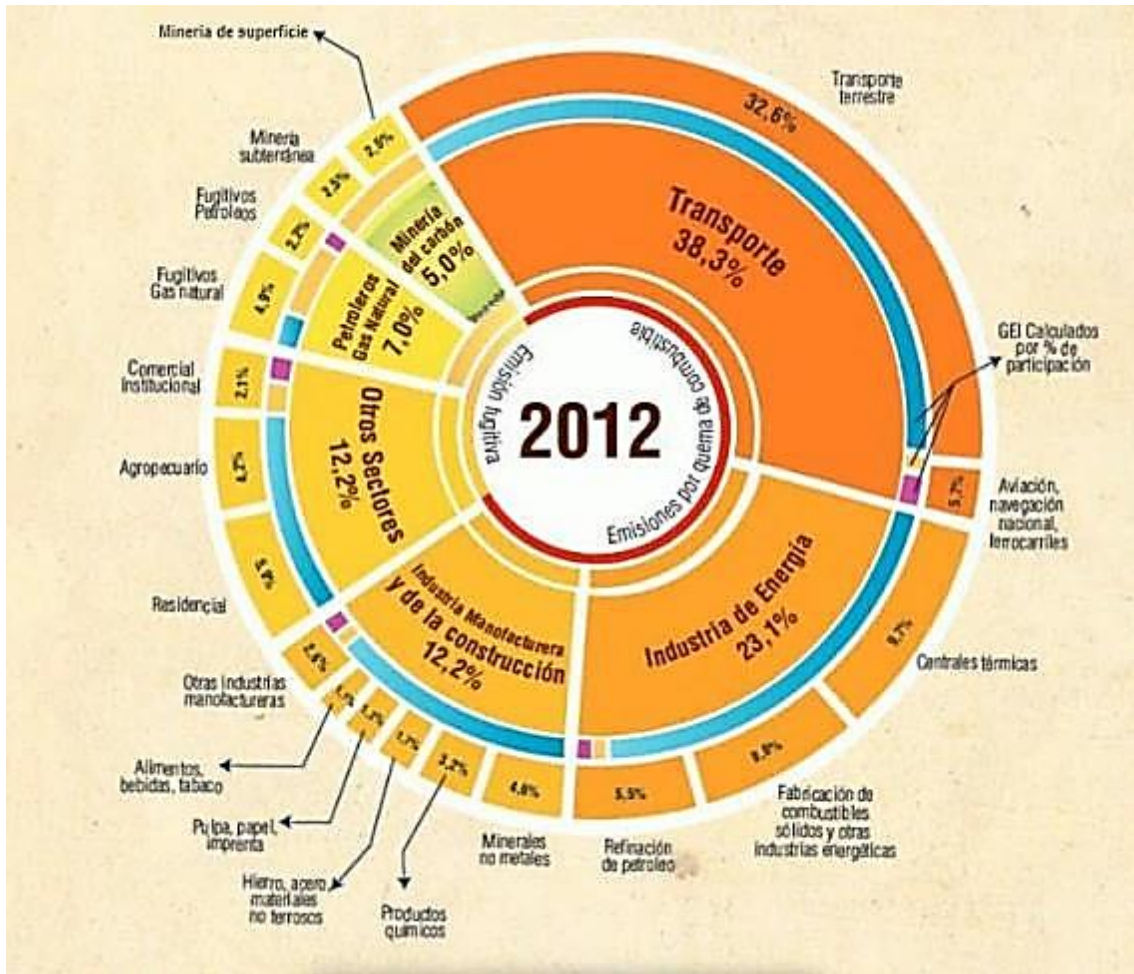
Colombia, no es uno de los principales actores en la problemática de emisiones de GEI, ya que sólo aporta el 0,37 %, equivalentes a 0,18 Gt de las emisiones de GEI totales en el mundo (49 Gt).

El 84% corresponde a emisiones de CO₂ por quema de combustibles fósiles en los diferentes sectores económicos del país (industrias de la energía, industria manufacturera y construcción, transporte, residencial, e institucional), el 16% a emisiones de CH₄, principalmente por emisiones fugitivas derivadas de las actividades de minería del carbón y extracción y procesamiento, de petróleo y gas, además del sector residencial. Ver Ilustración 11.

De acuerdo al documento de la tercera comunicación ante la CMNUCC (2015) acerca de los asuntos respecto a mitigación del sector, los esfuerzos de reducción de emisiones de GEI generados a partir del sector energético en subsectores como el de transporte (38%) estarán dirigidos a través del control de las emisiones de GEI causadas por fugas, venteo y quemas de la cadena del petróleo y gas deberá estar orientada, así como fomentar los modos caminata y bicicleta como alternativas atractivas y eficientes para movilizarse en las ciudades colombianas .

Igualmente dentro de los programas de mitigación del sector energético se fomentara el desarrollo de programas de EE en pequeñas y medianas empresas a través de la promoción de transferencia de tecnología y del desarrollo de proyectos pilotos de conversión tecnológica y eficiencia energética del sector industrial de la región Bogotá-Cundinamarca.

Ilustración 11. Inventario GEI para módulo de Energía en Colombia, año 2012



Fuente: (IDEAM, PNUD, 2015)

5.3 ESTADO DEL ARTE

5.3.1 Contexto Internacional

5.3.1.1 Proyectos MDL

Los MDL, son un mecanismo importante para la reducción de emisiones de GEI. De igual forma, se espera que sean utilizados como un instrumento a nivel mundial para cumplir con las metas de reducción fijadas dentro de los parámetros del Acuerdo de París. En la Tabla 4, se observa el estado de los proyectos MDL propuestos ante las Naciones Unidas.

Tabla 4. Estado de los proyectos MDL ante las Naciones Unidas a nivel mundial

Estado de los proyectos MDL	Numero
En validación	815
En solicitud de registro	7
En solicitud de revisión	1
En solicitud de corrección	0
Bajo revisión	0
Total en proceso de registro	8
En retirada	64
Rechazado por la JE	272
Validación negada por la EOD	267
Validación terminada por la EOD	2.145
Registrado, CER no emitidas	4.816
Registrados. CER emitidas	2.873
Total registrados	7.889
Número Total de proyectos (incluidos los rechazados)	12.344

Fuente: (UNEP, 2016)

Los proyectos mencionados en la Tabla 4, se pueden analizar regionalmente, donde salta a la vista la fuerte participación de la región de Asia y el Pacífico, como se observa en la Tabla 5. Esto se debe al gran avance de China en el tema de reducción de emisiones de GEI y su entusiasmo frente a la formulación de proyectos MDL.

Tabla 5. Distribución mundial de proyectos MDL

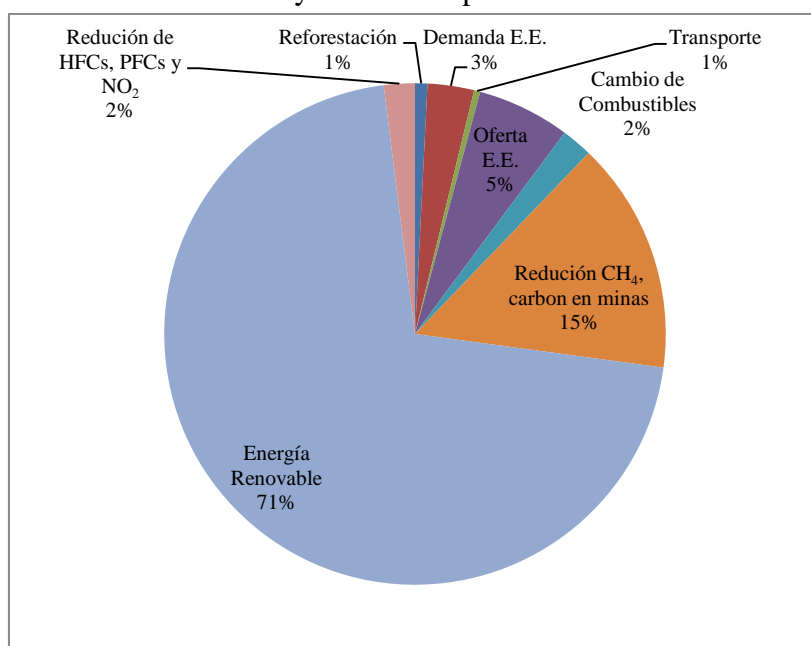
Región	Cantidad de Proyectos MDL	% del Total
Asia y Pacífico	6.972	81,9%
América Latina y el Caribe	1101	12,9%
África	244	2,9%
Mediano Oriente	109	1,3%
Europa y Asia Central	86	1%
Total	8.512	100%

Fuente: (UNEP, 2016)

En América Latina y el Caribe, se ve la clara influencia de los MDL, pues en una zona en vías de desarrollo se potencializa la oportunidad de crear proyectos y recibir los beneficios económicos de igual forma. Brasil y México, son los dos países con mayor número de proyectos MDL en la región, contrarrestado con Bahamas, Cuba, Guyana, Jamaica y Paraguay, con la menor representación de proyectos mencionados (UNEP, 2016).

Todos los proyectos se pueden llevar a cabo en distintas áreas productivas o sectores económicos, dependiendo de las condiciones en el que se desarrollan y las facilidades según el tipo de alternativa propuesta. En la Ilustración 12 se muestran los proyectos MDL por sector en el mundo.

Ilustración 12. Proyectos MDL por sector Nivel Mundial



Fuente: (UNEP, 2016)

En el Anexo IV. Distribución sectorial proyectos MDL en América Latina y el Caribe, se observa la cantidad total esperada de CER generadas hasta el final de 2012 para cada tipo de proyecto. Allí, se puede apreciar la alta aplicación de tecnologías para evitar la emisión de metano de rellenos sanitarios (28%) seguida por la generación de energía por el aprovechamiento de recursos hídricos (14%) (UNEP, 2016).

5.3.1.2 Dispositivos piezoeléctricos

En la actualidad, En países como Israel, ya se tienen dispositivos piezoeléctricos instalados debajo de las autopistas. De acuerdo con un reporte generado en el 2009, cuando la tecnología fue instalada, el gobierno de ese país aseguró que se encontraban en capacidad de generar 2.000 Wh de electricidad, únicamente por el hecho de implementar el sistema a lo largo de 10 metros de autopista (Gatto, 2011). En Italia, se firmó un contrato para usar esta tecnología en la autopista que conecta a Venecia con Trieste Autostrada (Gatto, 2011).

En otros países, como Australia, Inglaterra, E.E.U.U., Francia, Japón y Holanda, se han instalado estos dispositivos de manera permanente. La energía eléctrica se utiliza para iluminar espacios, como carreteras, aeropuertos y estaciones de metro con luces LED, funcionamiento de tableros electrónicos y puntos de carga de dispositivos electrónicos, señalización y sistemas de publicidad, entre otros (Pavegen Systems, 2014).

En Latinoamérica, en Brasil, se construyó una cancha de fútbol donde se instalaron dispositivos piezoeléctricos en el suelo, los cuales generan la iluminación de la misma (Pavegen Systems, 2014).

En el caso de las EKRR, el Reino Unido es el principal país donde se pueden ver estos dispositivos y donde se realizan pruebas de estos sistemas desde 2009; el condado de Ealing, al oeste de Londres, un área portuaria, aquí se puede dar la mayor generación de todas pues al ser una zona donde el tráfico principal son camiones los cuales por ser más pesados, más largos y tener más ejes (pisaran más veces y con más fuerza las EKRR) pueden llegar a generar hasta 40 veces más energía que un vehículo ligero (Fernandez Muerza, 2010). La cadena de supermercados Sainsbury's en la localidad de Gloucester la cual tiene varias EKRR instaladas en su parqueadero y suministran energía a las cajas registradoras, el supermercado dice que las EKRR son capaces de producir 30kWh de energía eléctrica (WebEcoist, 2016).

Algunas empresas desarrollan estos dispositivos, la empresa del reino unido Highway Energy Systems, fundada por el creador de las EKRR Peter Hughes; la compañía, Eco Raec, fundada por empresarios españoles que buscan comercializar y distribuir este dispositivo en España y en Portugal; la compañía estadounidense New Energy Technologies ya realiza pruebas de su dispositivo en Nueva Jersey (Fernandez Muerza, 2010).

5.3.1.3 Paneles solares

Es tanto el interés en usar energía renovable que ya no solo se piensa en adecuaciones para aprovechar la energía del sol, ahora se construyen edificios completos pensados desde un inicio con este propósito. Es el caso del El Sun Moon Mansion, que se encuentra ubicado en Dezhou, en la provincia de Shangdong, al noreste de China. Cuenta con una superficie de 75.000 m² y 5.000 m² de paneles fotovoltaicos. Es un edificio inteligente diseñado para asemejarse a un antiguo reloj de sol. Cuenta con salas de exposiciones, de reuniones y de formación, un centro de investigación científica y un hotel, todos ellos funcionando con energía renovable. Esto hace que su eficiencia de ahorro de energía sea del 88%, ahorrando un aproximado de 2,5 t de carbón, 6,6 millones de kWh de electricidad y más de 8,6 t de CO₂, lo que lo convierte en el edificio más grande del mundo en funcionar con energía solar (Minuto 30, 2015).

La torre Pearl River de 71 pisos, y que está ubicada en Guangzhou, China, es el rascacielos más ecológico del mundo. Este edificio cuenta con paneles solares capaces de generar un 58% de su energía total, convirtiéndolo en el rascacielos más eficiente del mundo (Dumaine, 2010).

Algunas universidades de México también se interesan por el uso de energías renovables. Es el caso de la Universidad Iberoamericana (UIA), con el proyecto “Ibero Verde”, la cual cuenta con 18 paneles solares que lograron generar en promedio 1.080 W/día. Esto equivale a la tercera parte de la energía con que funciona la estación de radio de la universidad. Otra universidad que ha usado los paneles solares como fuente de suministro de energía alternativa es la Universidad Popular Autónoma de Puebla, México (UPAEP). Esta tiene un “Eco Park” que cuenta con 729 paneles solares capaces de generar 134 kWh y que sirven para abastecer parte de la demanda de dos edificios de la universidad (Ciudadanos en red, 2009).

5.3.1.4 Sistemas de iluminación LED

En el mundo entero ya se nota la preocupación por reducir el consumo de energía y las emisiones de CO₂, es por esto que en muchos países ya usan la iluminación LED en muchos edificios tanto privados como públicos, como es el caso de Las Torres Dexia (Bruselas, Bélgica). Esta cuenta con 72.000 bombillas LED las cuales no solo sirven para la iluminación de las torres sino que también hacen parte del decorado de la misma, pues trabajan de acuerdo a la temperatura, variando de colores azules y morados cuando hace frío a colores rojos y amarillos cuando hace calor (ABC, 2011).

Otro caso es el de la Torre Agbar (Barcelona). Esta cuenta con un sistema de control avanzado de 45.000 bombillas LED que aparte de la iluminación sirven para adornar la fachada del edificio, con esto se logra que 1 hora de iluminación completa del edificio cueste tan solo 6 euros (ABC, 2011). En esta misma ciudad se encuentra ubicado el Edificio David, muy representativo para la ciudad, por esto se decidió cambiar la iluminación decorativa de la fachada que se realizaba mediante 12 proyectores de sodio de 250 W que consumían en total 2.400 W, estos proyectores fueron reemplazados por 12 luminarias ILED Starline de 24 W que consumen en total 288 W, lo que significó una reducción en el consumo del 85 % (Avan Luce Creative Lighting, 2014).

El Hotel Yas Marina (Abu Dabi, Emiratos Árabes) se convirtió en la mayor construcción cubierta de LED de todo el mundo. Cuenta con más de 5.000 bombillas LED que se encargan de iluminar su fachada de más de 200m de longitud (ABC, 2011).

Otros edificios son La Torre Uniqa (Viena), cuenta con más de 45.000 bloques de LED lo que la ha convertido en un símbolo de la ciudad. La Biblioteca nacional de Bielorrusia (Minsk) que desde el año 2006 se ha convertido en la biblioteca más curiosa y moderna de todo el mundo, pues a su forma de diamante y sus 72 m de altura se le suma el sistema de iluminación de 4.600 LED que la vuelven bastante llamativa (Entretenimiento facilísimo, 2015).

Los escenarios deportivos tampoco se quedan atrás, es el caso de estadio Allianz Arena es el primer y mayor estadio europeo que ofrece espectáculos de luz dinámica animada. Este proyecto fue realizado por Philips y cuenta con una capacidad para 71.137 personas. Su fachada, en forma de concha, cubre aproximadamente 29.000 m² cuadrados de superficie. Es aquí donde 380.000 LED dentro de 8.000 luminarias permiten no solo una iluminación más eficiente sino que también una más decorativa, de esta forma el estadio logro reducir en un 60% el consumo de energía, lo que equivale también a una reducción de aproximadamente 362 t de CO₂. Además, la larga vida de los LED significa que se requiere menos mantenimiento (Philips, 2014).

Algunos de los edificios y monumentos más representativos e importantes a nivel mundial también han encontrado en la iluminación LED una fuente para resaltar su belleza y majestuosidad mediante un bajo consumo de energía eléctrica. Entre estos encontramos Empire State de Nueva York o el interior de Notre Dame y la Torre Eiffel de París, el Londoneye y la catedral de San Pablo en Londres, el Grand Place, Bruselas y el Acuario Romano – Roma entre otros (Menos wattios, 2014), (Schreder Socelec, 2015).

5.3.2 Contexto Nacional

A pesar de que la posibilidad de registrar proyectos MDL sigue vigente en la actualidad, el primer periodo del Protocolo de Kioto ha finalizado en 2012 sin lograr su cumplimiento. Sin embargo, el Acuerdo de París crea nuevos escenarios para formular dichos proyectos.

Actualmente, a nivel latinoamericano, Colombia es el cuarto país en número de proyectos MDL (Garzón, 2008). Como se muestra en la Ilustración 13, Colombia tiene un total de 174 proyectos, de los cuales 101 cuentan con aprobación nivel nacional, 65 están registrados ante Naciones Unidas (Tabla 6) y 21 cuentan con Certificados de Emisiones Reducidas, en adelante CER (MADS, 2016).

Ilustración 13. Proyectos MDL en Colombia 2016



Fuente: (MADS, 2016).

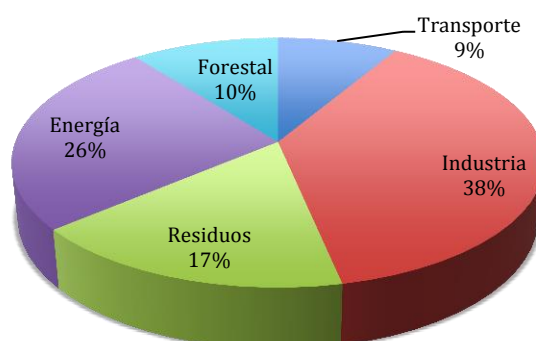
Tabla 6. Proyectos Colombianos registrados ante la UNFCCC

Sector	Número de Proyectos	Reducciones Anuales (t CO ₂ /Año)
Residuos	21	6.391.203,57
Energía	19	1.365.271,00
Industrial	11	1.683.540,00
Forestal	7	2.782.080,00
Transporte	7	983.248,57
Total	65	25.502.261

Fuente: (IDEAM; PNUD, 2015)

A continuación, en la Ilustración 14 se muestra la distribución de proyectos MDL por sector en Colombia.

Ilustración 14. Proyectos MDL por sector en Colombia



Fuente: (UNFCCC, CCEE, 2016)

Teniendo en cuenta lo anterior, en búsqueda de nuevas estrategias y tecnologías que puedan ser aplicadas a dichos mecanismos de reducción de emisiones y desarrollo bajo en carbono, se han desarrollado e implementado nuevos aparatos como son los dispositivos piezoeléctricos y paneles solares para su aplicación en proyectos de eficiencia energética, entre otros.

5.3.2.1 Dispositivos piezoeléctricos

En Colombia ya se dio el primer paso en el uso de las baldosas piezoeléctricas, en Medellín en la calle 10A, se realizó una prueba piloto donde se instalaron alrededor de 40 baldosas piezoeléctricas. Cada una contaba con 20 nodos y en cada nodo se podían ubicar dos cristales piezoeléctricos de 1 x 1 cm y 2 mm de espesor, y cada cristal puede generar hasta 0,5 J de energía. Durante la prueba se obtenían cada hora más de 2 millones de datos sobre el peso y la velocidad de los vehículos. Diariamente se generaban 3 kWh de energía para alimentar la demanda de los equipos electrónicos usados en el desarrollo de la prueba (Treevolt, 2014).

Por otro lado se han venido desarrollando investigaciones de tipo exploratorio en distintos centros educativos, con el fin de promover las medidas de eficiencia energética y la implementación de nuevas tecnologías, relacionadas a los dispositivos piezoeléctricos. Algunos ejemplos se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Investigaciones relacionadas en Colombia

Nombre del Proyecto	Institución	Ubicación
Análisis de la factibilidad económica y ambiental de utilizar baldosas piezoeléctricas en el campus de la universidad militar nueva granada (UMNG)	Universidad Militar Nueva Granada (UMNG)	Bogotá, Cundinamarca
Baldosa piezoeléctrica para alimentar sistemas de iluminación de bajo consumo energético	Escuela de Ingeniería de Antioquia	Envigado, Antioquia
Análisis de viabilidad para desarrollo de prototipo de acera que produce electricidad	Universidad de San Buenaventura	Buenaventura, Valle del Cauca
Valoración de la capacidad de generación de energía eléctrica por medio de un dispositivo con efecto piezoeléctrico en las entradas vehiculares de la sede central de la UIS	Universidad Industrial de Santander	Bucaramanga, Santander

Fuente: Elaborado por autores, basado en (Aguirre, 2013), (Gutiérrez J. A., 2013), (Zapata Valencia & Bustamante Rueda, 2012) y (Espitia Rey & Hernández Hernández, 2011)

A pesar de la existencia de estos proyectos enfocados a la eficiencia energética y al desarrollo sostenible, no se encuentra en funcionamiento ninguno de estos dispositivos (baldosa piezoeléctrica y/o EKRR) generadores de energía eléctrica. Únicamente se cuenta con prototipos (UNEP, 2016).

En relación a las EKRR, en Colombia esta tecnología es muy poco conocida lo que no ha permitido que se use o que se desarrollen investigaciones al respecto. Solo en la investigación realizada por las estudiantes de la UIS se trata este tema.

5.3.2.2 Paneles solares

Las Instituciones educativas no se quedan atrás y también han visto en la energía solar una fuente apropiada para ayudarles a suplir sus requerimientos energéticos. Entre estas encontramos el colegio Ramón Jimeno de Bogotá cuenta con 148 paneles fotovoltaicos de 240 W ubicados en la zona administrativa del colegio, un sendero y el parqueadero. Allí se suministra energía a los toma corrientes, las 22 aulas, los computadores, los talleres, las estufas y demás aparatos empleados para la limpieza. Esto ha causado un gran reconocimiento al colegio el cual será el primer plantel distrital que recibirá el 'sello verde' por eficiencia energética al devolver a la red, en los fines de semana y vacaciones, la energía solar sobrante (El Tiempo, 2015).

Otro caso es el de la universidad autónoma de occidente en la cual se ha logrado implementar un sistema fotovoltaico de última tecnología, con 638 paneles solares instalados sobre los techos de las zonas de parqueadero del campus; dicho sistema permite cubrir el 5% del gasto energético de la infraestructura de esta institución (País, 2015).

El Centro de Investigación en Procesos de Ingeniería (CIPI) de la universidad Jorge Tadeo Lozano en la ciudad de Bogotá, cuenta con sistemas fotovoltaicos instalados en los techos de la edificación, los cuales proveen de energía limpia y suplen el 8% de la energía demanda por equipos de sus laboratorios; según afirma el espectador (El Espectador, 2014) para los académicos de esta institución la iniciativa esto “no solo permitirá ponerle un sello verde a los productos que los estudiantes e investigadores desarrollen allí; también es una oportunidad para demostrar la viabilidad del uso de energía sostenible en la capital”.

5.3.2.3 Sistemas de iluminación LED

Los sistemas de iluminación LED y otros tipos de iluminación de alta eficiencia vienen implementándose en Colombia desde el siglo XXI sin embargo tomaron fuerza en el año 2013 cuando el ministerio de ambiente dio como fecha limite la dada de baja de los mercados nacionales la comercialización de bombillos incandescentes (Cervantes, 2013).

En la Tabla 8 se relaciona de forma breve algunas de los casos del contexto nacional en los que se ha implementado la tecnología led los cuales han representado un aumento en la eficiencia energética y reducción de costos en el costo eléctrico:

Tabla 8. Sistemas de iluminación LED en Colombia

Ubicación	Descripción
Roche Bobois	El uso de los diferentes formatos de las bombillas LED para la iluminación del local se consiguió destacar los muebles y resaltar los colores y texturas de los diferentes materiales, además de obtener un ahorro de 8.231 kWh al mes, lo que equivale al año a 100.144 kWh y que representa un beneficio de aproximadamente \$ 35'000.000 de pesos (Colombialeds, 2015).
Sodexo	Se integró en su sede administrativa calle 127 una zona apta para el trabajo de oficina, a esto se integró la iluminación 100% con tecnología LED para lograr no sólo ahorros energéticos sino una iluminación agradable (Colombialeds, 2015).
Farmatodo	Se hizo una evaluación del sistema de iluminación identificando áreas y usos y clasificando las luminarias por área y tipo, además de medir el consumo que tenían y tipificando el uso de iluminación, esto con el fin de determinar mejoras en cuanto a consumo, diseño, cumplimiento con reglamento, salud ocupacional, productividad, impacto ambiental. Los resultados obtenidos fueron la reducción de la carga lumínica en un 30% (Garper Energy Solution, 2015).
Avianca	En 2010 se cambiaron los sistemas de iluminación y control en los hangares y las oficinas de Avianca en Bogotá. Logrando de esta manera un ahorro promedio en el costo de la energía de \$ 300 MM al año, una reducción del consumo de electricidad de alrededor de 1 Millón de kWh/año, una reducción anual de GEI cercana a las 400 t logrando una reducción total de 1.200 Toneladas. Una vez se realizó esto se planteó el objetivo de reducir tanto costos como emisiones en un 40 % más (Garper Energy Solution, 2015).

Ubicación	Descripción
CC Unicentro Bogotá	<p>Se llevó a cabo el reemplazo de 3000 lámparas compactas fluorescentes de 84 W, por el mismo número en tecnología LED de 22 W.</p> <p>Como resultado se determinaron las medidas de eficiencia energética a implementar (equipos, controles, y capacitaciones) con lo que se logró una reducción en el consumo electricidad de 875.000 kWh/año, equivalente a una reducción en promedio de 400 toneladas de carbón y 800 toneladas de dióxido de carbono (CO₂) al año (Garper Energy Solution, 2015).</p>
Colpatria	<p>Se implementó un proyecto de eficiencia energética que permitiera solucionar los costos de electricidad los cuales estaban en aumento, para tal fin se instalaron sistemas de iluminación LED en los espacios de oficinas equivalentes al 40% de la torre. Como resultado se logró reducir el consumo de energía eléctrica en un 20% aproximadamente, manteniendo los niveles de iluminación y aspectos arquitectónicos pero mejorando la reproducción lumínica (Garper Energy Solution, 2015).</p>

Fuente: autores modificado de (Colombialeds, 2015) y (Garper Energy Solution, 2015)

5.3.2.4 Estrategias de eficiencia en la PUJ

Teniendo en cuenta el registro histórico, la PUJ ha comenzado a investigar sobre alternativas enfocadas a la eficiencia energética y a procesos de transferencia tecnológica a ella. De estas investigaciones se ha logrado materializar el cambio de luminarias fluorescentes por iluminación led, lo cual fue el primer paso para la implementación de medidas de eficiencia energética.

Por otro lado se han aprobado iniciativas para continuar con la implementación de estas medidas, entre las que se encuentra la utilización de paneles solares para satisfacer la demanda de energía diurna del parqueadero privado de la PUJ. Según la información dada por la Dirección de recursos físicos del campus, se han instalado 54 paneles solares en el techo de estas instalaciones y se desarrolla más interés por parte de la Universidad por desarrollar proyectos de este tipo que aporten a la eficiencia energética del campus (Pablo Andrés León Zapata, 2015).

5.4 MARCO GEOGRAFICO

La investigación se desarrolló en el campus de la PUJ, ubicada en la zona nororiental de la ciudad de Bogotá, Colombia. Ver Ilustración 15.

Ilustración 15. Ubicación de Bogotá, departamento de Cundinamarca



Fuente: Adaptado de (IGAC, 1999)

La ciudad de Bogotá está ubicada en el centro del país, exactamente en la cordillera central. Siendo ésta la capital del país tiene una extensión aproximada de 33 kilómetros de sur a norte y 16 kilómetros de oriente a occidente (Bogotá, Portal oficial de la ciudad, 2015).

En cuanto a su geografía, la ciudad cuenta con las siguientes características:

- Extensión total: 1775.98 km²
- Altitud de la cabecera municipal: 2.640 m.s.n.m.
- Temperatura media: 14 °C

Sus respectivas coordenadas polares, según el instituto Agustín Codazzi en adelante IGAC son:

- Latitud Norte: 4° 35'56'
- Longitud Oeste de Greenwich: 74°04'51'

Descripción del área de estudio:

La Pontificia Universidad Javeriana fue fundada en 1623, es una de las instituciones de educación superior más antiguas y más tradicionales de nuestro país y hace parte de las 114 universidades a nivel mundial que está confiada a la Compañía de Jesús (entre ellas se encuentran Georgetown University, Boston College, Fordham University, la Universidad Pontificia de Comillas y la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro) (Pontificia Unversidad Javeriana, 2016).

Debido a esto la Comunidad Educativa Javeriana crece constantemente y se consolida mediante la participación de todas las personas y estamentos de la Universidad. Actualmente cuenta con 18 facultades, 62 departamentos, 14 institutos, 158 posgrados (8 doctorados uno de los cuales otorga título eclesiástico, 32 maestrías, 79 especializaciones y 39 especializaciones clínicas y quirúrgicas) y 38 programas de pregrado (Pontificia Unversidad Javeriana, 2016).

El edificio 67 Rafael Arboleda S.J es uno de los más importantes de la PUJ. Allí se encuentran ubicadas la Editorial Pontificia Universidad Javeriana, Javegraf - Fundación Cultural Javeriana de Artes Gráficas, consultorios IEIM, cafetería, centro de fotocopias, centro de medicina preventiva, laboratorio de enfermería, banco de sangre, departamento de lenguas, instituto de bioética, CRID-Centro de recursos de Información y documentación, instituto de bioética, auditorio José Rafael Arboleda, facultad de comunicación y lenguaje, salas de audiovisuales, facultad de estudios ambientales y rurales, IDEADE, IER, instituto geofísico universidad javeriana y varias aulas de clase (Pontificia Unversidad Javeriana, 2016).

Ilustración 16. Mapa Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá



Fuente: (Google Earth, 2016) adaptado por autores

Ilustración 17. Modelo 3D Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá



Fuente: (Google Earth, 2016) adaptado por autores

5.5 MARCO LEGAL

5.5.4 Marco Legal Internacional

5.5.4.1 UNFCCC

Creada por la comunidad internacional el 9 de Marzo de 1992 con la finalidad de combatir el CC, esta convención incorporó dentro de los tratados multilaterales más importantes en términos de medio ambiente y de los cuales se ha tenido más eficacia en la historia. Su logro más trascendental es el de llegar al consenso en cuanto al reconocimiento del cambio climático como una realidad.

Su entrada en vigor fue el día 21 de marzo de 1994. En la actualidad, 195 países del mundo han ratificado esta Convención y han adoptado las medidas necesarias para incorporar sus directrices a través de políticas nacionales (UNFCCC, 2012).

A través del artículo 2 del documento de la Convención, se estableció el objetivo último de esta, el cual fue lograr a partir de las disposiciones pertinentes, la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas al sistema climático (UNFCCC, 1992).

Dicha estabilización, debería lograrse en un lapso de tiempo suficiente para permitir que los ecosistemas tengan la capacidad de adaptarse naturalmente al CC, así mismo asegurar que la producción de alimentos en el mundo no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico proceda de manera sostenible (UNFCCC, 1992).

Entre otros lineamientos más importantes declarados en esta Convención, se acordó como requerimiento a las partes de la misma, la elaboración y actualización periódica de inventarios nacionales de emisiones antropógenas por fuentes y por la absorción de sumideros de GEI.

Adicionalmente, las partes de la convención, tienen que elaborar y actualizar regularmente programas nacionales y regionales para la mitigación del CC, teniendo como base los inventarios nacionales de emisiones y así mismo proporcionar las respectivas medidas de adaptación.

5.5.4.2 Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto, es un documento de adición y puesta en práctica de los principios de la UNFCCC. Adoptado el 11 de noviembre de 1997 en Kioto, Japón, buscó poner metas claras y medibles en cuanto al acuerdo de la estabilización de emisiones de GEI fijado inicialmente en la UNFCCC.

Este protocolo, fue constituido en función de los principios de la UNFCCC, instauro metas de reducción de GEI para 37 países industrializados y a la Unión Europea, expresando que son los principales responsables de los elevados niveles de emisiones de dichos gases, y que son el resultado de la quema de combustibles fósiles durante más de 150 años (UNFCCC, 2012).

Entre otras disposiciones, el Protocolo ha logrado generar en los gobiernos la instauración de leyes y políticas para cumplir sus compromisos, a las empresas al desarrollo y toma de decisiones teniendo en cuenta el ambiente; de igual forma estructura el MDL y el desarrollo del mercado del carbono en pro del cumplimiento de las metas de reducción acordadas en éste.

5.5.4.3 Acuerdo de París

El Acuerdo de París genera el compromiso de los 195 países que se reunieron con el fin de iniciar un cambio definitivo hacia un desarrollo bajo en carbono. Esta fue la primera vez que tanto los países desarrollados como los países en vía de desarrollo se comprometieron para lograr un cambio verdadero para alcanzar los objetivos propuestos de mantener por debajo de los 2 °C el aumento de la temperatura global respecto a los niveles preindustriales, y aunar esfuerzos para alcanzar resultados más estrictos y mantener el aumento de la temperatura en menos de 1,5 °C para evitar efectos catastróficos en los países más vulnerables (UNFCCC, 2015).

El acuerdo, que ya fue firmado por todas las partes, entrará en vigencia en 2020. Una vez los países ratifiquen dicho acuerdo a nivel nacional, deberán fijar sus metas de reducción de emisiones cada 5 años, con el objetivo de ser revisadas y verificar su cumplimiento y como deben modificarse para lograr el objetivo propuesto. De los 195 países participantes, 186 ya presentaron sus compromisos y deben empezar a trabajar a nivel nacional en su desarrollo (UNFCCC, 2015).

El acuerdo también reitera la importancia de los bosques en la mitigación del CC, así mismo legitima mecanismos de desarrollo y transferencia tecnológica, además crea un mecanismo de desarrollo sostenible para promover la mitigación de GEI y el desarrollo sostenible de los países. Para esto se establece un financiamiento de US\$ 100'000.000 anuales a partir del 2020 para la implementación de los proyectos, planes y programas que se propongan.

5.5.4.4 IPCC

El IPCC fue establecido en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial, en adelante OMM, y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, en adelante UNEP por sus siglas en inglés. El IPCC, no lleva a cabo nuevas investigaciones. En cambio, su mandato consiste en emprender evaluaciones, relevantes desde una perspectiva política, de lo que se ha publicado en todo el mundo sobre los aspectos científicos, técnicos y socioeconómicos del CC. La mayor parte de esta literatura especializada ha aparecido en publicaciones revisadas por otros expertos (UNEP, 2001).

El IPCC, ha producido una serie de informes de evaluación, informes especiales, documentos técnicos y metodologías, las cuales se han transformado en obras normalizadas de referencia en cuanto al CC para los encargados de formulación de políticas, especialistas y estudiantes.

El Grupo de Expertos está organizado en tres grupos de trabajo:

- i) El Grupo de Trabajo I se centra en los aspectos científicos del sistema climático;
- ii) el Grupo de Trabajo II, en impactos, vulnerabilidad y adaptación; y
- iii) el Grupo de Trabajo III en mitigación, vocablo utilizado para describir las intervenciones humanas destinadas a reducir las emisiones de GEI y ampliar los “sumideros” (bosques, océanos y otros sistemas naturales que pueden absorber el dióxido de carbono y otros GEI de la atmósfera y almacenarlos) (UNEP, 2001).

5.5.5 Marco Legal Nacional

En Colombia, los entes gubernamentales y las autoridades ambientales responsables de hacer cumplir la normatividad y a poder ejercer cualquier control legal frente a temas de CC se muestran a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9. Autoridades Ambientales Nacionales para el Cambio Climático

Autoridad	Función
MADS	Su función es asegurar la adopción y ejecución de las políticas, planes, programas y proyectos respectivos, en orden a garantizar el cumplimiento de los deberes y derechos del Estado y de los particulares en relación con el ambiente y el patrimonio natural de la Nación.
Oficina Colombiana Para La Mitigación De Cambio Climático	Su función está relacionada con la estructuración y mercadeo del portafolio colombiano de proyectos de reducción de emisiones de GEI. Dicho grupo opera con recursos de cooperación técnica dentro del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Fuente: (MADS, 2015; DNP, 2003)

Estas entidades ambientales mencionadas, necesitan de instrumentos normativos para hacer cumplir su autoridad. En la Tabla 10 se muestra la normatividad pertinente al CC.

Tabla 10. Normatividad Nacional para el Cambio Climático

Norma	Expedida Por	Concepto
Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (UNFCCC) de 1992	ONU	Tiene como finalidad lograr estabilizar las concentraciones de los gases de efecto invernadero en la atmósfera con el fin de minimizar los cambios en el sistema climático.
Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y Desarrollo de 1992	ONU	Principio 12 "Los Estados deberían cooperar en la promoción de un sistema económico internacional favorable y abierto que llevara el crecimiento económico y el desarrollo sostenible de todos los países, a fin de abordar en mejor forma los problemas de degradación ambiental..." Principio 15 "Con el fin de proteger el medio ambiente los Estados deberán aplicar ampliamente el criterio de precaución conforme a sus capacidades..."

Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 1997	ONU	Ha impulsado a los gobiernos a crear e implementar leyes y políticas que permitan minimizar los gases de efecto invernadero ocasionados por los diferentes sectores económicos de los países.
Acuerdo de París 2015	ONU	Establece compromiso de los países para reducir sus emisiones de GEI, para lo cual deben establecer sus metas de reducción y formular las leyes, políticas y programas que aporten a su cumplimiento.
Constitución Política de 1991	Congreso de la República	La consideración, manejo y conservación de los recursos naturales y el medio ambiente, a través de los siguientes principios fundamentales: 1, Derecho a un ambiente sano 2, El medio ambiente como patrimonio común 3, Desarrollo Sostenible
Ley 23/93	Congreso de la República	Principios fundamentales sobre prevención y control de la contaminación del aire, agua y suelo y otorgó facultades al Presidente de la República para expedir el Código de los Recursos Naturales.
Decreto Ley 2811/74	Presidente de la República	El ambiente es patrimonio común, el estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo. Regula el manejo de los recursos naturales renovables (la atmósfera y el espacio aéreo Nacional; las aguas; la tierra; el suelo y el subsuelo; la flora; la fauna; las fuentes primarias de energías no agotables; entre otros), la defensa del ambiente y sus elementos.
Ley 99/93	Congreso de la República	Mediante esta ley se logra concretar en un solo documento las normas y principios que antes de esta ley carecían de coherencia en el control y formulación de políticas ambientales a nivel nacional. En ella se destacan los siguientes aspectos: a. Define los fundamentos de la política ambiental colombiana b. Establece los fundamentos de la política ambiental c. Define la obligatoriedad de obtener Licencia Ambiental para ejecutar proyectos, obras o actividades que puedan causar daño al medio ambiente. d. Crea el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial MMA, organiza el Sistema Nacional Ambiental SINA y reorganiza las Corporaciones Autónomas Regionales CAR's, creando otras. e. Permite la participación ciudadana en el proceso de otorgamiento de la Licencia ambiental.

Ley 29/1992	Congreso de la República	Por medio de ésta se aprueba el Protocolo de Montreal conexo a sustancias agotadoras de la capa de O ₃ .
Ley 164/1994	Congreso de la República	Por medio de ésta se aprueba la UNFCCC para Colombia.
Ley 629/2000	Congreso de la República	Por medio de ésta se aprueba el "Protocolo de Kioto de la UNFCCC para Colombia.
Ley 697/01	Congreso de la República	Reglamenta el uso eficiente y ahorro de energía y promueve el uso de energías alternativas. Declara el uso de este recurso como asunto de interés social, público y de conveniencia nacional, fundamentalmente para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana, la protección al consumidor y la promoción del uso de energías convencionales de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales.
Ley 1715/14	Congreso de la República	Promueve el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable.
Ley 143/94	Congreso de la República	Establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, concede autorizaciones y dicta otras disposiciones en materia energética.
CONPES 3242/2003	MAVDT y DNP	Estrategia Institucional para la Venta de Servicios Ambientales de Mitigación del CC.
Decreto 291/2004	Presidente de la República	Modifica la estructura del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, y se dictan otras disposiciones.
Decreto 3683/03	Presidente de la República	Formula los lineamientos de las políticas y diseñará los instrumentos para el fomento y la promoción de las fuentes no convencionales de energía, con prelación en las zonas no interconectadas; así como la ejecución de proyectos en Eficiencia Energética en Colombia; para lo cual realizará las gestiones necesarias para definir estrategias comunes con otras entidades, que desarrollen funciones relacionadas con el tema de Uso Racional de Energía, con el objetivo de organizar y fortalecer el esquema institucional más adecuado para el cumplimiento de dicha gestión.
Decreto 2331/07	Presidente de la República	Establece una medida tendiente al uso racional y eficiente de energía eléctrica. Mediante la utilización o sustitución de todas las bombillas incandescentes por bombillas ahorradoras.

Decreto 2501/07	Presidente de la República	Establece las entidades encargadas de formular las normas para el uso eficiente y racional de energía en periodos de tiempo determinado dependiendo de los productos utilizados en la transformación de energía eléctrica o los productos destinados para el uso final de energía eléctrica.
Decreto 3450/08	Presidente de la República	Establece el cambio en las fuentes de iluminación de baja eficacia lumínica, por fuentes lumínicas de la más alta eficacia disponible en el mercado, dependiente de las actividades. La disposición final que se debe generar de manera adecuada con programas pos consumo debido a la peligrosidad del residuo
Decreto 1541/78	Presidente de la República	Establece que se requiere concesión para obtener el derecho al aprovechamiento de las aguas para generación hidroeléctrica.
Decreto 1933/94	Presidente de la República	Por la cual se establecen los porcentajes de distribución por ventas brutas a las plantas de generación de energía hidroeléctrica o termoeléctrica.
Decreto 948/95	Presidente de la República	Establece que se requiere permiso de emisiones para la operación de plantas termoeléctricas.
Resolución 0454/2004	MAVDT	Por medio de la cual se regula el funcionamiento del Comité Técnico Intersectorial de Mitigación del CC del Consejo Nacional Ambiental.
Resolución 0910/2008	MAVDT	Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones.
Resolución 551/2009	MAVDT	Por la cual se adoptan los requisitos y evidencias de contribución al desarrollo sostenible del país y se establece el procedimiento para la aprobación nacional de proyectos de reducción de emisiones de GEI que optan al MDL y se dictan otras disposiciones.
Resolución 552/2009	MAVDT	Por la cual se crea y regula el funcionamiento del comité técnico de mitigación de CC y se dictan otras disposiciones.
Resolución 2733/2010	MAVDT	Por la cual se adoptan los requisitos y evidencias de contribución al desarrollo sostenible del país, se establece el procedimiento para la aprobación nacional de programas de actividades bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y se reglamenta la autorización de las entidades coordinadoras”

Resolución 2734/2010	MAVDT	Por la cual se adoptan los principios, requisitos y criterios y se establece el procedimiento para la Aprobación Nacional de proyectos de reducción de emisiones de GEI que optan al MDL.
Resolución 181331/09	MME	Por la cual se expide el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público RETILAP y se dictan otras disposiciones.
Resolución 90708/13	MME	Por la cual se expide el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas –RETIE.
CONPES 3700/2011	MAVDT y DNP	Estrategia Institucional para la Articulación de Políticas y Acciones en Materia de CC en Colombia.
Lineamientos Política Cambio Climático	MAVDT y DNP	Los lineamientos identifican siete estrategias, entre ellas, la promoción de actividades de reducción y captura de emisiones de GEI, dentro del marco del MDL. Aprobada en el año 2002.
NTC ISO 50001	ISO International Standar Organization	Da los lineamientos generales que permita establecer, implementar, mantener y mejorar un sistema de gestión de la energía, permitiendo a las organizaciones crear estrategias de mejoramiento energético, el uso y consumo de energía.

Fuente: (DNP, 2003) , (MADS, 2015), (Ministerio de Minas, 2015), (UNFCCC, 2012) y (Alcaldía de Bogotá, 2016)

6. ACCIONES METODOLÓGICAS

Este trabajo se fundamentó principalmente en el método deductivo, el cual sugiere una investigación de tipo descriptiva, es decir, tendrá como finalidad identificar, registrar y analizar los requerimientos de energía para la iluminación del Edificio Rafael Arbolea.

Una vez obtenidos los consumos y requerimientos de energía para iluminación del edificio, se llevó a cabo la cuantificación de las emisiones de CO₂ generadas para determinar la línea base o escenario de emisiones de CO₂ actuales por dicha actividad.

El estudio donde se llevó cabo la descripción de observación, fue el edificio Rafael Arbolea de la PUJ, teniendo en cuenta los consumos de energía asociados a la iluminación. Basados en esta descripción, se propusieron las alternativas de eficiencia energética para la reducción de emisiones de CO₂.

6.1 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Para este fin, se tomó como referencia en primera instancia, los términos que indica la metodología de línea base de emisiones “AMS II.E: Eficiencia energética y medidas de cambio de combustibles en edificios” para proyectos categorizados como “de pequeña escala”, en relación a las condiciones del establecimiento de la línea base de emisiones de CO₂. Esta es la versión 10 que ha estado en validez desde Agosto de 2007.

La metodología está incluida en el folleto elaborado por la UNFCCC, el cual resume cada una de las metodologías MDL aprobadas en una sola página que incluye una representación esquemática de innovación. Ver Anexo V. Metodología AMS II. E.

Según la UNFCCC (2015), dicha metodología será aplicada para cualquier eficiencia energética y/o medida de cambio de combustible para la generación de energía necesaria en edificios. Adicionalmente abarca proyectos que fomenten la eficiencia energética o que implique la sustitución de combustibles y estrategias que disminuyan la necesidad de utilización de energía eléctrica en iluminación.

Las medidas pueden ser un reemplazo del equipo existente o equipo que se instala en una nueva ubicación.

Según la UNFCCC (2015), la metodología AMS II.E tiene limitaciones que se tendrán en cuenta para este proyecto como:

- a. Se deberá establecer la ubicación física y geográfica. Las actividades del proyecto se deben aplicar a las instalaciones, o actividades a través de procesos similares en asociaciones.
- b. El ahorro de energía total de un solo proyecto no podrá exceder el equivalente a 60 GWh por año.

Igualmente, la UNFCCC (2015) sugiere que para la elaboración de la línea base se deberá tener en cuenta:

- a. La línea base de energía consistirá en el uso de energía de:
 - La actividad existente mediante la cual se reduce, en el caso de las medidas de adaptación.
 - Equipos o instalaciones que de otro modo se ubicarán en el caso de una nueva instalación.
- b. Si la energía desplazada es un combustible fósil, la línea de base de la energía es el consumo de combustible existente o la cantidad de combustible que sería utilizado por demanda de energía.
- c. Los autores del proyecto, deben demostrar la hipótesis de referencia del proyecto y del consumo de combustible frente a las actividades de referencia.
- d. Cada forma de energía en la línea base de emisión, se multiplica por un coeficiente de emisión en kg de CO₂/kWh. Para la electricidad desplazada, el coeficiente de emisión se calcula de acuerdo con lo dispuesto en la categoría. Para los combustibles fósiles, los valores por defecto del IPCC para los coeficientes de emisión pueden ser utilizados.

Dentro del alcance del proyecto, no está previsto el monitoreo de equipos transferidos. Se desarrollara la metodología enfocada a la producción de energía en plantas termoeléctricas.

Es importante aclarar que para la elaboración de la línea base, se debe hacer un inventario de emisiones de GEI por la producción de energía eléctrica. Para esto, se utilizarán las directrices que establece el IPCC para la metodología internacionalmente acordada y programas para el cálculo de las emisiones y absorciones nacionales de los GEI, la cual está generalizada para los países signatarios⁵ de la UNFCCC (IDEAM, PNUD, 2012).

Según el IDEAM y el PNUD (2012), el procedimiento metodológico final aplicado para la estimación y el análisis con base en el comportamiento de los GEI para el sector energético es el siguiente:

- Estimación de los GEI.
- Determinación de las emisiones de los GEI directos en CO₂ equivalente para cada sector.
- Sumar las emisiones de los sectores en unidades de CO₂ equivalente.
- Cálculo de la incertidumbre de los resultados.
- Análisis de categorías principales.

⁵ Colombia es signataria de la CMNUCC ratificado mediante la Ley 164 de 1994, así como del protocolo de Kioto ratificado mediante Ley 629 de 2000.

6.2 MÉTODO PARA CALCULAR LAS EMISIONES DE CO₂ PROCEDENTES DEL CONSUMO DE ELECTRICIDAD

Para el caso del cálculo de emisiones de CO₂ por el consumo de electricidad, se utilizaron los lineamientos del documento de UNFFCC, “*Methodological Tool to calculate project emissions from electricity consumption*”, versión 01.

Según UNFCCC (2007), ésta herramienta proporciona los procedimientos para el cálculo de las emisiones de CO₂ del proyecto asociadas con el consumo de electricidad relacionado a la actividad del proyecto MDL.

Con el fin de cuantificar las emisiones de CO₂ derivadas del consumo de energía eléctrica, se cuantifica el consumo de energía eléctrica y se estima el factor de emisión derivado del proceso de generación de electricidad. En este sentido para el CO₂ emitido se calculó de acuerdo con la Ecuación 1.

Ecuación 1. Emisiones de CO₂ por consumo de electricidad

$$E_{gf}^C = C_{electricidad} * FE_{electricidad.g}$$

Donde:

E_{gf}^C = emisiones de CO₂ por el consumo de electricidad en kg de CO₂

C_f = consumo de electricidad (kWh)

$FE_{g,f}$ = factor de emisión estandar de CO₂ por el proceso de consumo de electricidad
($\frac{kg \text{ de } CO_2}{kWh}$)

En la medida en que exista información detallada sobre los factores de emisión nacionales, que para este caso corresponden a la generación de electricidad, el cálculo de las emisiones de la línea base será más preciso. Es por esto que para el cálculo de las emisiones de CO₂ procedentes de la iluminación del edificio Rafael Arboleda, se utilizará el factor de emisión por consumo de electricidad del SIN⁶ para Colombia, el cual es proporcionado como resultado del documento “Cálculo del factor de emisión de CO₂ del Sistema Interconectado Nacional”, presentado por la UPME en el año 2013.

Según UPME (2013), este factor de emisión es utilizado para la “estimación de GEI por consumo de energía eléctrica y realización de inventarios de emisiones de GEI”.

De la misma forma se establece un factor para calcular las emisiones evitadas de CO₂ para proyectos MDL, el cual se refiere a todas aquellas actividades de proyectos que resultan en ahorros de electricidad y esta electricidad ahorrada habría sido suministrada por la red, por ejemplo, proyectos de eficiencia energética (UPME, 2013).

⁶ El SIN, se refiere a las plantas equipos de generación, redes de distribución y transmisión de electricidad regionales y transregionales interconectados (UPME, 2013).

7. ENFOQUE METODOLÓGICO

7.1 DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACION

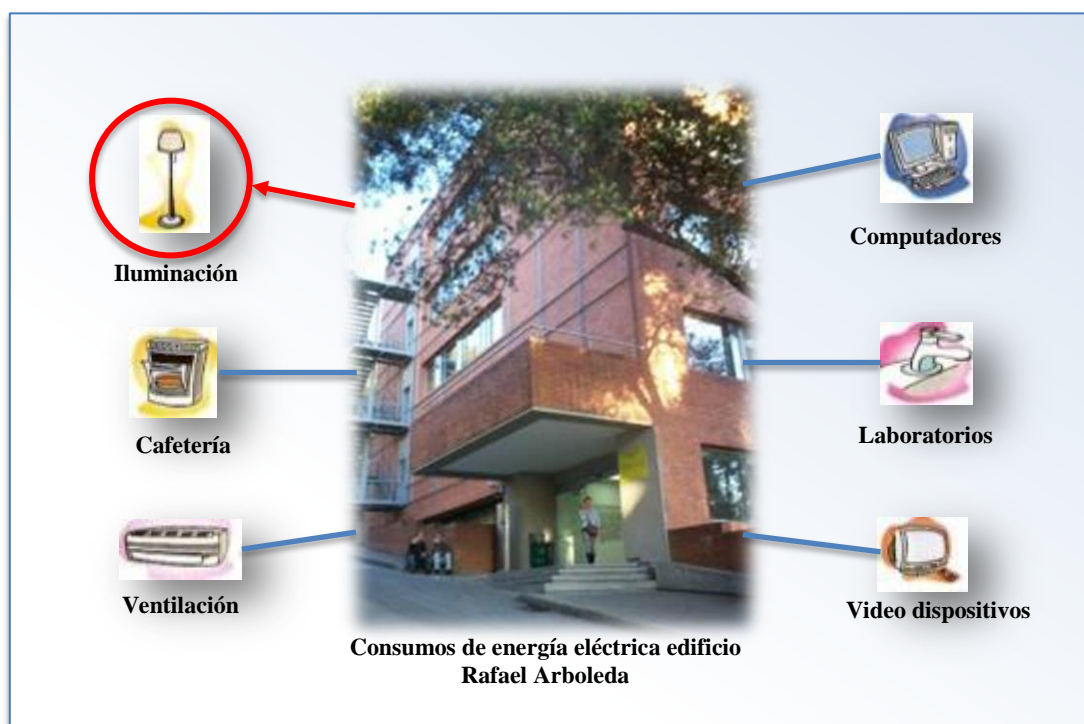
La cuantificación de emisiones de CO₂, se basó en el análisis de la generación de dichas emisiones a partir de la demanda energética del edificio Rafael Arboleda de la PUJ.

Para el desarrollo de esta investigación, se consideraron específicamente las emisiones generadas por la utilización de energía para la iluminación, es decir el uso de luminarias del edificio. Ver Ilustración 18.

Es importante aclarar que dentro de la propuesta del proyecto solo se propone la sustitución de luminarias utilizadas actualmente por luminarias tipo LED.

Para hacer el análisis del tiempo de retorno de la inversión, no se contemplaran los costos de accesorios, instalación y mantenimiento.

Ilustración 18. Delimitación de la investigación



Fuente: autores

7.2 HERRAMIENTAS INVESTIGATIVAS

Esta investigación, se planteó para ser desarrollado mediante herramientas de investigación cuantitativa, dada la naturaleza del proyecto, y a la metodología propuesta que se basa principalmente en la recolección y análisis de datos tanto en campo como es el edificio Rafael Arboleda de la PUJ, y el análisis teórico documental sobre el dispositivo piezoeléctrico. Todo esto para dar cumplimiento a los objetivos propuestos.

7.2.1 Recopilación de datos

7.2.1.1 Recopilación de datos del dispositivo piezoeléctrico

Es importante aclarar que la información del dispositivo piezoeléctrico se hará a través de una revisión documental de otras investigaciones sobre estos dispositivos, así como información suministrada por los fabricantes. Con esto se hará el estimativo de la capacidad de generación y de aporte al sistema eléctrico del edificio Rafael Arboleda.

7.2.1.2 Recopilación de datos de los paneles solares

De acuerdo a conversaciones con el personal encargado del mantenimiento del campus se conoce el interés por parte de ellos de realizar proyecto con paneles solares y así suplir la demanda energética de la PUJ. Por esta razón se trabajará en conjunto con ellos para lograr este objetivo. Es necesario determinar el número de paneles requeridos para suplir la demanda energética del edificio Rafael Arboleda, las especificaciones técnicas de estos dispositivos, el área requerida y el área con la que se cuenta para la instalación de los paneles. Con esto se busca determinar el aporte de los dispositivos solares al sistema eléctrico del edificio.

7.2.1.3 Recopilación de datos del flujo vehicular del parqueadero de la PUJ

Para realizar los cálculos de generación de energía por los dispositivos piezoeléctricos, es necesario conocer el flujo vehicular del parqueadero privado de la PUJ. Por consiguiente, se establecerá comunicación con la Oficina de Servicios Generales – Coordinación de parqueaderos y la Oficina de Administración del Campus de la PUJ:

- Sandra Catalina Acosta Cleves - Jefe de servicios generales
- Linda Karime Santoval Miller - Jefe administración campus
- Marcia Migdonia Bohórquez Morales - Coordinador parqueaderos
- John Alexander Parra Rueda - Coordinador parqueaderos

7.2.1.4 Recopilación de datos de diseño

Los datos relacionados al diseño del edificio Rafael Arboleda son necesarios para hacer el cálculo del número de paneles que se pueden instalar. Igualmente, es necesario conocer el diseño de la entrada vehicular norte del parqueadero de la PUJ para poder estimar el número de dispositivos piezoeléctricos que se pueden instalar.

Para hacer la recopilación de esta información se realizaron las siguientes actividades junto con la oficina Desarrollo Planta Física:

- a. Solicitud y revisión de los planos de diseño del edificio y la entrada vehicular a la arquitecta Lina Achury, a través de la Secretaria de Postgrados.
- b. Hacer una inspección locativa al piso 9 (cubierta) del edificio Rafael Arboleda y a la entrada vehicular norte del parqueadero de la PUJ.

7.2.1.5 Recopilación de datos de la demanda energética

Se mantendrá constante comunicación con el área Infraestructura Eléctrica de la PUJ. Se solicitarán las facturas de energía eléctrica respectivas para el edificio Rafael Arboleda.

Igualmente se identifica el inventario de luminarias presentes en todo el edificio, suministrado por la dirección de recursos físicos del campus universitario. La comunicación se establecerá con las siguientes personas:

- Ingeniero Sergio Bruno Paniagua - Coordinador de infraestructura eléctrica de la PUJ
- Ingeniero Pablo Andrés León Zapata - Profesional de infraestructura eléctrica de la PUJ

7.2.2 Identificación de la demanda energética

A partir de información secundaria sobre el consumo de energético del edificio Rafael Arboleda y del inventario de los dispositivos de iluminación con los que cuenta el edificio se hará una estimación de la demanda energética para dicha actividad, con el fin de reunir la información necesaria y poder determinar las medidas de eficiencia energética apropiadas.

8. RESULTADOS

8.1 RESULTADOS LINEA BASE EDIFICIO RAFAEL ARBOLEDA

Luego de hacer los cálculos pertinentes y utilizar las metodologías seleccionadas para el estudio, se obtuvo los resultados de la línea base del edificio Rafael Arboleda para iluminación. A partir de los resultados, y su posterior análisis, se propusieron las alternativas que permiten la reducción de emisiones de CO₂.

8.1.1 Demanda energética por iluminación convencional

Para realizar el cálculo de emisiones de CO₂ por la iluminación en el edificio Rafael Arboleda fue necesario hacer primero el cálculo del consumo de energía eléctrica por iluminación ya que este dato no se conoce ni se puede determinar directamente pues el medidor solo da el total del consumo de la energía eléctrica del edificio. Para el cálculo se tomó como base el inventario de luminarias del edificio que fue suministrado por la Oficina de Desarrollo Físico del Campus. Ver Anexo VI. Inventario de luminarias y demanda energética por iluminación del edificio Rafael Arboleda, PUJ. Con el total de luminarias y el consumo de cada una se calculó la energía eléctrica que éstas demandan. Ver Tabla 11.

Tabla 11. Inventario de luminarias y demanda por iluminación edificio Rafael Arboleda

Tipo de luminaria actual	Número de luminarias actuales	Demanda por luminarias actuales (W)	Demanda total (W)
Tubo T3	3.500	17	59.500
Tubo T5	1.202	24	28.848
Tubo 26W	254	26	6.604
Tubo 32W	140	32	4.480
Lámparas 653 50W 12V	47	50	2.350
Lámparas Dicroicas 50W 12V	7	50	350
Bombillo Ahorrador	18	20	360
Balas LED Blancas	95	11	1.045
Total	5.263		103.537

Fuente: (Dirección de recursos físicos campus universitario, 2015)

8.1.1.1 Demanda de energía eléctrica para iluminación convencional⁷

Ecuación 2. Demanda de energía eléctrica para iluminación convencional

$$\begin{aligned} &= \sum \text{Demanda total por tipo de luminaria (kW)} \\ &= 103.537 * \frac{1 \text{ kW}}{1.000 \text{ W}} \\ &= 103,537 \text{ kW} \end{aligned}$$

⁷ Entiéndase por iluminación convencional, la iluminación generada por medio de las luminarias actuales del edificio Rafael Arboleda.

Como no se conoce el tiempo exacto que se usan las luminarias y con base en la información que nos suministraron en la Oficina de Desarrollo Físico del Campus, se usó un supuesto de tiempo de uso de 14 horas para el 80% de las luminarias equivalentes a las ubicadas en salones de clase y áreas comunes (SAC), y de 10 horas para el restante 20% equivalente a las ubicadas en las oficinas (OF).

Ecuación 3. Demanda de energía eléctrica para iluminación convencional al día SAC

$$\begin{aligned}
 &= \text{Demanda total convencional (kW)} * \text{número de horas de uso al día} \\
 &= 103,537 \text{ kW} * 0,8 * 14 \frac{h}{\text{día}} \\
 &= 1159,61 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}
 \end{aligned}$$

Ecuación 4. Demanda de energía eléctrica para iluminación convencional al día OF

$$\begin{aligned}
 &= \text{Demanda total (kW)} * 0,2 * \text{número de horas de uso al día} \\
 &= 103,537 \text{ kW} * 0,2 * 10 \frac{h}{\text{día}} \\
 &= 207,07 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}
 \end{aligned}$$

Ecuación 5. Demanda total de energía eléctrica para iluminación convencional al día

$$\begin{aligned}
 &= \text{Demanda (kWh/día) SAC} + \text{Demanda (kWh/día) OF} \\
 &= 1.159,61 \frac{\text{kWh}}{\text{día}} + 207,07 \frac{\text{kWh}}{\text{día}} \\
 &= 1366,69 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}
 \end{aligned}$$

Ecuación 6. Demanda total de energía eléctrica para iluminación convencional al mes

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{Demanda total (kWh)}}{\text{día}} * \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}} \\
 &= \frac{1.366,69 \text{ kWh}}{\text{día}} * \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}} \\
 &= 41.000,7 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}}
 \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta el calendario académico de la universidad, el cual consta de dos semestres al año, y cada semestre es de aproximadamente cuatro meses, para efectos de los cálculos se tomara un periodo anual de nueve meses equivalentes a los ocho meses de clase. Adicionalmente se incluirá un mes más por efecto del trabajo de personal administrativo que inicia y termina sus labores antes y después de la jornada estudiantil.

Ecuación 7. Demanda total de energía eléctrica para iluminación convencional al año

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{Demanda total (kWh)} \cdot 9 \text{ meses}}{\text{mes}} * \frac{1 \text{ año}}{12 \text{ meses}} \\
 &= \frac{41.000,7 \text{ kWh}}{\text{mes}} * \frac{9 \text{ meses}}{12 \text{ meses}} \\
 &= 369.006,3 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

8.1.2 Emisiones de CO₂ generadas por iluminación convencional

Para realizar el inventario de emisiones de CO₂ por el uso de luminaria convencional en el edificio Rafael Arboleda de la PUJ se tuvo en cuenta la metodología de la UNFCCC (2007) mencionada en el numeral 6.2 y se utilizó un factor de emisión de 0,2 t CO₂/MWh - kgCO₂/ kWh correspondiente al factor de emisión del SIN. (UPME, 2013).

A continuación, la Ecuación 8, muestra el cálculo de inventario de emisiones de CO₂ generadas por la iluminación convencional en el edificio:

Ecuación 8. Cálculo de emisiones de CO₂ por uso de luminarias actuales edificio Rafael Arboleda

$$\begin{aligned}
 \text{Emisiones} \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right) &= 369.006,3 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ MWh}}{1.000 \text{ kWh}} * 0,2 \frac{t \text{ CO}_2}{\text{MWh}} \\
 &= 73,8 t \text{ CO}_2 / \text{año}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos por iluminación convencional y sus emisiones de CO₂ correspondientes.

Tabla 12. Resultados de línea base por iluminación en edificio Rafael Arboleda

Demanda de electricidad (kWh / año)	Factor de emisión (t de CO₂/ MWh)	Emisiones de CO₂ (t CO₂/ año)
369.006,3	0,2	73,8

Fuente: autores

8.1.3 Costo por iluminación convencional

Para calcular el costo de la energía consumida por las luminarias actuales se tomó como base el precio del kWh del último periodo septiembre-diciembre para el año 2015 pagado por la PUJ a EMGESA y que se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Resumen Costo kWh en el 2015

Periodo	Costo kWh (\$)
Enero – Abril	264,84
Mayo – Agosto	268,35
Septiembre - Diciembre	283,58

Fuente: (Dirección de recursos físicos campus universitario, 2015)

Ecuación 9. Costo teórico total de la iluminación convencional al día

$$\begin{aligned}
 &= \text{Demanda total} \frac{kWh}{\text{día}} * \text{costo} \frac{\$}{kWh} \text{ (septiembre – diciembre)} \\
 &= 1.366,69 \frac{kWh}{\text{día}} * \frac{\$283,58 \text{ pesos}}{kWh} \\
 &= \$ 387.565,9 \frac{\text{pesos}}{\text{día}}
 \end{aligned}$$

Ecuación 10. Costo total de la iluminación convencional al mes

$$\begin{aligned}
 &= \text{Demanda total} \frac{kWh}{\text{mes}} * \text{costo} \frac{\$}{kWh} \text{ (septiembre – diciembre)} \\
 &= 41.000,7 \frac{kWh}{\text{mes}} * \frac{\$283,58 \text{ pesos}}{kWh} \\
 &= \$ 11'626.978,5 \frac{\text{pesos}}{\text{mes}}
 \end{aligned}$$

Ecuación 11. Costo total de la iluminación convencional al año

$$\begin{aligned}
 &= \text{Demanda total} \frac{kWh}{\text{año}} * \text{costo} \frac{\$}{kWh} \text{ (septiembre – diciembre)} \\
 &= 369.006,3 \frac{kWh}{\text{año}} * \frac{\$283,58 \text{ pesos}}{kWh} \\
 &= \$ 104'642.806,5 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1 ANÁLISIS LÍNEA BASE EDIFICIO RAFAEL ARBOLEDA

El Edificio Rafael Arboleda presta varios servicios dentro del campus de la PUJ tanto académicos como administrativos lo que demanda energía eléctrica para la iluminación artificial. Es por esto que cuenta con 5.263 luminarias, de las cuales el 93,7% (5.150) son luminarias fluorescentes convencionales, tan solo un 5,3% (95) son luminarias LED y un 1 % (18) son luminarias ahorradoras.

Es debido a este gran número de luminarias y al gran porcentaje de luminarias fluorescentes que se genera una alta demanda de energía eléctrica por parte del edificio, ya que diariamente la demanda de energía en iluminación es de 1.366,69 kWh. Esto se traduce en un consumo mensual de 41.000,7 kWh e implica un consumo anual de 369.006,3 kWh.

La alta demanda de energía eléctrica se ve reflejado en un alto costo del servicio, ya que diariamente cuesta \$ 387.568,8 pesos, lo que se traduce en una parte del valor facturado mensualmente equivalente a \$ 11'626.978,5 pesos. Esto le representa a la PUJ un gasto total al año de \$ 104'642.806,5 pesos.

Es importante señalar que estos costos son variables de acuerdo a la fluctuación del precio del kWh en Colombia, el cual depende de factores como el nivel de los embalses que si llega a verse afectado de forma drástica influiría directamente en los costos, y no solo esto si no que puede llevar a tomar medidas más drásticas como ocurre actualmente en el país, donde se pueden llegar a presentar racionamientos energéticos y aumentos de los costos de la energía eléctrica. Esto también significaría un aumento en el pago del servicio por parte de la PUJ.

Se calcula a partir de los datos en la Tabla 12, que el total de emisiones de CO₂ producidas por el uso de luminarias en el Edificio Rafael Arboleda de la PUJ, es de 73,8 t CO₂ por año. Esto debido al gran uso que se les da por ser necesarias para desarrollar normalmente las actividades del edificio y que obligan a que un 80% de ellas estén encendidas aproximadamente 14 horas y el otro 20% aproximadamente 10 horas, lo que significa un uso del más del 50% del tiempo en el edificio.

10. ALTERNATIVAS PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

10.1 ALTERNATIVAS PARA ILUMINACIÓN DE EDIFICIO RAFAEL ARBOLEDA

10.1.1 Alternativa 1. Sustitución de luminarias por tecnología LED

El cambio de la tecnología de iluminación fluorescente a tecnología LED se constituye como una solución no solo para la reducción de emisiones de CO₂, sino también para mejorar la eficiencia energética, aunque la diferencia de costo entre las dos tecnologías puede ser representativa y puede ser un factor a tener en cuenta, pues la inversión inicial para realizar el cambio es alta, el beneficio a corto y mediano plazo es aún más significativo pues el ahorro en consumo de energía y en el costo de la misma así como la mayor vida útil que significa menos costos de mantenimiento hacen esta alternativa muy viable y rentable.

Como se delimitó en el alcance del proyecto, para el caso del edificio Rafael Arboleda de la PUJ, se propone una sustitución total de las luminarias convencionales a luminarias LED. Teniendo en cuenta el análisis de la línea base, esto significa cambiar 5.263 luminarias (fluorescentes y ahorradoras) con las que cuenta el edificio. Esto es una variable muy importante que representaría una disminución significativa en la demanda de energía eléctrica y en el costo de la misma una vez se realice el cambio. Para efectos de esta propuesta se toma en cuenta el cambio de tecnología con base en la equivalencia de vatiaje (W) de las luminarias actuales (fluorescentes y ahorradoras) comparadas con luminarias LED.

Teniendo en cuenta los cálculos de demanda y costos que estas generan por utilización de luminarias convencionales, se utilizaron las mismas ecuaciones proyectadas para las luminarias LED. Así se puede comparar y ayudar a determinar la viabilidad de esta alternativa. Ver Tabla 18.

Ilustración 19. Dispositivos LED



Fuente: (Garper Energy, 2015); (Philips, 2014)

Para determinar las equivalencias entre las luminarias actuales y luminarias LED se tomó como base la información de diferentes tablas de equivalencia y comparación entre luminarias LED y luminarias convencionales (VerLED, 2015) (Grupo Enersa, 2015), así como la información de tecnología de este tipo disponible en el mercado y que ofrecen diferentes fabricantes de luminarias (Colombialeds, 2015) (Garper Energy Solution, 2015). Ver Tabla 14.

Tabla 14. Número de luminarias LED necesarias

Tipo Luminaria actual	Número de luminarias actuales	Equivalencia en consumo LED (W)	Demanda Total (W)
Tubo T317W	3.500	9	31.500
Tubo T5 24W	1.202	12	14.424
Tubo 26W	254	12	3.048
Tubo 32W	140	15	2.100
Lámparas 653 50W 12v	47	22	1.034
Lámparas Dicroicas 50W 12v	7	22	154
Bombillo Ahorrador 20W	18	10	180
Balas LED Blancas 11W	95	11	1.045
Total	5.263		53.485

Fuente: autores

10.1.1.1 Demanda de energía eléctrica por iluminación con LED

A continuación se muestran las ecuaciones respectivas para calcular la demanda energética del edificio Rafael Arboleda al utilizar luminarias LED.

Ecuación 12. Demanda total LED

$$\begin{aligned}
 &= \sum \text{Demanda total por tipo de luminaria LED (kW)} \\
 &= 53.485 \text{ W} * \frac{1 \text{ kW}}{1.000 \text{ W}} \\
 &= 53,5 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Aplicando el mismo supuesto usado para el cálculo de la demanda de las luminarias actuales para el tiempo de uso, se usa un tiempo de 14 horas para el 80% de las luminarias equivalentes a las ubicadas en salones de clase y áreas comunes (SAC), y de 10 horas para el restante 20% equivalente a las ubicadas en las oficinas (OF).

Ecuación 13. Demanda LED SAC al día

$$\begin{aligned}
 &= \text{Demanda total LED (kW)} * 0,8 * \text{número de horas de uso al día} \\
 &= 53,5 \text{ kW} * 0,8 * 14 \frac{\text{h}}{\text{día}} \\
 &= 599 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}
 \end{aligned}$$

Ecuación 14. Demanda de energía eléctrica para iluminación LED OF al día

$$\begin{aligned} &= \text{Demanda total LED (kW)} * 0,2 * \text{número de horas de uso al día} \\ &= 53,5 \text{ kW} * 0,2 * 10 \frac{\text{h}}{\text{día}} \\ &= 107 \frac{\text{kWh}}{\text{día}} \end{aligned}$$

Ecuación 15. Demanda total de energía eléctrica para iluminación LED al día

$$\begin{aligned} &= \text{Demanda LED (kWh/día) SAC} + \text{Demanda LED (kWh/día) OF} \\ &= 599 \frac{\text{kWh}}{\text{día}} + 107 \frac{\text{kWh}}{\text{día}} \\ &= 706 \frac{\text{kWh}}{\text{día}} \end{aligned}$$

Ecuación 16. Demanda total de energía eléctrica para iluminación LED al mes

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Demanda total LED (kWh)}}{\text{día}} * \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}} \\ &= \frac{706 \text{ kWh}}{\text{día}} * \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}} \\ &= 21.180 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}} \end{aligned}$$

Ecuación 17. Demanda total de energía eléctrica para iluminación LED al año

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Demanda total LED (kWh)}}{\text{mes}} * \frac{9 \text{ meses}^8}{1 \text{ año}} \\ &= \frac{21.180 \text{ kWh}}{\text{mes}} * \frac{9 \text{ meses}}{1 \text{ año}} \\ &= 190.620 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \end{aligned}$$

10.1.1.2 Emisiones evitadas de CO₂ por iluminación con LED

Con el cambio a iluminación LED se genera una disminución en las emisiones, sin embargo al seguir consumiendo energía eléctrica del SIN, se siguen generando emisiones de CO₂. A continuación se muestran los cálculos respectivos de las emisiones de CO₂ generadas por iluminación con tecnología LED, y posteriormente, los cálculos respectivos a la reducción de las mismas frente a los resultados de la línea base.

⁸ Como se explicó anteriormente para efectos de cálculos anuales se tomara un periodo de nueve meses que es en el que se presenta mayor flujo de personal.

Ecuación 18. Cálculo de emisiones de CO₂ por uso de luminarias LED edificio Rafael Arboleda

$$\begin{aligned} \text{Emisiones} \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right) &= 190.620 \frac{kWh}{\text{año}} * \frac{1 \text{ MWh}}{1.000 \text{ kWh}} * 0,2 \frac{t \text{ CO}_2}{\text{MWh}} \\ &= 38,1 t \text{ CO}_2 / \text{año} \end{aligned}$$

Es importante mencionar que con el cambio de luminarias convencionales a luminarias LED se espera un ahorro energético frente a la demanda de energía eléctrica. Ver Ecuación 19.

Ecuación 19. Ahorro energético con cambio a LED al año

$$\begin{aligned} &= \text{Demanda total convencional} \frac{kWh}{\text{año}} - \text{Demanda total LED} \frac{kWh}{\text{año}} \\ &= 369.006,3 \frac{kWh}{\text{año}} - 190.620 \frac{kWh}{\text{año}} \\ &= 178.386,3 \text{ kWh/año (48,3 \% de reducción de energía demanda)} \end{aligned}$$

Este ahorro energético conlleva a su vez una reducción de emisiones de CO₂, las cuales se conocen como emisiones evitadas.

Para realizar el cálculo de emisiones evitadas de CO₂ por el uso de luminarias LED en el edificio Rafael Arboleda de la PUJ se tuvo en cuenta la metodología de la UNFCCC (2007) mencionada en el numeral 6.2 y se utilizó un factor de emisión 0,2 t CO₂/ MWh - kgCO₂ / kWh según lo establece la Unidad de Planeación Minero Energética, en adelante UPME (UPME, 2013).

A continuación, la Ecuación 20, muestra el cálculo de emisiones evitadas de CO₂ por iluminación LED en el edificio:

Ecuación 20. Cálculo de emisiones evitadas de CO₂ para luminarias LED edificio Rafael Arboleda al año

$$\begin{aligned} \text{Emisiones evitadas} \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right) &= \text{ahorro energético por utilización de LED} * \text{factor de emisión} \\ &= 178.386,3 \frac{kWh}{\text{año}} * \frac{1 \text{ MWh}}{1.000 \text{ kWh}} * 0,2 \frac{t \text{ CO}_2}{\text{MWh}} \\ &= 35,7 t \text{ CO}_2 / \text{año (48,3 \% de emisiones evitadas)} \end{aligned}$$

En la Tabla 15 se muestran los resultados obtenidos por iluminación eléctrica con LED y sus emisiones evitadas de CO₂ correspondientes.

Tabla 15. Emisiones evitadas de CO₂ por iluminación LED

Ahorro energético (kWh / año)	Factor de emisión (kg. de CO ₂ / MWh)	Emisiones evitadas de CO ₂ (t CO ₂ / año)
178.386,3	0,2	35,7

Fuente: autores

10.1.1.3 Costo teórico de iluminación con LED

El costo teórico por iluminación con LED, se calcula tomando como base el precio para el periodo septiembre-diciembre del 2015 del kWh de la Tabla 13.

$$\begin{aligned}
 & \text{Ecuación 21. Costo teórico total de la iluminación LED al día} \\
 & = \text{Demanda total LED} \frac{kWh}{\text{día}} * \text{costo} \frac{\$}{kWh} \text{ (septiembre – diciembre)} \\
 & = 706 \frac{kWh}{\text{día}} * \frac{\$283,58 \text{ pesos}}{kWh} \\
 & = \$ 200.207,5 \frac{\text{pesos}}{\text{día}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Ecuación 22. Costo teórico total de la iluminación LED al mes} \\
 & = \text{Demanda total LED} \frac{kWh}{\text{mes}} * \text{costo} \frac{\$}{kWh} \text{ (septiembre – diciembre)} \\
 & = 21.180 \frac{kWh}{\text{mes}} * \frac{\$283,58 \text{ pesos}}{kWh} \\
 & = \$ 6'006.224,4 \frac{\text{pesos}}{\text{mes}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Ecuación 23. Costo teórico total de la iluminación LED al año} \\
 & = \text{Demanda total LED} \frac{kWh}{\text{año}} * \text{costo} \frac{\$}{kWh} \text{ (septiembre – diciembre)} \\
 & = 190.620 \frac{kWh}{\text{año}} * \frac{\$283,58 \text{ pesos}}{kWh} \\
 & = \$ 54'056.019,6 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

10.1.1.4 Tiempo de retorno de la inversión en LED

Para poder conocer el tiempo de retorno de la inversión en iluminación con LED, es necesario conocer el ahorro económico generado al hacer dicha sustitución de luminarias. A continuación en la Ecuación 24 y Ecuación 25 se muestra el ahorro económico anual.

$$\begin{aligned}
 & \text{Ecuación 24. Ahorro económico en energía eléctrica anual con cambio a LED} \\
 & = \text{Costo iluminación convencional al año} - \text{Costo iluminación LED al año} \\
 & = \$ 104'642.806,5 \frac{\text{pesos}}{\text{año}} - \$ 54'056.019,6 \frac{\text{pesos}}{\text{año}} \\
 & = \$ 50'586.787 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Ecuación 25. Ahorro económico porcentual del costo con tecnología LED} \\
 & \text{Ahorro económico anual en energía con cambio a LED } \frac{\text{pesos}}{\text{año}} \\
 = & \frac{\text{Costo total de iluminación convencional al año } \frac{\text{pesos}}{\text{año}}}{\text{Costo total de iluminación convencional al año } \frac{\text{pesos}}{\text{año}}} * 100\% \\
 & = \frac{50'586.787 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}}{104'642.806,5 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}} * 100\% \\
 & = 48,3 \% \text{ de reducción de costos en energía}
 \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta el ahorro económico en energía eléctrica con cambio a LED vs. los costos de las luminarias por sustituir, se puede estimar el tiempo de la recuperación de la inversión. Para esto se tomaron precios del mercado de diferentes fabricantes que ofrecen luminarias LED de la potencia equivalente a las luminarias que actualmente utiliza el edificio Rafael Arboleda. Ver Anexo VII. Costos de luminarias LED.

Es importante recordar que dentro del alcance de la propuesta solo se propone la sustitución de luminarias, por lo que los cálculos se harán con base en el mismo número de la línea base.

En la Tabla 16 se muestran los costos de luminarias LED necesarias, los cuales se obtuvieron a través de consultas en el mercado con diferentes fabricantes de esta tecnología.

Tabla 16. Resumen del costo de luminarias LED necesarias (COP)

Tipo Luminaria actual	Número de luminarias necesarias	Equivalencia en consumo LED (W)	Costo luminaria LED unidad (\$)	Costo total luminarias LED (\$)
Tubo T317w	3.500	9	33.872	118'552.000
Tubo T5 24w	1.202	12	54.520	65'533.040
Tubo 26w	254	12	54.520	13'848.080
Tubo 32w	140	15	46.168	6'463.520
Lámparas 653 50w 12v	47	22	59.000	2'773.000
Lámparas Dicroicas 50w 12v	7	22	59.000	413.000
Bombillo Ahorrador 20w	18	10	14.000	252.000
Balas LED Blancas 11w	95	11	0	0
Total	5.263		312.508	207'834.640

Fuente: autores, adaptado de (Colombialeds, 2015), (Garper Energy, 2015) y (Philips, 2014)

- Costos luminarias: COP \$ 207'834.640

A continuación, la Ecuación 26 muestra la recuperación de la inversión en tecnología LED.

Ecuación 26. Recuperación de la inversión cambio luminarias LED

$$\text{Recuperación inversión (años)} = \frac{\text{Inversión en luminarias LED (pesos/año)}}{\text{Ahorro económico en energía eléctrica (pesos/año)}}$$

$$\frac{\$ 207'834.640 \text{ pesos/año}}{\$ 50'586.787 \text{ pesos/año}}$$

$$= 4,1 \text{ años}$$

En la Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19 se resumen cálculos realizados al sustituir las luminarias por la tecnología LED para iluminación en el edificio Rafael Arboleda. Adicionalmente, en estas tablas se modelan los resultados según una variación de la capacidad equivalente instalada de entre 10% hasta 100%, lo que es beneficioso en el momento de discutir los resultados y proponer la mejor alternativa de eficiencia energética.

Tabla 17. Análisis para el cambio a luminarias LED

Capacidad equivalente instalada de LED (%)	Capacidad equivalente instalada LED (kWh /año)	Número de luminarias LED
10%	19.062	526
20%	38.124	1.053
30%	57.186	1.579
40%	76.248	2.105
50%	95.310	2.632
60%	114.372	3.158
70%	133.434	3.684
80%	152.496	4.210
90%	171.558	4.737
100%	190.620	5.263

Fuente: autores

Tabla 18. Análisis de emisiones evitadas de CO₂ por utilización de tecnología LED

Demanda de energía eléctrica (kWh /año)	Capacidad instalada de LED (%)	Ahorro energético con LED (kWh /año)	Emisiones actuales (t CO ₂ /año)	Emisiones evitadas con LED (t CO ₂ /año)	Reducción de emisiones (t CO ₂ /año)
369.006,3	10%	17.839	73,8	3,6	4,8%
	20%	35.677		7,1	9,7%
	30%	53.516		10,7	14,5%
	40%	71.355		14,3	19,3%
	50%	89.193		17,8	24,2%
	60%	107.032		21,4	29,0%
	70%	124.870		25,0	33,8%
	80%	142.709		28,5	38,7%
	90%	160.548		32,1	43,5%
	100%	178.386,3		35,7	48,3%

Fuente: autores

Tabla 19. Análisis de costos por utilización de tecnología LED

Costo de energía eléctrica convencional (año)	Capacidad instalada de LED (%)	Capacidad instalada de LED (kWh /año)	Costo de energía eléctrica del SIN (año)	Ahorro en energía eléctrica (año)	Precio de luminarias LED	Recuperación de la inversión (años)
\$ 104'642.806,5	10%	19.062	\$ 99'584.128	\$ 5'058.679	\$ 20'783.464	4,1
	20%	38.124	\$ 94'525.449	\$ 10'117.357	\$ 41'566.928	4,1
	30%	57.186	\$ 89'466.770	\$ 15'176.036	\$ 62'350.392	4,1
	40%	76.248	\$ 84'408.092	\$ 20'234.715	\$ 83'133.856	4,1
	50%	95.310	\$ 79'349.413	\$ 25'293.393	\$ 103'917.320	4,1
	60%	114.372	\$ 74'290.734	\$ 30'352.072	\$ 124'700.784	4,1
	70%	133.434	\$ 69'232.056	\$ 35'410.751	\$ 145'484.248	4,1
	80%	152.496	\$ 64'173.377	\$ 40'469.429	\$ 166'267.712	4,1
	90%	171.558	\$ 59'114.698	\$ 45'528.108	\$ 187'051.176	4,1
	100%	190.620	\$ 54'056.019,6	\$ 50'586.787	\$ 207'834.640	4,1

Fuente: autores

10.1.2 Alternativa 2. Abastecimiento de la energía eléctrica para iluminación del edificio Rafael Arboleda a partir de energía solar

La energía solar, a través del uso de paneles fotovoltaicos, se constituye como una solución para la reducción de emisiones de CO₂, autores como (Torres, Sapiain, Schmidt, & Ovalle, s.f), plantean que aunque su costo puede ser un factor a tener en cuenta, pues su inversión inicial es alta, la operación del sistema es simple y comparado con el sistema convencional de suministro de energía eléctrica se convierte en una opción interesante a largo plazo desde el punto de vista económico.

Se construyó una tabla donde se desarrollan cálculos que estiman cual puede llegar a ser la opción más viable de abastecimiento, teniendo en cuenta disponibilidad de espacio para instalación, con energía solar fotovoltaica desde el punto de vista económico y ambiental, evaluando escenarios de capacidad instalada del 10% hasta el 100%.

Adicionalmente, se muestra cuáles son emisiones evitadas de CO₂ con la implementación de esta forma de energía alternativa. Ver Tabla 23.

Para las estimaciones pertinentes se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- a. Radiación Solar promedio: de acuerdo con UPME & IDEAM (2005), Colombia cuenta con un buen potencial energético solar en todo el territorio nacional, en regiones como la andina la radiación solar promedio está en el orden de los 1.643 kWh /m²/año, lo que equivale aproximadamente a 4,0 kWh /m². Ver Anexo VIII. Mapa promedio multianual de radiación solar en Colombia. La selección del panel fue realizada dando prioridad al proveedor actual que tiene la PUJ, donde se tuvieron en cuenta las variables de costo y potencia generada. Sin embargo se tuvieron en cuenta 3 cotizaciones diferentes.

Para el estudio se tomará como referencia el dato promedio para la ciudad de Bogotá, donde se registra que la radiación solar está entre los 3,5 a 4 kWh /m² (UPME & IDEAM, 2005).

- b. Brillo Solar en el lugar de estudio: se tomara como referencia los mapas de brillo solar publicados dentro del “Atlas de Radiación Solar de Colombia” (UPME & IDEAM, 2005), el cual plantea que para la zona de estudio el promedio multianual de brillo solar está entre 4 - 5 horas de sol por día. Ver Anexo IX. Mapa promedio multianual de horas de sol en Colombia.
- c. El panel solar fotovoltaico tendrá una potencia de 255 W con un área requerida por panel 1,65 m². El precio de cada panel será de \$ 233.000 pesos colombianos (Panasonic, 2016). Se selecciona previamente este panel para dar continuidad al enlace actual que tiene la PUJ con Panasonic en este tema. Ver Ilustración 20 y Anexo XIII. Especificaciones de paneles solares Panasonic.
- d. La instalación de los panales se hará según el área disponible en el piso 9 del edificio Rafael Arboleda (cubierta). Ver Anexo X. Fotografías piso 9 edificio Rafael Arboleda (cubierta) y Anexo XI. Diseño del piso 9 edificio Rafael Arboleda (cubierta).

Ilustración 20. Panasonic multicrystalline panel 255 W



Fuente: (Panasonic, 2016)

A continuación, se ejemplifica mediante ecuaciones, la proyección al sustituir el sistema de abastecimiento eléctrico para iluminación convencional del edificio por energía solar fotovoltaica en un 100%.

Ecuación 27. Potencia pico generada por panel al año

$$\text{Potencia Pico producida por panel} \left(\frac{kWh}{\text{mes}} \right) = 0,255 \text{ kWh} * 5 \frac{\text{h de sol}}{\text{dia}} * 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} * 12 \frac{\text{mes}}{\text{año}}$$

$$459 = kWh/año$$

Ecuación 28. Número de paneles requeridos

$$\text{No. de paneles requeridos al 100\%} = \frac{\text{demanda por iluminación al año}}{\text{potencia pico generada por panel}}$$

$$= 369.006,3 \frac{kWh}{\text{año}} * \frac{1 \text{ panel}}{459 kWh/año} = 804 \text{ paneles}$$

Ecuación 29. Área total requerida para paneles solares

$$\text{Área Total requerida} = 804 \text{ paneles} * 1,65 \frac{m^2}{\text{panel}} = 1.327 m^2$$

Es necesario contar con una batería de respaldo para el sistema, en caso de que se presente alguna situación de desabastecimiento. A continuación se muestran los cálculos para determinar cuál es la batería adecuada para esta alternativa.

Ecuación 30. Cálculo de banco de batería

$$C = \frac{E * N}{V * Pd}$$

Donde,

$$E \text{ (demanda kWh /día LED)} = 706$$

$$V \text{ (voltaje)} = 12 \text{ V}$$

$$Pd \text{ (profundidad de carga)} = 0,8$$

$$N \text{ (número de días de respaldo)} = 5$$

$$C = \frac{1366,69 \text{ kWh/día} * 2}{12 \text{ V} * 0,8}$$

$$C = 284,72 \text{ Ah}$$

Se selecciona la batería BAE Secura PVS Block Solar Bornay con capacidad nominal de C₁₂₀ 1.8 V/C Ah de 361, modelo 6V 5PVS 350. Ver Ilustración 21 y Anexo XIV. Especificaciones batería de respaldo BAE Secura PVS Block Solar.

Ilustración 21. Batería de respaldo BAE Secura PVS Block Solar Bornay para sistema solar



Fuente: (Bornay, 2016)

10.1.2.1 Emisiones evitadas de CO₂ con energía solar

Con la utilización de energía solar para iluminación se evidencia un ahorro energético frente a la demanda de energía eléctrica. Ver Ecuación 31.

Ecuación 31. Ahorro energético con energía solar al año

$$\begin{aligned} &= \text{Demanda total convencional} \frac{\text{kWh}}{\text{año}} - \text{Demanda total de la red con solar} \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \\ &= 369.006,3 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} - 0 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \\ &= 369.006,3 \text{ kWh/año (100 \% de reducción)} \end{aligned}$$

Este ahorro energético conlleva a su vez una reducción de emisiones de CO₂, las cuales se conocen como emisiones evitadas.

Al igual que en la alternativa 1, para realizar el cálculo de emisiones evitadas de CO₂ por el uso de energía solar en el edificio Rafael Arboleda de la PUJ se tuvo en cuenta la metodología de la UNFCCC (2007) mencionada en el numeral 6.2 y se utilizó un factor de emisión 0,2 t CO₂/ MWh - kgCO₂/ kWh (UPME, 2013).

A continuación, la Ecuación 32, muestra el cálculo de emisiones evitadas de CO₂ por capacidad instalada de energía solar en un 100% en el edificio:

Ecuación 32. Cálculo de emisiones evitadas de CO₂ por sistema solar en el edificio Rafael Arboleda

$$\begin{aligned} \text{Emisiones evitadas} \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right) &= \text{capacidad instalada} * \text{factor de emisión} \\ &= 369.006,3 \frac{kWh}{\text{año}} * \frac{1 \text{ MWh}}{1.000 \text{ kWh}} * 0,2 \frac{t \text{ CO}_2}{\text{MWh}} \\ &= 73,8 t \text{ CO}_2/\text{año} \text{ (100 \% de emisiones evitadas)} \end{aligned}$$

En la Tabla 20 se muestran los resultados obtenidos por iluminación eléctrica con energía solar y sus emisiones evitadas de CO₂ correspondientes.

Tabla 20. Emisiones evitadas de CO₂ por iluminación con energía solar

Ahorro energético (kWh / año)	Factor de emisión (kg. de CO ₂ / MWh)	Emisiones evitadas de CO ₂ (t CO ₂ / año)
369.006,3	0,2	73,8

Fuente: autores

10.1.2.2 Costo teórico de iluminación con energía solar

El costo teórico por iluminación con energía solar, se calcula tomando como base el precio para el periodo septiembre-diciembre del 2015 del kWh de la Tabla 13. Para esta ecuación se asume una capacidad instalada de 100 % en energía solar.

Ecuación 33. Costo teórico total de la iluminación con energía solar al año

$$\begin{aligned} &= \text{costo iluminación solar} \frac{kWh}{\text{año}} * \text{costo} \frac{\$}{kWh} \text{ (septiembre - diciembre)} \\ &= 0 \frac{kWh}{\text{día}} * \frac{\$283,58 \text{ pesos}}{\frac{kWh}{\text{año}}} \\ &= \$ 0 \frac{\text{pesos}}{\text{año}} \end{aligned}$$

10.1.2.3 Tiempo de retorno de la inversión en sistema solar fotovoltaico

Para poder conocer el tiempo de retorno de la inversión en iluminación con energía solar, es necesario conocer el ahorro económico generado a implementar dicho sistema en el edificio Rafael Arboleda. A continuación en la Ecuación 34 se muestra el ahorro económico anual.

$$\begin{aligned}
 &\text{Ecuación 34. Ahorro económico en energía eléctrica anual con energía solar} \\
 &= \text{Costo iluminación convencional al año} - \text{Costo iluminación solar al año} \\
 &= \$ 104'642.806,5 \frac{\text{pesos}}{\text{año}} - \$ 0 \frac{\text{pesos}}{\text{año}} \\
 &= \$ 104'642.806,5 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{Ecuación 35. Ahorro económico porcentual del costo con energía solar} \\
 &= \frac{\text{Ahorro económico anual en energía con cambio a solar} \frac{\text{pesos}}{\text{año}}}{\text{Costo total de iluminación convencional al año} \frac{\text{pesos}}{\text{año}}} * 100\% \\
 &= \frac{104'642.806,5 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}}{104'642.806,5 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}} * 100\% \\
 &= 100 \% \text{ de reducción de costos } \$
 \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta el ahorro económico en energía eléctrica con cambio a energía solar vs. los costos de los paneles por instalar, se puede estimar el tiempo de la recuperación de la inversión. Este último costo mencionado no incluye instalación, cableado, baterías de respaldo y/o accesorios debido a la delimitación de la investigación.

A continuación, la Ecuación 36 y Ecuación 37 muestran la recuperación de la inversión al implementar la energía solar en un 100% para la iluminación del edificio Rafael Arboleda.

$$\begin{aligned}
 &\text{Ecuación 36. Inversión en energía solar} \\
 &\text{Inversión (\$)} = \text{número de paneles} * \text{costo por panel} \\
 &= 804 \text{ paneles} * \$ 233.000 \text{ pesos/panel} \\
 &= \$ 187'332.000 \text{ pesos}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{Ecuación 37. Recuperación de la inversión en energía solar} \\
 &\text{Recuperación inversión (años)} = \\
 &\frac{\text{Inversión en energía solar (pesos/año)}}{\text{Ahorro costo de energía eléctrica (pesos/año)}} \\
 &= \frac{\$ 187'332.000 \text{ pesos/año}}{\$ 104'642.806,5 \text{ pesos/año}} \\
 &\cong 1,8 \text{ años}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 21, Tabla 22, Tabla 23 y Tabla 24 se resumen los cálculos realizados al suplir de energía solar al edificio Rafael Arbolea para su iluminación. Adicionalmente, en estas tablas se modelan los resultados según una variación de la capacidad equivalente instalada de entre 10% hasta 100%, lo que es beneficioso en el momento de discutir los resultados y proponer la mejor alternativa de eficiencia energética.

Tabla 21. Características para el abastecimiento con energía solar para iluminación convencional

Área requerida por panel (m ²)	Potencia pico del panel (kWh /año)	Precio por panel (pesos colombianos)	Demanda de energía por iluminación – convencional (kWh /año)
1,65	459	\$ 233.000	369.006,3

Fuente: autores

Tabla 22. Análisis para el abastecimiento con energía solar para iluminación convencional

Capacidad instalada de energía solar (%)	Capacidad instalada de energía solar (kWh /año)	Número de paneles requeridos	Área total requerida (m ²) ⁹
10%	36.900,6	80	133
20%	73.801,3	161	265
30%	110.701,9	241	398
40%	147.602,5	322	531
50%	184.503,2	402	663
60%	221.403,8	482	796
70%	258.304,4	563	929
80%	295.205,0	643	1.061
90%	332.105,7	724	1.194
100%	369.006,3	804	1.327

Fuente: autores

⁹ Según los datos en el Anexo XII. Áreas del edificio Rafael Arbolea, el área máxima del piso 9 es de 1381 m² de los cuales el 70% (966,7 m²) están disponibles para instalar los paneles solares.

Tabla 23. Análisis de reducción de emisiones de CO₂ por el abastecimiento con energía solar para iluminación convencional

Demanda de energía eléctrica (kWh /año)	Capacidad instalada de energía solar (%)	Capacidad instalada de energía solar (kWh /año)	Emisiones actuales (t CO ₂ /año)	Emisiones evitadas con energía solar (t CO ₂ /año)	Reducción (t CO ₂ /año)
369.006,3	10%	36.900,6	73,8	7,4	10%
	20%	73.801,3		14,8	20%
	30%	110.701,9		22,1	30%
	40%	147.602,5		29,5	40%
	50%	184.503,2		36,9	50%
	60%	221.403,8		44,3	60%
	70%	258.304,4		51,7	70%
	80%	295.205,0		59,0	80%
	90%	332.105,7		66,4	90%
	100%	369.006,3		73,8	100%

Fuente: autores

Tabla 24. Análisis de costos para el abastecimiento con energía solar para iluminación convencional

Costo de energía eléctrica convencional (año)	Capacidad instalada de energía solar (%)	Capacidad instalada de energía solar (kWh /año)	Costo de energía eléctrica del SIN (año)	Ahorro en energía eléctrica (año)	Precio de paneles solares	Recuperación de la inversión (años)
\$ 104'642.806,5	10%	36.900,6	\$ 94'178.527	\$ 10'464.281	\$ 18'640.000	1,8
	20%	73.801,3	\$ 83'714.246	\$ 20'928.562	\$ 37'513.000	1,8
	30%	110.701,9	\$ 73'249.965	\$ 31'392.842	\$ 56'153.000	1,8
	40%	147.602,5	\$ 62'785.685	\$ 41'857.123	\$ 75'026.000	1,8
	50%	184.503,2	\$ 52'321.404	\$ 52'321.404	\$ 93'666.000	1,8
	60%	221.403,8	\$ 41'857.123	\$ 62'785.685	\$ 112'306.000	1,8
	70%	258.304,4	\$ 31'392.842	\$ 73'249.965	\$ 131'179.000	1,8
	80%	295.205,0	\$ 20'928.562	\$ 83'714.246	\$ 149'819.000	1,8
	90%	332.105,7	\$ 10'464.281	\$ 94'178.527	\$ 168'692.000	1,8
	100%	369.006,3	\$ 0	\$ 104'642.807	\$ 187'332.000	1,8

Fuente: autores

Teniendo en cuenta que al implementar la alternativa 1 – iluminación con dispositivos LED, la demanda de energía que debería suplir el sistema solar para la iluminación del edificio Rafael Arboleda es mucho menor, se realizó el mismo análisis anteriormente mostrado frente a la implementación de este tipo de luminarias. Ver Tabla 25 a Tabla 28.

Tabla 25. Características para el abastecimiento con energía solar para iluminación LED

Área requerida por panel (m ²)	Potencia pico del panel (kWh /año)	Precio por panel (pesos colombianos)	Demanda de energía por iluminación LED (kWh /año)
1,65	459	\$ 233.000	190.620

Fuente: autores

Tabla 26. Análisis para el abastecimiento con energía solar para iluminación LED

Capacidad instalada de energía solar (%)	Capacidad instalada de energía solar (kWh /año)	Número de paneles requeridos	Área total requerida (m ²) ¹⁰
10%	19.062	42	69
20%	38.124	83	137
30%	57.186	125	206
40%	76.248	166	274
50%	95.310	208	343
60%	114.372	249	411
70%	133.434	291	480
80%	152.496	332	548
90%	171.558	374	617
100%	190.620	415	685

Fuente: autores

¹⁰ Según los datos en el Anexo XII. Áreas del edificio Rafael Arboleda, el área máxima del piso 9 es de 1381 m² de los cuales el 70% (966,7 m²) están disponibles para instalar los paneles solares.

Tabla 27. Análisis de reducción de emisiones de CO₂ por el abastecimiento con energía solar para iluminación LED

Demanda de energía eléctrica (kWh /año)	Capacidad instalada de energía solar (%)	Capacidad instalada de energía solar (kWh /año)	Emisiones con tecnología LED (t CO ₂ /año)	Emisiones evitadas con energía solar (t CO ₂ /año)	Reducción (t CO ₂ /año)
190.620	10%	19.062	38,1	3,8	10%
	20%	38.124		7,6	20%
	30%	57.186		11,4	30%
	40%	76.248		15,2	40%
	50%	95.310		19,1	50%
	60%	114.372		22,9	60%
	70%	133.434		26,7	70%
	80%	152.496		30,5	80%
	90%	171.558		34,3	90%
	100%	190.620		38,1	100%

Fuente: autores

Tabla 28. Análisis de costos para el abastecimiento con energía solar para iluminación LED

Costo de energía eléctrica LED (año)	Capacidad instalada de energía solar (%)	Capacidad instalada de energía solar (kWh /año)	Costo de energía eléctrica del SIN (año)	Ahorro en energía eléctrica (año)	Precio de paneles solares	Recuperación de la inversión (años) ¹¹
\$54'056.019,6	10%	19.062	\$ 48'650.418	\$ 5'405.602	\$ 9'786.000	1,8
	20%	38.124	\$ 43'244.816	\$ 10'811.203,9	\$ 19'339.000	1,8
	30%	57.186	\$ 37'839.214	\$ 16'216.805,9	\$ 29'125.000	1,8
	40%	76.248	\$ 32'433.612	\$ 21'622.407,8	\$ 38'678.000	1,8
	50%	95.310	\$ 27'028.010	\$ 27'028.009,8	\$ 48'464.000	1,8
	60%	114.372	\$ 21'622.408	\$ 32'433.611,8	\$ 58'017.000	1,8
	70%	133.434	\$ 16'216.806	\$ 37'839.213,7	\$ 67'803.000	1,8
	80%	152.496	\$ 10'811.204	\$ 43'244.815,7	\$ 77'356.000	1,8
	90%	171.558	\$ 5'405.602	\$ 48'650.417,6	\$ 87'142.000	1,8
	100%	190.620	\$ 0	\$ 54'056.019,6	\$ 96'695.000	1,8

Fuente: autores

¹¹ Para este cálculo se tuvo en cuenta la siguiente ecuación: (inversión de luminarias LED + inversión de paneles solares según el % de capacidad instalada respectivo) / ahorro económico frente a la línea base.

10.1.3 Alternativa 3. Abastecimiento de la energía eléctrica para iluminación del edificio Rafael Arboleda a partir de energía piezoeléctrica y/o EKRR

El uso de baldosas piezoeléctricas o EKRR se constituyen como una solución para la reducción de emisiones de CO₂, aunque su costo es un factor a tener en cuenta, ya que la inversión inicial es alta, su operación y mantenimiento es simple y en comparación con el sistema convencional de suministro de energía eléctrica se convierte en una opción interesante a largo plazo desde el punto de vista económico.

Para el caso del edificio Rafael Arboleda, existen limitantes que pueden afectar la viabilidad de la aplicación de baldosas piezoeléctricas o EKRR, pues debido a todos los servicios que presta actualmente, existe una alta demanda de energía. Esto se debe a que es necesario el uso de las luminarias para el desarrollo de las actividades diarias por parte del personal de las PUJ. Otro aspecto a tener en cuenta es el flujo vehicular del cual dependen estos dispositivos para funcionar y la variación de este puede afectar significativamente la generación de energía.

Este escenario puede representar una variable importante ya que de esto depende que sea necesario un gran número de baldosas piezoeléctricas o de EKRR para suplir la demanda de energía del sistema de iluminación, lo que a su vez incrementaría los costos y las adecuaciones necesarias del espacio que requiere la infraestructura de dicho sistema.

Para las estimaciones pertinentes se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- a. Servicios prestados por el parqueadero de la PUJ el cual presta servicio no solo a al personal de la universidad sino también al del hospital San Ignacio por tal razón funciona las 24 horas del día, todos los días del año, de acuerdo a la oficina de parqueaderos de la PUJ. Para efectos de los cálculos se toma como base el flujo semanal promedio (Coordinación de parqueaderos, 2016). Ver Anexo XV. Flujo vehicular entrada norte del parqueadero de la PUJ.
- b. La capacidad total del parqueadero y las horas de mayor flujo vehicular que permiten identificar las horas en las cuales se puede lograr la mayor producción de energía por día.
- c. La potencia generada por el dispositivo piezoeléctrico depende del número de dispositivos instalados, del número de vehículos que circulen por la vía en una hora, el peso de los vehículos y la distancia de la vía donde se instalaran los dispositivos.
- d. La potencia de las baldosas piezoeléctricas estará dada de acuerdo a la energía producida por las ruedas de cada vehículo, y la capacidad de generación del dispositivo, de acuerdo a la información suministrada por (Treevolt). Una baldosa de 33 x 22 cm cuenta con 16 nodos, en cada nodo se pueden instalar 2 cristales piezoeléctricos de 1x1 cm x 2 mm de espesor y cada cristal puede generar hasta 0,5 J de energía. Esto quiere decir que cada baldosa podría generar hasta 16 J de energía. Para los cálculos se tendrá en cuenta la entrada y salida de

los vehículos y el número de ruedas (4 por cada vehículo). Anexo XVIII. Especificaciones baldosas piezoeléctricas.

- e. La entrada vehicular norte es la que presenta mayor flujo vehicular durante todo el día, y por su cercanía al edificio Rafael arboleda se seleccionó para poner allí los dispositivos piezoeléctricos. El área escogida para esto es donde se ubican las talanqueras la cual cuenta con un área de 32,89 m², donde se instalarían las baldosas piezoeléctricas de (33 x 22 cm). Ver Anexo XVI. Fotografías de la entrada vehicular norte del parqueadero privado de la PUJ y Anexo XVII. Diseño de la entrada vehicular norte del parqueadero privado de la PUJ.
- f. La potencia por vehículo de las EKRR será de 274 W (Jaiswal, Pundir, Saxena, & Gupta, 2015), (Tehseen, y otros, Generating Electricity through Harnessing of Kinetic, 2013). El cálculo de la energía producida por las rampas está dado por la Ecuación 38. Ver Anexo XIX. Especificaciones EKRR.

10.1.3.1 Baldosas piezoeléctricas

A continuación, se ejemplifica mediante ecuaciones, la proyección al sustituir el sistema de abastecimiento eléctrico para iluminación convencional del edificio mediante el uso de baldosas piezoeléctricas en un 100%. Ver Ilustración 22.

Ilustración 22. Baldosa piezoeléctrica



Fuente: (Treevolt, 2014)

Debido a que las unidades energéticas de las baldosas se utilizan en (J), es conveniente convertir la potencia generada por una (1) baldosa. Por efectos de decimales, se trabajará con Wh. Ver Ecuación 38.

Ecuación 38. Energía generada por una (1) baldosa piezoeléctrica en Wh

$$\begin{aligned}
 \text{energía generada} &= \frac{16 J}{1 \text{ baldosa}} * \frac{1 Wh}{3599.9 J} \\
 &= 0,0044 \frac{Wh}{\text{baldosa}}
 \end{aligned}$$

Ya que se está trabajando con el flujo vehicular por hora se puede calcular la energía eléctrica producida durante la semana. Anexo XV. Flujo vehicular entrada norte del parqueadero de la PUJ y Ecuación 39.

Ecuación 39. Energía generada por una (1) baldosa piezoeléctrica en 1 hora

energía generada

*= número de ruedas por carro * flujo vehicular (hr) * energía de 1 baldosa*

Donde,

Número de ruedas por carro: 4

Energía de 1 baldosa: 0,0044 Wh

Teniendo en cuenta que el flujo vehicular varía para cada hora del día, la Ecuación 39 fue utilizada para calcular la energía generada para cada hora. Ver Tabla 29.

Tabla 29. Energía generada por una (1) baldosa piezoeléctrica (Wh)

Hora	Energía Generada Lunes (Wh)	Energía Generada Martes (Wh)	Energía Generada Miércoles (Wh)	Energía Generada Jueves (Wh)	Energía Generada Viernes (Wh)	Energía Generada Sábado (Wh)	Energía Generada Domingo (Wh)
12:00 - 01:00 am.	0,264	0,2464	0,3344	0,1936	0,2816	0,0352	0,0176
01:00 - 02:00 am.	0,2288	0,1584	0,1936	0,1232	0,1936	0,0176	0
02:00 - 03:00 am.	0,1584	0,1056	0,1936	0,176	0,1408	0,0528	0
03:00 - 04:00 am.	0,2112	0,1232	0,176	0,1408	0,264	0,0352	0,0176
04:00 - 05:00 am.	0,176	0,1584	0,2112	0,2288	0,2992	0,0352	0,0528
05:00 - 06:00 am.	0,352	0,3168	0,6336	0,6688	0,5456	0,2288	0,0176
06:00 - 07:00 am.	5,3856	5,4912	5,3504	5,4736	5,4384	3,9776	0,0352
07:00 - 08:00 am.	4,9808	4,8928	4,7168	4,7872	4,8576	4,312	0,5632
08:00 - 09:00 am.	3,3968	3,3264	3,2912	3,5552	3,3616	2,4112	0,4576
09:00 - 10:00 am.	3,6432	3,5728	3,3088	3,4496	3,3264	1,9536	0,3344
10:00 - 11:00 am.	3,4672	3,5552	3,4144	3,6608	3,3968	2,0944	0,44
11:00 - 12:00 am.	2,9744	2,7632	3,0624	2,8512	2,7984	2,4464	0,3872
12:00 - 01:00 pm.	3,432	3,5552	3,3264	3,6432	3,4848	2,0592	0,8096
01:00 - 02:00 pm.	2,4112	2,4816	2,4464	2,5168	2,376	1,7248	0,4048
02:00 - 03:00 pm.	2,6048	2,6928	2,6752	2,64	2,4816	1,0912	0,1584
03:00 - 04:00 pm.	2,7632	2,6224	2,6928	2,5696	2,4464	0,7568	0,088
04:00 - 05:00 pm.	3,5552	3,7488	3,608	3,8016	3,6784	0,7216	0,0352
05:00 - 06:00 pm.	5,2624	4,8224	4,7168	4,7344	4,5936	0,44	0,0528
06:00 - 07:00 pm.	2,64	3,1504	3,5728	3,2208	2,9744	0,352	0
07:00 - 08:00 pm.	3,0272	3,256	3,432	3,1152	3,3968	0,2288	0
08:00 - 09:00 pm.	1,2496	0,9328	1,3376	1,3904	1,232	0,0352	0
09:00 - 10:00 pm.	1,1088	0,6688	0,7744	0,968	1,056	0,0528	0,0352
10:00 - 11:00 pm.	0,7392	0,4752	0,8976	0,7216	0,6864	0,0352	0,0704
11:00 - 12:00 pm.	0,5104	0,264	0,6688	0,6864	0,4752	0,0704	0,0352
Total	54,5424	53,3808	55,0352	55,3168	53,7856	25,168	4,0128

Fuente: autores

La energía eléctrica producida semanalmente será la sumatoria de la energía producida en cada uno de los días como se muestra en la Ecuación 40.

Ecuación 40. Energía eléctrica producida por una (1) baldosa en la semana

$$\begin{aligned} \sum \text{Energía Eléctrica diaria Producida (kWh/semana)} \\ &= 301,2 \text{ Wh} * \frac{1 \text{ kWh}}{1000 \text{ Wh}} \\ &= 0,3 \text{ kWh/semana} \end{aligned}$$

Ecuación 41. Energía eléctrica producida por una (1) baldosa al mes

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Energía eléctrica producida (kWh)}}{\text{semana}} * \frac{4 \text{ semanas}}{1 \text{ mes}} \\ &= 0,3 \frac{\text{kWh}}{\text{semana}} * \frac{4 \text{ semanas}}{1 \text{ mes}} \\ &= 1,2 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}} \end{aligned}$$

Tomado como base que el mayor flujo vehicular se presenta durante el periodo académico, para efectos de cálculo se tomaran 9 meses como el periodo de un año.

Ecuación 42. Energía eléctrica producida por una (1) baldosa al año

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Energía Eléctrica Producida (kWh)}}{\text{mes}} * \frac{9 \text{ meses}}{1 \text{ año}} \\ &= 1,2 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}} * \frac{9 \text{ meses}}{1 \text{ año}} \\ &= 10,8 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \end{aligned}$$

Conociendo estos datos podemos calcular el número de baldosas necesarias para suplir la demanda total del edificio Rafael Arboleda de la PUJ. Ver Ecuación 43.

Ecuación 43. Número de baldosas requeridas al 100%

$$\begin{aligned} \text{Número de baldosas} &= \frac{\text{demanda de energía eléctrica convencional } \left(\frac{\text{kWh}}{\text{año}}\right)}{\text{energía producida por 1 baldosa } \frac{\text{kWh}}{\text{año}}} \\ &= \frac{369.006,3 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}}{10,8 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}} \\ &= 34.167 \text{ baldosas} \end{aligned}$$

Ecuación 44. Área total requerida para baldosas piezoeléctricas

$$= 34.167 \text{ baldosas} * 0,0726 \frac{\text{m}^2}{\text{baldosa}} = 2.481 \text{ m}^2$$

Al igual que para la instalación del sistema solar, es necesario contar con una batería de respaldo. Teniendo en cuenta que los valores energéticos con los que se realizan los

cálculos son los mismos que en la alternativa 2, se propone utilizar la misma batería de respaldo BAE Secura PVS Block Solar Bornay con capacidad nominal de C₁₂₀ 1.8 V/C Ah de 361, modelo 6V 5PVS 350.

10.1.3.2 Emisiones evitadas de CO₂ con baldosas piezoeléctricas

Con la utilización de las baldosas piezoeléctricas para iluminación se evidencia un ahorro energético frente a la demanda de energía eléctrica. Ver Ecuación 45.

$$\begin{aligned}
 & \text{Ecuación 45. Ahorro energético con baldosas piezoeléctricas al año} \\
 & = \text{Demanda total convencional} \frac{\text{kWh}}{\text{año}} - \text{Demanda total de la red con bald.} \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \\
 & = 369.006,3 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} - 0 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \\
 & = 369.006,3 \text{ kWh/año (100 \% de reducción)}
 \end{aligned}$$

Este ahorro energético conlleva a su vez una reducción de emisiones de CO₂, las cuales se conocen como emisiones evitadas.

Al igual que en la alternativa 1 y 2, para realizar el cálculo de emisiones evitadas de CO₂ por el uso de baldosas piezoeléctricas en la entrada vehicular norte de la PUJ se tuvo en cuenta la metodología de la UNFCCC (2007) mencionada en el numeral 6.2 y se utilizó un factor de emisión 0,2 t CO₂/ MWh - kgCO₂/ kWh (UPME, 2013).

A continuación, la Ecuación 46 muestra el cálculo de emisiones evitadas de CO₂ por capacidad instalada de baldosas piezoeléctricas en un 100% en el edificio:

Ecuación 46. Cálculo de emisiones evitadas de CO₂ por baldosas piezoeléctricas en el edificio Rafael Arboleda

$$\begin{aligned}
 & \text{Emisiones evitadas} \left(\frac{\text{t CO}_2}{\text{año}} \right) = \text{capacidad instalada} * \text{factor de emisión} \\
 & = 369.006,3 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ MWh}}{1.000 \text{ kWh}} * 0,2 \frac{\text{t CO}_2}{\text{MWh}} \\
 & = 73,8 \text{ t CO}_2/\text{año (100 \% de emisiones evitadas)}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 30 se muestran los resultados obtenidos por iluminación eléctrica con baldosas piezoeléctricas y sus emisiones evitadas de CO₂ correspondientes.

Tabla 30. Emisiones evitadas de CO₂ por iluminación con baldosas piezoeléctricas

Ahorro energético (kWh / año)	Factor de emisión (kg. de CO ₂ / MWh)	Emisiones evitadas de CO ₂ (t CO ₂ / año)
369.006,3	0,2	73,8

Fuente: autores

10.1.3.3 Costo teórico de iluminación con baldosas piezoeléctricas

Ecuación 47. Costo teórico total de la iluminación con baldosas piezoeléctricas al año

$$\begin{aligned}
 &= \text{costo iluminación baldosas} \frac{kWh}{\text{año}} * \text{costo} \frac{\$}{kWh} (\text{septiembre} - \text{diciembre}) \\
 &= 0 \frac{kWh}{\text{día}} * \frac{\$283,58 \text{ pesos}}{kWh} \\
 &= \$ 0 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

10.1.3.4 Tiempo de retorno de la inversión en baldosas piezoeléctricas

Para poder conocer el tiempo de retorno de la inversión en iluminación con baldosas piezoeléctricas, es necesario conocer el ahorro económico generado al implementarlas en el edificio Rafael Arboleda. A continuación en la Ecuación 48 se muestra el ahorro económico anual.

Ecuación 48. Ahorro económico en energía eléctrica anual con baldosas piezoeléctricas

= *Costo iluminación convencional al año*

$$\begin{aligned}
 &\quad - \text{Costo iluminación con baldosas al año} \\
 &= \$ 104'642.806,5 \frac{\text{pesos}}{\text{año}} - \$ 0 \frac{\text{pesos}}{\text{año}} \\
 &= \$ 104'642.806,5 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

Ecuación 49. Ahorro económico porcentual del costo con energía solar

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{Ahorro económico anual en energía con cambio a baldosas} \frac{\text{pesos}}{\text{año}}}{\text{Costo total de iluminación convencional al año} \frac{\text{pesos}}{\text{año}}} * 100\% \\
 &= \frac{104'642.806,5 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}}{104'642.806,5 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}} * 100\% \\
 &= 100 \% \text{ de reducción de costos } \$
 \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta el ahorro económico en energía eléctrica con cambio a baldosas piezoeléctricas vs. los costos de la mismas baldosas por instalar, se puede estimar el tiempo de la recuperación de la inversión. Este último costo mencionado no incluye instalación, cableado, baterías de respaldo y/o accesorios. Ya que no fue posible obtener una respuesta por parte de Treevolt sobre el precio de los dispositivos piezoeléctricos; se tomó un precio por baldosa de US \$30,39 (\$95.993,5¹²) de acuerdo a los costos dados por diferentes autores sobre este tema. (Debayan & Anupam, 2015), (Garland, 2013).

¹² Valor calculado con la Tasa de cambio representativa del mercado (TRM) del 17 de marzo de 2016 del Banco de la República (US \$ 3.158,72) (Banco de la Republica, 2016).

A continuación, la Ecuación 50 y Ecuación 51 muestran la recuperación de la inversión al implementar las baldosas piezoeléctricas en un 100% para la iluminación del edificio Rafael Arboleda.

$$\begin{aligned}
 &\text{Ecuación 50. Inversión en baldosas piezoeléctricas} \\
 &Inversión (\$) = \text{número de baldosas} * \text{costo por baldosa} \\
 &= 34.167 * 95.993,5 \\
 &= \$ 3.279'809.915 \text{ pesos}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{Ecuación 51. Recuperación de la inversión baldosas piezoeléctricas} \\
 &Recuperación inversión (años) =
 \end{aligned}$$

$$\frac{Inversión \text{ en baldosas piezoelctricas (pesos/año)}}{Ahorro \text{ costo de energía eléctrica (pesos/año)}}$$

$$\frac{\$ 3.279'809.915 \text{ pesos/año}}{\$ 104'642.806,5 \text{ pesos/año}}$$

\cong 31,3 años (tiempo superior al de la vida útil de una baldosa: 30 años (Debayan & Anupam, 2015))

En la Tabla 31, Tabla 32, Tabla 33 y Tabla 34 se resumen los cálculos realizados al suplir de energía piezoeléctrica al edificio Rafael Arbolea para su iluminación. Adicionalmente, en estas tablas se modelan los resultados según una variación de la capacidad equivalente instalada de entre 10% hasta 100%, lo que es beneficioso en el momento de discutir los resultados y proponer la mejor alternativa de eficiencia energética.

Tabla 31. Características para el abastecimiento con baldosas piezoeléctricas para iluminación convencional

Área requerida por baldosa piezoeléctrica (m ²)	Potencia por baldosa piezoeléctrica (kWh /año)	Precio por baldosa piezoeléctrica (pesos colombianos)	Demanda de energía por iluminación – convencional (kWh /año)
0.0726	21,6	\$ 95.993,5	369.006,3

Fuente: autores

Tabla 32. Análisis para el abastecimiento con baldosas piezoeléctricas para iluminación convencional

Capacidad instalada de baldosas piezoeléctricas (%)	Capacidad instalada de baldosas piezoeléctricas (kWh /año)	Número de baldosas piezoeléctricas	Área total requerida (m ²) ¹³
10%	36.900,6	3.417	248
20%	73.801,3	6.833	496
30%	110.701,9	10.250	744
40%	147.602,5	13.667	992
50%	184.503,2	17.084	1.240
60%	221.403,8	20.500	1.488
70%	258.304,4	23.917	1.736
80%	295.205,0	27.334	1.984
90%	332.105,7	30.750	2.232
100%	369.006,3	34.167	2.481

Fuente: autores

¹³ El área escogida para instalar las baldosas piezoeléctricas es en la sección de las talanqueras. Se cuenta con un área de 32,89 m² y se deben instalar 2 baldosas a lo ancho del segmento. Ver Anexo XVII. Diseño de la entrada vehicular norte del parqueadero privado de la PUJ.

Tabla 33. Análisis de reducción de emisiones de CO₂ por el abastecimiento con baldosas piezoeléctricas para iluminación convencional

Demanda de energía eléctrica (kWh /año)	Capacidad instalada de baldosas piezoeléctricas (%)	Capacidad instalada de baldosas piezoeléctricas (kWh /año)	Emisiones actuales (t CO ₂ /año)	Emisiones evitadas con baldosas piezoeléctricas (t CO ₂ /año)	Reducción (t CO ₂ /año)
369.006,3	10%	36.900,6	73,8	7,4	10%
	20%	73.801,3		14,8	20%
	30%	110.701,9		22,1	30%
	40%	147.602,5		29,5	40%
	50%	184.503,2		36,9	50%
	60%	221.403,8		44,3	60%
	70%	258.304,4		51,7	70%
	80%	295.205,0		59,0	80%
	90%	332.105,7		66,4	90%
	100%	369.006,3		73,8	100%

Fuente: autores

Tabla 34. Análisis de costos para el abastecimiento con baldosas piezoeléctricas para iluminación convencional

Costo de energía eléctrica convencional (año)	Capacidad instalada de baldosas piezoeléctricas (%)	Capacidad instalada de baldosas piezoeléctricas (kWh /año)	Costo de energía eléctrica del SIN (año)	Ahorro en energía eléctrica (año)	Precio de baldosas piezoeléctricas	Recuperación de la inversión (años)
\$ 104'642.806,5	10%	36.900,6	\$ 94'178.527	\$ 10'464.281	\$ 327'980.991,5	31,3
	20%	73.801,3	\$ 83'714.246	\$ 20'928.562	\$ 655'961.983	31,3
	30%	110.701,9	\$ 73'249.965	\$ 31'392.842	\$ 983'942.974,5	31,3
	40%	147.602,5	\$ 62'785.685	\$ 41'857.123	\$ 1.311'923.966	31,3
	50%	184.503,2	\$ 52'321.404	\$ 52'321.404	\$ 1.639'904.957,5	31,3
	60%	221.403,8	\$ 41'857.123	\$ 62'785.685	\$ 1.967'885.949	31,3
	70%	258.304,4	\$ 31'392.842	\$ 73'249.965	\$ 2.295'866.940,5	31,3
	80%	295.205,0	\$ 20'928.562	\$ 83'714.246	\$ 2.623'847.932	31,3
	90%	332.105,7	\$ 10'464.281	\$ 94'178.527	\$ 2.951'828.923,5	13,6
	100%	369.006,3	\$ 0	\$ 104'642.806,5	\$ 3.279'809.915	31,3

Fuente: autores

Teniendo en cuenta que al implementar la alternativa 1 – iluminación con dispositivos LED, la demanda de energía que debería suplir el sistema piezoeléctrico para la iluminación del edificio Rafael Arboleda es mucho menor, se realizó el mismo análisis anteriormente mostrado frente a la implementación de este tipo de tecnologías. Ver Tabla 35, Tabla 36, Tabla 37 y Tabla 38.

Tabla 35. Características para el abastecimiento con baldosas piezoeléctricas para iluminación LED

Área requerida por baldosa piezoeléctrica (m ²)	Potencia por baldosa piezoeléctrica (kWh /año)	Precio por baldosa piezoeléctrica (pesos colombianos)	Demanda de energía por iluminación LED (kWh /año)
0.0726	21,6	\$ 95.993,5	190.620

Fuente: autores

Tabla 36. Análisis para el abastecimiento con baldosas piezoeléctricas para iluminación LED

Capacidad instalada de baldosas piezoeléctricas (%)	Capacidad instalada de baldosas piezoeléctricas (kWh /año)	Número de baldosas piezoeléctricas	Área total requerida (m ²) ¹⁴
10%	19.062	1.765	128
20%	38.124	3.530	256
30%	57.186	5.295	384
40%	76.248	7.060	513
50%	95.310	8.825	641
60%	114.372	10.590	769
70%	133.434	12.355	897
80%	152.496	14.120	1.025
90%	171.558	15.885	1.153
100%	190.620	17.650	1.281

Fuente: autores

¹⁴ El área escogida para instalar las baldosas piezoeléctricas es en la sección de las talanqueras. Se cuenta con un área de 32,89 m². Ver Anexo XVII. Diseño de la entrada vehicular norte del parqueadero privado de la PUJ.

Tabla 37. Análisis de reducción de emisiones de CO₂ por el abastecimiento con baldosas piezoeléctricas para iluminación LED

Demanda de energía eléctrica (kWh /año)	Capacidad instalada de baldosas piezoeléctricas (%)	Capacidad instalada de baldosas piezoeléctricas (kWh /año)	Emisiones actuales (t CO ₂ /año)	Emisiones evitadas con baldosas piezoeléctricas (t CO ₂ /año)	Reducción (t CO ₂ /año)
190.620	10%	19.062	38,1	3,8	10%
	20%	38.124		7,6	20%
	30%	57.186		11,4	30%
	40%	76.248		15,2	40%
	50%	95.310		19,1	50%
	60%	114.372		22,9	60%
	70%	133.434		26,7	70%
	80%	152.496		30,5	80%
	90%	171.558		34,3	90%
	100%	190.620		38,1	100%

Fuente: autores

Tabla 38. Análisis de costos para el abastecimiento con baldosas piezoeléctricas para iluminación LED

Costo de energía eléctrica LED (año)	Capacidad instalada de baldosas piezoeléctricas (%)	Capacidad instalada de baldosas piezoeléctricas (kWh /año)	Costo de energía eléctrica del SIN (año)	Ahorro en energía eléctrica (año)	Precio de baldosas piezoeléctricas	Recuperación de la inversión (años)
\$54'056.019,6	10%	19.062	\$ 48'650.418	\$ 5'405.602	\$ 169.428.527,5	31,3
	20%	38.124	\$ 43'244.816	\$ 10'811.203,9	\$ 338.857.055	31,3
	30%	57.186	\$ 37'839.214	\$ 16'216.805,9	\$ 508.285.582,5	31,3
	40%	76.248	\$ 32'433.612	\$ 21'622.407,8	\$ 677.714.110	31,3
	50%	95.310	\$ 27'028.010	\$ 27'028.009,8	\$ 847.142.637,5	31,3
	60%	114.372	\$ 21'622.408	\$ 32'433.611,8	\$ 1'016.571.165	31,3
	70%	133.434	\$ 16'216.806	\$ 37'839.213,7	\$ 1'185.999.692,5	31,3
	80%	152.496	\$ 10'811.204	\$ 43'244.815,7	\$ 1'355.428.220	31,3
	90%	171.558	\$ 5'405.602	\$ 48'650.417,6	\$ 1'524.856.747,5	31,3
	100%	190.620	\$ 0	\$ 54'056.019,6	\$ 1'694.285.275	31,3

Fuente: autores

10.1.3.5 EKRR

Al igual que para las baldosas piezoeléctricas, a continuación, se ejemplifica mediante ecuaciones, la proyección al sustituir el sistema de abastecimiento eléctrico para iluminación convencional del edificio mediante el uso de EKRR en un 100%. Ver Ilustración 23.

Ilustración 23. EKRR



Fuente: (Tehseen, y otros, Generating Electricity through Harnessing of Kinetic, 2013)

Ya que se está trabajando con el flujo vehicular por hora se puede calcular la energía eléctrica producida durante la semana, teniendo en cuenta que una (1) EKRR produce 274 W por vehículo. Ver Anexo XV. Flujo vehicular entrada norte del parqueadero de la PUJ y Ver Ecuación 52.

Ecuación 52. Energía generada por una (1) EKRR en 1 hora

$$\text{energía generada} = \frac{\text{No. de vehiculos}}{\text{hora}} * \text{energía de 1 EKRR} * \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}}$$

Donde,

Energía de 1 EKRR: 274 W

Teniendo en cuenta que el flujo vehicular varía para cada hora del día, la Ecuación 52 fue utilizada para calcular la energía generada para cada hora. Tabla 39.

Tabla 39. Energía generada por una (1) EKRR (kWh)

Hora	Energía Generada Lunes (kWh)	Energía Generada Martes (kWh)	Energía Generada Miércoles (kWh)	Energía Generada Jueves (kWh)	Energía Generada Viernes (kWh)	Energía Generada Sábado (kWh)	Energía Generada Domingo (kWh)
12:00 - 01:00 am.	4,11	3,836	5,206	3,014	4,384	0,548	0,274
01:00 - 02:00 am.	3,562	2,466	3,014	1,918	3,014	0,274	0
02:00 - 03:00 am.	2,466	1,644	3,014	2,74	2,192	0,822	0
03:00 - 04:00 am.	3,288	1,918	2,74	2,192	4,11	0,548	0,274
04:00 - 05:00 am.	2,74	2,466	3,288	3,562	4,658	0,548	0,822
05:00 - 06:00 am.	5,48	4,932	9,864	10,412	8,494	3,562	0,274
06:00 - 07:00 am.	83,844	85,488	83,296	85,214	84,666	61,924	0,548
07:00 - 08:00 am.	77,542	76,172	73,432	74,528	75,624	67,13	8,768
08:00 - 09:00 am.	52,882	51,786	51,238	55,348	52,334	37,538	7,124
09:00 - 10:00 am.	56,718	55,622	51,512	53,704	51,786	30,414	5,206
10:00 - 11:00 am.	53,978	55,348	53,156	56,992	52,882	32,606	6,85
11:00 - 12:00 am.	46,306	43,018	47,676	44,388	43,566	38,086	6,028
12:00 - 01:00 pm.	53,43	55,348	51,786	56,718	54,252	32,058	12,604
01:00 - 02:00 pm.	37,538	38,634	38,086	39,182	36,99	26,852	6,302
02:00 - 03:00 pm.	40,552	41,922	41,648	41,1	38,634	16,988	2,466
03:00 - 04:00 pm.	43,018	40,826	41,922	40,004	38,086	11,782	1,37
04:00 - 05:00 pm.	55,348	58,362	56,17	59,184	57,266	11,234	0,548
05:00 - 06:00 pm.	81,926	75,076	73,432	73,706	71,514	6,85	0,822
06:00 - 07:00 pm.	41,1	49,046	55,622	50,142	46,306	5,48	0
07:00 - 08:00 pm.	47,128	50,69	53,43	48,498	52,882	3,562	0
08:00 - 09:00 pm.	19,454	14,522	20,824	21,646	19,18	0,548	0
09:00 - 10:00 pm.	17,262	10,412	12,056	15,07	16,44	0,822	0,548
10:00 - 11:00 pm.	11,508	7,398	13,974	11,234	10,686	0,548	1,096
11:00 - 12:00 pm.	7,946	4,11	10,412	10,686	7,398	1,096	0,548
Total	849,126	831,042	856,798	861,182	837,344	391,82	62,472

Fuente: autores

La energía eléctrica producida semanalmente será la sumatoria de la energía producida en cada uno de los días como se muestra en la Ecuación 52.

Ecuación 53. Energía Eléctrica Producida por una (1) EKRR a la semana (kWh)

$$\sum \text{Energía Eléctrica diaria Producida (kWh/semana)} \\ = 4.689,8 \text{ kWh}$$

Ecuación 54. Energía Eléctrica Producida por una (1) EKRR al mes (kWh /mes)

$$= \frac{\text{Energía eléctrica producida (kWh)}}{\text{semana}} * \frac{4 \text{ semanas}}{1 \text{ mes}} \\ = \frac{4.689,8 \text{ kWh}}{\text{semana}} * \frac{4 \text{ semanas}}{1 \text{ mes}} \\ = 18.759,2 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}}$$

Ya que el mayor flujo vehicular se presenta durante el periodo académico, para efectos de los cálculos se tomaran nueve meses.

Ecuación 55. Energía Eléctrica Producida por una (1) EKRR al año (kWh /año)

$$= \frac{\text{Energía Eléctrica Producida (kWh)}}{\text{mes}} * \frac{9 \text{ meses}}{1 \text{ año}} \\ = \frac{18.759,2 \text{ kWh}}{\text{mes}} * \frac{9 \text{ meses}}{1 \text{ año}} \\ = 168.832,8 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

Conociendo estos datos podemos calcular el número de EKRR necesarias para suplir la demanda total del edificio Rafael Arboleda de la PUJ.

Ecuación 53. Número de EKRR requeridas al 100%

$$\text{Número de EKRR} = \frac{\text{demanda de energía eléctrica convencional } \left(\frac{\text{kWh}}{\text{año}}\right)}{\text{energía producida por 1 EKRR } \frac{\text{kWh}}{\text{año}}} \\ = \frac{369.006,3 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}}{168.832,8 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}} \\ = 2,2 \text{ EKRR} \cong 3 \text{ EKRR}$$

Ecuación 54. Área total requerida para EKRR

$$= 3 \text{ EKRR} * 6 \frac{\text{m}^2}{\text{EKRR}} = 18 \text{ m}^2$$

Al igual que para la instalación del sistema solar, es necesario contar con una batería de respaldo. Teniendo en cuenta que los valores energéticos con los que se realizan los cálculos son los mismos que en la alternativa 2, se propone utilizar la misma batería de respaldo BAE

Secura PVS Block Solar Bornay con capacidad nominal de C₁₂₀ 1.8 V/C Ah de 361, modelo 6V 5PVS 350.

10.1.3.6 Emisiones evitadas de CO₂ con EKRR

Con la utilización de las EKRR para iluminación se evidencia un ahorro energético frente a la demanda de energía eléctrica. Ver Ecuación 55.

$$\begin{aligned}
 & \text{Ecuación 55. Ahorro energético con EKRR (kWh /año)} \\
 & = \text{Demanda total convencional} \frac{\text{kWh}}{\text{año}} - \text{Demanda total de la red EKRR} \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \\
 & = 369.006,3 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} - 0 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \\
 & = 369.006,3 \text{ kWh/año (100 \% de reducción)}
 \end{aligned}$$

Este ahorro energético conlleva a su vez una reducción de emisiones de CO₂, las cuales se conocen como emisiones evitadas.

Al igual que en la alternativa 1 y 2, para realizar el cálculo de emisiones evitadas de CO₂ por uso de las EKRR en la entrada vehicular norte de la PUJ se tuvo en cuenta la metodología de la UNFCCC (2007) mencionada en el numeral 6.2 y se utilizó un factor de emisión 0,2 t CO₂/MWh - kgCO₂/ kWh (UPME, 2013).

A continuación, la Ecuación 56 muestra el cálculo de emisiones evitadas de CO₂ por capacidad instalada de EKRR en un 100% en el edificio:

Ecuación 56. Cálculo de emisiones evitadas de CO₂ por EKRR en el edificio Rafael Arboleda

$$\begin{aligned}
 & \text{Emisiones evitadas} \left(\frac{\text{t CO}_2}{\text{año}} \right) = \text{capacidad instalada} * \text{factor de emisión} \\
 & = 369.006,3 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ MWh}}{1.000 \text{ kWh}} * 0,2 \frac{\text{t CO}_2}{\text{MWh}} \\
 & = 73,8 \text{ t CO}_2/\text{año (100 \% de emisiones evitadas)}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 40, se muestran los resultados obtenidos por iluminación eléctrica con EKRR y sus emisiones evitadas de CO₂ correspondientes.

Tabla 40. Emisiones evitadas de CO₂ por iluminación con EKRR

Ahorro energético (kWh / año)	Factor de emisión (kg. de CO ₂ / MWh)	Emisiones evitadas de CO ₂ (t CO ₂ / año)
369.006,3	0,2	73,8

Fuente: autores

10.1.3.7 Costo teórico de iluminación con EKRR

Ecuación 57. Costo teórico total de la iluminación con baldosas EKRR al año

$$\begin{aligned}
 &= \text{costo iluminación EKRR} \frac{kWh}{\text{año}} * \text{costo} \frac{\$}{kWh} \text{ (septiembre – diciembre)} \\
 &= 0 \frac{kWh}{\text{día}} * \frac{\$283,58 \text{ pesos}}{kWh} \\
 &= \$ 0 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

10.1.3.8 Tiempo de retorno de la inversión en EKRR

Para poder conocer el tiempo de retorno de la inversión en iluminación con EKRR, es necesario conocer el ahorro económico generado al implementarlas en el edificio Rafael Arboleda. A continuación en la Ecuación 58 se muestra el ahorro económico anual.

Ecuación 58. Ahorro económico en energía eléctrica anual con EKRR

$$\begin{aligned}
 &= \text{Costo iluminación convencional al año} - \text{Costo iluminación con EKRR al año} \\
 &= \$ 104'642.806,5 \frac{\text{pesos}}{\text{año}} - \$ 0 \frac{\text{pesos}}{\text{año}} \\
 &= 104'642.806,5 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

Ecuación 59. Ahorro económico porcentual del costo con uso de EKRR

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{Ahorro económico anual en energía con cambio a EKRR} \frac{\text{pesos}}{\text{año}}}{\text{Costo total de iluminación convencional al año} \frac{\text{pesos}}{\text{año}}} * 100\% \\
 &= \frac{104'642.806,5 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}}{104'642.806,5 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}} * 100\% \\
 &= 100 \% \text{ de reducción de costos } \$
 \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta el ahorro económico en energía eléctrica con EKRR vs. los costos de las mismas EKRR por instalar, se puede estimar el tiempo de la recuperación de la inversión. Este último costo mencionado no incluye instalación, cableado, baterías de respaldo y/o accesorios.

Los costos de las EKRR varían dependiendo de la necesidad de generación del dispositivo y su tamaño y pueden ir desde las £15.000 hasta las £ 55.000 (\$66'698.727,30 - \$ 244'562.000,10¹⁵). Estos costos varían de acuerdo a las especificaciones de cada EKRR, en función a su tamaño y capacidad de generación de energía. Según ha manifestado el creador de las EKRR en diferentes entrevistas (The Naked Scientists, University of Cambridge, 2006), (The Guardian, 2009).

¹⁵ Valor calculado con la Tasa de cambio representativa del mercado (TRM) del 17 de marzo de 2016 del Banco de la República (GBP \$ 4.446,58) (Banco de la República, 2016).

A continuación, la Ecuación 61 se muestra la recuperación de la inversión al implementar las EKRR en un 100% para la iluminación del edificio Rafael Arboleda. Para efecto del cálculo se toma un costo de una EKRR de £ 20.000¹⁶ (\$ 88'931.636,4), partiendo del hecho que según los cálculos se necesitan 2,2 EKRR para suplir la demanda energética de la iluminación del edificio Rafael Arboleda, por lo que sería necesario usar 3 EKRR para suplir el 100% de la demanda energética.

$$\begin{aligned}
 &\text{Ecuación 60. Inversión en EKRR} \\
 &\text{Inversión (\$)} = \text{número de EKRR} * \text{costo por EKRR} \\
 &= 3 * \$ 88'931.636,4 \text{ pesos} \\
 &= \$ 266'794.909,2 \text{ pesos}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{Ecuación 61. Recuperación de la inversión EKRR} \\
 &\text{Recuperación inversión (años)} =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\frac{\text{Inversión en EKRR (pesos/año)}}{\text{Ahorro costo de energía eléctrica (pesos/año)}} \\
 &\frac{\$ 266'794.909,2 \text{ pesos/año}}{\$ 104'642.806,5 \text{ pesos/año}} \\
 &\cong 2,5 \text{ años}
 \end{aligned}$$

A continuación, en la Tabla 41, Tabla 42, Tabla 43 y Tabla 44 se resumen los cálculos realizados para la implementación de las EKRR. Adicionalmente, en estas tablas se modelan los resultados según una variación de la capacidad equivalente instalada de entre 10% hasta 100%, lo que es beneficioso en el momento de discutir los resultados y proponer la mejor alternativa de eficiencia energética.

Tabla 41. Características para el abastecimiento con EKRR para iluminación convencional

Área requerida por EKRR (m ²)	Potencia EKRR (kWh /año)	Precio por EKRR (Pesos Colombianos)	Demanda de energía por iluminación – convencional (kWh /año)
6	168.832,8	\$ 88'931.636,4	369.006,3

Fuente: autores

Tabla 42. Análisis para el abastecimiento con EKRR para iluminación convencional

Capacidad instalada de EKRR (%)	Capacidad instalada de EKRR (kWh /año)	Número de EKRR requeridos	Área total requerida (m ²) ¹⁷
10%	36.900,6	1	6
20%	73.801,3	1	6
30%	110.701,9	1	6
40%	147.602,5	1	6
50%	184.503,2	2	12

¹⁶ Se tomó este valor correspondiente a una EKRR adecuada para las características de la entrada norte al parqueadero de la PUJ Anexo XVII. Diseño de la entrada vehicular norte del parqueadero privado de la PUJ.

¹⁷ El área escogida para instalar las EKRR es en la sección de las talanqueras. Se cuenta con un área de 32,89 m² y se deben instalar 3 EKRR a lo ancho del segmento. Ver Anexo XVII. Diseño de la entrada vehicular norte del parqueadero privado de la PUJ.

Capacidad instalada de EKRR (%)	Capacidad instalada de EKRR (kWh /año)	Número de EKRR requeridos	Área total requerida (m ²) ¹⁷
60%	221.403,8	2	12
70%	258.304,4	2	12
80%	295.205,0	2	12
90%	332.105,7	2	12
100%	369.006,3	3	18

Fuente: autores

Tabla 43. Análisis de reducción de emisiones de CO₂ por el abastecimiento con EKRR para iluminación convencional

Demanda de energía eléctrica (kWh /año)	Capacidad instalada de EKRR (%)	Capacidad instalada de EKRR (kWh /año)	Emisiones actuales (t CO ₂ /año)	Emisiones evitadas con EKRR (t CO ₂ /año) ¹⁸	Reducción (t CO ₂ /año)
369.006,3	10%	36.900,6	73,8	7,4	10%
	20%	73.801,3		14,8	20%
	30%	110.701,9		22,1	30%
	40%	147.602,5		29,5	40%
	50%	184.503,2		36,9	50%
	60%	221.403,8		44,3	60%
	70%	258.304,4		51,7	70%
	80%	295.205,0		59,0	80%
	90%	332.105,7		66,4	90%
	100%	369.006,3		73,8	100%

Fuente: autores

Tabla 44. Análisis de costos para el abastecimiento con EKRR para iluminación convencional

Costo de energía eléctrica convencional (año)	Capacidad instalada EKRR (%)	Capacidad instalada EKRR (kWh /año)	Costo de energía eléctrica del SIN (año)	Ahorro en energía eléctrica (año)	Precio de EKRR	Recuperación de la inversión (años)
\$ 104'642.806,5	10%	36.900,6	\$ 94'178.527	\$ 10'464.281	\$ 88'931.636	8,5
	20%	73.801,3	\$ 83'714.246	\$ 20'928.562	\$ 88'931.636	4,2
	30%	110.701,9	\$ 73'249.965	\$ 31'392.842	\$ 88'931.636	2,8
	40%	147.602,5	\$ 62'785.685	\$ 41'857.123	\$ 88'931.636	2,1
	50%	184.503,2	\$ 52'321.404	\$ 52'321.404	\$ 177'863.273	3,4
	60%	221.403,8	\$ 41'857.123	\$ 62'785.685	\$ 177'863.273	2,8
	70%	258.304,4	\$ 31'392.842	\$ 73'249.965	\$ 177'863.273	2,4
	80%	295.205,0	\$ 20'928.562	\$ 83'714.246	\$ 177'863.273	2,1
	90%	332.105,7	\$ 10'464.281	\$ 94'178.527	\$ 177'863.273	1,9
	100%	369.006,3	\$ 0	\$ 104'642.806,5	\$ 266'794.909	2,5

Fuente: autores

¹⁸ Para este caso, las emisiones evitadas se relacionan únicamente con la demanda de energía eléctrica para iluminación.

Teniendo en cuenta que al implementar la alternativa 1 – iluminación con dispositivos LED, la demanda de energía que debería suplir las EKRR para la iluminación del edificio Rafael Arboleda es mucho menor, se realizó el mismo análisis anteriormente mostrado frente a la implementación de este tipo de tecnología. Ver Tabla 45, Tabla 46, Tabla 47 y Tabla 48.

Tabla 45. Características para el abastecimiento con EKRR para iluminación LED

Área requerida por EKRR (m ²)	Potencia EKRR (kWh /año)	Precio por EKRR (Pesos Colombianos)	Demanda de energía por iluminación LED (kWh /año)
6	168.832,8	\$ 88'931.636,40	190.620

Fuente: autores

Tabla 46. Análisis para el abastecimiento con EKRR para iluminación LED

Capacidad instalada de EKRR (%)	Capacidad instalada de EKRR (kWh /año)	Número de EKRR requeridos	Área total requerida (m ²) ¹⁹
10%	19.062	1	6
20%	38.124	1	6
30%	57.186	1	6
40%	76.248	1	6
50%	95.310	1	6
60%	114.372	1	6
70%	133.434	1	6
80%	152.496	1	6
90%	171.558	2	12
100%	190.620	2	12

Fuente: autores

¹⁹ El área escogida para instalar las EKRR es en la sección de las talanqueras. Se cuenta con un área de 32,89 m². Ver Anexo XVII. Diseño de la entrada vehicular norte del parqueadero privado de la PUJ.

Tabla 47. Análisis de reducción de emisiones de CO₂ por el abastecimiento con EKRR para iluminación LED

Demanda de energía eléctrica (kWh /año)	Capacidad instalada EKRR (%)	Capacidad instalada de EKRR (kWh /año)	Emisiones actuales (t CO ₂ /año)	Emisiones evitadas con EKRR (t CO ₂ /año) ²⁰	Reducción (t CO ₂ /año)
190.620	10%	19.062	38,1	3,8	10%
	20%	38.124		7,6	20%
	30%	57.186		11,4	30%
	40%	76.248		15,2	40%
	50%	95.310		19,1	50%
	60%	114.372		22,9	60%
	70%	133.434		26,7	70%
	80%	152.496		30,5	80%
	90%	171.558		34,3	90%
	100%	190.620		38,1	100%

Fuente: autores

Tabla 48. Análisis de costos para el abastecimiento con EKRR para iluminación LED

Costo de energía eléctrica LED (año)	Capacidad instalada de EKRR (%)	Capacidad instalada de EKRR (kWh /año)	Costo de energía eléctrica del SIN (\$)	Ahorro en energía eléctrica (\$)	Precio de EKRR (\$)	Recuperación de la inversión (años) ²¹
\$54'056.019,6	10%	19.062	\$ 48'650.418	\$ 5'405.602	\$ 88'931.636	16,4
	20%	38.124	\$ 43'244.816	\$ 10'811.203,9	\$ 88'931.636	8,2
	30%	57.186	\$ 37'839.214	\$ 16'216.805,9	\$ 88'931.636	5,4
	40%	76.248	\$ 32'433.612	\$ 21'622.407,8	\$ 88'931.636	4,1
	50%	95.310	\$ 27'028.010	\$ 27'028.009,8	\$ 88'931.636	3,3
	60%	114.372	\$ 21'622.408	\$ 32'433.611,8	\$ 88'931.636	2,7
	70%	133.434	\$ 16'216.806	\$ 37'839.213,7	\$ 88'931.636	2,3
	80%	152.496	\$ 10'811.204	\$ 43'244.815,7	\$ 88'931.636	2,1
	90%	171.558	\$ 5'405.602	\$ 48'650.417,6	\$ 177'863.273	3,6
	100%	190.620	\$ 0	\$ 54'056.019,6	\$ 177'863.273	3,3

Fuente: autores

²⁰ Para este caso, las emisiones evitadas se relacionan únicamente con la demanda de energía eléctrica para iluminación.

²¹ Para este cálculo se tuvo en cuenta la siguiente ecuación: (inversión de luminarias LED + inversión de EKRR según el % de capacidad instalada respectivo) / ahorro económico frente a la línea base.

11. DISCUSIÓN

11.1 DISCUSIÓN DE ALTERNATIVAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Los resultados de las tabas anteriores nos permiten tener una amplia visión sobre las diferentes posibilidades de eficiencia energética. La disminución de la demanda energética y por consiguiente la disminución de emisiones de CO₂ debido a la iluminación del edificio Rafael Arboleda.

11.1.4 Discusión alternativa 1: Sustitución de luminarias por tecnología LED

Los resultados muestran que actualmente la tecnología utilizada para la iluminación del edificio Rafael Arboleda compuesta en su mayor parte por luminarias fluorescentes, no son eficientes, pues demandan un gran consumo de energía eléctrica lo que a su vez representa un costo elevado en el pago del servicio de energía. El reemplazo de las luminarias actuales por luminarias LED muestra que esta alternativa es muy viable ya que es mucho más eficiente en todos los aspectos. A continuación en la Tabla 49 se presenta un resumen comparativo de los dos sistemas de iluminación donde se ve más claramente la eficiencia de la tecnología LED.

Tabla 49. Resumen comparativo de sistemas de iluminación

Aspecto	Luminarias Actuales	Luminarias LED	Reducción
Numero de luminarias	5.263	5.263	0
Consumo luminarias (W)	103.537	53.485	50.052
Demanda Diaria (kWh /día)	1.366,69	706	660,7
Demanda mes (kWh /mes)	41.000,7	21.180	19.820
Demanda año (kWh /año)	369.006,3	190.620	178.386,3
Emisiones generadas (t CO ₂ /año)	73,8	38,1	35,7
Costo iluminación día (\$/día)	387.565,9	200.207,5	187.358,4
Costo iluminación mes (\$/mes)	11'627.978,5	6'006.222,4	5'621.756
Costo iluminación año (\$/año)	104'642.806,5	54'056.019,6	50'586.787

Fuente: autores

Al cambiar al sistema de iluminación LED podemos apreciar una reducción tanto para el consumo como para el costo de un 48,3%, siendo esta una reducción bastante grande e importante. Esto solo con el cambio de sistema, si se sumara la implementación de un sistema de gestión energético se podría lograr un ahorro aun mayor, pues implementando sistemas de control que sean capaces de vigilar la iluminación se puede lograr mayor eficiencia.

En este sentido también hay que tener en cuenta que a este tema no se le presta tanta atención como se debería, y la falta de conciencia e interés por una parte del personal de la PUJ (tanto administrativo como estudiantes) hace que ambos sistemas de luminarias sean menos eficientes al generar un consumo innecesario de la iluminación cuando no sea requerido su uso.

Al revisar las cifras del cambio al sistema de iluminación LED también debemos ver el costo del mismo, el cual implica un cambio del 94,7% de las luminarias actuales, esto representa una inversión de \$207'834.640 pesos, aunque es un costo alto al principio, se ve justificado por el ahorro energético total y en la reducción del costo del servicio de energía, de esta manera el tiempo de retorno de la inversión será de tan solo 4,1 años. Es importante señalar que este cambio debe ir acompañado de un estudio de iluminación para asegurar el cumplimiento de la normatividad respectiva, y los resultados que muestre pueden significar una reducción en el número de luminarias necesarias, lo que a su vez significaría también una reducción en costos tanto de la inversión requerida como de costos de consumo, esto representaría también una disminución en el tiempo de retorno de la inversión.

A esto debemos sumarle también el impacto ambiental positivo que se genera por el cambio a luminarias LED, el ahorro energético logrado representa evitar la emisión de 35,7 t /CO₂ al año, lo que significa una disminución del 48,3% de las emisiones por iluminación del edificio Rafael Arboleda.

11.1.5 Discusión alternativa 2: Energía solar

La implementación de un sistema de abastecimiento de energía solar desde el punto de vista ambiental resulta una gran alternativa que tiene el potencial de reducir hasta en un 100% las emisiones de CO₂, generadas por iluminación del edificio Rafael Arboleda, siendo esta una fuente renovable y limpia de generación de energía. Esto resulta convirtiéndolo en una medida atractiva para mejorar la eficiencia energética del edificio.

Los resultados sugieren que para lograr cubrir la totalidad de la demanda de energía para iluminación convencional a partir de energía solar, es necesario disponer de un área de 1.327 m² para la instalación de los paneles. Teniendo en cuenta que el área disponible en la cubierta del edificio Rafael Arboleda es de 966,7 m², solo se podría suplir con energía solar un 70% de la demanda energética, requiriendo un área de 929 m² para su funcionamiento.

Por otro lado, como se mencionó anteriormente si la alternativa 1 es implementada y se hace la sustitución a tecnología LED, la demanda energética se reduce. Esto significa que para lograr cubrir la totalidad de la demanda de energía por iluminación con LED a partir de energía solar, es necesario disponer de un área de 685 m² para la instalación de los paneles.

En cuanto a las condiciones meteorológicas necesarias para su funcionamiento, este tipo de sistema se encuentra en ventaja frente a sistemas diferentes de generación de energía, ya que tanto a nivel nacional como regional, se cuenta con un promedio de brillo y radiación solar que proporciona que el sistema funcione en los mejores escenarios para la generación de energía.

Haciendo un acercamiento hacia el aspecto económico, y teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, para cubrir el 70% de la demanda energética por iluminación convencional se debe hacer una inversión de \$ 131'179.000. Esto generaría un ahorro económico anual de \$ 73'249.965 pesos, logrando un periodo de recuperación de la inversión de 1,8 años.

Por otro lado, si se quiere suplir el 100% de la demanda energética por iluminación con tecnología LED a partir de energía solar se debe hacer, primero la sustitución a LED y luego una inversión de \$ 96'695.000 pesos en paneles solares. Esto generaría un ahorro económico anual de \$ 104'642.807 pesos²², logrando un periodo de recuperación de la inversión de 1,8 años.

Apartándose de la visión económica de dicha alternativa, la implementación del sistema de paneles fotovoltaico, se convierte en la opción que logra el mejor balance en la reducción de emisiones de CO₂, por ser una fuente renovable de energía. Se estima que el potencial de emisiones evitadas es de 51,7 t CO₂/año en el caso que se instale un sistema con una capacidad de generar el 70% de la demanda energética por iluminación convencional y 73,8 t CO₂/año por un sistema con capacidad de generar el 100% de la demanda por iluminación con LED.

11.1.6 Discusión alternativa 3: Energía por dispositivos piezoeléctricos

11.1.6.1 Baldosas piezoeléctricas

Al igual que la implementación de un sistema de abastecimiento de energía solar, la generación de energía a partir de baldosas piezoeléctricas, desde el punto de vista ambiental resulta una gran alternativa que logra una reducción del 100% en las emisiones de CO₂, al ser una fuente renovable y limpia de generación de energía.

Sin embargo al revisar los cálculos en cuanto a las necesidades de infraestructura para la implementación del sistema de baldosas piezoeléctricas, se puede ver que el número de baldosas requeridas frente al sistema de paneles fotovoltaicos es mucho mayor. Igualmente debido al costo teórico que se requiere de dichos equipos, que aunque por unidad resulta ser casi dos veces y media menor que el costo por unidad del panel fotovoltaico, si vemos el costo teórico total de las baldosas piezoeléctricas este resulta ser casi seis veces y media mayor en comparación con el costo total de los paneles fotovoltaicos. Esto reduce su viabilidad económica, y por ende la capacidad de recuperación de la inversión en el mediano y corto plazo ya que tomaría 31,3 años.

Al analizar otra de las características que se deben tener en cuenta para la implementación de este tipo de sistema, se encontró que el área requerida para ubicar el total de las baldosas necesarias para suplir la demanda energética del edificio Rafael Arboleda es de 2.481 m², y el sitio seleccionado inicialmente para la ubicación de los dispositivos es donde se ubican las talanqueras que permiten el ingreso y registro de los usuarios al parqueadero, y esta área es de tan solo 32.89 m², aunque por metro cuadrado se pueden ubicar dos baldosas piezoeléctricas no sería suficiente; inclusive si se quisiera aplicar a toda la vía vehicular de la bahía norte del parqueadero la cual cuenta con un área aproximada de 506 m² no alcanzaría para ubicar la totalidad de las baldosas piezoeléctricas. Por esta razón tampoco sería viable esta alternativa.

Un aspecto importante a tener en cuenta es la facilidad de acceder a estos dispositivos ya que las empresas que lo desarrollan no son fáciles de contactar o su mercado no llega aun a Colombia.

²² El ahorro económico corresponde al ahorro por la implementación del sistema LED + solar en relación a la línea base.

Aunque una empresa ya está trabajando en nuestro país no ha incursionado de lleno en el mercado y aunque fue posible contactarnos con ella la información suministrada no fue del todo satisfactoria ni la atención tan oportuna ni satisfactoria. Esto también hace inviable esta alternativa.

11.1.6.2 EKRR

Al igual que la implementación de un sistema de abastecimiento de energía solar, o generación de energía a partir de baldosas piezoeléctricas, desde el punto de vista ambiental resulta una gran alternativa que logra una reducción del 100% en las emisiones de CO₂, al ser una fuente renovable y limpia de generación de energía.

De acuerdo a los cálculos en cuanto a las necesidades de infraestructura que requiere este sistema, se aprecia una disminución significativa respecto al número requerido de paneles fotovoltaicos por unidad, y aún más significativa frente al número de baldosas piezoeléctricas requeridas, lo que lo hace bastante viable en este aspecto.

El otro aspecto a evaluar es el costo que se requiere de dichos equipos, aunque al analizar este aspecto por unidad resulta ser el de mayor costo de los tres, y por una diferencia bastante alta; al revisar el costo total de la inversión requerida resulta ser seis veces menor que la requerida por las baldosas piezoeléctricas, y casi la misma que requieren los paneles fotovoltaicos. Esto hace que sea viable económicamente, además la capacidad de recuperación de la inversión sería en el corto plazo, pues tan solo tardaría 2,5 años.

Al analizar la otra características que se debe tener en cuenta para la implementación de este tipo de sistema, se encontró que el área requerida para ubicar el total de las EKRR necesarias para suplir la demanda energética del edificio Rafael Arboleda es de 18 m², lo cual se ajusta perfectamente al sitio seleccionado inicialmente para la ubicación de los dispositivos que es donde se ubican las talanqueras que permiten el ingreso y registro de los usuarios al parqueadero, y que cuenta con un área de 32.89 m². Esto haría también viable esta alternativa.

De igual forma este sistema depende del flujo vehicular para la generación de energía y las variaciones del mismo afectaran su eficiencia, sin embargo al instalar el número necesario de EKRR para suplir el 100% de la demanda del edificio Rafael Arboleda se generara un excedente de energía, por lo que en caso de implementar esta alternativa, se debe decidir qué hacer con este excedente, ya sea que se determine venderlo o aprovecharlo en otro edificio. De esta manera sería más rápida la recuperación de la inversión realizada. Este aspecto también hace viable esta alternativa.

Un aspecto importante a tener en cuenta y que se debe revisar para determinar la viabilidad de esta alternativa es la facilidad de acceder a estos dispositivos ya que las empresas que lo desarrollan no son fáciles de contactar y algunas ya no están en el mercado. Aunque varias investigaciones han demostrado que se pueden desarrollar estos dispositivos independientemente.

A continuación se muestra un cuadro resumen comparativo de las alternativas estudiadas²³. Ver Tabla 50.

Tabla 50. Cuadro resumen comparativo de alternativas al 100% de implementación frente a iluminación convencional

Escenario	Consumo Energía (kWh /año)	Ahorro Energía (kWh /año)	Costo Energía (\$/año)	t CO ₂ Emitidas por año	Emisiones Evitadas (t /CO ₂) año	Ahorro Económico (\$/año)	Inversión Requerida (\$)	Recuperación de la inversión (años)	Reducción de Emisiones (t CO ₂ /año)	
Línea base o escenario actual de emisiones de CO ₂	369.006,3	---	104'642.807	73,8	---	---	---	---	---	
Alternativa 1: Cambio a luminarias LED	190.620	178.386	54'056.020	38,1	35,7	50'586.787	207'834.640	4,1	35,7 (48,3%)	
Alternativa 2: Abastecimiento de la energía eléctrica a partir de paneles fotovoltaicos	0	369.006,3	0	0	73,8	104'642.807	187'332.000	1,8	73,8 (100%)	
Alternativa 3: Abastecimiento de la energía eléctrica a partir de dispositivos piezoeléctricos	Baldosas piezoeléctricas	0	369.006,3	0	0	73,8	104'642.807	3.279'809.915	31,3	73,8 (100%)
	EKRR	0	369.006,3	0	0	73,8	104'642.807	266'794.909	2,5	73,8 (100%)

Fuente: autores

Teniendo en cuenta que al implementar la alternativa 1: cambio a luminarias LED la demanda de energía se reduce, a continuación se muestra un cuadro comparativo de las alternativas estudiadas bajo el supuesto de la previa implantación esta alternativa. Ver Tabla 52.

²³ Para efectos de comparación, se utilizan los datos de implementación de 100% para todas las alternativas estudiadas.

Tabla 51. Cuadro resumen comparativo de alternativas al 100% de implementación frente a iluminación LED

Escenario		Consumo Energía (kWh/año)	Ahorro Energía (kWh/año)	Costo Energía (\$/año)	t CO ₂ Emitidas por año	Emisiones Evitadas (t /CO ₂) año	Ahorro Económico (\$/año)	Inversión Requerida (\$)	Recuperación de la inversión (años)	Reducción de Emisiones (t CO ₂ /año)
Alternativa 2: Abastecimiento de la energía eléctrica a partir de paneles fotovoltaicos		0	369.006,3	0	0	73,8	104'642.807	96'695.000	1,8	73,8 (100%)
Alternativa 3: Abastecimiento de la energía eléctrica a partir de dispositivos piezoeléctricos	Baldosas piezoeléctricas	0	369.006,3	0	0	73,8	104'642.807	1.694'285.275	31,3	73,8 (100%)
	EKRR	0	369.006,3	0	0	73,8	104'642.807	177'863.273	3,3	73,8 (100%)

Fuente: autores

12. ESCENARIO MEJORADO

Teniendo en cuenta la discusión de las alternativas y las limitantes que cada una de estas tiene, la presente investigación sugiere escenarios mejorados de eficiencia energética, combinando distintos porcentajes de implementación de dichas alternativas.

A continuación se presentan los escenarios mejorados, los cuales se priorizaron según los tiempos de recuperación de la inversión y emisiones evitadas de CO₂. Ver Tabla 52 a Tabla 56.

El escenario mejorado 1 sugiere hacer una sustitución completa de tecnología de iluminación por LED. Ver Tabla 52.

Tabla 52. Escenario mejorado 1

Sistema	Capacidad instalada	Emisiones evitadas (t CO ₂ /año)	Recuperación de la inversión (años)	Ahorro económico (años)
LED	100%	35,7	4,1	\$ 50'586.787

Fuente: autores

El escenario mejorado 2 sugiere cubrir en un 100% la demanda energética requerida por el edificio Rafael Arboleda por iluminación con LED con energía solar. Ver Tabla 53.

Tabla 53. Escenario mejorado 2

Sistema	Capacidad instalada	Emisiones evitadas (t CO ₂ /año)	Recuperación de la inversión (años)	Ahorro económico (años)
Solar - LED	100%	73,8	1,8	\$ 104'642.807

Fuente: autores

El escenario mejorado 3, al igual que el escenario 2, sugiere cubrir en un 100% la demanda energética requerida por el edificio Rafael Arboleda por iluminación con LED con EKRR. Ver Tabla 54.

Tabla 54. Escenario mejorado 3

Sistema	Capacidad instalada	Emisiones evitadas (t CO ₂ /año)	Recuperación de la inversión (años)	Ahorro económico (años)
EKRR – LED	100%	73,8	3,3	\$ 104'642.807

Fuente: autores

El escenario mejorado 4 no contempla el cambio de tecnología por LED. Únicamente ofrece la instalación de paneles solares y EKRR en un 50% de capacidad instalada cada uno. Estos porcentajes se establecieron según las limitaciones de espacio para la instalación de las piezas. Ver Tabla 55.

Tabla 55. Escenario mejorado 4

Sistema	Capacidad instalada	Emisiones evitadas (t CO ₂ /año)	Recuperación de la inversión (años)	Ahorro económico (años)
Solar	50%	36,9	1,8	\$ 52'321.403
EKRR	50%	36,9	2,5	\$ 52'321.403
Total	100%	73,8	2,5	\$ 104'642.807

Fuente: autores

Por último, el escenario mejorado 5 además de suplir la demanda de energía por iluminación, genera energía sobrante que puede distribuirse al resto de actividades que demandan de ella en el edificio Rafael Arboleda, disminuyendo así un mayor número de emisiones de CO₂ y aumentando el ahorro económico anual por disminución del pago de electricidad consumida. Ver Tabla 56.

Tabla 56. Escenario mejorado 5

Sistema	Capacidad instalada	Potencial de Emisiones evitadas (t CO ₂ /año)	Recuperación de la inversión (años)	Ahorro económico (año)
LED	100%	35,7	1,8	\$ 50'586.787
Solar-LED	100%	73,8	1,8	\$ 104'642.807
EKRR-LED	100%	73,8	2,5	\$ 104'642.807
Total	100%	147,6²⁴	2,5	\$ 259'872.401²⁵

Fuente: autores

²⁴ Debido que mediante la implementación del sistema Solar - Led se evita el 100% de las emisiones generadas en la línea base, las emisiones evitadas por la implementación de las EKRR corresponderán a las actividades que demanden energía eléctrica diferentes a la iluminación. Así mismo esto generará un mayor ahorro económico.

²⁵ Se hace una suma lineal de costos, ya que a pesar que se cubre el 100% de la demanda por iluminación, se genera un ahorro económico adicional por la energía excedente que se generaría en este escenario.

13. PROYECCIÓN A NIVEL NACIONAL

En Colombia, la demanda de energía eléctrica aumenta cada año, y así mismo las emisiones de CO₂ generadas a causa de esto (UPME, 2015). Teniendo en cuenta esto, es importante realizar una proyección de las emisiones que se pueden evitar por la demanda de energía eléctrica en el país si se implementan escenarios como los propuestos en esta investigación, los cuales tendrían un impacto significativo frente a la reducción del inventario de emisiones de CO₂ en Colombia.

Para este cálculo se toma como base la proyección de la demanda de energía eléctrica total establecida por el UPME. Ver Tabla 57.

Tabla 57. Proyección de la demanda de energía total nacional (GWh)

Proyección GWh			
Año	Esc. Alto	Esc. Medio	Esc. Bajo
2015	66.284	66.017	65.751
2016	72.333	71.260	70.194
2017	74.907	73.803	72.707
2018	77.998	76.865	75.740
2019	80.125	78.962	77.807
2020	82.125	80.930	79.742
2021	84.269	83.043	81.826
2022	86.531	85.273	84.024
2023	88.656	87.361	86.074
2024	90.692	89.365	88.046
2025	93.083	91.720	90.365
2026	95.652	94.247	92.852
2027	98.600	97.149	95.707
2028	101.229	99.736	98.253
2029	104.019	102.483	100.957

Fuente: (UPME, 2015)

Con base en la tabla anterior, es posible calcular las emisiones generadas para cada año proyectado (2015-2029). Para esto se tuvo en cuenta la metodología de la UNFCCC (2007) mencionada en el numeral 6.2 y se utilizó un factor de emisión de 0,2 t CO₂ / MWh - kgCO₂ / kWh correspondiente al factor de emisión del SIN (UPME, 2013).

A continuación, la Ecuación 62 se muestra el cálculo de emisiones de CO₂ generadas por la demanda de energía eléctrica total nacional para el año 2016²⁶:

²⁶ Es importante aclarar que el potencial de reducción de emisiones por la demanda de energía eléctrica en Colombia es proporcional a la demanda de la misma, lo que puede llegar a ser de 100%.

Ecuación 62. Cálculo de emisiones de CO₂ evitadas por la demanda de energía eléctrica total nacional

$$Emisiones \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right) = 72.333 \frac{GWh}{\text{año}} * \frac{1.000 \text{ MWh}}{1 \text{ GWh}} * 0,2 \frac{t \text{ CO}_2}{\text{MWh}}$$

$$= 14'466.600 \text{ t CO}_2 / \text{año}$$

Así mismo es posible proyectar el potencial de reducción de emisiones para todos los años. Ver Tabla 58.

Tabla 58. Potencial de reducción de emisiones de CO₂ generadas por la demanda de energía eléctrica total nacional

Proyección de emisiones evitadas t CO₂/año			
Año	Esc. Alto	Esc. Medio	Esc. Bajo
2015	13'256.800	13'203.400	13'150.200
2016	14'466.600	14'252.000	14'038.800
2017	14'981.400	14'760.600	14'541.400
2018	15'599.600	15'373.000	15'148.000
2019	16'025.000	15'792.400	15'561.400
2020	16'425.000	16'186.000	15'948.400
2021	16'853.800	16'608.600	16'365.200
2022	17'306.200	17'054.600	16'804.800
2023	17'731.200	17'472.200	17'214.800
2024	18'138.400	17'873.000	17'609.200
2025	18'616.600	18'344.000	18'073.000
2026	19'130.400	18'849.400	18'570.400
2027	19'720.000	19'429.800	19'141.400
2028	20'245.800	19'947.200	19'650.600
2029	20'803.800	20'496.600	20'191.400

Fuente: autores

Según el inventario de emisiones titulado “Primer Informe Bienal De Actualización De Colombia Ante La Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático 2015”, para el año 2012 las emisiones de GEI del sector de energía correspondieron al 44% de las emisiones totales del país, con un total de 77.784 Gg CO₂ eq, de las cuales el 86% corresponden a emisiones de CO₂. De esta forma se obtiene un total de 66.894 Gg CO₂ o 66'894.000 t de CO₂ emitidas por este sector. Igualmente el informe establece que el total de misiones de GEI de Colombia para el año 2012 fueron de 178.258 Gg CO₂ eq, de los cuales corresponden un total de 123.385 Gg de CO₂ o 123'385.000 t de CO₂ (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, 2015).

Tomando estos valores como referencia y para efectos de cálculos podemos determinar en qué proporción se puede aportar a la meta de reducción del 20% mediante la implementación de proyectos que le apunten a la reducción de emisiones de CO₂, entre ellos aquellos enfocados al el uso de energía eléctrica.

En la Ecuación 63 se muestran los cálculos del potencial de reducción de emisiones para el escenario alto del año 2016 respecto a las emisiones totales a nivel nacional por demanda de energía eléctrica.

Ecuación 63. Potencial de reducción de emisiones de CO₂ por demanda de energía eléctrica

$$\% \text{ de Reducción} = \frac{\text{emisiones evitadas 2016} \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right)}{\text{emisiones totales a nivel nacional} \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right)} * 100 \%$$

$$\% \text{ de Reducción} = \frac{14'466.600 \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right)}{66'894.000 \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right)} * 100 \%$$

$$\% \text{ de Reducción} = 21,6 \%$$

Así mismo podemos calcular el porcentaje de reducción de las emisiones totales de CO₂ de Colombia. Ver Ecuación 64

Ecuación 64. Porcentaje de reducción de emisiones de CO₂ por demanda de energía eléctrica. En el total de emisiones

$$\% \text{ de Reducción} = \frac{\text{emisiones evitadas} \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right)}{\text{emisiones totales} \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right)} * 100 \%$$

$$\% \text{ de Reducción} = \frac{14'466.600 \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right)}{123'385.000 \left(\frac{t \text{ CO}_2}{\text{año}} \right)} * 100 \%$$

$$\% \text{ de Reducción} = 11,7 \%$$

14. CONCLUSIONES

La elaboración de una línea base de emisiones, ayuda en la identificación de falencias y fortalezas que presenta un sistema de iluminación. Para el caso puntual del edificio Rafael Arboleda, la poca eficiencia del sistema de iluminación actual que demanda un consumo de 369.006,3 kWh/año de energía eléctrica, generando así un impacto ambiental y económico.

La elaboración de una línea base de emisiones, puede ser un indicador muy relevante para evaluar y tomar medidas tendientes a disminuir los consumos de energía dentro de la PUJ, además sirve como herramienta para replicarlo a otros edificios de la universidad o de otras instituciones.

Con la implementación de sistemas de eficiencia energética como los paneles solares, los dispositivos piezoeléctricos y métodos como la sustitución de tecnologías de iluminación poco eficiente por LED, se reduce la demanda de energía eléctrica al SIN y se evitan emisiones de CO₂.

El cambio del sistema de iluminación actual a un sistema de iluminación LED, es necesario y sería el primer paso para la implementación de un sistema de eficiencia energética en el edificio Rafael Arboleda. Como se muestra en el escenario 1, esto se demuestra en la reducción de la demanda energética, ahorrando anualmente 178.386,3 kWh al año, la disminución en los costos tanto por consumo el cual representa un ahorro económico de \$ 50'586.787 pesos al año, como por mantenimiento y la reducción de emisiones equivalentes a 35,7 t CO₂ al año. El tiempo de retorno de la inversión es de 4,1 años, siendo este el mayor entre todos los escenarios.

Si esta sustitución a tecnología LED se hace, la demanda energética se reduce en un 48,3%. Esto significa que se lograría cubrir la totalidad de la demanda de energía por iluminación a partir de energía solar ya que solo es necesario disponer de un área de 685 m² para la instalación de los paneles (escenario 2). De lo contrario, el sistema solar no podría suplir el 100% de demanda de energía por iluminación convencional ya que no se cuenta con el espacio suficiente necesario para la instalación de la totalidad de los paneles solares. En este caso, se reducirían 138 t CO₂ al año, generando un ahorro económico de \$ 104'642.807 pesos al año. El tiempo de retorno se estima en 1,8 años.

El potencial de generación de las baldosas piezoeléctricas, aunque podría satisfacer la demanda energética del edificio y reduciría totalmente el consumo de energía eléctrica y las emisiones, no es una alternativa viable dado el gran número de dispositivos que se requieren (34.167 para iluminación actual y 17.650 para iluminación LED). A su vez significa una mayor área para la ubicación de estos (2.481 m² para iluminación actual y 1.281 m² para iluminación LED) y una inversión mucho mayor (\$3.279'809.915 pesos para la iluminación convencional y \$1.694'285.275 pesos para iluminación LED). Es por esto que esta alternativa no se tuvo en cuenta dentro de los escenarios propuestos.

Por otro lado, como se muestra en el escenario 3, el potencial de generación de las EKRR, es capaz de satisfacer la demanda energética del edificio y reducir completamente las emisiones. Este escenario es viable. La cantidad de dispositivos de

este tipo requeridos (3 para iluminación actual y 2 para iluminación LED) y la poca área que demandan (18m² para iluminación actual y 12m² para iluminación LED), lo hace atractivo técnicamente. Tiene el potencial de reducir 73,8 t CO₂ al año y su costo total (\$ 266'794.909 pesos para iluminación actual y \$ 177'863.273 pesos para iluminación LED) que se asemeja mucho al de los paneles fotovoltaicos y siendo menor al de las baldosas piezoeléctricas permiten que sea económicamente amigable. Se espera que la recuperación de la inversión se de en 3,3 años.

El escenario mejorado 4, muestra que con la implementación de un sistema híbrido compuesto por 50% de paneles fotovoltaicos y 50% de EKRR se logra la reducción de 73,8 t CO₂ al año y un ahorro económico de \$ 104'642.807 pesos al año, y tendría un periodo de recuperación de la inversión de 2,5 años, siendo este, junto con el escenario 5, el menor entre todos. Sin embargo esto implica continuar con un sistema de iluminación poco eficiente, por lo que escenario no es el más recomendable para lograr la eficiencia energética del edificio Rafael Arboleda.

El escenario mejorado 5, muestra que con el cambio del 100% a iluminación LED y la implementación del 100% de EKRR y paneles fotovoltaicos, se logra la reducir 147,6 t CO₂ al año. Esto debido a que se genera energía excedente la cual puede ser utilizada para las demás actividades del edificio Rafael Arboleda, evitando de esta manera emisiones adicionales a las generadas por la iluminación. Así mismo esto generará un mayor ahorro económico, aproximado de \$ 259'872.401 pesos al año. Este escenario es el más adecuado y sugerido como resultado de la presente investigación para lograr la eficiencia energética del edificio Rafael Arboleda, ya que es el que presenta mayores beneficios, sumándole otro punto a favor que es la generación de energía extra.

Es importante mencionar que la mejora de la eficiencia energética de un edificio debe ser pensada de forma integral, abordando los aspectos que permitan el desarrollo de todas las actividades sin ninguna dificultad y cubran las necesidades del personal. En cuanto al sistema de iluminación debe ser seleccionado de acuerdo al tipo de actividad que se va a desarrollar y la demanda de la misma, de tal forma que la iluminación se pueda aprovechar al máximo y no se le dé un uso innecesario.

Al hacer una evaluación general, las alternativas de eficiencia energética basadas en energías renovables son muy buenas y pueden ser opciones muy viables desde el punto de vista ambiental ya que son capaces de reducir las emisiones de CO₂ en su totalidad. Para este caso las tres alternativas propuestas son capaces de evitar la emisión de 73,8 t CO₂ al año. Son los factores técnicos y económicos los que representan el verdadero desafío y los que al final determina su aplicación.

Los resultados del estimado del potencial de generación de emisiones por iluminación del edificio Rafael Arboleda, demuestran que un proyecto de eficiencia energética para todo el campus de la PUJ, puede ser un escenario atractivo para gestionar el inicio de un proyecto de eficiencia energética.

De igual forma la proyección a nivel nacional arrojó resultados significativos. A través de la implementación de proyectos de eficiencia energética enfocados a la reducción de emisiones de CO₂ se lograría un aporte de hasta el 11,7% de reducción, aportando a los compromisos adquiridos por Colombia en el acuerdo de París (reducción de 20% de las emisiones totales).

El abordar temas tan cotidianos y comunes que involucran a todas las personas e instituciones desde la Gestión Ambiental y proponer soluciones, genera mayores intereses para el público en general. Esto a su vez puede servir de motivación para buscar estrategias como la mejora de la eficiencia energética, y por qué no aplicarlas en otros campos, que a su vez aporten a la mitigación del cambio climático.

En un mundo de donde rige el sistema capitalista, es importante tener el factor económico presente. La creación de proyectos enfocados a cumplir el Acuerdo de París se puede ver como un negocio lucrativo, el cual tiene como trasfondo el mejoramiento de las condiciones ambientales. Es importante que la UNFCCC, fortalezca las estructuras y condiciones de mecanismos frente al cambio climático, y de tal forma, habrá un mayor incentivo para la generación de nuevos proyectos que se encaminen hacia la eficiencia energética.

La situación actual de nuestro país, donde se ha hecho necesario ahorrar energía para no tener que llegar a un escenario tan álgido como el del racionamiento energético, se convierte en el escenario en el cual se deben fomentar este tipo de investigaciones.

Su alcance cubre todas las instituciones tanto públicas como privadas, donde no se han llevado a cabo grandes avances y no se ha tenido mucho interés al respecto. El sector educativo debe liderar esto con el fin de lograr aprovechar las potencialidades de reducción que existen en dicho campo, de esta forma se puede contribuir con las metas de reducción fijadas por el Acuerdo de París.

15. RECOMENDACIONES

Esta investigación está envuelta en un contexto carente de información en cuanto al tema de consumo de energía eléctrica del edificio Rafael Arboleda ya que este solo cuenta con un medidor propio para determinar su consumo total, lo que no permite cuantificar los diferentes consumos generados. Por esto se recomienda hacer la instalación de medidores independientes por piso y tipo de instalación para determinar los diferentes consumos del edificio (iluminación, toma corriente, etc.) al igual que costos de mantenimiento, como se establece en los sistemas de gestión de eficiencia energética.

Se debe evaluar el uso de otros sistemas de control de la iluminación del edificio Rafael Arboleda y que contribuyan en la disminución del consumo de energía tales como sensores de movimiento que prendan o apaguen las luminarias y que eviten su uso innecesario, sistemas de control que permitan ajustar el consumo energético evitando así gastos innecesarios.

Igualmente es importante hacer mediciones de iluminación dentro del edificio y establecer los niveles adecuados para las actividades que allí se desarrollan. Cualquier cambio que se haga en este aspecto deberá ser de acuerdo a la normatividad aplicable²⁷. Una vez se realice el cambio de luminarias se presentará un ahorro económico a la disminución de los costos de mantenimiento del sistema de iluminación del edificio Rafael Arboleda, a mediano y largo plazo.

Así mismo se recomienda establecer una guía de buenas prácticas para el uso racional de la energía en la cual se vincule al personal administrativo de cada una de las oficinas, a los profesores, estudiantes y personal de vigilancia que verifiquen esto en los salones de clase y áreas comunes.

Es importante que se desarrollen investigaciones, sobre la viabilidad del uso de otras fuentes de energías renovables que ayuden al suministro de energía eléctrica de forma más eficiente.

Las potencialidades de reducción deben ser exploradas en otras fuentes de consumo eléctrico dentro del edificio Rafael Arboleda generando más conocimiento del tema, que pueda servir como base para mejorar la planeación de un sistema de gestión de eficiencia energética en la PUJ.

De igual forma, se puede hacer una homologación del proyecto a los otros edificios de la PUJ, los cuales involucren variables y condiciones similares. Así mismo tenerlo en cuenta para los diseños de los nuevos edificios que se tengan proyectados construir por parte de la universidad.

Con base en los resultados obtenidos se recomienda replicar este proyecto en la entrada sur del parqueadero de la PUJ, incluyéndolo dentro de próximas investigaciones o dentro de programas de uso de energías renovables, con el propósito de ampliar la

²⁷ Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público – RETILAP.

capacidad instalada de generación de energía renovable y así poder satisfacer un porcentaje o la totalidad de la demanda de otro edificio de la PUJ.

Dada la poca investigación que hay en nuestro país sobre las baldosas piezoeléctricas y las EKRR, se deben realizar más investigaciones sobre estos temas de forma que se pueda avanzar en su desarrollo, permitiendo así que mejoren su eficiencia y bajen sus costos. Dentro de la PUJ se pueden realizar investigaciones a modo de trabajo de grado de los estudiantes de Ingeniería electrónica que permita delimitar mejor la capacidad de generación de estos dispositivos y por qué no realizar un diseño que se pueda implementar en el campus de la universidad y que a su vez pueda ser más económico y con las mismas o mejores características de las mencionadas en esta investigación.

16. BIBLIOGRAFÍA

- ABC. (25 de Marzo de 2011). *Sociedad*. Recuperado el Noviembre de 2015, de ABC: <http://www.abc.es/20110325/sociedad/abci-edificios-mejor-iluminados-mundo-201103251012.html>
- Agatón. (22 de Mayo de 2014). Recuperado el 2015 de diciembre de 15, de <http://hdl.handle.net/10654/12025>
- Aguirre, F. J. (2013). *Análisis de la Factibilidad Económica y Ambiental de Utilizar Baldosas Piezoeléctricas en el campus de la Universidad Militar Nueva Granada (UMNG)*. Universidad Militar Nueva Granada (UMNG), Cundinamarca, Bogotá. Recuperado el octubre de 2015
- Alcaldía de Bogotá. (2016). *Normas: Bogotá jurídica Digital*. Recuperado el 2016, de Bogotá Jurídica Digital: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/>
- Andrade, C., Ardila, J., Lopez, M., & Rico, C. (septiembre de 2011). *Design blog*. Recuperado el noviembre de 2015, de <http://designblog.uniandes.edu.co/blogs/dise2308/files/2011/09/MANUAL-LUZ-INCANDESCENTES1.pdf>
- Arce, R. (2009). *Manual Cambio Climático*. Lima, Perú: InWent. Recuperado el abril de 2015
- Avan Luce Creative Lighting. (30 de Abril de 2014). Recuperado el Diciembre de 2015, de Avan Luce Crative Lighting: <http://www.avanluce.com/la-iluminacion-de-edificios-en-barcelona-edificio-david/>
- Banco Mundial. (2015). *Indicadores*. Recuperado el julio de 2015, de Banco Mundial: <http://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL/countries?display=map>
- Bogotá, Portal oficial de la ciudad. (10 de octubre de 2015). Recuperado el 16 de diciembre de 2015, de <http://www.bogota.gov.co/ciudad/ubicacion>
- Bornay. (2016). *Catálogo Bornay*. Recuperado el enero de 2016, de <http://www.bornay.com/es/productos/bae-batterien/pvv>
- Bornay. (2016). *Catálogo Bornay*. Recuperado el enero de 2016, de <http://www.bornay.com/es/productos/bae-batterien/pvs>
- CDIAC. (2013). Recuperado el febrero de 2016, de <http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/top2010.tot>
- Certificados energéticos. (2015). *LED iluminación eficiente*. Recuperado el Diciembre de 2015, de Certificados energéticos: <http://www.certificadosenergeticos.com/led-iluminacion-eficiente>
- Cervantes, F. C. (15 de mayo de 2013). *Periódico El Tiempo*. Recuperado el febrero de 2016, de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-12800889>
- Ciudadanos en red. (8 de Diciembre de 2009). Recuperado el Diciembre de 2015, de ciudadanos en red: <http://ciudadanosenred.com.mx/aprovechan-universidades-mexicanas-energia-solar/>
- Código R. (2015). *Bonos de carbono*. Obtenido de Código R: <http://www.codigor.com.ar/bonosdecarbono.htm>
- Colombialeds. (2015). *Proyectos: Colombialeds*. Obtenido de Colombialeds web site: <http://www.colombialeds.com/proyectos>
- Comisión Europea. (2000). Libro Blanco sobre Responsabilidad Ambiental. En D. g. ambiente, *Libro Blanco sobre Responsabilidad Ambiental* (pág. 13). Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas.

- CONAFE. (2013). *Uso Eficiente de la Energía*. Recuperado el noviembre de 2015, de <http://www.conafe.cl/clientehogar/Paginas/UsoEficientedelaEnergia.aspx>
- Construdata. (2013). Recuperado el 4 de Diciembre de 2015, de http://www.construdata.com/Bc/Construccion/Noticias/piezolectricidad_
- Coordinación de Parqueaderos. (9 de Marzo de 2016). *Flujo vehicula parqueadero PUJ*. Bogotá.
- Coordinación de parqueaderos. (2016). *Flujo vehicular parqueadero PUJ*. Bogotá. Recuperado el febrero de 2016
- Creighton, P. (2016). Recuperado el enero de 2016, de <http://www.eurosur.org/futuro/fut53.htm>
- Debayan, P., & Anupam, R. (2015). Piezoelectric Effect: Smart roads in green energy. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)* , 112-116.
- Design LED company. (septiembre de 2012). *DLED CO*. Recuperado el octubre de 2015, de <http://www.dledco.com/equivalencias-potencia-led-vs-convencionales/>
- Dhamma Energy. (s.f). Recuperado el febrero de 2016, de http://www.dhammaenergy.com/es/comment_marche.asp
- Dirección de recursos físicos campus universitario. (2015). *Inventario de luminarias edificio Rafael Arboleda*. Bogotá. Recuperado el noviembre de 2015
- DNP. (25 de agosto de 2003). *Ministerio de Minas y Energía*. Recuperado el abril de 2015, de <http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/AMBIENTAL/PoliticaAmbiental/Conpes%203242.pdf>
- Dumaine, B. (24 de Febrero de 2010). *CNN Expansión*. Recuperado el Noviembre de 2015, de <http://www.cnnexpansion.com/negocios/2010/02/23/rascacielos-verde-sustentable-mas-alto>
- El Espectador. (30 de octubre de 2014). Recuperado el febrero de 2016, de <http://www.elespectador.com/noticias/educacion/jorge-tadeo-lozano-universidad-movida-energia-solar-articulo-524953>
- El Tiempo. (5 de junio de 2015). *Especiales comerciales*. Recuperado el Noviembre de 2015, de EL Tiempo: <http://www.eltiempo.com/contenido-comercial/especiales-comerciales/energia-solar-en-colombia/15901037>
- Entretenimiento facilísimo. (2015). Obtenido de Entretenimiento Facilísimo: http://entretenimiento.facilisimo.com/los-9-edificios-con-mejor-iluminacion-del-mundo_564683.html
- Epec. (2015). *Material técnico y educativo: Epec*. Recuperado el noviembre de 2015, de Epec web site: <http://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/fichaedison.pdf>
- Espitia Rey, C. M., & Hernández Hernández, E. (2011). *Valoración De La Capacidad De Generación De Energía Eléctrica Por Medio De Un Dispositivo Con Efecto Piezoeléctrico En Las Entradas Vehiculares De La Sede Central De La UIS*. Universidad Industrial de Santander, Santander, Bucaramanga. Recuperado el marzo de 2015
- Esplandiú. (Octubre de 2009). Obtenido de <http://www.libertaddigital.com/ciencia/una-empresa-israeli-logra-generar-electricidad-gracias-al-trafico-1276372565/>
- Estilo ambientación. (2015). *Estilo ambientación*. Recuperado el diciembre de 2015, de <http://www.estiloambientacion.com.ar/iluminaciontipos.htm>
- Fernandez Muerza. (6 de septiembre de 2010). Recuperado el 2016 de febrero de 2016, de http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2010/09/06/195593.php

- Fernández, M. E. (octubre de 2015). *La energía del cambio*. Recuperado el mayo de 2016, de Abengoa: <http://www.laenergiadelcambio.com/los-retos-de-la-cumbre-de-paris-de-2015>
- Garland, R. (26 de Abril de 2013). *Courses*. Recuperado el diciembre de 2015, de Stanford University: <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph240/garland1/>
- Garper Energy. (2015). *Tubo LED t8 60cm 9w: producto: Garperenergy*. Obtenido de Garper Energy web site: <http://www.garperenergy.com/producto/tubo-led-t8-60cm-9w/>
- Garper Energy Solution. (2015). *Casos de Éxito: Garper Energy*. Obtenido de Garper Energy Solution web site: <http://www.garperenergy.com/proyectos-ahorro-energetico/>
- Garzón, M. (20 de junio de 2008). *Desechos.net*. Recuperado el marzo de 2015, de http://www.desechos.net/news_items/26-opportunidades-para-colombia-con-proyectos-de-mecanismos-de-desarrollo-limpio
- Gatto, M. (24 de Febrero de 2011). *Piezoelectric roads for California*. Recuperado el diciembre de 2014, de Energy Harvesting Journal: <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/piezoelectric-roads-for-california-00003128.asp?sessionid=1>
- Gil, A. (octubre de 2009). *Historia de la Iluminación: Revista Digital Innovación y Experiencias Educativas*. Recuperado el noviembre de 2015, de http://www.csic-sif.es/andalucia/modules/mod_ense/revista/pdf/Numero_23/ANDRES_A_GIL_1.pdf
- Global, C. C. (2016). Recuperado el febrero de 2015, de <http://cambioclimaticoglobal.com/efecto-invernadero>
- Gómez, M. (s.f.). *Inecc*. Obtenido de Descargas: http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/cong_nal_06/tema_04/06_mario_gomez.pdf
- Google Earth. (2016). Recuperado el enero de 2016, de <https://www.google.com/maps>
- Grupo Enersa. (2015). *LED*. Recuperado el Enero de 2016, de grupo enersa: <http://www.grupoenersa.es/led/calculo-de-led/>
- Gutiérrez, J. A. (2013). *Baldosa Piezoeléctrica Para Alimentar Sistemas De Iluminación De Bajo Consumo Energético*. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Antioquia, Envigado. Recuperado el febrero de 2015
- Gutiérrez, M. (julio de 2014). *Repositorio Intitucional: Universidad de la Laguna*. Recuperado el octubre de 2015, de <http://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/1142/ILUMINACION%20LED.%20AHORRO%2c%20EFICIENCIA%20E%20INNOVACION.%20C2%BFPROYECTO%20DE%20MEJORA%20DE%20LA%20ILUMINACION%20DE%20UN%20HOTEL%20C2%BF.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hernández, A. L. (24 de agosto de 2013). *Blog Archive: Agosto, Energía piezoeléctrica, un nuevo concepto de ahorro energético*. Recuperado el octubre de 2014, de Master en Energías Renovables: <http://www.master-energias-renovables.com/>
- Herranz, C., Ollé, J., & Jáuregui, F. (2015). *Contenido: Biblioises*. Recuperado el octubre de 2015, de <http://www.biblioises.com.ar/Contenido/600/622/iluminacion%20con%20led.pdf>
- IDEAM, PNUD. (2012). *Inventario de Emisiones de Gases Efecto Invernadero para la Región Bogotá – Cundinamarca*. Informe Técnico, Cundinamarca, Bogotá. Recuperado el 2015

- IDEAM, PNUD. (11 de noviembre de 2015). Recuperado el febrero de 2016, de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023421/cartilla_INGEI.pdf
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2015). *IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA*. Bogotá.
- IDEAM; PNUD. (Noviembre de 2015). Recuperado el Diciembre de 2015
- IGAC. (1999). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*. Recuperado el 17 de 11 de 2015, de <http://www.igac.gov.co:10040/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/Mapas%20de%20Colombia/Mapas/Nacionales>
- INAPI. (2014). *Orientación*. Recuperado el 12 de Octubre de 2014, de INAPI: <http://www.inapi.cl/portal/orientacion/602/w3-article-693.html>
- IPCC. (2001). Recuperado el agosto de 2015, de <http://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf>
- IPCC. (2001). *Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Bonn. Recuperado el agosto de 2015
- IPCC. (2007). *Reporte Síntesis de Cambio Climático*. Suecia: Equipo de redacción principal, Rajendra K. Pachauri, Andy Reisinger.
- IPCC. (2011). *Reporte Síntesis de Cambio Climático*. Cambridge University.
- IPCC. (2014). Recuperado el febrero de 2016, de <https://www.ipcc.ch/report/graphics/index.php?t=Assessment%20Reports&r=AR5%20-%20Synthesis%20Report&f=SPM>
- IPCC. (2014). Recuperado el diciembre de 2015, de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014 Informe de Evaluación*. Recuperado el diciembre de 2015, de Intergovernmental panel of climate change: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_All_Topics.pdf
- Isagen. (2016). *Generando energía productiva*. Recuperado el febrero de 2016, de <https://www.isagen.com.co/nuestra-empresa/generacion-de-energia/>
- Jaiswal, S., Pundir, A., Saxena, S., & Gupta, R. (2015). Electro-Kinetic Road Ramp. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET)*, 221-223.
- Linares, P. (2009). Eficiencia Energética y Medio Ambiente. *Economía y Medio Ambiente*, 75-92. Recuperado el noviembre de 2015
- MADS. (13 de abril de 2015). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Recuperado el 13 de julio de 2015, de <http://www.minambiente.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=463&conID=7751>
- MADS. (2016). *Portafolio Colombiano de proyectos MDL 2016*. Bogotá: Dirección de Cambio Climático. Recuperado el mayo de 2016
- MAVDT. (2003). *Cambio climático, Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, Protocolo de Kioto y Mecanismo de Desarrollo Limpio*. (O. C. Climático, Ed.) Bogotá, Colombia.
- Menos wattios. (23 de Abril de 2014). Recuperado el Diciembre de 2015, de Menos wattios: <https://menoswattios.wordpress.com/2014/04/23/iluminacion-led-edificios/>
- Ministerio de Minas. (8 de Septiembre de 2015). *Normatividad: Minminas*. Obtenido de Minminas: <https://www.minminas.gov.co/normatividad>

- Minuto 30. (25 de enero de 2015). *Ciencia y tecnología*. Obtenido de Minuto 30: <http://www.minuto30.com/el-edificio-mas-grande-del-mundo-que-funciona-con-energia-solar-de-noches-es-espectacular-foto/305220/>
- Muerza, A. F. (19 de marzo de 2007). *Medio Ambiente: energía y ciencia*, página 12. Recuperado el octubre de 2014, de Eroski consumer: http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2007/03/19/160873.php
- Murcia, H. R. (15 de Enero de 2009). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus Perspectivas. *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*, 83-89. Recuperado el enero de 2016
- Oficina Desarrollo Planta Física. (2015). *Plano Campus Actualizado 2014*. Bogotá.
- Oficina Desarrollo Planta Física. (2 de Diciembre de 2015). *Planos Edificio Rafael Arboleda PUJ*. Bogotá.
- Pablo Andrés León Zapata, P. d. (noviembre de 2015). Paneles solares en la PUJ. (S. C. Ronald Velandía, Entrevistador) Bogotá.
- País, P. e. (1 de julio de 2015). Recuperado el febrero de 2016, de <http://www.elpais.com.co/elpais/cal/noticias/universidad-autonoma-premiada-por-implementacion-sistema-solar-fotovoltaico>
- Panasonic. (2016). *Panasonic multicrystalline panel*. Recuperado el 2016, de Panasonic: http://panasonic.net/ecosolutions/solar/polycrystalline_panel/#section03
- Parro. (2016). *Diccionario de arquitectura y construcción*. Obtenido de <http://www.parro.com.ar/definicion-de-vatiaje>
- Pavegen Systems. (2014). *Projects*. Recuperado el Sábado de 10 de 2014, de Pavegen Systems: <http://www.pavegen.com/projects>
- Paz. (Enero de 2012). Recuperado el 14 de Diciembre de 2015, de <http://www.clase911.com/CV/index.php/45-technologie/technologie/122-electricidad-autogenerada-el-tranque-en-las-grandes-ciudades-podran-ahora-generar-electricida>
- Philips. (22 de Mayo de 2014). *Noticias*. Obtenido de Philips: http://www.newscenter.philips.com/es_es/standard/news/press/2014/20140522-allianz-arena.wpd#.Vt2qhpx97IU
- Philips. (Octubre de 2014). *productos: lighting philips*. Obtenido de lighting philips: http://images.philips.com/is/content/PhilipsConsumer/PDFDownloads/Spain/lambms/ODLI20150901_001-UPD-es_ES-04_LEDBulb-GenIII.pdf
- Pontificia Unversidad Javeriana. (2016). *programas:javeriana*. Obtenido de javeriana web site: <http://www.javeriana.edu.co/programas/ventajas-de-estudiar-en-la-javeriana>
- Sanchez Pacheco, C. (2010). Recuperado el noviembre de 2014, de <http://hdl.handle.net/10334/503>
- Schreder Socelec. (2015). *Centro de formación*. Recuperado el Marzo de 2016, de Schreder Socelec: <http://www.schreder.com/ess-es/LearningCenter/Como-Illuminar/Pages/How-to-light-Monuments.aspx>
- Shcheneider Electric. (s.f). Recuperado el octubre de 2015, de <http://www.schneiderelectric.es/documents/local/soluciones/guia-soluciones-parque-fotovoltaico.pdf>
- Speed-Ramps. (2016). *Speed bump*. Recuperado el 7 de Enero de 2016, de Speed-Ramps: <http://www.speed-ramps.com/speed-bumps-to-generate-clean-energy>

- Tehseen, Ilahi, A., Afroz, M. U., Khan, A., Zafar, K., & Bakht, S. A. (2013). Generating Electricity through Harnessing of Kinetic. *International Journal of Modeling and Optimization*, 520-522.
- Tehseen, Ilahi, A., Afroz, M. U., Khan, A., Zafar, K., & Bakht, S. A. (2013). Generating Electricity through Harnessing of Kinetic. *International Journal of Modeling and Optimization*, 520-522.
- The Guardian. (8 de Febrero de 2009). *Environment*. Obtenido de The Guardian: <http://www.theguardian.com/environment/2009/feb/08/alternative-energy-speed-bumps>
- The Naked Scientists, University of Cambridge. (3 de Junio de 2006). *Interwies*. Obtenido de The Naked Scientists: <http://www.thenakedscientists.com/HTML/interviews/interview/377/>
- The Naked Scientists, University of Cambridge. (3 de Junio de 2006). *Interwies*. Obtenido de The Naked Scientists: <http://www.thenakedscientists.com/HTML/interviews/interview/377/>
- Torres, E., Sapiain, R., Schmidt, R., & Ovalle, R. (s.f). Recuperado el diciembre de 2014, de <http://www.olivos.cl/images/stories/noticias/02-2012/goteo-solar.pdf>
- Torres, J., & Gómez, A. (2008). *Adaptación al Cambio Climático: de los fríos y los calores en los Andes*. Perú: Lima: Soluciones Prácticas-ITDG. Recuperado el diciembre de 2015
- Treevolt. (2014). Obtenido de Treevolt: <http://treevolt.com/>
- Treevolt, & Guerra, W. (12 de marzo de 2016). Información sobre membranas de generacion de energía y datos. (R. Velandia, & S. Carrillo, Entrevistadores)
- UNEP. (2001). *Cambio Climático 2001: Mitigación*. Suiza.
- UNEP. (1 de febrero de 2016). *Actualización del Portafolio de Proyectos MDL en América Latina y el Caribe*. Recuperado el febrero de 2016, de <http://www.cdmpipeline.org/overview.htm>
- UNFCCC. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático*. Recuperado el 13 de abril de 2015, de <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- UNFCCC. (1998). Protocolo de Kioto de La Convención Marco de Naciones Unidas Sobre Cambio Climático. Recuperado el 5 de enero de 2015
- UNFCCC. (22 de junio de 2007). *Clean Development Mechanism*. Recuperado el diciembre de 2015, de http://cdm.unfccc.int/EB/032/eb32_repan10.pdf
- UNFCCC. (2012). *United nations Framework on Climate Change*. Recuperado el 14 de Abril de 2012, de http://unfccc.int/portal_espanol/informacion_basica/la_convencion/items/6196.php
- UNFCCC. (Abril de 2012). *UNFCCC*. Recuperado el 11 de Abril de 2012, de http://unfccc.int/portal_espanol/informacion_basica/protocolo_de_kyoto/items/6215.php
- UNFCCC. (2013). *Bases físicas Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del IPCC*.
- UNFCCC. (2015). *Aprobación del Acuerdo de París*. París: UN. Recuperado el mayo de 2016, de <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/109s.pdf>
- UNFCCC. (2015). *Eficiencia energética y medidas de cambio de combustible para edificios*.
- UNFCCC. (2016). *CDM Methodologies*. Recuperado el octubre de 2015, de <http://cdm.unfccc.int/methodologies/index.html>

- UNFCCC, CCEE. (2016). *Proyectos MDL en Colombia*. Bogotá. Recuperado el 2016, de <https://sites.google.com/a/ccee-colombia.org/www/anuncios/colombiaeselcuarto4paisdelatinoamericaennumero deproyectosmdlmecanismo de desarrollo limpio registrados antelaonuyel numero de ce12del mundo el sector energetico haregistrado56proyectosmdl>
- UNFCCC; PNUMA. (2014). Recuperado el noviembre de 2015, de Cambio Climático: <http://www.cambioclimatico.org/content/de-que-manera-las-actividades-humanas-producen-gases-de-invernadero>
- Universidad de Jaen. (s.f). Recuperado el 20 de Diciembre de 2015, de https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/images/tipos_cell.gif
- UPME & IDEAM. (2005). *UPME*. Recuperado el 22 de Abril de 2012, de http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/1-Atlas_Radiacion_Solar.pdf
- UPME. (2013). Recuperado el febrero de 2015, de http://www.siame.gov.co/Portals/0/Factor_CO2/Calculo%20del%20Factor%20de%20Emision_2009.pdf
- UPME. (2013). Factores de emisión del SIN Sistema Interconectado Nacional de Colombia. Bogotá. Recuperado el marzo de 2016, de http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi4s9DSuajLAhXLHx4KHRgZBdAQFggnMAI&url=http%3A%2F%2Fwww.siame.gov.co%2Fsiame%2Fdocumentos%2FCalculo_FE_SIN_2013_Nov2014.pdf&usg=AFQjCNE6eojBNNsYI2aVmc82VCBituCrf
- UPME. (2014). *Energía*. Ministerio de Minas y Energía, Cundinamarca, Bogotá.
- UPME. (2015). *Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano – junio de 2015*. Bogotá.
- UPME. (2015). *Proyección de Demanda de Energía Eléctrica en Colombia Revisión Octubre de 2015*. Bogotá.
- USDOE, FIRCO, SNL. (24 de Marzo de 2001). *New México State University*. Recuperado el 9 de Abril de 2012, de <http://solar.nmsu.edu/publications/guide1.pdf>
- VerLED. (2015). *LED*. Recuperado el enero de 2016, de <http://www.verled.es/content/20-tabla-comparativa-de-led>
- WebEcoist. (2016). *energy & fuel*. Recuperado el 16 de Febrero de 2016, de WebEcoist: <http://webecoist.momtastic.com/2009/09/09/driving-force-harvesting-kinetic-energy-from-passing-cars/>
- Wordpress Energías Renovables. (28 de marzo de 2009). Recuperado el noviembre de 2015, de <http://energiasrenovables.wordpress.com/2009/03/28/energia-solar-fotovoltaica/>
- Yuste, P. S. (2014). *Sertificados energéticos*. Recuperado el enero de 2015, de <http://www.certificadosenergeticos.com/led-iluminacion-eficiente>
- Zapata Valencia, D. R., & Bustamante Rueda, G. (2012). *Análisis De Viabilidad Para Desarrollo De Prototipo De Acera Que Produce Electricidad*. Universidad de San Buenaventura, Valle del Cauca, Buenaventura. Recuperado el octubre de 2015

Anexo I. Símbolos químicos y unidades científicas

Símbolos Químicos

C₂F₆	Perfloroetano
CFC	Clorofluorocarbonados
CH₄	Metano
CO₂	Dióxido de Carbono
H₂O	Vapor de Agua
HFC	Hidrofluorocarbonados
N₂O	Óxido nitroso
O₃	Ozono
PFC	Perflurocarbonados PFC
SF₆	Hexafluoruro de azufre

Fuente: autores

Unidades Científicas

°C	Grado Celsius (0°C = 273 °K aproximadamente)
Gt	Giga toneladas = 10 ⁹ toneladas
GWh	Giga vatio-hora
MW	Mega vatio
W	Vatio
kg	Kilo gramo
kWh	Kilo vatio-hora
J	Julios
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
t	Tonelada
g	Gramo
°K	Grado Kelvin
mm	Milímetros
Gg	Giga gramos = 10 ⁹ gramos = 1000 toneladas
CO₂ eq.	CO ₂ equivalente
GJ	Giga julios = 10 ⁶ kilojulios
L	Litro

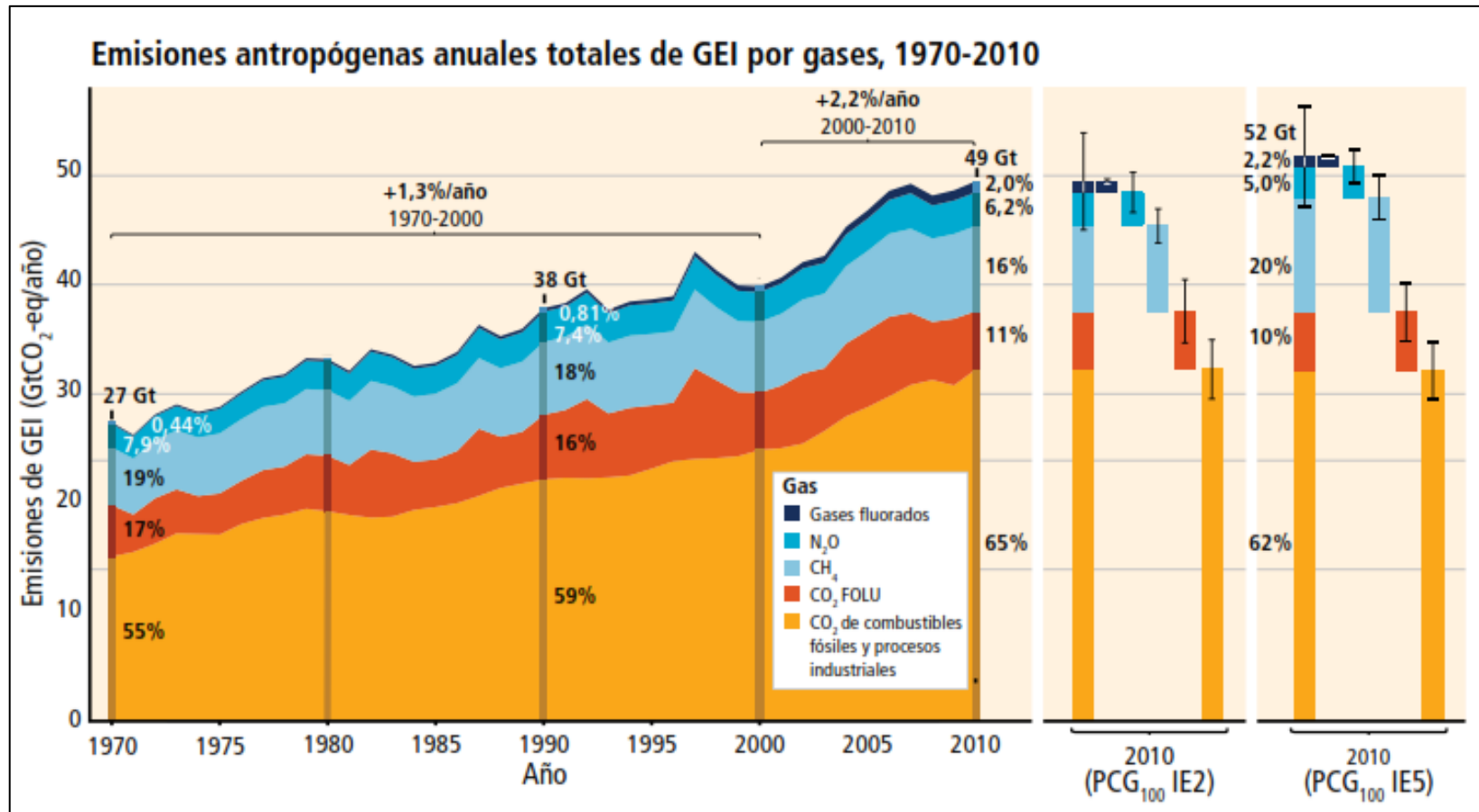
Fuente: autores

Unidades y equivalencias

1 m³	1.000 L
Factor de Emisión de CO₂ por el consumo de electricidad del SIN	0,2 kg de CO ₂ / kWh
Para la presente investigación se utilizara “.” para discriminar unidades de mil y “,” para decimales.	

Fuente: autores

Anexo II. Emisiones mundiales de GEI antropógenas



Fuente: (IPCC, 2014)

Anexo III. Emisiones anuales por país de GEI en el mundo

Países	Emisiones Anuales (t)	Porcentaje Total de Emisiones
Resto del Mundo	280.7603	33 %
EE.UU	1'481.608	17 %
China	2'259.856	26 %
Rusia	474.714	6 %
India	547.811	6 %
Japón	319.257	4 %
Alemania	203.268	2 %
Canadá	136.116	2 %
Reino Unido	134.580	2 %
Corea del Sur	154.777	2 %
Italia	110.801	1 %
Total	8'630.391	100 %


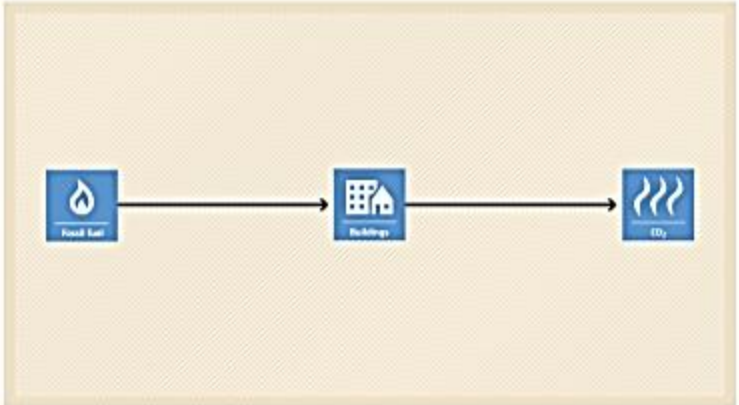
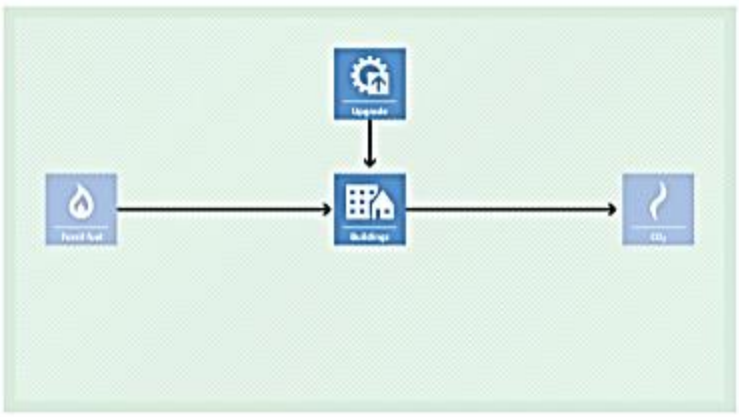
Fuente: adaptado por autores de (CDIAC, 2013)

Anexo IV. Distribución sectorial proyectos MDL en América Latina y el Caribe

<i>América Latina</i>	<i>Número</i>		<i>CREs Esperados (000) hasta finales del 2012</i>	
A forestación	3	0,34%	1,129	0,29%
Agricultura	0	0,0%	0	0%
Energía de Biomasa	153	17,32%	38,745	10,08%
Cemento	3	0,34%	1,180	0,31%
captura de CO2	3	0,34%	156	0,01%
Yacimientos de carbón /metano de minas	1	0,01%	2,200	0,57%
Distribución de energía	3	0,34%	962	0,25%
EE hogares	2	0,22%	1,654	0,43%
EE industria	14	1,57%	2,350	0,61%
EE autogeneración	19	2,14%	8,849	2,3%
EE servicios	1	0,01%	9	0,01%
EE oferta	14	1,57%	7,764	2,02%
sustitución de combustible fósil	16	1,79%	3,846	1,00%
Fugas	7	0,79%	1,709	0,44%
Geotermal	4	0,45%	3,668	0,95%
HFCs	2	0,01%	21,479	5,59%
Hídrico	211	23,73%	54,860	14,28%
Gas de rellenos sanitarios	124	13,95%	110,163	28,67%
Metano evitado	219	24,63%	49,163	12,79%
N2O	9	1,01%	44,827	11,66%
PFCs y SF6	5	0,56%	1,599	0,41%
Reforestación	15	1,69%	6,037	1,57%
Solar	1	0,01%	5	0,01%
Tidal	0	0,0%	0	0%
Transporte	12	1,35%	4,382	1,14%
Eólica	48	5,39%	17,605	4,58%
Total	889	100%	384,3	100%

Fuente: (UNEP, 2016)

Anexo V. Metodología AMS II. E

<p>United Nations Framework Convention on Climate Change</p>		<p>CDM Methodology Booklet November 2015 (up to EB 95)</p>		<p>AMS-II.E.</p>	
<p>AMS-II.E. Energy efficiency and fuel switching measures for buildings</p>					
<p>Typical project(s)</p>	<p>Installation of, or replacement or retrofit of, existing equipment with energy efficiency (e.g. efficient appliances, better insulation) and optional fuel switching (e.g. switch from oil to gas) measures in residential, commercial or institutional buildings.</p>				
<p>Type of GHG emissions mitigation action</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Energy efficiency. • Electricity and/or fuel savings through energy efficiency improvement. • Optionally, use of less-carbon-intensive fuel. 				
<p>Important conditions under which the methodology is applicable</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Energy use within the project boundary shall be directly measured; • The impact of the implemented measures (improvements in energy efficiency) can be clearly distinguished from changes in energy use due to other variables not influenced by the project. 				
<p>Important parameters</p>	<p>At validation:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Energy use of buildings before the project implementation; • If grid electricity is consumed: grid emission factor (can also be monitored ex post). <p>Monitored:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Specifications of the equipment replaced or retrofitted (only for replacement or retrofit projects); • Energy use of buildings after the project implementation. 				
<p>BASELINE SCENARIO Use of less-efficient and/or more-carbon-intensive equipment in buildings.</p>	 <pre> graph LR A[Fuel Fuel] --> B[Buildings] B --> C[CO2] </pre>				
<p>PROJECT SCENARIO Use of more-efficient and/or less-carbon-intensive equipment in buildings.</p>	 <pre> graph TD D[Upgrade] --> B[Buildings] A[Fuel Fuel] --> B B --> C[CO2] </pre>				

TYPE II - ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT PROJECTS

Project participants shall take into account the general guidance to the methodologies, information on additionality, abbreviations and general guidance on leakage provided at <http://cdm.unfccc.int/methodologies/SSCmethodologies/approved.html>.

II.E. Energy efficiency and fuel switching measures for buildings

Technology/measure

1. This category comprises any energy efficiency and fuel switching measure implemented at a single building, such as a commercial, institutional or residential building, or group of similar buildings, such as a school, district or university. This category covers project activities aimed primarily at energy efficiency; a project activity that involves primarily fuel switching falls into category III.B.¹ Examples include technical energy efficiency measures (such as efficient appliances, better insulation and optimal arrangement of equipment) and fuel switching measures (such as switching from oil to gas). The technologies may replace existing equipment or be installed in new facilities. The aggregate energy savings of a single project may not exceed the equivalent of 60 GWh per year.
2. This category is applicable to project activities where it is possible to directly measure and record the energy use within the project boundary (e.g. electricity and/or fossil fuel consumption).
3. This category is applicable to project activities where the impact of the measures implemented (improvements in energy efficiency) by the project activity can be clearly distinguished from changes in energy use due to other variables not influenced by the project activity (signal to noise ratio).

Boundary

4. The project boundary is the physical, geographical site of the building(s).

Baseline

5. The energy baseline consists of the energy use of the existing equipment that is replaced in the case of retrofit measures and of the facility that would otherwise be built in the case of a new facility.
6. Each energy form in the emission baseline is multiplied by an emission coefficient. For the electricity displaced, the emission coefficient is calculated in accordance with provisions under category I.D. For fossil fuels, the IPCC default values for emission coefficients may be used.

Leakage

7. If the energy efficiency technology is equipment transferred from another activity or if the existing equipment is transferred to another activity, leakage is to be considered.

¹ Thus, fuel-switching measures that are part of a package of energy efficiency measures at a single location may be part of a project activity included in this project category.

Monitoring

1. In the case of retrofit measures, monitoring shall consist of:
 - (a) Documenting the specifications of the equipment replaced;
 - (b) Calculating the energy savings due to the measures installed.
2. In the case of a new facility, monitoring shall consist of:
 - (a) Metering the energy use of the building(s);
 - (b) Calculating the energy savings of the new building(s).

Project activity under a programme of activities

The following conditions apply for use of this methodology in a project activity under a programme of activities:

8. In case the project activity involves fossil fuel switching measures leakage resulting from fuel extraction, processing, liquefaction, transportation, re-gasification and distribution of fossil fuels outside of the project boundary shall be considered. The guidance provided in the leakage section of ACM009 as in annex 1 of this document shall be followed in this regard.

In case the project activity involves the replacement of equipment, and the leakage effect of the use of the replaced equipment in another activity is neglected because the replaced equipment is scrapped, an independent monitoring of scrapping of replaced equipment needs to be implemented. The monitoring should include a check if the number of project activity equipment distributed by the project and the number of scrapped equipment correspond with each other. For this purpose scrapped equipment should be stored until such correspondence has been checked. The scrapping of replaced equipment should be documented and independently verified.

Anexo VI. Inventario de luminarias y demanda energética por iluminación del edificio Rafael Arboleda, PUJ

Tipo de luminaria actual	Cantidad de lámparas	Número de luminarias actuales por lámpara	Total de luminarias actuales	Demanda por luminarias actuales (w)	Demanda total por lámpara (w)	Demanda total (w)
Tubo T3	875	4	3.500	17	68	59.500
Tubo T5	601	2	1.202	24	48	28.848
Tubo 26w	127	2	254	26	52	6.604
Tubo 32w	20	7	140	32	224	4.480
Lámparas 653 50w 12v	47	1	47	50	50	2.350
Lámparas Dicroicas 50w 12v	7	1	7	50	50	350
Bombillo Ahorrador en Espiral	18	1	18	20	20	360
Balas LED Blancas	95	1	95	11	11	1.045
Total	1.790		5.263		523	103.537

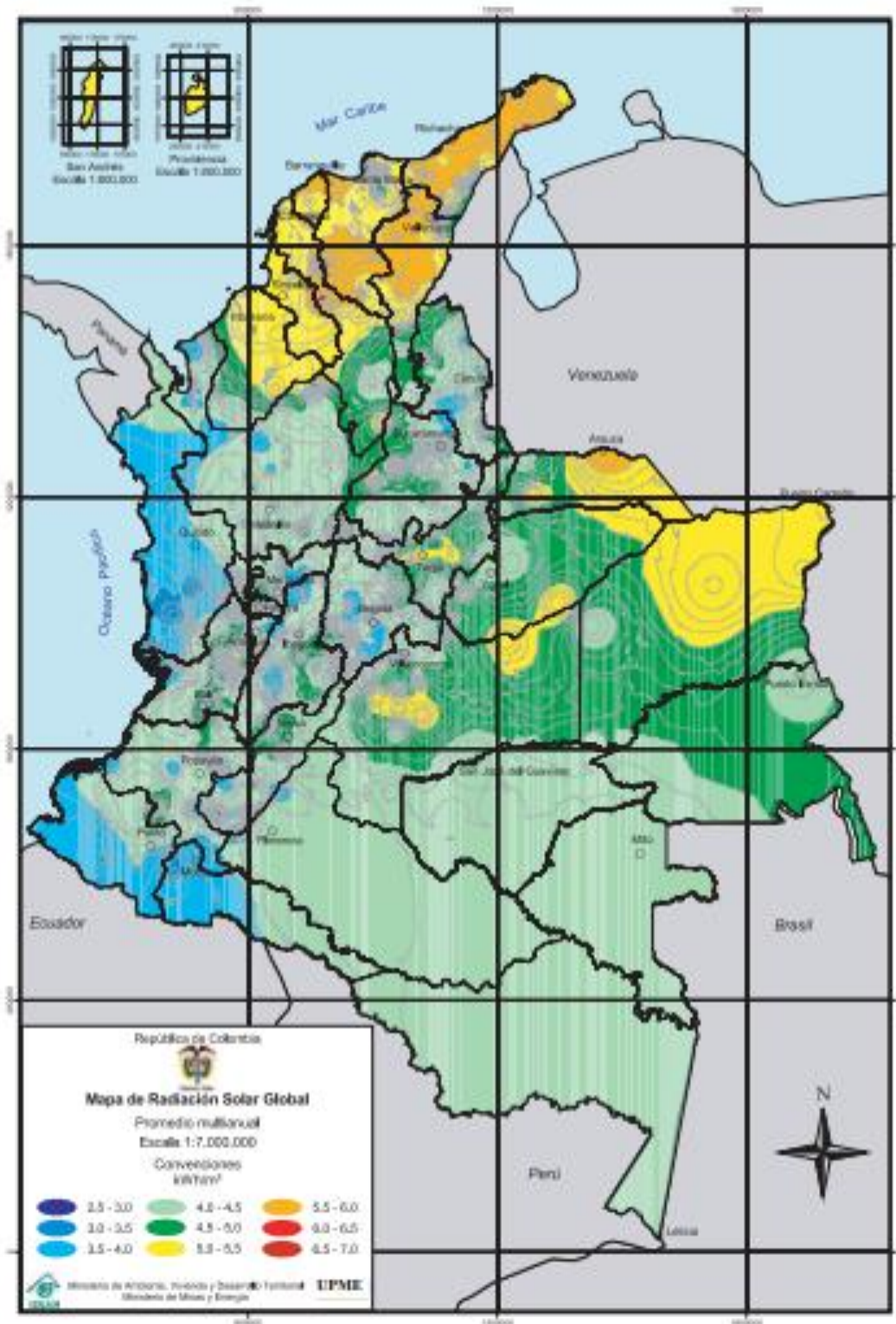
Fuente: (Dirección de recursos físicos campus universitario, 2015)

Anexo VII. Costos de luminarias LED

Tipo Luminaria	Cantidad de lámparas	Número de luminarias actuales por lámpara	Total de luminarias actuales	Equivalencia en consumo LED (w)	Costo unitario luminaria LED (\$)	Costo Total (\$)
Tubo T3	875	4	3.500	9	33.872	118'552.000
Tubo T5	601	2	1.202	12	54.520	65'533.040
Tubo 26w	127	2	254	12	54.520	13'848.080
Tubo 32w	20	7	140	15	46.168	6'463.520
Lámparas 653 50w 12v	47	1	47	22	59.000	2'773.000
Lámparas Dicroicas 50w 12v	7	1	7	22	59.000	413.000
Bombillo Ahorrador	18	1	18	10	14.000	252.000
Balas LED Blancas	95	1	95	11	0	0
Total	1.790		5.263	254	312.508	207'834.640

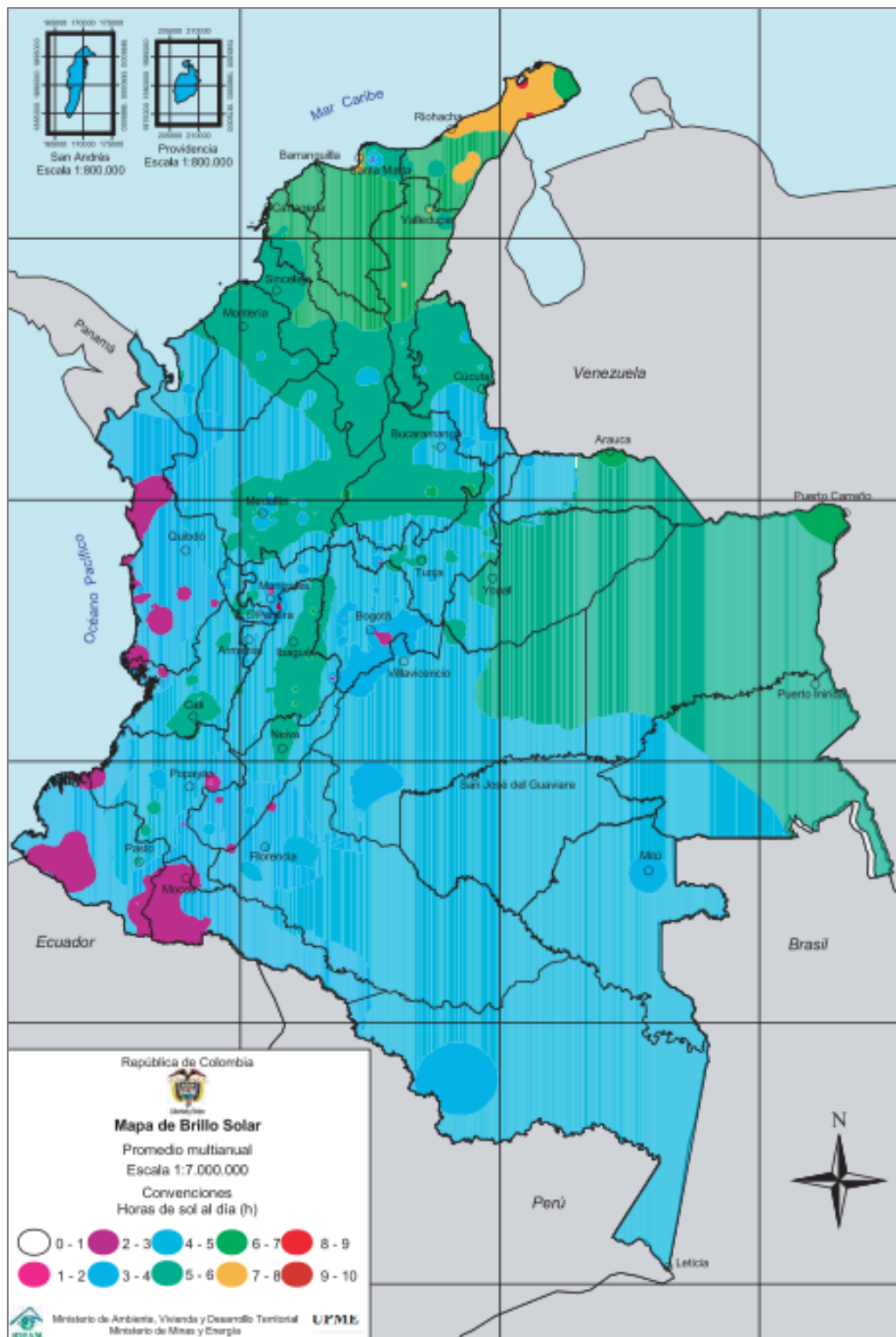
Fuente: autores, adaptado de (Colombialeds, 2015), (Garper Energy, 2015) y (Philips, 2014)

Anexo VIII. Mapa promedio multianual de radiación solar en Colombia



Fuente: (UPME & IDEAM, 2005)

Anexo IX. Mapa promedio multianual de horas de sol en Colombia



Fuente: (UPME & IDEAM, 2005)

Anexo X. Fotografías piso 9 edificio Rafael Arboleda (cubierta)

Fotografía 1. Cubierta edificio Rafael Arboleda



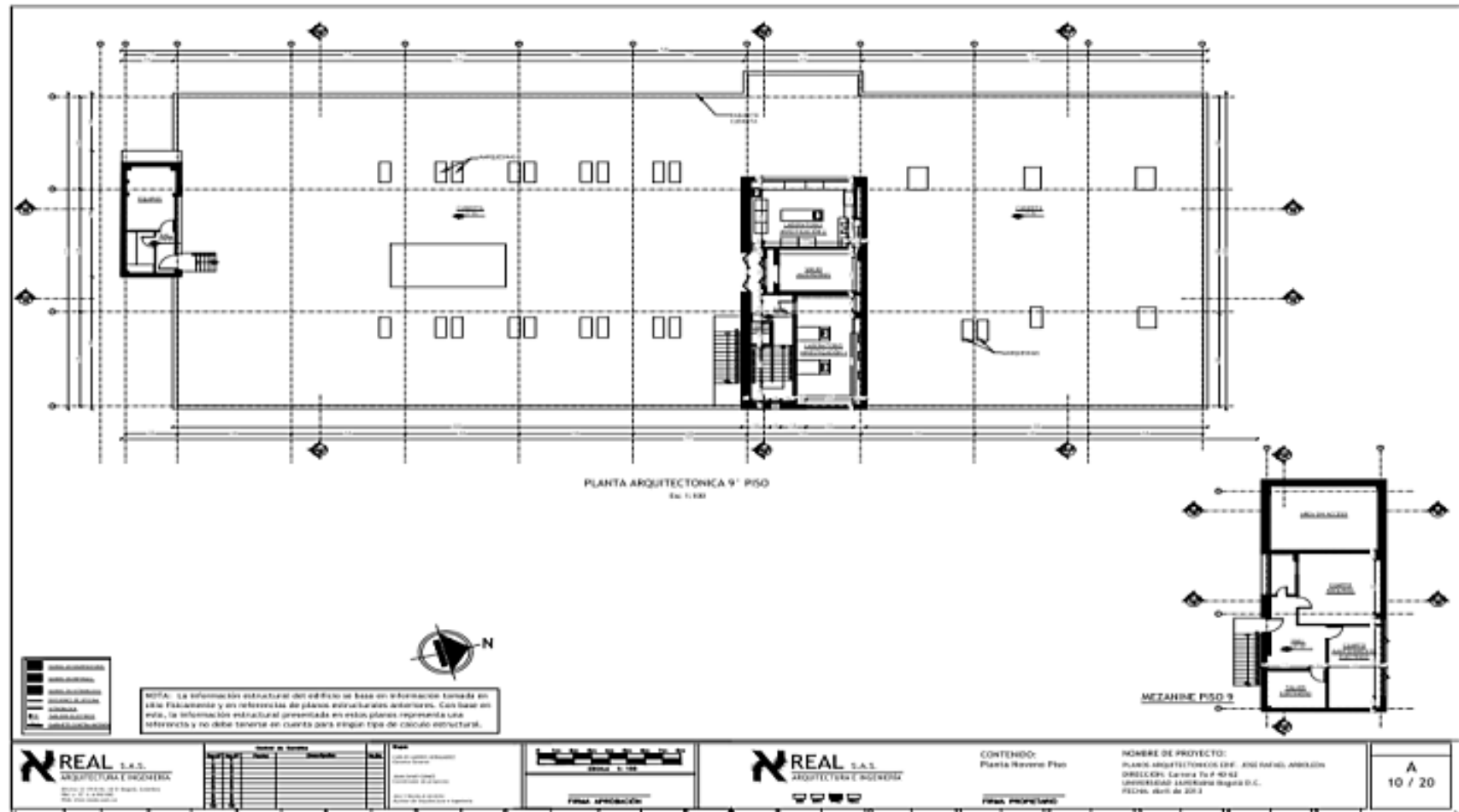
Fuente: autores

Fotografía 2. Cubierta edificio Rafael Arboleda



Fuente: autores

Anexo XI. Diseño del piso 9 edificio Rafael Arboleda (cubierta)



Fuente: (Oficina Desarrollo Planta Física, 2015)

Anexo XII. Áreas del edificio Rafael Arboleda

CUADRO DE AREAS EDIFICIO ARBOLEDA	
SOTANO	378,54
PISO 1	1052,00
PISO 2	1134,29
PISO 3	1489,00
PISO 4	1837,96
PISO 5	1550,10
PISO 6	1512,88
PISO 7	1394,75
PISO 8	1393,88
PISO 9	150,00
PISO 9 Mezzanine	131,65
CUBIERTA	1381,00
TOTAL	13406,05
SOTANO	378,54
AREAS DE SOPORTE	22,61
ASCENSORES	7,82
ESCALERAS	9,56
DEPOSITO	5,23
LABORATORIOS Y OFICINAS	258,97
BAÑOS	23,27
ZONAS COMUNES	73,69

Fuente: (Oficina Desarrollo Planta Física, 2015)

Anexo XIII. Especificaciones de paneles solares Panasonic

The key features for Panasonic multicrystalline panel

Specification			
Model	VBMS260AE04	VBMS255AE04	VBMS250AE04
Pmax	260W	255W	250W
Module Efficiency	15.8%	15.5%	15.3%
Temp Coeff. [%/C]	-0.446		
Dimension	1665x991x38 mm		
Weight	18kg		
Wind/Snowload	2400Pa (Maximum up to 3100Pa)		
System Voltage	1000V		
Warranty	10 Years Workmanship, 25 Years Power Output		
Certificate	IEC 61215, IEC 61730, IEC 61701(salt mist)		



Fuente: (Panasonic, 2016)

BATERÍAS / ESTACIONARIAS / BAE SECURA PVS BLOCK SOLAR

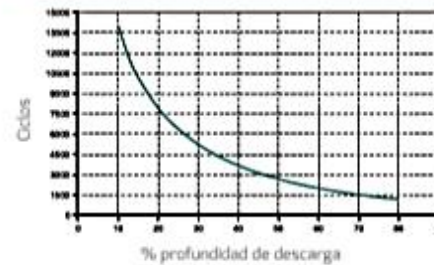


Las baterías BAE SECURA BLOCK SOLAR son baterías de bajo mantenimiento usadas para almacenar energía eléctrica en pequeñas instalaciones de energías renovables.

Debido al robusto diseño de las placas, estas baterías son una excelente elección para altos requerimientos de ciclaje y una larga vida útil.



NÚMERO DE CICLOS EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE DESCARGA



DISEÑO

- Placa positiva - Placa positiva tubular protegida con funda de poliéster y rejilla de aleación de bajo contenido en antimonio, la dotan de una sólida resistencia a la corrosión.
- Placa negativa - Placa tipo rejilla con una aleación con bajo contenido en antimonio y un material expandible de larga duración.
- Separación - Separador micro poroso.
- Electrolito - Ácido sulfúrico con una densidad de 1,24 kg/l a 20 °C.
- Contenedor - Transparente y con una alta resistencia a los impactos, SAN y UL-94 rating: HB.
- Tapones - Tapones con laberinto para detener aerosoles; opcionalmente se pueden suministrar tapones cerámicos de ventilación con o sin embudo.
- Bornes - BAE Panzerpol- 100% resistentes a gas y electrolito, deslizante, revestimiento de plástico.
- Protección - IP 25 conforme a la norma EN 60529, protección contra contactos conforme a la norma VBG 4.

Fuente: (Bornay, 2016)

Modelo	Capacidad Nominal C ₁₀ 1.80 V/C Ah.	Capacidad Nominal C ₁₀₀ 1.80 V/C Ah.	Capacidad Nominal C ₁₂₀ 1.80 V/C Ah.	l	b/w	H*	Peso vaso incl. Ácido aprox.	Resistencia Interna (mohm)	Corriente Corto Circuito (kA)
12V 1 PVS 70	56	71	72	272	205	385	41	16.62	0.75
12V 2 PVS 140	109	140	140	272	205	385	47.6	8.91	1.40
12V 3 PVS 210	167	215	217	380	205	385	69.4	6.27	1.99
6V 4 PVS 280	223	287	289	272	205	385	46.5	2.47	2.52
6V 5 PVS 350	279	359	361	380	205	385	60.4	2.09	2.98
6V 6 PVS 420	334	431	434	380	205	385	66.5	1.82	3.42

INSTALACIÓN

Las baterías BAE SECLURA PVS solar están diseñadas para instalaciones interiores. Para instalaciones exteriores, puede contactar con nuestros comerciales.

MANTENIMIENTO

- Cada 6 meses comprobar el voltaje de los elementos así como la temperatura.
- Cada 12 meses comprobar las conexiones, comprobar el voltaje de los elementos así como la temperatura.
- Cada 3 años, rellenar el electrolito (Variará en función de la utilización y la temperatura)

DATOS OPERATIVOS

- Profundidad de descarga - Max. 80 % (Ue = 1.91 V/elemento para periodos de descarga >10 h; 1.80 V/elemento para 1 h)
- Descargas profundas de más del 80 % deben evitarse.
- Corriente de carga - limitada, la mínima corriente de carga debe de ser 5A/100 Ah C₁₀.
- Voltaje de carga en operación cíclica - Restringido entre 2.30 V a 2.40 V por elemento, revisar las instrucciones de operación.
- Voltaje de flotación - 2.23 V/elemento.
- Ciclos - 2700 conforme a IEC 61427.
- Temperatura - -20 °C a 55 °C, rango de temperatura recomendado entre 10 °C y 30 °C.
- Autodescarga - Aprox. 3 % por mes a 20 °C.

NORMATIVA

- Norma de test - IEC 60896-11, IEC 61427
- Norma de seguridad - EN 50272-2



12 V 1 PVS 70 to 12 V 3 PVS 210



6 V 4 PVS 280 to 6 V 6 PVS 420



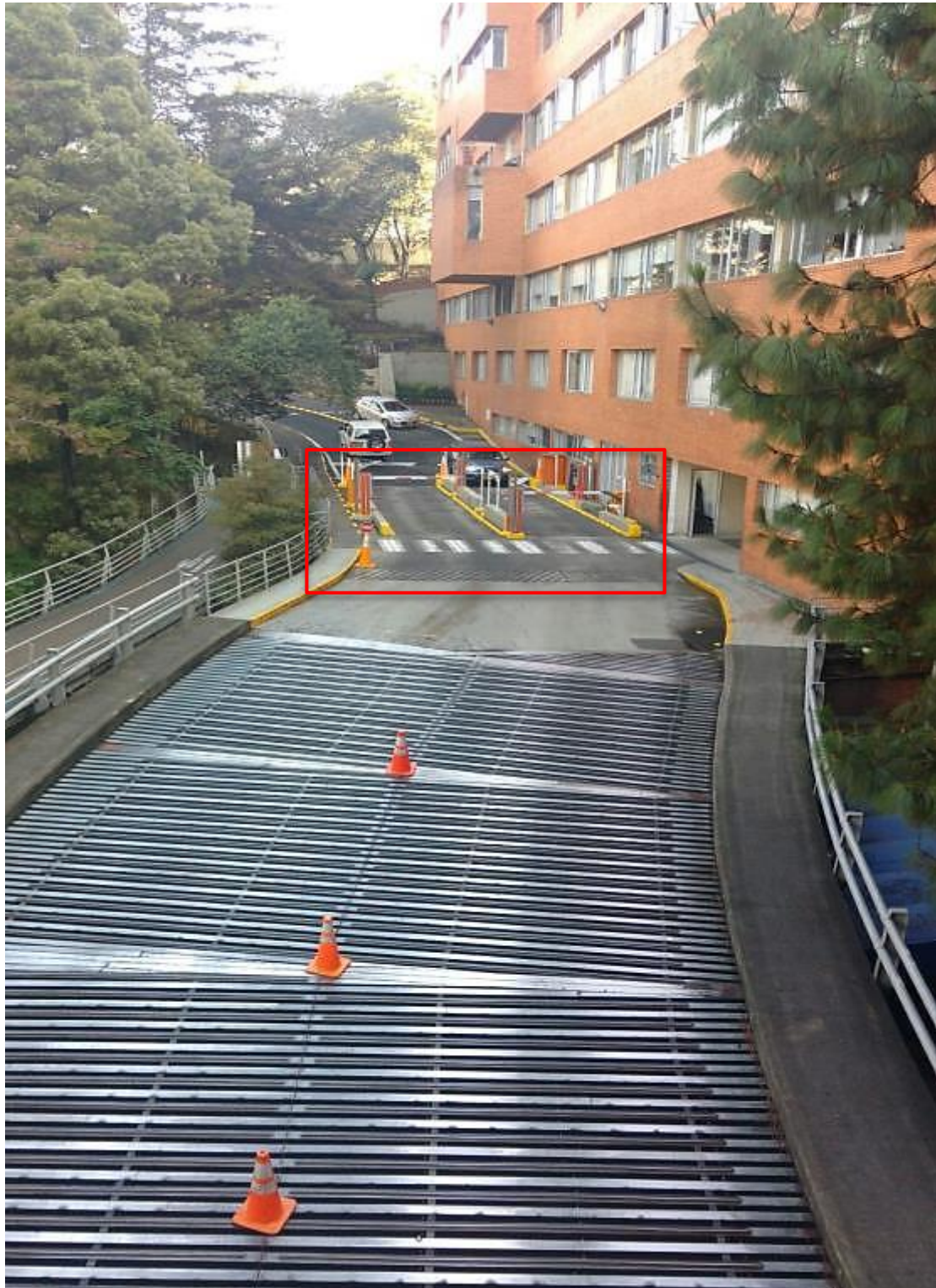
Anexo XV. Flujo vehicular entrada norte del parqueadero de la PUJ

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
12:00 - 01:00 am.	15	14	19	11	16	2	1
01:00 - 02:00 am.	13	9	11	7	11	1	0
02:00 - 03:00 am.	9	6	11	10	8	3	0
03:00 - 04:00 am.	12	7	10	8	15	2	1
04:00 - 05:00 am.	10	9	12	13	17	2	3
05:00 - 06:00 am.	20	18	36	38	31	13	1
06:00 - 07:00 am.	306	312	304	311	309	226	2
07:00 - 08:00 am.	283	278	268	272	276	245	32
08:00 - 09:00 am.	193	189	187	202	191	137	26
09:00 - 10:00 am.	207	203	188	196	189	111	19
10:00 - 11:00 am.	197	202	194	208	193	119	25
11:00 - 12:00 am.	169	157	174	162	159	139	22
12:00 - 01:00 pm.	195	202	189	207	198	117	46
01:00 - 02:00 pm.	137	141	139	143	135	98	23
02:00 - 03:00 pm.	148	153	152	150	141	62	9
03:00 - 04:00 pm.	157	149	153	146	139	43	5
04:00 - 05:00 pm.	202	213	205	216	209	41	2
05:00 - 06:00 pm.	299	274	268	269	261	25	3
06:00 - 07:00 pm.	150	179	203	183	169	20	0
07:00 - 08:00 pm.	172	185	195	177	193	13	0
08:00 - 09:00 pm.	71	53	76	79	70	2	0
09:00 - 10:00 pm.	63	38	44	55	60	3	2
10:00 - 11:00 pm.	42	27	51	41	39	2	4
11:00 - 12:00 pm.	29	15	38	39	27	4	2
Total	3099	3033	3127	3143	3056	1430	228

Fuente: (Coordinación de Parqueaderos, 2016)

Anexo XVI. Fotografías de la entrada vehicular norte del parqueadero privado de la PUJ

Fotografía 3. Entrada vehicular norte – foto 1



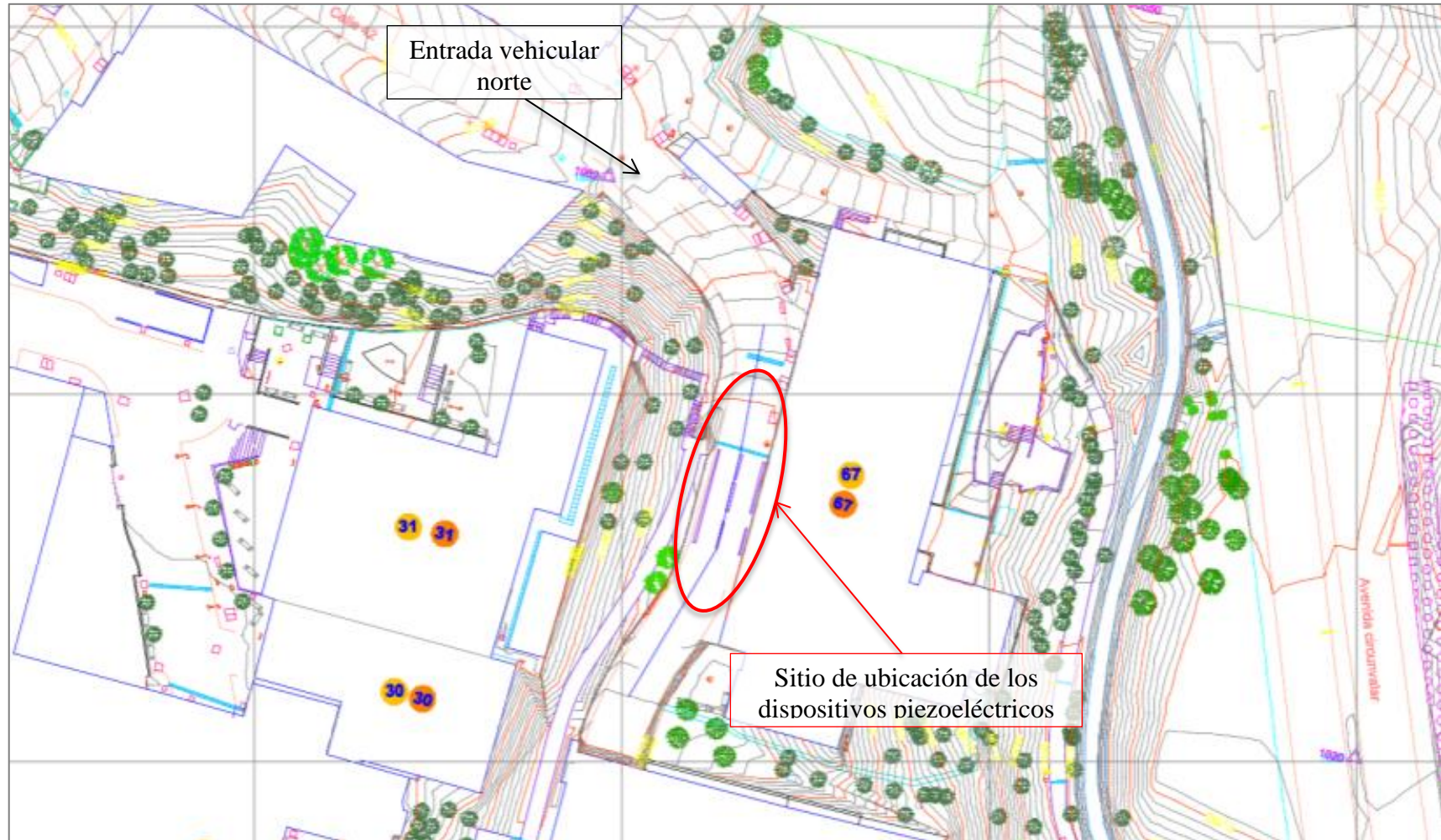
Fuente: autores

Fotografía 4. Entrada vehicular norte – foto 2



Fuente: autores

Anexo XVII. Diseño de la entrada vehicular norte del parqueadero privado de la PUJ



Fuente: (Oficina Desarrollo Planta Física, 2015)

Anexo XVIII. Especificaciones baldosas piezoeléctricas

Ronald Velandia <ronaldvelandia@gmail.com>

Información sobre membranas de generación de energía y datos

william david guerra perez <wguerra@treevolt.com>
Para: Ronald Velandia <ronaldvelandia@gmail.com>12 de marzo de 2016, 16:21

Saludos Roland,

Un cristal piezoeléctrico de 1x1cm y espesor 2mm puede generar hasta 0.5J de energía. Te invito a que con esta información pienses cuentos podrían ir en la entrada de un parqueadero, en una vía o donde los quieras poner. Recuerda que estos cristales necesitan ser deformados y a la vez protegidos de las inclusiones externas para que se rompan, etc.

Las medidas de los tapetes que instalamos en la ciudad de Medellín son: 33X22cm y cada uno tenía 16 nodos. En cada nodo podíamos poner hasta 2 cristales al tiempo.

Lastimosamente no te puedo compartir mucha de la información que me pides porque hace parte del modelo de negocios que actualmente está siendo evaluado y es confidencial.

Cualquier cosa me escribes.

[El texto citado está oculto]
--

William D. Guerra P.
CTO
Phone (+57) 3197991136
wguerra@treevolt.com
www.treevolt.com

"The content of this message, and any attached file(s), belong to TREEVOLT S.A.S. and may be privileged and confidential information, and is intended only for the person or entity to which it is addressed. If you are not the intended recipient, please contact the sender, and delete it immediately. Any withholding, disclosure, retransmission, dissemination, review or other use of, is prohibited. The messages and attached files from TREEVOLT S.A.S. are always checked with antivirus programs. However, if you are the real recipient, please check. Accordingly, TREEVOLT S.A.S. is not responsible for the damage, the presence of any virus may cause to the recipient's equipment or software. Any concept or opinion which may cause any inconvenience, the sender, as a natural person, will be the only responsible."

"Este mensaje, y cualquier archivo que se adjunte al mismo es confidencial y podría contener información privilegiada y reservada de TREEVOLT S.A.S., para el uso exclusivo de la persona o empresa a la cual está dirigido. Si usted ha recibido este mensaje por error le solicitamos comedidamente avisarnos, retenerlo y abstenerse de distribuirlo o divulgarlo en cualquier forma. Por favor proceda a borrar su contenido inmediatamente. Los sistemas de TREEVOLT S.A.S. son siempre revisados con programas antivirus; no obstante, el destinatario debe examinar el mensaje, por cuanto TREEVOLT S.A.S. no se hace responsable en ningún caso por los eventuales daños derivados de su recepción. Todo concepto de carácter personal que llegue a generar perjuicio a un tercero, el único responsable será el emisor, en su condición de persona natural."

Fuente: (Treevolt & Guerra, 2016)

Anexo XIX. Especificaciones EKRR

B. Software Model

Allen Bradley SLC 503 PLC is used for monitoring & controlling of the system[5] and a PC-Based HMI is connected with it for displaying the process.

Whole system is fully automated with programmable logic controller PLC.

The Software's that are used for Automation are listed below:

R SLinx Classic : Diver installer
 RSLogix 500 : Ladder Programmer
 R SLogix Emulate 500 : Offline Simulator.
 R SV iew 32 : PC-Based HMI Display

The Modules that are used in SLC 503 are listed below:

1747-L532 (SLC 503 Processor)
 1746-IB16 (Digital de Input Modules)
 1746-OB16 (Digital de Output Modules)
 1746-NI4 (Analog Input Modules)

The rotation reader provided pulses that are the digital input of the 1746-IB16 module. PLC is programmed that the pulses is converted into rpm and are displayed on the PC-Based HMI.

When a car passes over the slab, the limit switch is pressed then the limit switch signals sends to the digital input (1746-IB16) module of PLC. Finally number of cars displayed on the PC-Based HMI.

IV. RESULT AND DISCUSSION

When one vehicle passes over the ramp, it produces 12-14 volts & 8-10 amperes for 2x4 seconds

- One car produce 12-14v and 9A in 2seconds
- One car produce Power of 240W (vehicle pushes twice a slab).
- 500W 43AH battery will charge in 4 hours.

The hour's calculation is determined by:

$$\text{Hours} = \text{AH rating} / \text{load current}$$

where Hours is the life of battery. AH rating is the Ampere Hour rating of battery [6].

110watts bulb glow for 4hour & 30 minutes



Fig. 5. System implemented at ground

B. SOFTWARE MODEL

A Limit switch is placed below the slab for the counting of the cars. When a car passes over the slab, the limit switch is pressed then the limit switch signals sends to the digital input (1746-IB16) module. Allen Bradley SLC 503 PLC is used for monitoring & controlling of the system and a PC-Based HMI is connected with it for displaying the process.

Whole system is fully automated with programmable logic controller PLC. When a car passes over the slab, the limit switch is pressed then the limit switch signals sends to the digital input (1746-IB16) module of PLC. Finally number of cars displayed on the PC-Based HMI.

The Software's that are used for Automation are listed below:

R SLinx Classic : Diver installer

IV. RESULTS AND DISCUSSION

One car produces 12-14 volts and 9 amperes in 2 seconds. When one vehicle passed it produces 12-14 volts and 9 amperes in 2.4 seconds. One car produces power of 240 W Kinetic Energy:

K.E produce in flywheel, $E(\text{rotational}) = 1/2 I \omega^2$ where ω is the angular speed

I am the moment of inertia around the axis of rotation. E is the kinetic energy.

Angular speed:

Angular speed produced in Flywheel is 900 which means $\omega = 94.2 \text{ rad/s}$

$$I = mr^2$$

M = mass of flywheel (3kg) r = radius of flywheel (8inch) $I = (3\text{kg})(0.08\text{m})^2 \approx 0.02 \text{ kg m}^2$

$$\text{Input} = \text{K.E} = 1/2 (0.02)(94.2)^2 = 88 \text{ J}$$

Fuente: (Tehseen, y otros, Generating Electricity through Harnessing of Kinetic, 2013), (Jaiswal, Pundir, Saxena, & Gupta, 2015)