

**Proyecto de factibilidad técnica de un modelo de autoproducción y suministro eléctrico  
de pequeña escala de paneles solares con aplicación a Transmilenio.**

Autores:

María José Cuellar Silva

Javier Ricardo De Moya Orozco

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Especialización Gerencia de Proyectos

Docente

Luz Marina Sánchez Ayala

Bogotá D.C.

Mayo 2023

**Tabla de contenido.**

<b>1. RESUMEN:</b> .....	4
<b>2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b> .....	6
<b>3. OBJETIVOS.</b> .....	8
<b>3.1 Objetivo general.</b> .....	8
<b>3.2 Objetivos específicos.</b> .....	8
<b>4. JUSTIFICACIÓN</b> .....	9
<b>4.1 Conveniencia de la investigación</b> .....	10
<b>5. MARCO TEÓRICO</b> .....	12
<b>5.1 Marco organizacional</b> .....	19
<b>6. METODOLOGÍA</b> .....	21
<b>7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS</b> .....	24
<b>7.1 Medio ambiente legal</b> .....	24
<b>7.2 Factibilidad técnica</b> .....	26
<b>7.3 Ámbito Comercial</b> .....	41
<b>8. ANEXOS</b> .....	¡Error! Marcador no definido.

## Lista de tablas

Tabla 1 Demanda de suministro eléctrico .....	19
Tabla 2 Valores promedio de brillo solar diario .....	28
Tabla 3 Radiación solar promedio diaria. ....	29
Tabla 4 Configuraciones por vagones TransMilenio. ....	36
Tabla 5 Electricidad producida por cada panel solar .....	38
Tabla 6 Número de paneles necesarios .....	39

## Lista de ilustraciones

Ilustración 1 Brillo Solar. ....	30
Ilustración 2 Radiación Solar promedio.....	30
<i>Ilustración 3 Dimensiones vagones TransMilenio.....</i>	32
<i>Ilustración 4 Patrones de configuración TransMilenio.....</i>	32
Ilustración 5 Configuración vagones Fase I.....	33
Ilustración 6 Configuración vagones Fase II .....	33
Ilustración 7 Configuración vagones Fase II .....	34
Ilustración 8 Configuración vagones Fase II .....	34
<i>Ilustración 9 Consumo estación W-1, W-2 .....</i>	35
Ilustración 10 Consumo estación W-3, W-4 .....	35
Ilustración 11 Ficha técnica panel solar .....	38

## **1. RESUMEN:**

La dependencia energética del modelo actual de producción eléctrica y la insostenibilidad ambiental son producto de la permanencia activa de la forma en la que se ha venido obteniendo la electricidad que consumimos diariamente, no existen mecanismos alternativos que puedan ofrecerla de forma segura y prolongada. Este proyecto busca evaluar la factibilidad técnica de un modelo de autoproducción y suministro eléctrico de pequeña escala de paneles solares con aplicación a TransMilenio.

Se desarrolló bajo un enfoque mixto, es decir, existe convergencia en la recolección y análisis de los datos cualitativos y cuantitativo. Entre los principales resultados encontrados están, la existencia de normativas que incentivan la implementación de dichos proyectos de energía renovables en el país.

De igual forma, se identifica que es factible; la implementación de un sistema adecuado de paneles fotovoltaico, ya que permite suplir gran parte de la demanda eléctrica de las estaciones o su totalidad con las debidas recomendaciones que el documento propone.

Palabras claves: Energías limpias, energía eólica, autoproducción, suministro eléctrico de pequeña escala, TransMilenio.

## **SUMMARY**

The energy dependence of the current model of electricity production and environmental unsustainability are the result of the active permanence of the way in which the electricity we consume daily has been obtained, there are no alternative mechanisms that can offer the safe and prolonged way. This project seeks to evaluate the technical feasibility of a model of self-production and small-scale electricity supply with solar panels with application to TransMilenio.

It was developed under a mixed approach, that is, there is convergence in the collection and analysis of qualitative and quantitative data. Among the main results found are the existence of regulations that encourage the implementation of said renewable energy projects in the country.

In the same way, it is identified that it is feasible; the implementation of an adequate system of photovoltaic panels, since it allows supplying a large part of the electricity demand of the stations or all of it with the appropriate recommendations that the document proposes.

Keywords: Clean energy, wind energy, self-production, small-scale electricity supply, TransMilenio.

## 2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Aproximadamente cerca de un 70% de la electricidad que se produce en el país, se obtiene por medio de las centrales hidroeléctricas que desde finales de los años veinte se han venido construyendo, en cuyo caso es evidente la dependencia del recurso hídrico disponible, que a su vez es producto de la época del año y de fenómenos climáticos como “la niña” o “el niño”; un 29% se genera a partir de carbón mineral y otros combustibles fósiles mientras que el restante 1% corresponde a algún tipo de energía renovable, paneles solares o turbinas eólicas (Alfonso, 2019).

La asociación de energías renovables Colombia, realizó un análisis de flexibilidad en el sistema eléctrico en donde se demuestra que si bien el sistema tradicional de producción eléctrica es flexible y suficiente; en épocas de sequías o bajos aportes hídricos, los costos asociados a los sistemas de respaldo aumentan en gran medida, al igual que lo hacen las emisiones de material particulado y dióxido de carbono producto de la combustión de carbón y demás materiales fósiles que impulsan dicho sistema auxiliar (Ser Colombia, 2018).

En este orden de ideas, los impactos ambientales que cada sistema de producción eléctrica genera bajo la actual demanda de electricidad son diversos, el consumo masivo de recursos naturales, emisiones y vertidos, la generación de residuos, la destrucción o modificación de los ecosistemas, la pérdida de vegetación, la alteración de la biodiversidad, la alteración del ciclo hidrológico del agua, entre otros, son algunos de ellos; muchos de los cuales serán más significativos durante las épocas o los años en los que por factores climáticos escasee el recurso hídrico. Los combustibles fósiles y la energía eléctrica proveniente de la red nacional, son significativamente contaminantes producto de sus propiedades fisicoquímicas (Rodríguez, 2018).

Pese a que en general hoy en día se pretende una transición energética que nos libere del uso de combustibles fósiles mediante la sustitución de estos por bio combustibles, hidrogeno y en especial acudiendo a la electrificación como alternativa; esto supondrá un significativo aumento de la demanda eléctrica, la cual traerá consigo un incremento de todos los efectos negativos ya

mencionados, pues también como ya se explicó, los sistemas de respaldo de producción eléctrica están basados en el uso de carbón y otros combustibles fósiles. Es imperativo asegurar una transición energética mediante una actualización del sistema eléctrico que garantice la generación, transmisión y distribución altamente eficiente y acorde a la creciente demanda (Caro, 2022).

La dependencia energética del modelo actual de producción eléctrica y la insostenibilidad ambiental son los problemas que se pretenden solucionar; los grandes volúmenes de agua que se ven comprometidos, el alto impacto ambiental, la alteración en los ecosistemas, el desplazamiento de poblaciones y la dificultad en el abastecimiento, son producto de la permanencia activa de la forma en la que se ha venido obteniendo la electricidad que consumimos diariamente, sin la existencia de mecanismos alternativos que puedan ofrecer una autonomía segura y prolongada. (Cuellar, De Moya, Pizón, y Sarmiento, 2022). Las propuestas existentes no logran superar la eficiencia del sistema de producción eléctrico tradicional, y los costos iniciales asociados a su instalación hoy en día son en principio elevados; Para cumplir con un correcto abastecimiento de energía conforme a los requerimientos y necesidades humanas, es indispensable desarrollar una proyección energética que logre prever la demanda (Hernández,2022).

Bajo estas premisas, el objetivo es encontrar un escenario en el que, en vez de producir electricidad en grandes cantidades para suplir las demandas de regiones enteras, cada unidad funcional, no importa su tamaño, pueda generar gran parte o la totalidad de la electricidad que consume. Sugiere que se debe lograr una autosuficiencia eléctrica de orden local, que posibilite superar la crisis energética producto de la baja capacidad de producción en relación a la creciente demanda y la ampliación en el valor de los combustibles que se han fijado en el ámbito de la política internacional (Rodríguez, 2022).

Para tal fin entonces, esta investigación enfocará sus esfuerzos en resolver la pregunta que a continuación se plantea: ¿es factible técnicamente desarrollar un modelo de autoproducción y suministro eléctrico de pequeña escala con aplicación a TransMilenio?

### **3. OBJETIVOS.**

#### **3.1 Objetivo general.**

Realizar un proyecto de factibilidad técnica de un modelo de autoproducción y suministro eléctrico de pequeña escala de paneles solares con aplicación a TransMilenio.

#### **3.2 Objetivos específicos.**

- Evaluar la factibilidad técnica del modelo de autoproducción y suministro eléctrico de pequeña escala de paneles solares con aplicación a TransMilenio.
- Realizar la descripción general del medio ambiente legal que enmarca el modelo de autoproducción y suministro eléctrico de pequeña escala de paneles solares con aplicación a TransMilenio.
- Identificar las características del ámbito comercial a fin de determinar el acoplamiento del modelo de autoproducción en dicho medio, asegurando la debida aceptación y crecimiento del proyecto.

#### 4. JUSTIFICACIÓN

La dependencia energética de un solo sistema de producción eléctrica, la baja eficiencia e insostenibilidad ambiental, los grandes volúmenes de agua que se ven comprometidos, el alto impacto ambiental, la alteración en los ecosistemas y la dificultad en el abastecimiento, son producto de la permanencia activa de la forma en la que se ha venido obteniendo la electricidad que consumimos diariamente sin la existencia de mecanismos alternativos.

Los métodos tradicionales de producción eléctrica a gran escala y sus mecanismos de respaldo a base de combustibles fósiles, contribuyen a la contaminación atmosférica, que por consiguiente afecta gravemente a la salud de los colombianos al reducir la calidad del aire no solo por el aumento del monóxido de carbono sino también por el exceso de material particulado presente en este. Los problemas de salud asociados a la mala calidad del aire y a la contaminación ambiental, son la tercera causa de sobrecostos sociales después de la contaminación y deterioro de las fuentes hídricas y los desastres naturales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

La creciente actividad industrial y el considerable aumento del parque automotor al ser una fuente directa de la que emanan sustancias que intoxican la atmosfera, ha provocado el daño creciente y gradual de la calidad del aire en diferentes ciudades Colombia; tal y como se puede apreciar en la información registrada en el boletín especial de indicadores nacionales, calidad del aire: periodo 2018-2022.

Tomando como referencia el estudio valoración económica de la degradación ambiental en el 2015, el motivo de lo más de 8 mil fallecimientos anuales es producto de la mala calidad del aire. En este orden de ideas, teniendo en teniendo presente la actual coyuntura a nivel nacional, es imperativo la selección de las diversas alternativas y modelos de autosuficiencia eléctrica que puedan proveer y ser soporte eficiente en la generación eléctrica del país (IDEAM, 2022).

Tal como pretenden las intenciones de generar políticas que promuevan el cuidado del medio ambiente y el mejoramiento de la calidad del aire a partir del cambio de los sistemas de desarrollo tradicionales por modelos que cumplan con las metas de sostenibilidad establecidas, a fin de mantener la adecuada salud pública y suministrar acceso garantizado a todos los recursos sin exceptuar o marginar poblaciones; es decir asegurar los recursos naturales tanto para las generaciones actuales como futuras( IDEM, 2022).

Es aquí, en donde se hace necesario a partir de la investigación y desarrollo previo, la implementación de diversas tecnologías que posibiliten la continua producción y abastecimiento por unidad residencial, empresarial, comercial o cualquier equipamiento que con estos sistemas pueda ser dotado de la capacidad de generar una pequeña parte o el total de la energía eléctrica que consume.

Para tal fin, como en cualquier proyecto, es requisito fundamental ejecutar los diversos análisis, evaluaciones y modelaciones que permitan determinar la viabilidad y factibilidad de las distintas alternativas que puedan ser instaladas para trabajar tanto de forma articulada como competitiva; es decir cuáles de ellas pueden funcionar en mixtura o cuál es mejor entre en un conjunto posible, teniendo en cuenta su respectivo costo beneficio en términos de eficiencia y estableciendo al mismo tiempo las limitaciones e influencia del medio ambiente legal, económico, técnico y comercial que alberga dichas propuestas

#### **4.1 Conveniencia de la investigación**

Desde los espacios de formación que se han logrado establecer en la especialización en gerencia de proyectos, se reconoce la necesidad de gestionar proyectos que generen valor económico, ambiental y social a nivel regional, nacional e internacional. Dentro de los propósitos que tienen los estudiantes y profesionales está el contribuir al desarrollo de conocimiento de la universidad Ean. Por esto, se implementará una investigación en el campo de ciencia, tecnología e innovación; la línea de acción estará relacionada con el grupo de investigación gestión ambiental. Es preciso anotar que el desarrollo sostenible es la posibilidad que se tiene para

mejorar el futuro de todos y todas sin comprometer los recursos del mañana (Cepal, 2023). El proceso investigativo está vinculado con los objetivos del plan energético nacional 2020- 2050, el cual propende por cumplir los requerimientos energéticos de la nación y una evolución energética global, caracterizada por comprometerse y respetar el medio ambiente.

## 5. MARCO TEÓRICO

Uno de los hechos que negativamente marcan las formas de producción energética a gran escala, es la inevitable dependencia de fuentes no renovables; que en conjunto con la insostenibilidad ambiental producto de la actividad antrópica, ha generado en el ámbito político e internacional, un interés por el uso e implementación de métodos de obtención de energías alternativas que logren reducir el impacto ambiental negativo.

Buscan implementar una fuente de energía no tradicional que logre ser limpia y sostenible. Las energías renovables son llamativas para los sistemas eléctricos de las naciones que presentan características naturales apropiadas para su unificación, entre ellas encontramos: las fuentes hídricas, la radiación solar y el potencial ecológico. (Dávila, Gámez, Melo y Pimienta, 2020). Es de vital importancia la presencia de las energías verdes en aras de reducir los impactos negativos que producen costos en las esferas ambientales, sociales y de seguridad. (Castillo, 2015)

La generación de electricidad efectuada por mecanismos de producción limpios y amigables con el medio ambiente está enfocada principalmente en captar la energía resultante de fenómenos propiamente naturales tales como el viento, las olas, la luz e incluso de la misma actividad física de los seres vivos, sin que en dicho proceso se generen grandes modificaciones de los ecosistemas y reduciendo al máximo los impactos ambientales inherentes a este tipo de proyectos.

En este contexto, hoy en día existen varias tecnologías con las cuales se pueden implementar sistemas de producción y abastecimiento eléctrico que, en vez de estar dispuestos para generación a gran escala, puedan instalarse en las unidades más básicas bien sean residenciales, comerciales, institucionales o industriales. Es decir, fundamentalmente se trata de pasar de un sistema de producción y a abastecimiento de rango regional para suplir la demanda de cada unidad presente en una ciudad, a uno en el que cada unidad tenga la capacidad de generar parte o la totalidad de la electricidad que se requiere.

Las tecnologías limpias tienen como objetivo principal reducir las emisiones antes de ser producidas por origen o por la implementación de menor cantidad de recursos ambientales por unidad de producto (Mejía, Ávila y Córdova, 2016).

En este orden de ideas, se definirán algunas de las disponibles bien sea en etapa de investigación o en etapa de desarrollo y sobre las cuales se pretende adelantar la respectiva evaluación y proceso de factibilidad. Se trata de determinar qué tan factible es técnicamente la implementación de un sistema que sustituya al sistema de producción eléctrica actual o en su defecto lo respalde en gran medida al suplir parte de la demanda eléctrica. Entre ellas se encuentran:

### **Piezoelectricidad**

Es el fenómeno que se presenta al interior de la estructura cristalina de algunos materiales al someterlos a tensión o esfuerzos mecánicos. El resultado de la aplicación de fuerzas sobre este tipo de materiales genera una diferencia de potencial eléctrico como respuesta al estrés mecánico. El objetivo de implementar e instalar materiales con tal capacidad, está enfocado en la producción de electricidad a partir de la energía que se libera producto del impacto de actividades convencionales y de naturaleza física tales como el movimiento, la fricción o el caminar (Dávila, Gámez, Melo y Pimienta, 2020).

### **Biogás**

Es una mezcla de gas metano y anhídrido de carbono que resulta de la descomposición natural de la materia orgánica en estado de anoxia (Castro y Gámez, 2022) y que se extrae fundamentalmente de tres fuentes por la gran masa de material que representa: rellenos sanitarios, aguas residuales y la digestión anaerobia de podas o residuos vegetales urbanos. (Barragán, Cepeda, Zalamea y Parra 2019). Es un material combustible.

### **Bioetanol**

Es un biocombustible que se obtiene a partir de la destilación del fermentado de materia orgánica de origen vegetal y con alto contenido de glucosa y azúcares; o como modificación de

la química del etileno al ser hidratado. Ambientalmente es de los combustibles más amigable debido a su huella neutra de carbono y aunque generalmente debe de usarse mezclado con gasolina, este contribuye en la reducción de la emisión de carbono por volumen de combustible consumido.

Adicionalmente la biomasa a partir de la cual se obtiene puede plantarse en tierras de poco valor o que no tengan una demanda agrícola por parte de otros productos, generando de esta forma un positivo impacto económico en la zona (Sas, 2022).

### **Energía mareomotriz**

Es la energía inmersa en el movimiento de las masas de agua oceánicas producto de la interacción entre la luna y la tierra la cual puede utilizarse para tecnologías de producción eléctrica impulsadas por las mareas, mareomotéricamente o por potencia osmótica. Pese a ser uno de los medios de producción eléctrica alternativos más avanzados, es un limitante el hecho de que solo este destinado a las zonas costeras en espacio tales como bahías o estuarios (Barragán, Cepeda, Zalamea y Parra, 2019).

Las mareas son un fenómeno que liberan grandes cantidades de energía, lo cual permite impulsar una turbina de doble cuchilla, mediante la cual la energía de la masa de agua en movimiento se convierte en electricidad. Es pertinente aclarar que esta es una alternativa de gran escala para la producción y abastecimiento de varias poblaciones.

### **Energía eólica**

Es la energía inmersa en el movimiento de la masa de aire que puede utilizarse para impulsar aerogeneradores, que, al estar provistos de grandes aspas, alabes o palas, transforman la energía cinética del viento en electricidad después de impulsar un generador eléctrico. Esta energía se puede alcanzar ubicando turbinas en tierra firme o con base cimentada en el fondo marino (Forero, 2019).

Estos molinos o turbinas pueden ser de eje horizontal o vertical y se encuentran conectados a una transmisión que a su vez esta acoplada a un generador eléctrico. Aunque las turbinas de eje horizontal son las que mayor eficiencia suponen y sirven para abastecer varias poblaciones toda vez que se encuentren agrupadas en un parque eólica; es posible considerar las turbinas de eje vertical como una alternativa de producción para proyectos de menor escala debido a su baja eficiencia, pero por su facilidad de ser instalada a nivel del terreno o incluso en las azoteas de edificios.

Es pertinente aclarar que, como cualquier sistema de producción limpia de electricidad, con este también se pueden hacer combinaciones con otros mecanismos de generación eléctrica a fin de aumentar la eficiencia del mismo; por ejemplo, tener turbinas eólicas y paneles solares.

### **Baldosa de generación eléctrica**

Es un sistema que utiliza la energía del movimiento para activar un pequeño generador eléctrico (volante de inercia o generador de inversión electromagnética) capaz de producir aproximadamente 8 watts por pisada y cuyo éxito radica en que sea instalado en lugares de grandes superficies y que permitan la circulación de una gran masa de personas; una variante de este tipo de tecnología funciona con materiales piezoeléctricos en vez de un generador eléctrico.

Es así, como a partir de la búsqueda de investigaciones realizadas sobre modelos de producción de energías limpias, es notable que se han adelantado propuestas académicas, encaminadas a evaluar la viabilidad de la ejecución de este tipo de proyectos, entre los que se pueden destacar los sistemas alternativos de producción eléctrica. A continuación, se listan las que desde nuestro enfoque profesional fueron consideradas como las más relevantes para el desarrollo de este documento:

- Estudiantes de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito con el propósito de optar por el título de especialistas en desarrollo y gerencia integral de proyectos unidad de proyectos Bogotá en el año 2018, plantearon la *“Elaboración de un estudio de prefactibilidad para el montaje de una empresa de comercialización, instalación y mantenimiento de plataformas*

*piezoeléctricas: caso portales y estaciones de TransMilenio.*” En donde se concluyó que la demanda y la oferta del sector eléctrico, presenta un aumento gradual progresivo en el sector industrial; así mismo, se encontró que las políticas gubernamentales motivan a las organizaciones prestadoras del servicio eléctrico a la producción de energía renovable especialmente las fotovoltaica y la eólica (Pineda, Infante y Milán, 2018).

- Además, en el 2019 se adelantaron estudios sobre la *“Prefactibilidad ambiental de sustitución de fuentes energéticas convencionales por baldosas piezoeléctricas para iluminación.”* Por parte de estudiantes de la universidad el bosque, esta investigación les permitió entender que, a través de los procesos de análisis, se puede dar inicio a la integración de energías renovables con zonas de recreación a una mayor escala, logrando abastecer un barrio o ciudad por medio del alumbrado público. (Díaz y Gómez, 2019).

- Alumnos de la Institución Universitaria Esumer, en el año 2020 realizaron un *“Estudio de viabilidad para la creación de un sistema que permita transformar la energía cinética que se produce en los gimnasios del Valle de Aburra, en energía eléctrica limpia.”* En dicha investigación se logró identificar que la ejecución e implementación estos proyectos, permite generar soluciones adecuadas para garantizar el acceso a energía confiable y económica, sin comprometer el clima, ni la salud de los ciudadanos. (Hernández y Robledo, 2020).

- De igual forma, con el propósito de optar por el título de ingeniero industrial en la fundación Universidad de América en el año 2020, se adelantó una investigación de *“Estudio de factibilidad para la implementación de una empresa que comercialice y haga el montaje de pisos eléctricos en la ciudad d Bogotá D.C”*. Dentro de los resultados se logró encontrar que el rubro designado por parte del Ministerio de Minas y Energía tiene como propósito desarrollar e implementar de proyectos energéticos sostenibles e innovadores, teniendo presente el potencial energético no convencional que tiene el país y la regulación estipulada para garantizar el suministro de energía confiable a largo plazo (Castellanas, 2020).

- Desde la Universidad de la Costa en el año 2020, se implementó un estudio de *“Evaluación potencial de generación de energía piezoeléctrica en los andenes: estudio de caso calle 85 de Barranquilla”*, en el cual se estudiaron y consideraron los costos relacionados con la puesta en marcha de estas tecnologías, su potencial de generación energética, la reducción de emisiones de dióxido de carbono y la reducción económica percibida por conceptos de electricidad (Barreto y Parada, 2020).

- Leonardo Barrera Torres, aspirante al título de ingeniero eléctrico en la Universidad de Pamplona del Norte de Santander, como trabajo de grado adelantó un *“Análisis de viabilidad para implementar sistemas fotovoltaicos de autogeneración para terrazas menores a 2000 m2 en Medellín”*. Esta investigación permitió concluir que es viable la implementación de un sistema fotovoltaico de autogeneración para terraza menores a 2000 m2 en forma técnica y económica; reconociendo que la vida útil de este sistema será de 20 a 30 años (Torres, 2021).

- En un *“Estudio socio-técnico del uso de energías renovables como alternativa de iluminación en las comunidades de las zonas no interconectadas”*, ejecutado por estudiantes de la Universidad Industrial de Santander en el año 2021, ratificó la necesidad de instaurar sistemas de autoproducción y suministro eléctrico de pequeña escala, debido a la fuerte relación y condicionamiento que presenta las personas con la luz natural y artificial para lograr desarrollar rutinas diarias como es la movilidad, la interacción entre la comunidad, los quehaceres domésticos, labores y escolares (Muñoz, Villamil, Restrepo y Bolívar, 2021).

- Desde la Universidad De Guayaquil en el año 2021, se llevó a cabo un estudio sobre el *“Desarrollo de un prototipo basado en dispositivos piezoeléctricos para generar energía eléctrica alternativa y alimentar el alumbrado público del puente de la unidad nacional”*. Esta investigación planteó que el panorama energético actual, es retador; ya sea por temas de seguridad energética, crecimiento económico o protección ambiental. (Rodríguez y Alvarado, 2021).

- En la Universidad Tecnológica del Perú en el año 2021, se investigó sobre el “*Diseño de un sistema generador piezoeléctrico para reducir los costos por la alimentación eléctrica de los equipos biomédicos de emergencia en el hospital Santa Rosa – Lima*” concluyendo que mediante la construcción de dicho sistema se puede alcanzar un aumento de la vida útil de cada equipo hospitalario. Así mismo, la optimización de los niveles de ahorro energético posibilitará mejorar el consumo de los equipos y la confiabilidad del servicio (Hinostroza, 2021).

- Aspirantes al título de ingeniero mecánico electricista en la Universidad Cesar Vallejo en Chiclayo-Perú, ejecutaron a manera de trabajo de grado la “*Factibilidad de central eléctrica con base a baldosas piezoeléctricas para iluminación de una plaza de armas*” en donde se concluyó ecológicamente que estas baldosas, son factiblemente ambientales, pero si busca mitigar las emisiones de gases a una mayor escala, es indispensable instalarlas en cantidades significativas y con una mayor circulación de peatones. (Hernández y Sanjinez 2022).

- En el año 2022, desde la Universidad El Bosque, se adelantó una “*Propuesta para la implementación de baldosas piezoeléctricas como alternativa energética para el centro comercial Santafé en Bogotá D.C.*”, los resultados salientes de este estudio refieren que para que el funcionamiento de un proyecto de baldosas piezoeléctricas sea satisfactorio debe ejecutarse en escenarios con alto tránsito, ya que de esta forma se genera la mayor cantidad de energía eléctrica. Con base en lo anterior, el escenario de un centro comercial es apropiado para su implementación por su constante tránsito de peatones (Ortiz,2022).

- Estudiantes de la Universidad Técnica del Norte en el año 2023, llevaron a cabo un análisis de “*Desarrollo de cerámica piezoeléctrica para recolección de energía del tránsito peatonal y vehicular en cruce cebra*”. En dicha investigación se recomendó la necesidad dar monitoreo y seguimiento a la investigación de los materiales piezoeléctricos como una fuente de producción de energía eléctrica para obtener un mayor alcance y campo de aplicación. (Chandi, 2023).

Todos estos estudios ratifican el interés global por el cambio climático, encontrándose estrechamente relacionado con las preocupaciones internacionales a nivel económico, legal,

social y tecnológico. La energía y sus diferentes fuentes de producción son consideradas un tema muy especial, y se necesita con premura investigar todas sus dimensiones específicamente (Ballesteros y Gallego, 2019).

### 5.1 Marco organizacional

Tal como fue expresado anteriormente en el respectivo numeral, el objetivo es *“Realizar un proyecto de factibilidad técnica de un modelo de autoproducción y suministro eléctrico de pequeña escala de paneles solares con aplicación a TransMilenio.”*, para lo cual, en primera instancia, los análisis de factibilidad estarán enfocados en la instalación del mencionado modelo en las estaciones del sistema de transporte masivo.

En este orden de ideas, lo más importante es tener en cuenta los elementos que constituyen la principal demanda eléctrica dentro de las estaciones para de esta forma determinar las competencias y posibilidades que un modelo de autoproducción y suministro eléctrico de pequeña escala tenga frente al actual sistema de suministro para el funcionamiento de toda la electrónica, red eléctrica y subsistema de iluminación que este tipo de equipamiento requiere para su función. La siguiente tabla consigna todos los objetos que demandan de suministro eléctrico, su consumo, horas de uso al día y cantidad en estaciones de tres vagones.

Potencia en Wats	Elementos	Cantidad	Hora de uso diario	Total consumido en Wats
25	LAMPARAS TUBULAR LED DE 1,2M	210	9	47250
50	LAMPARA LED	9	9	4050
180	MOTOR DE PUERTA	42	14	105840
180	Torniquetes	12	21,5	46440
180	EQUIPO GRABACION CCTV	3	24	12960
600	INFORMACION SISTEMA	3	21,5	38700
180	CONEXIÓN TAQUILLAS	15	21,5	58050
600	PUBLICIDAD ILUMINADA	12	21,5	154800
<b>Total día</b>				<b>468090</b>

*Tabla 1 Demanda de suministro eléctrico – Elaboración propia.*

Habiendo mencionado lo más relevante en relación a la demanda eléctrica de las estaciones también es de suma importancia destacar, las características que a nuestro juicio determinan el sistema de producción eléctrica de pequeña escala que se pueda implementar.

La cubierta de los vagones que componen las estaciones es de aproximadamente de 48 metros de largo por 6.5 metros de ancho aproximadamente para el caso del tipo w1; para los w2, es de 40.8m por 6.5 metros de ancho; para los del tipo w3 es de 31.2 metros por 6.5 metros y para los del tipo w4 es de 24.0 metros por 6.5 metros de ancho; los que supone en todas las combinaciones de vagones que configuran una estación, un área en cubierta propicia para la instalación de un sistema eléctrico fotovoltaico (Sistema Integrado de Transporte Público, 2013)

Bajo este esquema será efectuado todo el estudio de factibilidad técnica objeto de este proyecto.

## 6. METODOLOGÍA

Centrándose en responder la pregunta de investigación formulada al principio de este documento, acerca de la factibilidad técnica de un modelo de autoproducción y suministro eléctrico de pequeña escala de paneles solares con aplicación a TransMilenio. Este proyecto se desarrollará bajo un enfoque mixto, es decir, existirá convergencia en la recolección y análisis de los datos cualitativos y cuantitativos presentes.

Es preciso enfatizar que los análisis de viabilidad son un proceso de tipo cuantitativo toda vez que se encuentren enmarcado por los aspectos técnicos, financieros, económicos y comerciales del proyecto, por consiguiente la investigación que se deberá ejecutar para tal fin, se hará sobre información de la misma naturaleza, la cual deberá contener las cantidades con las que se puedan hacer los cálculos respectivos para determinar la pertinencia y oportunidad en el mercado que la solución que se desea implementar pueda brindar dentro de los parámetros de sustentabilidad y sostenibilidad asociados a la actual demanda eléctrica pero con gran congruencia con las actuales necesidades medio ambientales. En este aspecto, se plantea un alcance descriptivo y correlacional (Hernández Sampieri, 2014), ya que cumple con estas disposiciones, pues se pretende caracterizar las variables del estudio; y así mismo, se busca identificar la relación existente entre variables en un contexto en particular, como lo es la factibilidad técnica de un modelo de autoproducción y suministro eléctrico de pequeña escala de paneles solares con aplicación a TransMilenio.

Ahora bien, cabe agregar que tratándose de soluciones dirigidas a apoyar o sustituir los actuales sistemas de producción eléctrica, son proyectos cuya implementación se encuentra supeditada a lo que permita el marco legal vigente del país y las facultades que otorguen las nuevas políticas para la transición energética; en este sentido es necesario adelantar una investigación de tipo cualitativo que permita identificar la legislación correspondiente sobre la cual se identificaran las características del medio ambiente legal. De igual forma es importante establecer las definiciones y caracterizaciones de mercados que quedarán enmarcadas dentro del

aspecto comercial que harán parte de los determinantes o factores que puedan afectar el ciclo de vida del tipo de modelo que se implemente.

Con el propósito de conocer el medio ambiente legal, los procesos de recolección de datos serán a través de la revisión documental en la que se expongan las normativas vigentes, ya que esto permitirá conocer los antecedentes en el marco normativo, sus limitaciones y alcances. De igual forma, en aras de poder recolectar y analizar datos para efectuar la caracterización del ámbito comercial, se realizará una entrevista a un experto en el ámbito de las energías limpias, posibilitando una mayor contextualización del mercado, y reconociendo sus limitaciones y alcances.

En este orden de ideas y habiendo definido en el marco teórico las tecnologías que hoy en día se encuentran disponibles para la producción eléctrica a pequeña escala, la investigación que se pretende plasmar en este documento será el insumo fundamental para determinar la factibilidad técnica (teniendo en cuenta el medio ambiente legal y las condiciones que suponga el ámbito comercial), de un ***“modelo de autoproducción y suministro eléctrico de pequeña escala de paneles solares con aplicación a TransMilenio”***; basado en electricidad obtenida mediante foto celdas.

Es así, como este modelo al estar configurados bajo tecnología mediante la cual se puede aprovechar un tipo de energía específica y disponible naturalmente para realizar la conversión en energía eléctrica, requiere de información específica con la que se puedan evaluar los rendimientos y costos asociados a dicho proceso. Para tal fin se definen entonces las magnitudes, cantidades y variables vinculados al disponible energético que cada uno de los modelos requiere para su funcionamiento y cuyos datos incluidos en los reportes de investigación de trabajos de tesis, mediciones de instituciones públicas como el IDEAM o la CAR, entre otros, serán el insumo principal para la evaluación de las factibilidades contenidas en los objetivos de este trabajo.

La estrategia de la investigación consistirá en recolectar la información inherente a las variables involucradas, en la que adecuadamente se encuentre registrada la estadística correspondiente a los últimos años y congruente al periodo de diseño que se pretenda evaluar (5, 10 15 o 20 años) para que, en conjunto con las especificaciones técnicas de cada modelo, sea posible estimar la sustentabilidad y sostenibilidad deseada o en dado caso generar las debidas precauciones o descartar la idea.

A continuación, se describe a partir del tipo de modelo, las variables involucradas, sus definiciones y magnitudes las cuales en su interacción con las especificaciones técnicas del ***“modelo de autoproducción y suministro eléctrico de pequeña escala de paneles solares con aplicación a TransMilenio”*** permitirán establecer la viabilidad técnica del mismo, teniendo en cuenta en relación a su eficiencia que tan competitivo podría ser con el actual sistema de producción y suministro eléctrico.

## 7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### 7.1 Medio ambiente legal

El actual gobierno tiene como propósito llevar a cabo una transición energética sostenible y justa, que permita contrarrestar el cambio climático, posibilite el acceso a la energía y garantice la soberanía energética del país. El interés político, social y público que actualmente tiene el uso e implementación de energías no convencionales, avala la puesta en marcha de proyectos de autoproducción y suministro eléctrico de pequeña escala.

Dichas iniciativas, se ven respaldadas por una serie de disposiciones legales que logran robustecer y fungir como base y sustento normativo. Ratificando la necesidad de que el País posea Políticas para incentivar el uso de energías no renovables en aras de reducir el impacto y el daño sobre el medio ambiente.

- Ley 697 de 2001, busca fomentar el uso racional y eficiente de la energía, incentiva la implementación de energías alternativas en aras de garantizar el abastecimiento energético oportuno en el país.
- Ley 1715 de 2014, permite orientar las políticas públicas y precisar los beneficios tributarios e instar por la inyección de recursos, la investigación y el adelanto de producción e implementación de energía a partir de fuentes no convencionales.
- Ley 2169 de 2021, mediante la cual se impulsa el desarrollo bajo en carbono a través del establecimiento de metas mínimas en relación al carbono neutralidad y la resiliencia climática.
- Ley 2099 de 2021, propende por modernizar la legislación vigente, dinamizando el mercado energético a través del uso, desarrollo e impulso de fuentes no convencionales de energía.
- Las Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2022 – 2026, contempla una transición energética justa, busca aumentar y estimular la producción de energías renovables, promoviendo el uso y desarrollo de tecnologías que posibiliten el avance del potencial de energía solar, eólica, biomasa y geotérmica.

Es importante reconocer que pese a que existe normativa que regula la implementación de este tipo de energías, los beneficios existentes como las deducciones especiales hasta el 50% de la inversión, la depreciación acelerada, la exclusión en temas de IVA y aranceles, dichas ventajas están encaminadas a los empresarios que tienen un capital considerable, pero no contemplan a la ciudadanía o al empresario local, es decir, no se han generado incentivos que promuevan la implementación de dichas energías en pequeña escala en los hogares de las familias Colombianas y las pequeñas empresas.

## 7.2 Factibilidad técnica

### Modelo basado en foto celdas o paneles solares

Se trata de fotos celdas agrupadas en paneles de 2 metros de largo por 1 de ancho en el que pueden haber entre 60 a 72 de estas células, cuya función es básicamente producir electricidad a partir de la radiación solar que captan. Cada uno de estos paneles puede llegar a producir entre 300 y 445 watts pico por cada hora de sol que reciba.

Para este modelo, las consideraciones están estrictamente ligadas a las características y eficiencia de los paneles solares, al tipo y al número de vagones que conformen una estación y determinantemente a la variable en materia, la cual está definida por la radiación solar hora día medida en función del flujo radiante y expresadas en unidades de energía, bien sean watts/m<sup>2</sup> o Joules/m<sup>2</sup>.

Los registros de radiación solar hora día, se encuentran organizados por series de tiempo en tablas donde se expresan los valores por hora diarios que se presentan durante el año en las ciudades y municipios del país y tomados por varios instrumentos dispuestos para tal fin. Para el caso de Colombia el registro y organización de toda información hidro-meteorológica se encuentra a cargo del IDEAM, el cual dispone de varios métodos para la divulgación y difusión de dicha información, siendo posible el acceso a los datos que se necesitan para el cálculo de los watts horas producidos por un sistema de paneles fotovoltaicos instalados en las cubiertas de los vagones y que sean capaces de suplir la demanda eléctrica de las estaciones en las que se implemente este sistema, bien sea parcial o totalmente.

Habiendo efectuado la definición de las variables cuyos datos serán el principal insumo para el cálculo de los producidos eléctricos del modelo anteriormente explicado, el siguiente paso está dirigido al tratamiento de la información que se recolecte; en primer nivel se debe de determinar un intervalo de tiempo, sobre el cual habrá que ejecutar la respectiva estadística con la que se determinen los valores promedios para la evaluación de las factibilidades del modelo de

producción eléctrica de pequeña escala que se ha descrito en el desarrollo del presente documento.

Como se ha mencionado, los datos que enmarcan cada una de las variables, serán recolectados mediante las fuentes de consultas que TransMilenio, la CAR y el IDEAM tengan dispuestos para la divulgación de dicha información y teniendo en cuenta las restricciones que en tal caso también supongan. Otras formas de consulta tales como trabajos de grado e investigaciones también deberán de ser tenidas en cuenta.

Este será el instrumento de consulta seleccionado para este trabajo y debido la naturaleza especializada de dicha información y teniendo en cuenta que mediante la instrumentación y tecnologías de las que disponen las entidades mencionadas, ya fueron tomados; no es necesario realizar un trabajo en campo que requiera de la implementación de otro instrumento o modelo para la recolección de información relativa a las variables que se deben de incluir en los cálculos.

Una vez ejecutado el proceso estadístico, se determinarán los producidos de electricidad del modelo y se realizarán los correspondientes estudios de factibilidad con los cuales se puedan evaluar los beneficios de cada alternativa con respecto al sistema de suministro eléctrico actual que poseen las estaciones del sistema de transporte masivo.

### **Datos Brillo Solar Hora/Dia**

Es una forma de expresar a la radiación solar que recibe la superficie terrestre y enmarca las mediciones de horas de sol efectivo en un día. Las series de datos por estaciones que proporciona la CAR a través de sus servicios de consulta en línea para los ciudadanos están dadas en brillo solar mensual y se obtienen a partir de la sumatoria de las horas de sol diaria que percibe el heliógrafo de las diversas estaciones hidro-meteorológicas (desde las 05:00 horas hasta las 18:00 horas), distribuidas tanto en Bogotá D.C. como en todo el departamento de Cundinamarca.

Para efectos de la presente investigación, las series de datos contendrán la información procesada en términos de radiación solar (valores totales diarios en unidades de cal/cms<sup>2</sup>) y brillo solar diario (valores totales diarios en unidades de horas).

Las siguientes tablas pertenecen a los registros heliográficos de las estaciones de la CAR instaladas en el aeropuerto de Guaymaral y en el municipio de Guatavita. Es pertinente aclarar que la información que entregan estas estaciones tiene una cobertura que supera los 50 km de radio, de tal forma que fueron seleccionadas por tener las series de tiempo más completas al poseer registros desde 1965 hasta 2021.

### Estación Aeropuerto Guaymaral Brillo Solar

VALORES PROMEDIO DE BRILLO SOLAR DIARIO (HORAS)												
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1966	5,33	7,38	4,04	4,71	3,82	4,89	3,63	4,07	4,68	4,61	1,53	4,34
1967	4,01	5,35	5,21	3,26	2,83	2,05	3,48	3,72	3,10	2,89	4,19	5,75
1968	4,90	5,51	4,60	3,04	3,36	1,63	2,78	3,28	3,83	3,33	3,78	5,80
1969	5,83	5,62	5,83	2,61	2,90	4,12	4,50	3,88	4,50	4,26	5,38	6,23
1970	5,05	5,98	5,37	2,73	3,89	4,23	4,85	3,86	3,01	3,30	4,68	4,62
1971	4,72	5,14	3,13	3,29	2,76	2,30	2,02	2,81	3,44	3,45	4,41	4,82
1972	3,62	6,05	4,46	4,06	3,55	3,32	3,84	4,11	3,00	5,29	4,53	5,70
1973	6,18	7,50	4,20	4,65	4,19	2,46	4,34	3,43	3,08	3,75	3,89	5,22
1974	5,25	4,65	4,48	2,80	3,49	3,72	4,86	3,90	3,33	3,48	3,66	7,11
1975	5,56	4,05	3,97	4,73	3,61	3,71	4,03	3,62	4,27	3,75	4,15	3,57
1976	5,71	5,37	3,79	2,59	3,44	3,12	3,52	4,23	1,87	3,17	4,99	4,73
1977	7,09	5,59	0,77	1,34	2,62	3,66	4,14	3,89	3,46	3,52	4,75	6,52
1978	7,61	6,12	4,26	2,63	3,41	4,34	5,14	4,73	4,32	3,84	3,52	6,18
1980	7,48	7,61	5,33	5,20	5,33	5,04	5,91	4,93	5,35	4,53	5,59	5,60
1981	6,71	2,55	5,46	0,05	1,87	3,81	3,56	3,51	3,61	3,77	5,42	4,41
1982	5,73	3,66	3,84	2,90	3,11	2,40	3,14	3,77	2,34	2,64	3,22	1,50
1984	4,71	4,52	4,03	3,19	3,23	2,89	3,34	2,76	2,55	2,33	2,30	4,29
1985	5,80	4,03	3,70	3,21	3,46	2,25	3,49	3,30	3,59	3,33	4,40	6,22
1986	4,31	3,87	1,74	2,43	3,54	2,89	3,95	2,65	3,14	2,47	4,43	4,32
1991	6,88	4,64	4,20	2,93	2,46	2,58	2,45	3,18	3,65	4,43	5,00	3,35
1992	5,43	5,70	5,02	4,64	3,14	2,95	3,00	3,73	3,77	3,66	3,83	5,33
1993	4,49	5,50	3,66	2,53	2,44	2,15	3,10	2,38	2,45	2,66	2,72	4,54
1994	4,77	2,14	2,55	1,50	1,23	2,12	1,11	1,15	3,16	4,48	3,44	1,54
1995	5,20	6,69	3,85	3,14	2,06	3,17	2,65	3,20	3,77	3,29	4,94	4,02
1996	5,54	3,77	3,42	3,79	2,25	2,61	3,44	3,75	3,27	3,51	4,97	3,80
1997	2,15	6,25	0,65	3,85	2,84	4,15	2,90	3,78	4,07	2,65	1,79	5,22
1998	6,52	4,68	0,80	2,94	2,43	3,94	3,53	3,75	4,07	4,29	3,90	3,58
1999	3,85	2,53	2,43	2,94	4,53	3,48	4,13	3,45	2,69	3,39	4,41	1,76
2000	2,66	4,23	3,30	2,57	1,80	2,84	2,60	2,93	2,24	2,26	4,58	1,28
2001	4,96	4,15	2,63	3,02	2,25	2,54	3,85	3,42	3,71	3,91	3,82	1,98
2002	5,42	6,11	4,04	1,98	2,72	2,34	2,22	3,99	1,46	3,03	2,25	1,60
2003	5,24	4,87	4,22	2,85	2,63	2,09	3,11	3,15	2,99	2,97	3,43	1,50
2004	4,58	5,76	4,31	2,86	2,09	3,01	3,18	2,74	2,80	1,39	3,37	1,93
2005	1,40	1,44	4,57	2,48	1,10	2,15	3,32	0,12	3,14	3,03	3,44	1,07
2007	5,35	6,81	3,08	1,39	2,20	3,76	3,37	2,99	4,07	2,79	4,67	3,64
2008	4,49	5,27	4,49	3,38	3,48	3,23	3,59	3,99	3,56	2,86	3,73	5,57
2009	5,01	4,88	3,35	3,00	3,03	3,78	4,19	4,43	4,74	4,06	3,92	4,25
2010	5,56	3,43	4,56	2,87	2,47	3,16	2,75	3,33	3,01	3,68	3,14	2,47
2011	5,69	3,93	2,89	2,91	2,40	3,44	3,32	4,31	4,13	2,93	3,10	3,69
2012	3,50	5,45	3,06	1,84	2,15	3,29	2,53	2,47	4,34	3,65	4,05	3,52
2013	4,86	3,98	2,97	3,98	2,55	3,80	4,40	4,20	3,33	3,88	3,79	3,70
2014	5,10	4,38	4,28	2,68	3,36	3,05	4,26	3,44	4,60	3,32	2,73	2,59
2015	3,47	4,59	3,50	2,65	3,44	2,81	4,16	3,61	3,99	3,35	1,45	3,22
2016	4,51	4,19	4,65	2,78	2,89	3,85	3,81	3,37	4,05	2,00	1,04	3,29
2017	3,20	2,89	2,75	2,87	3,05	2,77	3,41	3,50	3,72	2,59	2,50	2,90
2018	2,82	3,85	2,48	1,93	1,73	2,69	2,61	3,26	1,61	1,90	2,02	0,41
2019	1,89	2,21	2,10	2,61	2,20	2,71	3,43	3,56	2,65	1,49	2,51	1,73
2020	2,92	3,99	2,91	2,89	1,60	2,59	1,93	1,69	2,87	0,91	0,79	0,99
2021	1,20	2,13	2,00	1,92	0,53	1,92	2,74	2,52	2,90	1,91	2,44	0,48
PROMEDIO	4,78	4,71	3,61	2,92	2,80	3,10	3,46	3,38	3,41	3,22	3,60	3,71
MÁXIMO	7,61	7,61	5,83	5,20	5,33	5,04	5,91	4,93	5,35	5,29	5,59	7,11
MÍNIMO	1,20	1,44	0,65	0,05	0,53	1,63	1,11	0,12	1,46	0,91	0,79	0,41

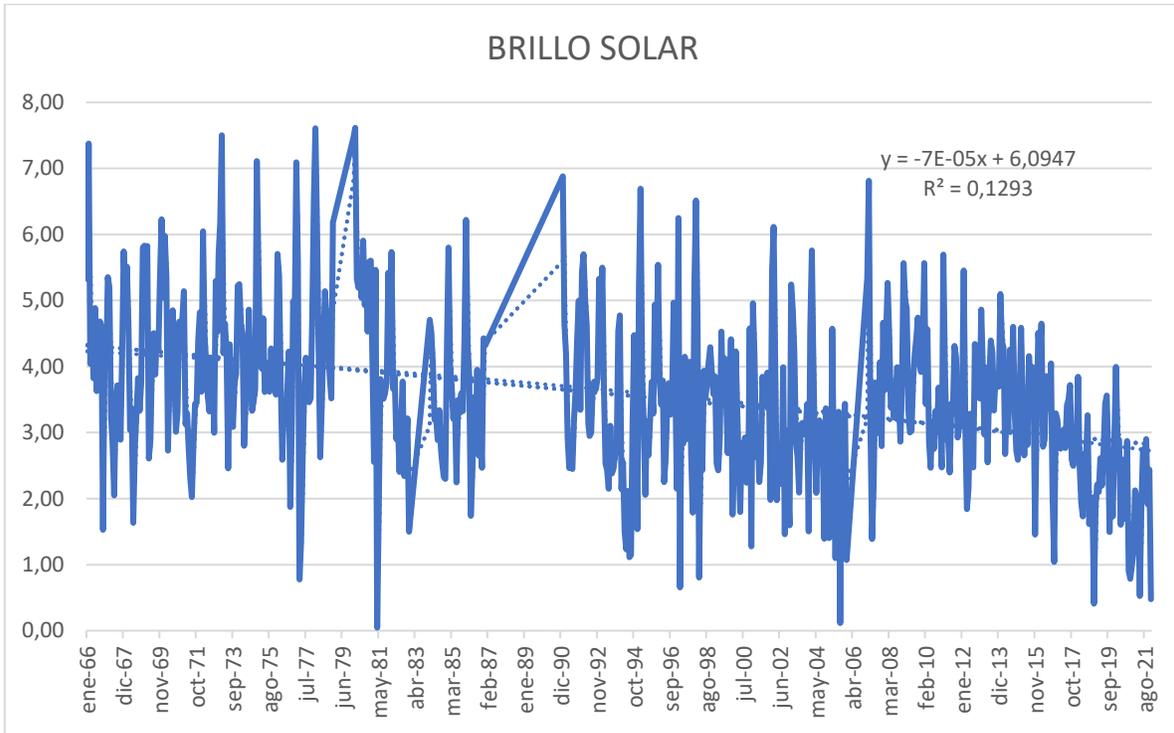
Tabla 2 Valores promedio de brillo solar diario – Elaboración propia basado en los datos de las series de tiempo tomados y registrados por la CAR desde 1966 a 2021

## Estación Aeropuerto Guaymaral Y Guatavita: Radiación Solar

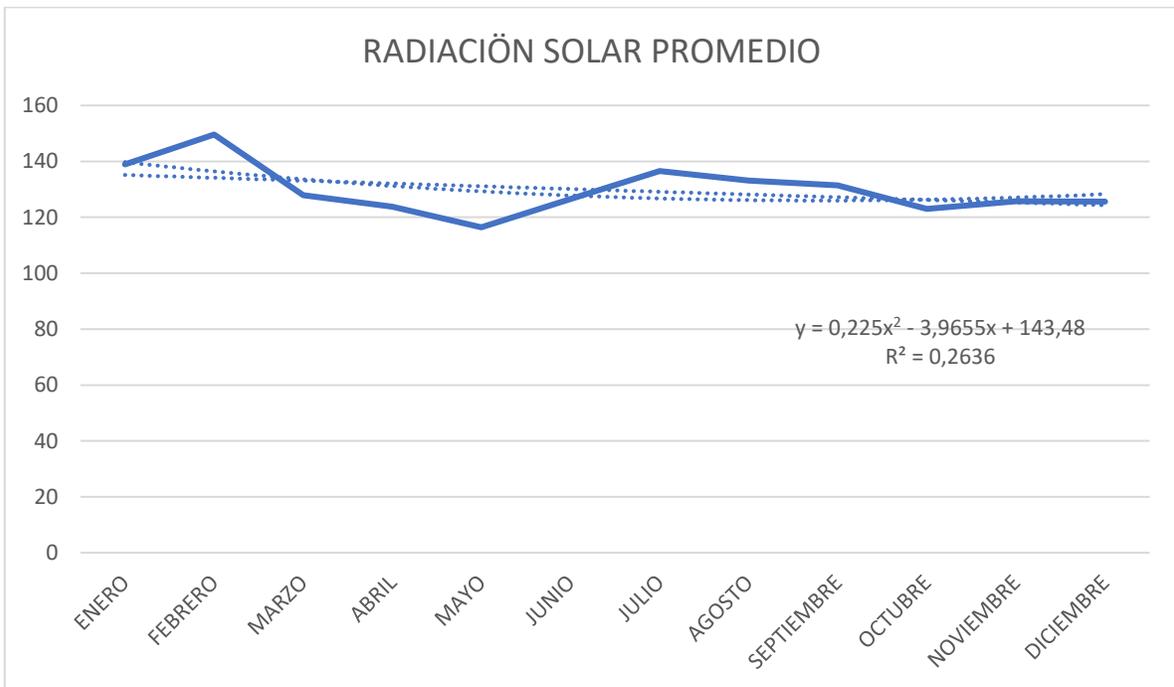
Los registros de radiación solar hora día se procesaron teniendo en cuenta la información tomada por estas dos estaciones al ser las más cercanas a la ciudad de Bogotá y al contener el mayor número de datos con relación a las series de tiempo que expresan. De esta forma se hará un promedio de las series de tiempo con los datos de la estación Guaymaral del año 1966 a 2005 y los de la estación Guatavita del año 2006 al año 2021.

	RADIACIÓN SOLAR PROMEDIO DIARIA (Wh/m <sup>2</sup> )											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DECIEMBRE
1966	119,68	158,67	116,68	125,60	111,05	124,83	115,52	114,42	117,46	111,05	112,42	103,92
1967	109,17	136,24	136,18	113,20	114,05	95,37	105,06	109,17	109,71	98,29	115,91	115,92
1968	121,93	140,81	126,05	129,09	116,68	118,24	119,01	117,80	129,87	118,55	115,91	127,18
1969	138,43	149,53	141,44	112,04	105,05	117,46	130,26	112,55	120,95	120,05	120,95	122,68
1970	125,30	140,81	132,81	107,38	110,67	119,40	124,44	115,17	111,26	103,54	124,05	114,80
1971	109,92	132,91	99,79	117,85	104,29	115,52	112,81	119,30	127,54	113,67	110,10	111,80
1972	112,92	154,10	125,68	128,32	112,17	103,12	122,12	128,31	127,54	131,31	127,93	119,30
1974	119,62	144,72	125,52	123,67	119,68	134,91	148,48	132,43	130,26	126,05	132,97	152,32
1975	138,81	126,68	133,56	132,97	122,30	120,95	128,32	129,06	139,95	130,18	136,85	118,93
1976	142,56	156,59	131,68	124,44	123,80	121,34	119,79	123,80	118,24	125,68	135,68	122,30
1977	157,19	155,34	114,42	144,99	110,67	134,52	139,95	137,31	130,26	113,30	127,15	137,31
1978	144,81	155,76	90,41	76,76	88,91	109,71	141,11	140,31	133,36	126,80	127,15	127,18
1979	153,07	179,43	126,43	124,05	126,05	117,46	130,26	117,05	146,93	117,05	129,87	125,30
1980	156,07	199,37	155,69	172,51	162,07	155,45	162,04	148,56	179,49	147,44	147,31	153,07
1981	149,69	134,58	126,80	91,10	89,29	96,53	104,28	102,42	105,45	105,80	103,51	80,66
1982	106,92	93,87	91,54	86,06	82,16	112,28	119,69	116,21	121,24	112,52	117,46	115,27
1983	131,63	147,46	123,42	119,38	112,43	118,63	132,97	115,55	137,23	120,05	112,81	121,75
1984	146,69	130,42	129,43	87,61	91,91	93,82	102,73	106,17	96,53	111,05	100,02	82,91
1990	129,43	150,36	112,17	98,08	114,80	119,01	130,64	122,30	131,42	121,18	124,83	119,59
1991	176,70	186,91	129,81	148,48	139,94	139,56	128,32	138,81	153,90	158,32	125,60	138,06
1992	173,70	184,00	165,45	134,91	129,43	134,91	139,56	153,44	151,19	136,18	118,63	151,19
1993	150,06	175,70	144,81	127,54	116,68	106,61	126,38	136,56	133,75	128,68	125,60	146,31
1994	148,56	137,48	121,55	141,89	135,43	153,13	154,68	156,44	161,27	175,20	152,35	129,81
1995	159,82	181,51	144,81	131,81	144,44	166,70	148,48	164,32	177,94	128,31	141,11	146,69
1996	163,57	152,02	126,92	158,94	127,93	145,76	155,84	154,19	148,86	152,69	124,42	124,34
1998	140,27	151,94	127,35	163,60	131,31	159,72	150,41	146,31	194,61	169,95	167,86	193,58
1999	161,69	161,99	189,83	162,43	152,32	155,84	171,74	157,57	149,64	147,44	170,57	170,70
2000	161,32	141,22	120,43	135,30	126,05	144,99	129,09	151,19	153,13	135,06	149,25	121,55
2001	176,70	192,31	125,68	131,42	116,68	151,97	189,18	181,95	191,12	176,70	167,08	175,95
2002	213,47	236,75	166,20	159,72	163,95	189,57	186,86	190,21	182,98	156,82	136,07	126,05
2003	150,64	210,59	178,20	154,68	210,47	233,76	325,64	307,26	257,02	231,85	267,49	243,85
2004	252,86	229,69	286,25	251,98	222,10	249,27	258,19	263,36	144,20	133,90	217,87	225,47
2005	267,49	297,40	288,87	233,38	153,82	84,90	259,35	152,51	144,20	133,90	137,09	136,43
2006	82,16	112,56	71,28	79,47	84,79	86,84	88,39	94,17	97,30	79,53	84,12	89,14
2008	96,91	134,99	125,30	114,75	96,04	121,73	126,38	109,92	98,15	91,96	89,11	86,03
2009	101,29	126,68	108,42	115,52	111,42	124,44	87,31	100,28	95,41	88,93	151,58	145,19
2010	171,45	104,26	117,43	118,24	107,30	107,38	123,28	112,17	116,69	125,30	107,77	96,04
2011	81,03	112,56	103,54	114,75	107,67	121,34	124,44	127,93	117,08	109,17	106,22	111,05
2012	106,17	148,70	94,92	86,84	92,29	113,97	105,06	99,04	98,47	113,67	111,26	110,30
2013	120,05	103,84	105,42	82,15	78,78	88,55	88,97	96,61	91,07	87,66	88,00	82,79
2016	101,25	101,66	85,49	80,91	77,93	87,35	87,98	69,78	66,29	76,91	44,58	48,77
2017	65,28	90,13	73,91	75,98	72,41	70,17	79,86	94,92	105,06	72,41	89,55	69,40
2018	77,66	14,54	54,02	72,88	71,66	89,01	89,94	91,91	93,82	93,04	82,96	107,30
2019	97,54	122,95	68,28	89,16	86,66	92,26	101,96	96,47	90,22	93,42	93,04	90,41
2020	152,69	174,45	127,93	107,00	84,79	141,11	151,97	156,07	92,51	97,17	90,71	118,18
2021	126,43	107,99	92,29	108,93	95,29	129,09	113,97	110,67	126,38	112,17	119,01	122,30
PROMEDIO	138,93	149,62	127,92	123,86	116,43	126,49	136,58	133,09	131,45	123,04	125,69	125,63
MÁXIMO	267,49	297,40	288,87	251,98	222,10	249,27	325,64	307,26	257,02	231,85	267,49	243,85
MÍNIMO	65,28	14,54	54,02	72,88	71,66	70,17	79,86	69,78	66,29	72,41	44,58	48,77

Tabla 3 Radiación solar promedio diaria. – Elaboración propia basado en los datos de las series de tiempo tomados y registrados por la CAR desde 1966 a 2021



*Ilustración 1 Brillo Solar- Elaboración propia.*



*Ilustración 2 Radiación Solar promedio – Elaboración propia.*

El comportamiento de la variable expresado en los gráficos es congruente con las anotaciones del IDEAM y otros artículos como el relacionado en el “*Estudio del Recurso Solar en la Ciudad de Bogotá para el Diseño de Sistemas Fotovoltaicos Interconectados Residenciales*”. La variable tiende a presentar sus valores más bajos en los meses de abril, mayo y octubre, con una tendencia a aumentar en los meses de julio, diciembre; presentando sus valores más alto en los meses de enero y febrero (Hernández, Sáenz y Vallejo, 2010).

Cabe anotar, que en efecto los valores obtenidos en las series de tiempo promediadas son próximos a los datos expresados en los reportes de IDEAM y los presentes en el artículo de referencia citado en el anterior párrafo; es decir que la tendencia graficada es similar.

### **Estaciones de Transmilenio y Demanda Eléctrica**

Según el documento de Transmilenio y la Alcaldía Mayor de Bogotá, las estaciones se encuentran clasificadas según su tamaño y funcionalidad, siendo la característica más importante para efectos de este trabajo, la geometría de sus cubiertas, las longitudes y la demanda eléctrica de las mismas (Sistema Integrado de Transporte Publico, 2013).

#### **Según su funcionalidad:**

Sencillas

Sencillas de Transferencia

Sencillas Sin Intercambio

Intermedias

Portales

Todas ellas configuradas en cuatro patrones, definidos según el tipo de vagón que las conforman.

Para efectos prácticos, la siguiente imagen tomada del documento de Transmilenio y la Alcaldía Mayor de Bogotá, muestra los tipos de vagones, con sus respectivas dimensiones

**W1:** Este es un módulo típico de acceso con 2 plataformas cubiertas, el cual tiene de una longitud de 48.0 m, el cual se divide en; una zona de acceso de 12.0 m, seguido de una plataforma de 14.4 m, un intervalo de 4.8 m, una plataforma de 14.4 m y un intervalo final de 2.4 m.

**W2:** Este es un módulo típico interior con 2 plataformas cubiertas, el cual tiene de una longitud de 40.8 m, el cual se divide en; un intervalo de 4.8 m, seguido de una plataforma de 14.4 m, un intervalo de 4.8m, una plataforma de 14.4m, y un intervalo de 2.4 m.

**W3:** Este es un módulo típico de acceso con una plataforma cubierta, el cual tiene de una longitud de 31.2 m, el cual se divide en; un acceso de 12.0 m, una plataforma de 14.4 m, y un intervalo de 4.8m.

**W4:** Este es un módulo típico interior con una plataforma cubierta, el cual tiene una longitud de 24.0 m, el cual se divide en; un intervalo de 4.8 m, seguido por una plataforma de 14.4 m, y un intervalo de 4.8 m.

*Ilustración 3 Dimensiones vagones TransMilenio- Sistema Integrado de Transporte Publico, 2013)*

La cubierta de los vagones en general es 5 metros más grande que su longitud al nivel de la superficie de tránsito y cuyo ancho efectivo esta entre los 5 y los 7 metros (Sistema Integrado de Transporte Publico, 2013)

### **Patrones de Configuración**

Tal como lo muestra el documento trabajado anteriormente, las configuraciones son las siguientes:

**PATRON 1:** Con 2 accesos y se configura con los módulos típicos de la siguiente manera: Rampa-W1-Modulo de transición descubierto de 34 m-W2- Modulo de transición descubierto de 34 m -W3-Rampa.

**PATRON 2:** Con 2 accesos y se configura con los módulos típicos de la siguiente manera: Rampa-W1- Modulo de transición descubierto de 34 m -W1-Rampa.

**PATRON 2:** Con 1 acceso y se configura con los módulos típicos de la siguiente manera: W2-Modulo de transición descubierto de 34 m -W1- Rampa.

**PATRON 3:** Con 2 accesos y se configura con los módulos típicos de la siguiente manera: Rampa-W3- Modulo de transición descubierto de 34 m -W3-Rampa.

**PATRON 3:** Con 1 acceso y se configura con los módulos típicos de la siguiente manera: Rampa W3-Modulo de transición descubierto de 34 m -W4.

**PATRON 4:** Con 1 acceso y se configura con los módulos típicos de la siguiente manera: Rampa-W1.

*Ilustración 4 Patrones de configuración TransMilenio- (Sistema Integrado de Transporte Publico, 2013)*

En este orden de ideas las estaciones se distinguen según el tipo de vagones que las configuran, tal como se muestra en la siguiente tabla resumen extraída del documento Capitulo de la Infraestructura para los Escenarios del Sistema Integrado de Transporte Publico.

FASE	TRONCAL	ESTACIÓN	VAGONES
FASE I	AV. CARACAS	Molinos	W1 + W1
		Consuelo	W3 + W4
		Socorro	W3 + W4
		Santa Lucia	W1 + W1
		Parque	W1 / W1
		Biblioteca	W1 / W1
		Cl. 40 Sur	W3+W2+W1
		Quiroga	W3+W4
		Olaya	W3+W4
		Restrepo	W3+W4
		Fucha	W3+W4
		Nariño	W3+W4
		Hortúa	W3+W3
Hospital	W3+W4		
Tercer Milenio	W3+W2+W1		

*Ilustración 5 Configuración vagones Fase I- (Sistema Integrado de Transporte Publico, 2013)*

FASE	TRONCAL	ESTACIÓN	VAGONES	
		Jiménez	W3+W2+W1	
		Cl. 19	W3+W2+W1	
		Cl. 22	W3+W2+W1	
		Cl. 26	W3+W2+W1	
		Profamilia	W3+W2+W1	
		Av. 39	W3+W2+W1	
		Cl. 45	W3+W2+W1	
		Marly	W3+W2+W1	
		Cl. 57	W3+W2+W1	
		Cl. 63	W3+W2+W1	
		Flores	W1+W1	
		Cl. 72	W3+W2+W1	
		Cl. 76	W3+W2+W1	
		CALLE 80	Quirigua	W1
			Cr. 90	W1
			Av. Cali	W1
			Granja	W1
	Cr. 77		W1+W4+W3	
	Mínuto de Dios		W1	
	Boyacá		W1	
	Fenas		W1	
	Avenida 68		W1	
	Cr. 53		W1	
	Cr. 47	W1		
	AUTOPISTA NORTE	Escuela Militar	W1 + W2	
		Polo	W1	
		Héroes	W1+W2+W8	
		Cl. 85	W2+W1 / W3+W4 / W4+W3	
		Virey	W1+W2+W2	
		Cl. 100	W1+W2+W1	
		Cl. 106	W3+W4 / W4+W3	
		Pepe Sierra	W2+W1	
		Cl. 127	W2+W1	
Prado		W2+W4+W3		
Alcalá		W1+W2+W5		
Cl. 142		W3+W4 / W4+W3		
Cl. 146		W3+W4		
Mazurén		W3+W4 / W4+W3		

*Ilustración 6 Configuración vagones Fase II- (Sistema Integrado de Transporte Publico, 2013)*

FASE	TRONCAL	ESTACIÓN	VAGONES	
FASE II		Cardio Infantil	W3+W4 / W4+W3	
		Toberín	W3+W4 / W4+W3	
		Santa Fé	W2+W2	
		Terminal	W2+W2	
	EJE AMBIENTAL	Museo Del Oro	W1	
		Las Aguas	W1	
	AMÉRICAS	Av. Jimenez	W1+W1 / W1+W1	
		Patio Bonito	W1+W2 / W2+W1	
		Biblioteca Tintal	W1+W2 / W2+W1	
		Tv. 86	W2+W2+W2+W2	
		Mandalay	W2+W2+W2+W2	
		Mundo Aventura	W2+W2+W2+W2	
		Marsella	W4+W2+W2 / W4+W2+W2	
		Pradera	W4+W4 / W4+W4	
		Américas Cr. 53A	W2+W2 / W2+W2	
		CALLE 13	Puente Aranda	W3+W4
			Cr. 43	W3+W3
			Zona Industrial	W3+W3
			CDS Cr. 32	W3+W3
Ricaurte			W3+W2+W1	
San Fason Cr. 22			W1+W1	
De la Sabana			W3+W3	
NQS		Perdomo	W3+W4	
		Madelena	W3+W4	
		Sevillana	W3+W4	
		Venecia	W3+W4	
		Alqueria	W3+W4	
		General Santander	W2+W1 / W2+W1	
		NQS Cl. 38 A sur	W3+W4	
		NQS Cl. 30 Sur	W3+W4	
		SENA	W3+W4	
		Santa Isabel	W3+W4	
		Comuneros	W1+W1	
	Ricaurte	W3+W2+W1		
	Paloquemao	W2+W1		
CAD	W1+W1			
Av. Dorado	W1			
U. Nacional	W1+W2+W3			

*Ilustración 7 Configuración vagones Fase II- (Sistema Integrado de Transporte Publico, 2013)*

FASE	TRONCAL	ESTACIÓN	VAGONES
		Campín	W1+W2
		Coliseo	W1+W2
		Simón Bolívar	W1+W2
		Av. Chile	W4+W2+W2 / W4+W2+W2
		NQS Calle 75	W2+W2 / W2+W2
		La Castellana	W4+W4 / W4+W4
	SUBA	La campiña	W3+W4
		Suba Tv. 91	W3+W4
		21 Ángeles	W3+W4
		Gratamira	W3+W4
		Suba Av. Boyacá	W4+W4
		Niza Cl. 127	W3+W3
		Humedal Córdoba	W3+W4
		Shaio	W3+W4
		Puente Largo	W3+W4
		Suba Cl. 100	W3+W4
		Suba Cl. 95	W3+W4
		Rionegro	W3+W4
		San Martín	W3+W4

*Ilustración 8 Configuración vagones Fase II- (Sistema Integrado de Transporte Publico, 2013)*

## Demanda Eléctrica por Tipo de Vagón

La demanda eléctrica de cada uno de los cuatro tipos de vagones está determinada por el consumo eléctrico de los componentes relacionados en las siguientes tablas (Rojas, 2018)

consumo estación W -1					consumo estación W -2				
POTENCIA EN W	ELEMENTOS DE CONSUMO EN LA ESTACION	NUMERO DE ELEMENTOS	HORAS DIARIAS DE USO	TOTAL	POTENCIA EN W	ELEMENTOS DE CONSUMO EN LA ESTACION	NUMERO DE ELEMENTOS	HORAS DIARIAS DE USO	TOTAL
25	LAMPARAS TUBULAR LED DE 1,2M	70	9	15750	25	LAMPARAS TUBULAR LED DE 1,2M	60	9	13500
50	LAMPARA LED	3	9	1350	50	LAMPARA LED	3	9	1350
180	MOTOR DE PUERTA	14	14	35280	180	MOTOR DE PUERTA	14	14	35280
180	TORNQUETES	4	21,5	15480	180	TORNQUETES	0	21,5	0
180	EQUIPO GRABACION CCTV	1	24	4320	180	EQUIPO GRABACION CCTV	1	24	4320
600	INFORMACION SISTEMA	1	21,5	12900	600	INFORMACION SISTEMA	1	21,5	12900
180	CONEXIÓN TAQUILLAS	5	21,5	19350	180	CONEXIÓN TAQUILLAS	0	21,5	0
600	PUBLICIDAD ILUMINADA	4	21,5	51600	600	PUBLICIDAD ILUMINADA	4	21,5	51600
				156030					118950
			TOTAL DIA	156,03 kWh/día				TOTAL DIA	118,95 kWh/día
			TOTAL AÑO	56.950,95 kWh/año				TOTAL AÑO	43.416,75 kWh/año
M <sup>2</sup>	TOTAL CONSUMO DIARIO kWh/m2	TOTAL CONSUMO MES kWh/m2	TOTAL CONSUMO AÑO kWh/m2		M2	TOTAL CONSUMO DIARIO kWh/m2	TOTAL CONSUMO MES kWh/m2	TOTAL CONSUMO AÑO kWh/m2	
237,6 m2	0,65	19,77	237,25		205,2 m2	0,58	17,64	211,7	

Ilustración 9 Consumo estación W-1, W-2 (Rojas, 2018)

consumo estación W -3					consumo estación W -4				
POTENCIA EN W	ELEMENTOS DE CONSUMO EN LA ESTACION	NUMERO DE ELEMENTOS	HORAS DIARIAS DE USO	TOTAL	POTENCIA EN W	ELEMENTOS DE CONSUMO EN LA ESTACION	NUMERO DE ELEMENTOS	HORAS DIARIAS DE USO	TOTAL
25	LAMPARAS TUBULAR LED DE 1,2M	48	9	10800	25	LAMPARAS TUBULAR LED DE 1,2M	40	9	9000
50	LAMPARA LED	3	9	1350	50	LAMPARA LED	3	9	1350
180	MOTOR DE PUERTA	6	14	15120	180	MOTOR DE PUERTA	6	14	15120
180	TORNQUETES	4	21,5	15480	180	TORNQUETES	0	21,5	0
180	EQUIPO GRABACION CCTV	1	24	4320	180	EQUIPO GRABACION CCTV	1	24	4320
600	INFORMACION SISTEMA	1	21,5	12900	600	INFORMACION SISTEMA	1	21,5	12900
180	CONEXIÓN TAQUILLAS	5	21,5	19350	180	CONEXIÓN TAQUILLAS	0	21,5	0
600	PUBLICIDAD ILUMINADA	2	21,5	25800	600	PUBLICIDAD ILUMINADA	2	21,5	25800
				105120					68490
			TOTAL DIA	105,12 kWh/día				TOTAL DIA	68,49 kWh/día
			TOTAL AÑO	38.368,8 kWh/año				TOTAL AÑO	24.998,85 kWh/año
M2	TOTAL CONSUMO DIARIO kWh/m2	TOTAL CONSUMO MES kWh/m2	TOTAL CONSUMO AÑO kWh/m2		M2	TOTAL CONSUMO DIARIO kWh/m2	TOTAL CONSUMO MES kWh/m2	TOTAL CONSUMO AÑO kWh/m2	
162 m2	0,65	19,77	237,25		129,6 m2	0,53	16,12	193,45	

Ilustración 10 Consumo estación W-3, W-4 (Rojas, 2018)

Así, teniendo en cuenta la anterior información y acudiendo a la configuración por vagones que presentan las distintas estaciones del sistema Transmilenio, será posible estimar la demanda eléctrica de cada tipo tal y como se constituyen. Las siguientes tablas muestran 16 configuraciones:

Estacion Tipo 1			
Tipo de Vagon	Cantidad	Demanda Electrica KWh/dia	Total KWh/dia
W1	2	156,03	312,06
		Total	312,06

Estacion Tipo 2			
Tipo de Vagon	Cantidad	Demanda Electrica KWh/dia	Total KWh/dia
W1	1	156,03	156,03
W2	1	118,95	118,95
W3	1	105,12	105,12
		Total	380,1

Estacion Tipo 3			
Tipo de Vagon	Cantidad	Demanda Electrica KWh/dia	Total KWh/dia
W3	1	105,12	105,12
W4	1	68,49	68,49
		Total	173,61

Estacion Tipo 4			
Tipo de Vagon	Cantidad	Demanda Electrica KWh/dia	Total KWh/dia
W1	1	156,03	156,03
W2	1	118,95	118,95
		Total	274,98

Estacion Tipo 5			
Tipo de Vagon	Cantidad	Demanda Electrica	Total KWh/dia
W1	1	156,03	156,03
W3	1	105,12	105,12
W4	1	68,49	68,49
		Total	329,64

Estacion Tipo 6			
Tipo de Vagon	Cantidad	Demanda Electrica	Total KWh/dia
W2	1	118,95	118,95
W3	1	105,12	105,12
W4	1	68,49	68,49
		Total	292,56

Estacion Tipo 7			
Tipo de Vagon	Cantidad	Demanda Electrica	Total KWh/dia
W1	1	156,03	156,03
W2	1	118,95	118,95
W3	2	105,12	210,24
W4	2	68,49	136,98
		Total	622,2

Estacion Tipo 8			
Tipo de Vagon	Cantidad	Demanda Electrica	Total KWh/dia
W3	2	105,12	210,24
W4	2	68,49	136,98
		Total	347,22

Estacion Tipo 9			
Tipo de Vagon	Cantidad	Demanda Electrica KWh/dia	Total KWh/dia
W2	2	118,95	237,9
		Total	237,9

Estacion Tipo 10			
Tipo de Vagon	Cantidad	Demanda Electrica KWh/dia	Total KWh/dia
W1	4	156,03	624,12
		Total	624,12

Estacion Tipo 11			
Tipo de Vagon	Cantidad	Demanda Electrica KWh/dia	Total KWh/dia
W1	2	156,03	312,06
W2	2	118,95	237,9
		Total	549,96

Estacion Tipo 12			
Tipo de Vagon	Cantidad	Demanda Electrica KWh/dia	Total KWh/dia
W2	4	118,95	475,8
		Total	475,8

Estacion Tipo 13			
Tipo de Vagon	Cantidad	Demanda Electrica	Total KWh/dia
W3	2	105,12	210,24
		Total	210,24

Estacion Tipo 14			
Tipo de Vagon	Cantidad	Demanda Electrica	Total KWh/dia
W1	1	156,03	156,03
		Total	156,03

Estacion Tipo 15			
Tipo de Vagon	Cantidad	Demanda Electrica	Total KWh/dia
W2	4	118,95	475,8
W4	2	68,49	136,98
		Total	612,78

Estacion Tipo 16			
Tipo de Vagon	Cantidad	Demanda Electrica	Total KWh/dia
W4	4	68,49	273,96
		Total	273,96

Tabla 4 Configuraciones por vagones TransMilenio. - (Sistema Integrado de Transporte Publico, 2013)

Ahora bien, teniendo las horas promedias diarias de brillo solar por mes y definiendo los tipos de paneles solares, será posible estimar cuanto de ellos se necesitan para suplir la demanda eléctrica de cada una de las estaciones, considerando claro está, las restricciones espaciales que las cubiertas de los vagones supongan.

Después de haber investigado y consultado las fuentes de distintos proveedores de paneles solares, es posible identificar tres tipos de tecnologías disponibles:

**Monocristalinos:** de todo el mercado son los que están asociados a un mayor rendimiento y estabilidad en el tiempo, aunque suponen mayores costos. Están fabricados a partir del crecimiento controlado de cristales de silicio metalúrgico y cuidando que solo se genere un tipo de estructura cristalina, de ahí su nombre.

**Policristalino:** A diferencia de los monocristalinos, estos no tienen control en el proceso de formación de los cristales, tendiéndose entonces a crearse, varias estructuras que facilitan la disposición de estos en lingotes para la conformación de celdas fotovoltaicas. Son inferiores en rendimiento que los monocristalinos, pero también implican menores costos por unidad.

**Amorfos:** Materiales con propiedades fotovoltaicas tales como el silicio, telurio de cadmio, cobre, galio y selenio; son dispuestos en capas y confinados entre plásticos, vidrios o tejidos, para generar células flexibles integrables a varios materiales de construcción.

Según la información consultada en la página de varias asociaciones europeas y según ANIPIER (Asociación Nacional de Productores de Energía Fotovoltaica) y la UNEF (Asociación Española Fotovoltaica), mediante el uso de paneles solares es posible el aprovechamiento de un 70% de la radiación solar recibida, con ahorros por concepto de factura eléctrica de un 50 a 60%.

Habiendo hecho una introducción de la tecnología base que configura los paneles solares, es oportuno resaltar que los hay en el mercado en varios precios y ofertados según su capacidad. Para efectos de este trabajo, se utilizarán paneles solares monocristalinos de 545W, 24V, cuyo precio en el mercado se encuentra alrededor de \$1'038,665 y que según el fabricante posee las siguientes especificaciones:

- Potencia del Panel Solar: 545W
- Tipo de Célula del Panel Solar: Monocristalina
- Rigidez del Panel Solar: Rígido
- Dimensiones del Panel Solar: 2278 x 1134 x 33mm
- Tensión Máxima Potencia: 41.80V
- Eficiencia del Módulo: 21.1%
- Tensión en Circuito Abierto: 49.75V
- Voltaje de Trabajo del Panel Solar: 24V
- Peso del Panel Solar: 27,8KG
- Marco del Panel Solar: Aluminio anodizado
- Garantía del Panel Solar: 10 años

*Ilustración 11 Ficha técnica panel solar- (AutoSolar, 2023)*

### **Cálculo de la Electricidad producida por cada panel solar**

La electricidad producida por cada panel es el producto de la potencia del panel solar y las horas de sol diarias registradas, que por supuesto según lo indicado en las tablas de brillo solar diario, varía dependiendo la época del año.

MES	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
PROMEDIO (h/día)	4,74	4,56	3,45	2,86	2,75	3,09	3,45	3,32	3,37	3,16	3,53	3,51
POTENCIA PANEL SOLAR (WATS)	545	545	545	545	545	545	545	545	545	545	545	545
TOTAL (Wh/día)	2582,862	2485,148	1882,372	1559,858	1498,91	1686,47	1881,89	1808,5196	1836,392088	1724,4842	1925,953594	1913,90282
TOTAL (kWh/día)	2,58	2,49	1,88	1,56	1,50	1,69	1,88	1,81	1,84	1,72	1,93	1,91
TOTAL (kWh/año)	942,74	907,08	687,07	569,35	547,10	615,56	686,89	660,11	670,28	629,44	702,97	698,57

*Tabla 5 Electricidad producida por cada panel solar – Elaboración propia.*

Ahora tomaremos el mínimo valor que un panel solar de 545 W y 24 V será capaz de producir de acuerdo con las horas de sol diarias promedios presentes en determinado mes. Tal y como se

aprecia en la anterior tabla dicho valor corresponde al mes de mayo con el cual se pueden producir 1.50 kWh/día por cada panel solar, de tal forma que, para satisfacer la demanda eléctrica de cada estación, será necesario un número determinado de paneles solares para cubrir el requerimiento de dicho mes y por supuesto al ser el dato más crítico, la disposición de paneles que resulte cubrirá por exceso el resto de los periodos. La siguiente tabla muestra entonces el número de paneles necesarios para cada tipo de estación.

Estación	Demanda Eléctrica Total (kWh/día)	Electricidad producida por un solo panel solar (kWh/día)	Número total de paneles requeridos	Área Panel (m <sup>2</sup> )	Área disponible en cubierta m <sup>2</sup> con ancho promedio de 5,5 metros	Área requerida en cubierta m <sup>2</sup>
Tipo 1	312,06	1,5	208	2,58	583	537,420
Tipo 2	380,1	1,5	253	2,58	742,5	654,596
Tipo 3	173,61	1,5	116	2,58	357,5	298,986
Tipo 4	274,98	1,5	183	2,58	544,5	473,562
Tipo 5	329,64	1,5	220	2,58	649	567,695
Tipo 6	292,56	1,5	195	2,58	610,5	503,837
Tipo 7	622,2	1,5	415	2,58	1259,5	1071,533
Tipo 8	347,22	1,5	231	2,58	715	597,971
Tipo 9	237,9	1,5	159	2,58	506	409,704
Tipo 10	624,12	1,5	416	2,58	1166	1074,839
Tipo 11	549,96	1,5	367	2,58	1089	947,124
Tipo 12	475,8	1,5	317	2,58	1012	819,408
Tipo 13	210,24	1,5	140	2,58	396	362,069
Tipo 14	156,03	1,5	104	2,58	291,5	268,710
Tipo 15	612,78	1,5	409	2,58	1331	1055,310
Tipo 16	273,96	1,5	183	2,58	638	471,805

*Tabla 6 Número de paneles necesarios- Elaboración propia*

Es preciso anotar que desafortunadamente este es un escenario ideal debido a que las horas de brillo solar promedio diarias, no son continuas, y por consiguiente para que el sistema sea efectivo

será necesario la instalación de un sistema de almacenamiento eléctrico o bancos de baterías; de lo contrario se considera que el sistema pudiera quedar sub utilizado; y en tal caso es mejor plantear una disposición de menos paneles y banco de baterías para que suplan una parte de la demanda eléctrica de las estaciones; el resto del tiempo mediante un inversor, las estaciones seguirán abasteciéndose con el sistema eléctrico convencional.

Considerando el panel solar propuesto y su valor, solo por concepto de los paneles necesarios para suplir la demanda eléctrica de las estaciones, el proyecto tendría un valor de \$ 4'055,156,595, sin contar la mano de obra, bancos de baterías y adecuación de la estructura de cubierta.

### 7.3 Ámbito Comercial

- El Sistema Integrado de Transporte Público, está diseñado para que su operación sea prolongada durante los años, por tanto, si se justifica la inversión de bancos de baterías que permitan suplir energía para los sistemas que funcionan durante las horas de la noche, como lo es la iluminación de la señalización y las luces de emergencia. Aunque se requiere una interconexión con el sistema eléctrico tradicional para garantizar una segunda fuente de energía, por temas de seguridad y funcionamiento.
- La industria colombiana viene implementando el uso e instalación energías limpias. La viabilidad de estos proyectos se ve reflejada en apuestas organizativas, una de ellas es la Asociación de Energías Renovables Colombia – SER Colombia, más de 90 compañías a nivel nacional e internacional buscan el desarrollo de energías renovables no convencionales en el país.
- La implementación de este tipo de proyectos genera beneficios económicos, una planta de energía puede fácilmente reducir el consumo entre 30 y 40 %, una familia colombiana que su consumo de energía este un rango entre los 350 a 400 KW en el mes, debe estar pagando recibos en promedio de \$ 250.000 a \$300.000 pesos, como producto de la implementación de tamaño normal puede llegar a pagar \$ 120.000 a \$ 150.000 pesos.
- La normativa vigente, enlista los beneficios que trae la implementación de proyectos de fuentes no convencionales de energía renovables, entre ellos se encuentra las deducciones especiales hasta el 50% de la inversión, la depreciación acelerada, la exclusión en temas de IVA y aranceles.

## Conclusión

En efecto, tal como muestran los resultados de la evaluación, es posible suplir parte de la demanda eléctrica (o su totalidad, dependiendo de las configuraciones técnicas que se instalen) de las estaciones mediante la implementación de un sistema de paneles solares que por las restricciones espaciales que suponen las cubiertas de estos equipamientos, deben de ser mínimo de 545 W a 24 V (con especificaciones menores el espacio disponible en las cubiertas es insuficiente).

El hecho de que la ciudad de Bogotá presente un promedio de brillo solar relativamente bajo obliga a que el número de paneles solares necesarios para suplir la demanda eléctrica de las estaciones aumente considerablemente, lo que constituye un limitante, pues al momento de tener que decidir sobre la implementación de un *“modelo de autoproducción y suministro eléctrico de pequeña escala con aplicación a Transmilenio”* basado en paneles solares, este puede generar la idea de ser muy costoso o de tener una baja relación costo beneficio. Sin embargo, es pertinente aclarar que es un costo que hay que asumir si se trata de enmarcar la operación del sistema de transporte masivo en los lineamientos y objetivos de los procesos de transición energéticos que actualmente el país pretende llevar a cabo.

Adicionalmente, debido al hecho de que el promedio diario de horas de brillo solar no es continuo, es necesario la implementación de bancos de baterías, que puedan almacenar la electricidad producida y posteriormente liberarla para consumo de la estación en forma continua. Esta necesidad, incrementa los costos del modelo considerablemente, pues como se sabe en el mercado de la electricidad, lo más costoso es almacenarla.

Por último, para dar respuesta a la pregunta de investigación acerca de si ¿es factible técnicamente desarrollar un modelo de autoproducción y suministro eléctrico de pequeña escala de paneles solares con aplicación a TransMilenio? la información registrada en este documento demuestra que es factible; tal como se puede apreciar, con un sistema adecuado de paneles fotovoltaicos es posible suplir gran parte de la demanda eléctrica de las estaciones o su totalidad. Todo depende del costo que los bogotanos estén dispuestos a pagar por tal beneficio.

## Referencias

- Alfonso, R. (2019) Caracterización energética para la evaluación de los impactos ambientales reales y potenciales del consumo energético, caso estudio conjunto residencial abedul en Soacha, Cundinamarca. [tesis de pregrado, universidad del bosque]. Repositorio universidad del bosque. Recuperado de:  
<https://repositorio.unbosque.edu.co/handle/20.500.12495/2135>
- AutoSolar (2023) Ficha técnica. Recuperado de: [Panel Solar 545W 24V Monocrystalino JA SOLAR | AutoSolar](#)
- Ballesteros, V.; Gallego, A. (2019) Modelo de educación en energías renovables desde el compromiso público y la actitud energética. Revista facultad de ingeniería. 28 (52), pp. 27-42. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n52.2019.9652>
- Barragán, E.; Cepeda, F.; Zalamea, E.; Parra, A. (2019) Las energías renovables a escala urbana. Aspectos determinantes y selección tecnológica. Bitácora urbano territorial, pp. 39-42. [Las energías renovables a escala urbana. Aspectos determinantes y selección tecnológica/renewable energy in urban areas. Critical aspects and technological selection - ciencia y tecnología - proquest](#)
- Barreto, J.; Parada, M. (2020). Evaluación potencial de generación de energía piezoeléctrica en los andenes: estudio de caso calle 85 de barranquilla [tesis de pregrado]. Archivo digital. [Evaluación potencial de generación de energía piezoeléctrica en los andenes: estudio de caso calle 85 de barranquilla \(cuc.edu.co\)](#)
- Caro, E. (2022) Propuestas regulatorias para la inclusión de las redes inteligentes en Colombia, aportando al desarrollo de las ciudades inteligentes en articulación con las energías renovables. [tesis de maestría, universidad de Antioquia] repositorio institucional:  
[https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/29876/1/caruelkin\\_2022\\_inclusionenergiasrenovables.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/29876/1/caruelkin_2022_inclusionenergiasrenovables.pdf)
- Castellanas, N. (2020). Estudio de factibilidad para la implementación de una empresa que comercialice y haga el montaje de pisos eléctricos en la ciudad de Bogotá D.C. [tesis de pregrado] archivo digital. [3132880-2020-iii-ii \(2\).pdf](#)

- Castillo, A. (2015) Energías verdes: planificación, adaptación y consumo de energías renovables como medio de sustentabilidad. [tesis de pregrado]. Archivo digital. [Energías verdes: planificación, adaptación y consumo de energías renovables como medio de sustentabilidad.pdf \(unipiloto.edu.co\)](#)
- Castro, I & Gámez, M (2022). Potencial De producción de biogás para su aprovechamiento energético en el contexto rural de Manabí. Ingeniería energética, 43(3), 62-70. [Potencial de producción de biogás para su aprovechamiento energético en el contexto rural de manabí \(sld.cu\)](#)
- Chandi Andrango, S. I. (2023). Desarrollo de cerámica piezoeléctrica para recolección de energía del tránsito peatonal y vehicular en cruce cebra [tesis de pregrado, universidad técnica del norte]. Archivo digital. [Http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13429](http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13429)
- Cuellar, M., De Moya., Pizon, C., Y Sarmiento, A. (2022). Trabajo de formulación y evaluación de proyectos. Universidad Ean.
- Dávila, A; Gámez, E; Melo, G.; Pimienta, G. (2020) Desarrollo de un prototipo de losa generadora de energía eléctrica usando sensores piezoeléctricos. Revista de estudios interdisciplinarios en ciencias sociales, tecnologías e innovación. 4 (1) pp. 8-18. [vista de desarrollo de un prototipo de losa generadora de energía eléctrica usando sensores piezoeléctricos | renovat: revista de estudios interdisciplinarios en ciencias sociales, tecnología e innovación \(sena.edu.co\)](#)
- De Moya, J.; Porras, M.; Hurtado, M. (2023). Simulación financiera del modelo de negocio. Universidad Ean.
- Diaz, D.; Gómez, J. (2019). Prefactibilidad ambiental de sustitución de fuentes energéticas convencionales por baldosas piezoeléctricas para iluminación. Parque de Usaquén [tesis de pregrado]. Archivo digital. [Gómez Alba Juan Sebastian 2019.pdf \(unbosque.edu.co\)](#)
- Forero, C. (2019) Estudio de la prospectiva y viabilidad de las fuentes de energía mareomotriz y biogás comparando su eficiencia energética y sostenibilidad ambiental, en relación con las fuentes de energía convencionales para la implementación en el

municipio de Barrancabermeja. Unidades tecnológicas Santander. [F-dc-125 informe final.pdf \(uts.edu.co\)](#)

- Hernández Sampieri, R., Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mcgraw-hill. <https://www-ebooks7-24-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/?II=6443>
- Hernández, E.; Sanjinez, M. (2022) Factibilidad de central eléctrica en base a baldosas piezoeléctricas para iluminación de una plaza de armas. [tesis de pregrado] archivo digital. [hernandez\\_nea-sanjinez\\_gma-sd.pdf \(ucv.edu.pe\)](#)
- Hernández, L.; Robledo, C. (2020). “Estudio de viabilidad para la creación de un sistema que permita transformar la energía cinética que se produce en los gimnasios del valle de aburra, en energía eléctrica limpia. [tesis de posgrado, institución universitaria esumer]. Archivo digital. [Trabajogrado\\_luisahernandez\\_carolinaperez \(1\).pdf](#)
- Hernández, n. (2022). Modelo de prospectiva para la formulación de escenarios del consumo energético de los sectores de consumo en Colombia. [tesis de magister, universidad autónoma de Bucaramanga (UNAB)]. Repositorio UNAB. Recuperado de: [https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/16165/2022\\_tesis\\_nelson\\_javier\\_hernandez.pdf?Sequence=1&isallowed=y](https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/16165/2022_tesis_nelson_javier_hernandez.pdf?Sequence=1&isallowed=y)
- Hernández, J.; Sáenz, E.; Vallejo, A. (2010). Estudio del Recurso Solar en la Ciudad de Bogotá para el Diseño de Sistemas Fotovoltaicos Interconectados Residenciales. *Revista Colombiana de Física*, 42 (2), 161-165. <https://www.bing.com/ck/a?!&p=9033421f627b5d4eJmltdHM9MTY4NDcxMzYwMCZpZ3VpZD0wZGQ4Y2IxMi1kMGM0LTZhNzAtMWMxMy1kODBiZDE4YjZiZjkmaW5zaWQ9NTE2OQ&ptn=3&hsh=3&fclid=0dd8cb12-d0c4-6a70-1c13-d80bd18b6bf9&psq=Estudio+del+Recurso+Solar+en+la+Ciudad+de+Bogot%c3%a1+para+el+Dise%c3%b1o+de+Sistemas+Fotovoltaicos+Interconectados+Residenciales&u=a1aHR0cDovL2Zpc2ljYS51ZGVhLmVkdS5jby9vanMvb2pzL2luZGV4LnBocC9yY2YvYXJ0aWNsZS9kb3dubG9hZC80MjAyMjEvODI&ntb=1>
- Hinostraza, L.; (2021) Diseño de un sistema generador piezoeléctrico para reducir los costos por la alimentación eléctrica de los equipos biomédicos de emergencia en el hospital santa rosa-lima. [tesis de pregrado]. Archivo

[digital.l.hinostroza\\_trabajo\\_de\\_suficiencia\\_profesional\\_titulo\\_profesional\\_2021.pdf](#)  
([utp.edu.pe](http://utp.edu.pe))

- IDEAM. (2022). Boletín especial de indicadores nacionales boletín especial de indicadores nacionales calidad del aire periodo 2018-2022. [1816d679-17e1-43a0-958f-8950b98e71aa](#) ([ideam.gov.co](http://ideam.gov.co))
- Ley 1715. (2014). Congreso de la República. Diario Oficial No. 49150  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>
- Ley 2099. (2021) [Congreso de la República. Diario Oficial No 51731. LEY 2099 DE 2021](#) ([suin-juriscol.gov.co](http://suin-juriscol.gov.co))
- Ley 2169. (2021). Diario Oficial No. 51.896 de la República. [LEY 2169 DEL 22 DE DICIEMBRE DE 2021.pdf](#) ([presidencia.gov.co](http://presidencia.gov.co))
- Ley 697. (2001) Congreso de la República. Diario Oficial No. 44573.  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4449>
- Mejía, J.; Ávila, D.; Córdova, F. (2016). Las innovaciones tecnológicas orientadas al autoabastecimiento energético sostenible: el caso de México. Revista bitácora urbano territorial, 26(1), pp. 93-102. [Redalyc. Las innovaciones tecnológicas orientadas al autoabastecimiento energético sostenible: el caso de méxico](#)
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2021). La contaminación atmosférica en Colombia. Minambiente. [Contaminación atmosférica - ministerio de ambiente y desarrollo sostenible](#) ([minambiente.gov.co](http://minambiente.gov.co))
- Muñoz, C.; Villamil, B.; Restrepo, A.; Bolívar, O. (2021) Estudio sociotécnico del uso de energías renovables como alternativa de iluminación en las comunidades de las zonas no interconectadas. [tesis de pregrado] archivo digital. [Estudio socio-técnico del uso de energías renovables como alternativa de iluminación en las comunidades de las zonas no interconectadas | revista uis ingenierías](#)
- Ortiz, M. F. (2022). Propuesta para la implementación de baldosas piezoeléctricas como alternativa energética para el Centro Comercial Santafé en Bogotá D.C. [tesis de pregrado]. Archivo digital. [Http://hdl.handle.net/20.500.12495/7830](http://hdl.handle.net/20.500.12495/7830).
- Pineda, J.; Infante, G.; Milán, J. (2018) Elaboración de un estudio de prefactibilidad para el montaje de una empresa de comercialización, instalación y

mantenimiento de plataformas piezoeléctricas: caso portales y estaciones de TransMilenio. [tesis de pregrado] archivo digital.

<https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/921/millan%20mican%2c%20juan%20pablo%20-%202018.pdf?Sequence=1&isallowed=y>

- Proyecto de Ley. (2022). Departamento Nacional de Planeación. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-05-04-bases-plan-nacional-de-inversiones-2022-2026.pdf>
- Rodríguez, J. (2022) Eficiencia energética en una centro comercial y ahorro con energías renovables. [tesis de pregrado, universidad pontificia comillas]. Repositorio comillas. Recuperado de: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/64937>
- Rodríguez, J.; Alvarado, J. (2021) Desarrollo de un prototipo basado en dispositivos piezoeléctricos para generar energía eléctrica alternativa y alimentar el alumbrado público del puente de la unidad nacional. [tesis de pregrado]. Archivo digital. [Guía para la \(ug.edu.ec\)](http://Guia para la (ug.edu.ec))
- Rojas, S. (2018) Viabilidad del uso de paneles fotovoltaicos para suplir la demanda eléctrica de los vagones del sistema Transmilenio (Tesis). Recuperada de: [201617\\_RojasSergio.pdf \(upc.edu\)](http://201617_RojasSergio.pdf (upc.edu))
- Sas, Rs. (2022). Diseño de una planta de producción de bioetanol para una capacidad de producción de 80000 toneladas al año. Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/191204>
- Ser Colombia (2018) evaluación de la flexibilidad del sistema eléctrico de Colombia- caso de estudio de la herramienta Flextool de IRENA. <https://ser-colombia.org/wp-content/uploads/2020/09/Evaluaci%C3%B3n-de-la-flexibilidad-del-sistema-el%C3%A9ctrico-de-Colombia.pdf>
- Sistema Integrado de Transporte Público – SITP. (2013). Capítulo de la infraestructura para los escenarios del Sistema Integrado de Transporte Público – SITP, Plan De Ascenso Tecnológico Línea Cuatro. Recuperado de <https://www.bing.com/ck/a?!&&p=4fddeeddaf25bc09JmltdHM9MTY4NDcxMzYwMCZpZ3VpZD0wZGQ4Y2IxMi1kMGM0LTZhNzAtMWMxMy1kODBiZDE4YjZiZjkmaW5zaWQ9NTE2OQ&ptn=3&hsh=3&fclid=0dd8cb12-d0c4-6a70-1c13->

[d80bd18b6bf9&psq=CAPITULO+DE+LA+INFRAESTRUCTURA+PARA+LOS+ESCENARIOS+DEL+SISTEMA+INTEGRADO+DE+TRANSPORTE+P%C3%9aBLICO+%e2%80%93SITP%2c+2013\)&u=a1aHR0cHM6Ly93d3cudHJhbnNtaWxlbmlvLmdvdi5jby9sb2FkZXIucGhwP2xTZXJ2aWNpbz1Ub29sczImbFRpcG89ZGVzY2FyZ2FzJmxGdW5jaW9uPWRLc2NhcmdhciZpZD0xMzEzNw&ntb=1](https://www.transmilenio.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=53628)

- Sistema Integrado de Transporte Público- SITP. (2022). Estadísticas de oferta y demanda del Sistema Integrado de Transporte Público- Informe No.83.

<https://www.transmilenio.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=53628>

- Torres, L. (2021) Análisis de viabilidad para implementar sistemas fotovoltaicos de autogeneración para terrazas menores a 2000 m2 en Medellín. [tesis de pregrado].

Archivo

digital.[http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5029/1/Barrera\\_2021\\_TG.pdf](http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5029/1/Barrera_2021_TG.pdf)

- Cepal. (2023) Acerca del desarrollo Sostenible. [Acerca de Desarrollo Sostenible | CEPAL \(bingj.com\)](#)