

**EVALUACIÓN DE LA FAVORABILIDAD ECONÓMICA DE SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS EN COLOMBIA, A PARTIR DE LA OPTIMIZACIÓN DE LA  
INVERSIÓN EN FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES DE DEMANDA Y LA  
IRRADIACIÓN SOLAR CON BASE EN EL MODELO ECONÓMICO DE D. YOGI  
GOSWAMI**

**JONATHAN JAVIER ESCOBAR GALINDO**

**UNIVERSIDAD LIBRE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN ENERGÍAS ALTERNATIVAS  
BOGOTÁ D.C.  
2019**

**EVALUACIÓN DE LA FAVORABILIDAD ECONÓMICA DE SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS EN COLOMBIA, A PARTIR DE LA OPTIMIZACIÓN DE LA  
INVERSIÓN EN FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES DE DEMANDA Y LA  
IRRADIACIÓN SOLAR CON BASE EN EL MODELO ECONÓMICO DE D. YOGI  
GOSWAMI**

**JONATHAN JAVIER ESCOBAR GALINDO**

**Trabajo de Grado para optar al título de Magister en Ingeniería  
(Énfasis en Energías Alternativas)**

**Director: PhD. Ing. Camilo Arias Henao**

**UNIVERSIDAD LIBRE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN ENERGÍAS ALTERNATIVAS  
BOGOTÁ D.C.**

**2019**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Firma del director, asesor, orientador

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá, D.C., 2019

Albert Einstein dijo: *"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad"*, aunque yo le agregaría al final: .... y la energía atómica: la voluntad y la familia".

Dedico este proyecto de investigación a Dios por bendecirme, guiarme y brindarme las herramientas para culminar una etapa más en mi vida profesional. Así mismo, dedico este trabajo a mi familia: mamá, hermano, tíos y en especial a dos personas que han iluminado y han llenado mi vida de felicidad y amor, mi esposa Eimmy Preciado y mi hijo Joaquín Escobar Preciado.

## **Agradecimientos**

A mi familia por su constante motivación, apoyo y comprensión, en especial a mi esposa e hijo, que son el motor de mi vida.

A Yadison Preciado por brindarme su colaboración y sus conocimientos.

A cada uno de los docentes que hicieron parte de mi formación como magister, desde sus diferentes disciplinas.

Al ingeniero Camilo Arias, no solo por aceptar dirigir este proyecto, sino también por la dedicación, sus aportes, conocimiento y orientación en todo momento. Dios le bendiga.

Al ingeniero Ricardo Vega, por su interés para que este proyecto saliera adelante.

Finamente a todas aquellas personas que de alguna manera hicieron parte de este proyecto, no únicamente desde los cognitivo, investigativo y/o procedimental.

## RESUMEN

En la actualidad la generación de energía se encuentra como uno de los principales retos que enfrenta la ciencia debido a la limitación de recursos y los efectos adversos que generan las fuentes convencionales. Por lo que, hoy en día existen diferentes métodos de cogeneración que permiten suplir la necesidad energética y a su vez no perturban nocivamente el medioambiente.

La producción de energía por medio de la captación solar es uno de los métodos más destacados por su eficiencia creciente en el tiempo, facilidad de instalación y porque además en el caso de los paneles fotovoltaicos están compuestos por uno de los materiales más abundantes de la tierra, el silicio. Cada vez son más los países que incentivan la implementación de sistemas fotovoltaicos como forma de generación energética, impulsadas por legislaciones que le exponen al usuario las ventajas económicas y ambientales que conlleva su uso.

El escenario de estudio de esta investigación es Colombia, un país ubicado en Sur América que cuenta con un amplio territorio y diferentes condiciones climatológicas que lo convierten en un lugar con un gran potencial solar. Colombia cuenta con diferentes leyes que promueven la implementación fotovoltaica como es el caso de la 1715 de 2015 siendo una respuesta a la diferencia de condiciones energéticas en su territorio.

En esta investigación se evalúa la aplicación de sistemas fotovoltaicos en dos locaciones específicas, Bogotá y la Guajira, las cuales presentan condiciones de estudio interesantes. El análisis en estas zonas se basa en la rentabilidad económica que se presenta bajo ciertas condiciones y si resulta factible o no la instalación de sistemas fotovoltaicos en estas regiones.

Para realizar el análisis económico se tienen en cuenta los parámetros de evaluación expuestos por Yogi Goswami como lo son, el VAN, la TIR y el LCOE para sistemas fotovoltaicos. Para obtener la factibilidad máxima posible se busca la implementación de un método de optimización denominado programación lineal que da como resultado el sistema fotovoltaico con la rentabilidad óptima evaluada en la vida útil del sistema.

Mediante un algoritmo construido en base a programación lineal y parámetros económicos, solares, de financiamiento y de demanda se busca un sistema con la rentabilidad máxima en dos sectores de Colombia para zonas no-interconectadas que puedan ser una solución para la demanda energética. Teniendo el sistema ideal se puede hacer un examen detallado de los proyectos fotovoltaicos contrastando la información con la que presenta la energía hídrica en Colombia la cual es la fuente principal permitiendo una toma de decisiones idónea.

**PALABRAS CLAVE:** Fuentes no convencionales de energía, optimización, programación lineal, rentabilidad económica, sistemas fotovoltaicos, captación solar.

## **ABSTRACT**

At the present time, the generation of energy is one of the main challenges facing science due to the limited resources and adverse effects generated by conventional sources. Therefore, at present, there are different cogeneration methods that allow to supply the energy need and in turn, don't harm the environment.

The production of energy by means of solar capture is one of the most outstanding methods for its increasing efficiency over time, ease of installation and because in the case of photovoltaic panels are composed of one of the most abundant materials on earth, the silicon. Increasingly countries are encouraging the implementation of photovoltaic systems as a form of energy generation, driven by legislation that exposes the user to the economic and environmental benefits of their use.

The stage to and object of study of this research is Colombia, a country located in South America that has a wide territory and different weather conditions that make it a place with high solar potential. Colombia has different laws that promote photovoltaic implementation, as in the case of 1715 of 2015, being a response to the difference of energy conditions in their territory.

This research evaluates the application of photovoltaic systems in two specific locations, Bogotá and La Guajira, which present interesting study conditions. The analysis in these areas is based on the economic profitability that occurs under certain conditions and whether the installation of photovoltaic systems in these regions is feasible or not.

In order to carry out the economic analysis, account is taken of the evaluation parameters described by Yogi Goswami as they are, the NPV, the IRR and the LCOE for photovoltaic systems. With the purpose of obtain the maximum possible feasibility, the implementation of an optimization method called linear programming



that results in the photovoltaic system with the optimum profitability evaluated in the life of the system.

Through an algorithm built on linear programming and economic, solar, financing and demand parameters, a system with maximum profitability is sought in two sectors of Colombia for non-interconnected areas that can be a solution for energy demand. Having the ideal system can be done a detailed examination of the photovoltaic projects contrasting the information presented by the water energy in Colombia which is the main source allowing a suitable decision making.

**KEYWORDS:** Non-conventional sources of energy, optimization, linear programming, economic profitability, photovoltaic systems, solar collection.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
1. GENERALIDADES .....	2
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.3. OBJETIVOS.....	7
1.3.1. Objetivo General.....	7
1.3.2. Objetivo(s) Específico(s).....	7
1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES .....	8
1.4.1. Alcances:.....	8
1.4.2. Limitación: .....	8
1.5. ANTECEDENTES.....	9
2. MARCO TEÓRICO.....	22
2.1. ENERGÍA SOLAR .....	22
2.2. RADIACIÓN SOLAR.....	23
2.3. ENERGÍA SOLAR EN COLOMBIA.....	26
2.4. PRINCIPIO FOTOVOLTAICO .....	30
2.4.1. Efecto Fotoeléctrico.....	31
2.5. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS .....	32
2.5.1. Componentes de los Sistemas Fotovoltaicos .....	34
2.5.1.1. Panel fotovoltaico .....	34
2.5.1.2. Baterías.....	37
2.5.1.3. Reguladores.....	39
2.5.1.4. Inversores .....	40
2.5.1.5. Mantenimiento y remplazo de sistemas fotovoltaicos .....	42
2.6. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN COLOMBIA .....	43
2.7. ECONOMÍA EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	44
2.8. ANÁLISIS ECONÓMICO .....	47
2.8.1. Modelo de Yogi Goswami.....	47

2.8.1.1.	Valor Presente y futuro .....	47
2.8.1.2.	Series de pagos .....	48
2.8.1.3.	Valor actual neto (VAN) .....	49
2.8.1.4.	Tasa Interna de Retorno (TIR) .....	49
2.8.1.5.	Costo Nivelado de Energía LCOE .....	50
2.9.	OPTIMIZACIÓN .....	51
2.9.1.	Programación Lineal.....	52
3.	MARCO LEGAL .....	54
3.1.	PLAN ENERGÉTICO NACIONAL .....	54
3.2.	LEY 1 DE 1984 .....	54
3.3.	DECRETO 3652 DE 2003 .....	55
3.4.	LEY 1715 DE 2014 .....	55
4.	DESARROLLO METODOLÓGICO .....	57
4.1.	PARÁMETROS DE ENTRADA.....	58
4.1.1.	Parámetros energéticos según usuario .....	58
4.1.1.1.	Consumo.....	59
4.1.1.1.1.	Perfil de consumo .....	60
4.1.1.2.	Irradiación Local.....	61
4.1.2.	Parámetros económicos según usuario .....	62
4.1.2.1.	Financiamiento.....	62
4.1.3.	Parámetros económicos que no dependen del usuario.....	63
4.1.3.1.	Precio de la electricidad .....	63
4.1.3.2.	Inflación.....	64
4.1.3.3.	IVA .....	64
4.1.3.4.	Incentivos.....	64
4.2.	MODELO DE SIMULACIÓN .....	65
4.3.	CONSTRUCCIÓN MATEMÁTICA .....	67
4.3.1.	Variable de optimización.....	67
4.3.2.	Función Objetivo.....	68
4.3.3.	Restricciones .....	70

4.4. ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN .....	74
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	75
5.1. APLICACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OPTIMIZADOS .....	75
5.2. BOGOTÁ D.C. ....	75
5.3. GUAJIRA .....	89
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	102
6.1. CONCLUSIONES .....	102
6.2. RECOMENDACIONES.....	109
7. BIBLIOGRAFÍA .....	111
8. ANEXOS .....	117
8.1. Anexo 1. ....	117
8.2. Anexo 2. ....	118
8.3. Anexo 3. ....	118
8.4. Anexo 4. ....	119

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Configuración de un sistema fotovoltaico general.....	33
Tabla 2: Tipos de células solares.....	35
Tabla 3: Mantenimientos de SFV.....	42
Tabla 4: Factores de análisis económico.....	45
Tabla 5: Parámetros naturales de Bogotá. ....	75
Tabla 6: Parámetros energéticos de un hogar promedio en Bogotá.....	76
Tabla 7: Potencia Nominal de Electrodomésticos de un Hogar Promedio en Bogotá estrato 4.....	76
Tabla 8: Parámetros Económicos de Bogotá.....	77
Tabla 9: Parámetros Económicos Según Usuario y Forma de Financiación. ....	78
Tabla 10: Resultados óptimos del módulo solar. ....	79
Tabla 11: Costo de Sistema Fotovoltaico Óptimo.....	80
Tabla 12: Parámetros naturales de La Guajira. ....	90
Tabla 13: Parámetros energéticos de un hogar promedio en la Guajira.....	91
Tabla 14: Potencia Nominal de Electrodomésticos de un Hogar Promedio en la Guajira estrato 4. ....	92
Tabla 15: Parámetros Económicos de la Guajira.....	92
Tabla 16: Parámetros Económicos Según Usuario y Forma de Financiación en la Guajira. ....	93
Tabla 17: Resultados óptimos del módulo solar para la Guajira.....	94
Tabla 18: Costo de Sistema Fotovoltaico Óptimo.....	94

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Coordenadas solares.....	25
Figura 2: Diagrama de Horas solares pico.....	26
Figura 3: Línea de tiempo de implementación de Sistemas Fotovoltaicos en Colombia.....	27
Figura 4: Atlas de Radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia. ....	29
Figura 5: Tecnologías de producción eléctrica en Colombia. ....	30
Figura 6: Gráfico de Instalación fotovoltaica no conectada a la Red Eléctrica.....	34
Figura 7: Diagrama de Panel Fotovoltaico: Principio básico de funcionamiento de un Panel Fotovoltaico. ....	35
Figura 8: Esquemático de Batería: Principio básico de funcionamiento de una batería.....	37
Figura 9: Esquemático de un Regulador: Principio básico de funcionamiento de un Regulador. ....	40
Figura 10: Principio básico de funcionamiento de un Inversor.....	41
Figura 11: Precios de componentes de Sistema Fotovoltaico. ....	44
Figura 12: Metodología para la resolución de problemas por programación lineal. ....	53
Figura 13: Diagrama de Flujo de Desarrollo Metodológico. ....	58
Figura 14: Distribución energética del consumo promedio en Colombia. ....	59
Figura 15: Perfil de consumo promedio estrato 4 Bogotá. ....	60
Figura 16: Promedio mensual de radiación global en Bogotá.....	62
Figura 17: Tarifas de Electricidad Sector Industrial América Latina. ....	63
Figura 18: Dimensionamiento del Sistema Solar Fotovoltaico.....	65
Figura 19: Proceso de transformación de energía: Ley de la Conservación de la Energía y el balance energético presentado en un sistema aislado. ....	71
Figura 20: Energía producida y consumo en el tiempo de vida del Panel Solar para Bogotá. ....	81
Figura 21: Relación entre el VAN y la TIR para Bogotá. ....	82

Figura 22: Relación entre el VAN y el Interés de financiación para Bogotá. ....	83
Figura 23: Flujos de caja presentados en los periodos de tiempo dentro de la vida útil de 20 años para Bogotá. ....	84
Figura 24: Flujos de caja presentados en los periodos de tiempo dentro de la vida útil de 25 años para Bogotá. ....	85
Figura 25: Relación entre el VAN y el tiempo de la deuda para una instalación solar fotovoltaica ubicada en Bogotá. ....	86
Figura 26: Dimensionamiento del sistema en relación con el estrato socioeconómico para Bogotá. ....	87
Figura 27: VAN en relación con el estrato socioeconómico para Bogotá. ....	88
Figura 28: Relación entre el LCOE y el estrato socioeconómico para Bogotá. ....	89
Figura 29: Promedio mensual de radiación global en Riohacha. ....	91
Figura 30: Energía producida y consumo en el tiempo de vida del Panel Solar para Guajira. ....	95
Figura 31: Relación entre el VAN y la TIR para Guajira. ....	96
Figura 32: Relación entre el VAN y el Interés de financiación para Guajira. ....	97
Figura 33: Flujos de caja presentados en los periodos de tiempo dentro de la vida útil de 20 años para Guajira. ....	98
Figura 34: Relación entre el VAN y el tiempo de la deuda para una instalación solar fotovoltaica ubicada en la Guajira. ....	99
Figura 35: VAN en relación con el estrato socioeconómico para Guajira. ....	99
Figura 36: Dimensionamiento del sistema en relación con el estrato socioeconómico para Guajira. ....	100
Figura 37: Relación entre el LCOE y el estrato socioeconómico para Guajira. ...	101
Figura 38: Potencias generadas por el Panel Solar, las Baterías y el Inversor con relación a la carga de demanda, en un año. ....	103
Figura 39: Potencia Suministrada por SFV igual a la Potencia de demanda (Imagen ampliada de los dos primeros meses). ....	104
Figura 40: Energías generadas por cada componente del SFV en las horas acumuladas por mes. ....	104

Figura 41: Energía de Suministro vs energía de Carga en horas al año. ....105

Figura 42: Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia .....117

Figura 43: Promedio Horario de Radiación Bogotá (Wh/m<sup>2</sup>).....118

Figura 44: Tarifas de Energía eléctrica: Valor del vatio y consumo promedio en Bogotá. ....119

Figura 45: Tarifas de Energía eléctrica: Valor del vatio y consumo promedio en Rioacha.....119



## INTRODUCCIÓN

La presente investigación se refiere al análisis de rentabilidad en la implementación de sistemas fotovoltaicos aislados en dos regiones de Colombia con condiciones específicas mediante el desarrollo de un algoritmo basado en optimización por programación lineal, con el propósito de contribuir a la toma de decisiones de proyectos con fuentes de energías no convencionales.

El análisis parte de la teoría económica de evaluación de factibilidad desde el enfoque de Yogi Goswami para sistemas solares, teniendo en cuenta las condiciones climáticas, económicas y legislativas que afectan a las regiones de Bogotá y la Guajira, así como también los parámetros económicos individuales definidas por el usuario como la financiación de proyectos.

En búsqueda de energías limpias que sirvan como alternativa en Colombia a la fuente hídrica en zonas de difícil acceso, la radiación solar y las condiciones económicas actuales afectan directamente la rentabilidad de los proyectos desde este enfoque, dando como inferencia una dependencia sinérgica de parámetros para la factibilidad más óptima.

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Con el fin de obtener energía eléctrica limpia y económica, que aporte en la disminución de problemas ambientales y que no provenga de las fuentes convencionales de energía (Petróleo, carbón, el gas natural, etc.), en Colombia se ha aumentado la presentación de proyectos a pequeña escala de generación de energía de fuentes no convencionales (FNCE). De acuerdo a las cifras presentadas por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), en diciembre de 2017 fueron recibidos 329 proyectos y fueron certificados 244; para julio de 2018 se presentaron 430 proyectos de los cuales 379 corresponde a soluciones Solares Fotovoltaicas, de estos, 285 ya fueron aprobados para recibir los beneficios tributarios, como Deducción especial en el impuesto sobre la renta, Depreciación acelerada, Exclusión del IVA en productos y servicios, y Exclusión del gravamen arancelario, establecidos por la Ley 1715 de 2014.

No se puede negar, como lo señala Ricardo Ramírez Carrero, director (e) de la Upme, “no solo es factible que se mantenga la tendencia creciente en la presentación de proyectos, sino que es muy probable ver a algunos usuarios comercializando excedentes de energía una vez entre la reglamentación de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) para la comercialización de excedentes en pequeña escala (Resolución 121 del 2017), que está en consulta” (Ahumada, O. 2017).

Si bien es cierto que el número de proyectos de generación de energía solar ha crecido, está el interrogante de ¿por qué no se están implantando a mayor escala y con mayor rapidez?, pues el país está quedando rezagado en el desarrollo de este tipo de proyectos y la generación de electricidad a partir de fuentes renovables como la solar fotovoltaica. Según información suministrada por MinMinas, el año pasado,

que la fuente con mayor participación fue la hidráulica a gran escala, con 80,35%, mientras que las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) representaron 5,66%, la biomasa 0,95%, la solar 0,01% y la eólica 0,005% (Cigüenza Riaño, 2018).

Esto lleva a pensar que, a pesar de los incentivos fiscales y de la reducción de costos en los componentes que constituyen las instalaciones fotovoltaicas (Tipping, 2018), a nivel nacional aún no se destinan grandes recursos hacia proyectos de esta índole, y quizá la principal razón es la inversión económica, es decir el valor de la implementación y su relación costo beneficio, ya que este tipo de tecnología representa grandes inversiones de capital al inicio y el mantenimiento de los equipos se hace de manera más periódica, comparado con los sistemas convencionales de generación y transmisión de energía eléctrica.

Para evaluar lo mencionado anteriormente, se han realizado algunos estudios en los cuales se analiza la viabilidad económica en la implementación de paneles solares para la producción de energía eléctrica, teniendo en cuenta índices como la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN), para establecer la rentabilidad al momento de invertir en esta tecnología.

Pero los resultados de estos estudios han presentado diferentes conclusiones, como por ejemplo el análisis realizado por Ortiz J. (2013), en el cual se calcula la viabilidad de la instalación y aprovechamiento de un sistema solar fotovoltaico de pequeña escala en la ciudad de Bogotá, expresa que debido a los altos costos de adquisición y de instalación del sistema solar fotovoltaico es poco probable obtener un resultado económicamente atractivo con el tipo de sistema de aprovechamiento de la energía solar que usaron (pequeña escala) y que esta tecnología no es competitiva frente a la electricidad disponible en la red nacional que abastece los centros urbanos, a un costo considerablemente menor dado su origen principalmente hidráulico.

Por otro lado, en 2017, Garzón y Salamanca llevaron a cabo un Estudio de Factibilidad para la Implementación de Energía Solar Fotovoltaica en la Zona Preescolar del Colegio Agustiniiano Suba, en el cual evidenciaron que la implementación de Energías Solar Fotovoltaica es factible, pues los egresos son menores a los ingresos, con un Beneficio Neto en 25 años del 74% y la recuperación de la inversión se daría en un periodo de 9 años, teniendo en cuenta que la vida útil del sistema es de 25 años.

Incluso, en otros países los estudios muestran que los resultados de viabilidad económica dependen de varios factores; Armendáriz (2017) presento el trabajo de título: Costo-Beneficio de Sistemas Fotovoltaicos en el Sector Residencial en la Ciudad de Chihuahua, para analizar la viabilidad económica de un sistema fotovoltaico policristalino. En este trabajo se concluyó que invertir en sistemas fotovoltaicos en consumos promedio mensuales inferiores a los 150 kWh no es rentable, debido a que el costo del sistema fotovoltaico es superior a los consumos de electricidad que se tienen a lo largo del año. Por otro lado, en algunos casos se alcanzarían retornos de inversión superiores a los 20 años. Cuando los consumos mensuales promedio de energía eléctrica superan los 200 kWh, las inversiones económicas alcanzan un tiempo de retorno de la inversión de 10.26 años. Conforme se incrementan los consumos promedio mensuales, los tiempos de retorno de inversión son de mayor interés, principalmente cuando se superan los 300 kWh, en donde el tiempo de retorno de la inversión son inferiores a los 5 años y medio.

Dado que algunos resultados de viabilidad económica, para la implementación de paneles solares fotovoltaicos a nivel nacional, son positivos y otros no, cabe preguntarse ¿cuáles son las variables económicas que llevan a que esos resultados sean diferentes y cómo se podría optimizar la inversión en función de las condiciones de demanda y la irradiación solar, para obtener la mejor rentabilidad y así motivar a los colombianos a hacer uso de esta fuente de energía renovable?

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

En Colombia, a partir de la entrada en vigor de la Ley 1715 de 2004, se ha generado una política de incentivos para la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, de tal manera que se diversifique la matriz energética.

Ya que en este país se cuenta con grandes recursos energéticos, como, por ejemplo, un recurso solar promedio uniforme durante el año para todo el territorio del orden de  $4,5 \text{ kWh/m}^2$  (Toledo, 2013), en principio, es posible que se suplieran necesidades de energía eléctrica con el uso de sistemas solares fotovoltaicos.

Pero para que esto suceda es necesario, además de tener conocimientos y cierta preocupación por la temática ambiental, tener presente un factor esencial, como lo es la inversión económica (precios de implementación, operación, mantenimiento, impuestos de los paneles solares, rentabilidad, entre otros factores).

Resulta importante realizar estudios reales de las implicaciones económicas que tiene la implementación de un sistema como el solar fotovoltaico en zonas de diferente radiación en Colombia para evaluar si resulta favorable o no a los colombianos implementar sistemas de este tipo en materia de inversión y si el rendimiento de estos puede ser comparables con el consumo dentro de sus casas o empresas.

Por su parte, el gobierno colombiano instauro incentivos fiscales que hacen que la fotovoltaica se presente como una tecnología factible desde el punto de vista económico (Tipping, 2018); sin embargo la generación de electricidad en el país a partir de fuentes renovables como la solar fotovoltaica es muy baja, y si bien se han reducido costos en las celdas, como estas reducciones están relacionadas directamente con los recursos solares con que se cuenten y el rendimiento que se

requiera, el posible sitio donde se ubique el sistema también es significativo en un estudio de viabilidad económica.

Estudios de este tipo, en el mundo y en Colombia arrojan diferentes resultados en cuanto a rentabilidad, siendo unos favorables y otros no tanto, desde el punto de vista económico. Se puede decir, por tanto, que hay más de un factor que influye en los resultados y que resulta oportuno estudiar las variables económicas implícitas en la instauración de sistemas fotovoltaicos.

Ahora, una vez realizados los estudios de viabilidad económica, es importante optimizar las variables que intervienen en el estudio.

De acuerdo con Jimeno y Mokotoff (2011):

*“La Teoría de la Optimización es una herramienta indispensable en Economía. Muchos problemas económicos hacen uso de esta, permitiendo su modelización matemática y, de este modo, ofreciendo soluciones a los mismos. Al analizar el comportamiento de los distintos agentes económicos de una economía se asume que dichos agentes exhiben algún tipo de comportamiento racional u optimizador de sus preferencias.”*

Por tanto, optimizando las variables dentro de un modelo económico, como el de Yogi Goswami, para la implementación de paneles solares, una vez se determinen cuáles son y de qué modo afectan los resultados a la favorabilidad económica, se puede encontrar un comportamiento que permita la mejor opción en rendimiento energético, costos de implementación y tasa interna de retorno, brindando la oportunidad de mejora en la incorporación de este tipo de energía renovable y limpia que tanto se necesita actualmente, en lo que corresponde a la parte de costos.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. Objetivo General**

Evaluar la favorabilidad económica de sistemas fotovoltaicos en Colombia, a partir de la optimización de la inversión en función de las condiciones de demanda y la irradiación solar con base en el modelo económico de Yogi Goswami.

### **1.3.2. Objetivo(s) Específico(s)**

1. Dimensionar un sistema fotovoltaico, en un paquete de computo pertinente, para conocer la energía eléctrica generada que pueda suplir el consumo energético de acuerdo con las características de demanda de edificaciones colombianas de vivienda.
2. Aplicar el modelo matemático de Yogi Goswami, bajo las características y condiciones de las zonas de estudio, para establecer la evaluación económica del sistema fotovoltaico diseñado en el software, en relación con los beneficios tributarios dados por las normas de regulación de energía renovables.
3. Emplear un software, para generar un modelo de optimización de algunas de las variables del modelo de Yogi Goswami aplicables al entorno Colombia.
4. Analizar la oportunidad económica que tiene la tecnología solar fotovoltaica respecto a la energía hídrica.

## **1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **1.4.1. Alcances:**

- Se analizó la favorabilidad económica de sistemas fotovoltaicos aislados, debido en primer lugar a la existencia aún en Colombia de zonas no interconectadas (ZNI), y por otra parte porque muchos estudios similares a este se dirigen a sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Esta evaluación de favorabilidad se hace a partir de la optimización de la inversión en función de las condiciones de demanda y la irradiación solar con base en el modelo económico de D. Yogi Goswami.
- Se empleó el modelo económico de D. Yogi Goswami, el cual contribuye no solo en comprender la relación entre variables inmersas en el estudio, sino que también permite realizar algunas predicciones acerca del comportamiento de estas y así encontrar la opción más conveniente en proyectos a corto, mediano y largo plazo de sistemas solares fotovoltaicos, de acuerdo con la ubicación geográfica.

### **1.4.2. Limitación:**

- Dada la complejidad de obtener todos los datos específicos y el tiempo que demanda lograr que las muestras sean representativas para este estudio, se emplean en lugares de Colombia (Bogotá y la Guajira) como referentes, para realizar la favorabilidad económica de sistemas fotovoltaicos, debido a sus índices de radiación solar y su estructura económica.
- Para la optimización se empleó Programación lineal y no entera mixta debido a que los valores empleados son enteros, no hay valores complejos, ni binarios, ni reales.



## 1.5. ANTECEDENTES

Con el fin de tener una perspectiva de la evolución de la tecnología fotovoltaica en los últimos años, enfatizando en el estudio de la viabilidad económica, se ha hecho una recopilación de varios trabajos que se han publicado referentes a este tema, con el fin de evidenciar algunos avances que se han ido desarrollando, y de cómo se pueden complementar o mejorar las investigaciones ya realizadas, con el trabajo que se pretende realizar.

- Fernando Blanco Silva y Alfonso López Díaz (2007), realizaron un trabajo en España, titulado: “*Estudio de viabilidad de una instalación fotovoltaica de coste 50.000 euros en España*”, cuyo objetivo general consistía en analizar la viabilidad de una instalación solar fotovoltaica de coste 50.000 euros. Se realizó una instalación en la provincia de Ourense donde la radiación solar media es de unos  $4 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$  ·día, lo que supone unos  $1.440 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$  cada año, contando con la ayuda de un inversor que deseaba desembolsar 50.000 euros. La propuesta incluía únicamente un estudio de viabilidad y producción por lo que no se detalló en los componentes a usar, sino únicamente las características generales de la instalación elegida. La instalación tuvo una producción de 10.000kWh anuales. Sin considerar la existencia de impuestos, el resultado de los parámetros económicos de cálculo es una Tasa Interna de Rendimiento de un 8,18%, un periodo de retorno de unos 12 años y un V.A.N. (Valor Activo Neto) de unos 101.700 euros. Al realizar el cálculo considerando la existencia de impuestos la T.I.R. baja hasta un rendimiento neto del 7,93%, el periodo de retorno son 12,2 años y el V.A.N. son 89.472,17 euros. La conclusión arrojada por la investigación es que una instalación fotovoltaica en España es rentable en condiciones específicas de instalación.

- Mompó (2016), presentó “*Estudio Técnico y Económico para Instalaciones Fotovoltaicas de Autoconsumo*”. El objetivo de investigación planteado fue realizar un estudio técnico y económico de instalaciones fotovoltaicas con diferentes potencias instaladas y para diferentes consumos en viviendas unifamiliares. Se trataba de determinar la viabilidad económica para tres diferentes casos de consumo: un estudio con la vivienda conectada a red sin baterías, un estudio con una vivienda conectada a red con baterías, pudiendo bajar o no la potencia contratada, y finalmente un estudio de una vivienda totalmente aislada de la red con el uso de baterías. Para dicho estudio se calculó la radiación solar incidente, y con esto la producción de energía que podían producir las placas. Las características técnicas de la instalación son las mismas para los tres tipos de consumos. El trabajo partió de la base que las instalaciones tendrían una potencia instalada desde 500W (dos placas), hasta 4000W (ocho placas). El estudio se realizó en tres viviendas con diferentes consumos, y para cada una de estas, se ha realizado el estudio en tres casos diferentes, con el propósito de encontrar cuál de estos casos es el óptimo para cada vivienda. En el caso de la vivienda uno se encontró que en ningún caso la instalación es rentable para la vivienda. Para la vivienda 2 se encontró que el caso donde se instalaron 4 paneles fotovoltaicos, sin baterías y con conexión a red, la inversión se recuperaría con un plazo alrededor de 4 años y supondría un ahorro de 18.000€ en 25 años. En la vivienda 3 el caso 1 es el mejor, donde se instalaron 5 paneles fotovoltaicos, sin baterías y con conexión a red. El plazo de recuperación de la inversión sería de alrededor de 4 años y supondría un ahorro de unos 27.000€ durante 25 años.
- En el 2016, Lee, Chang, Aktas y Gorthala se trazaron como objetivo evaluar la viabilidad económica de sistemas de energía solar fotovoltaica bajo restricciones realistas, mediante el análisis de los datos reales de la matriz solar en un campus particular. El título “*Viabilidad Económica de los Sistemas Fotovoltaicos en Todo el Campus en Nueva Inglaterra*” correspondió al trabajo, donde se hizo uso de la calculadora PVWATTS para calcular la

producción anual de energía y otras variables. Se hizo uso de ecuaciones para calcular la potencia estimada producida por la Matriz fotovoltaica con datos promedio de radiación solar. Se obtuvo que el período de recuperación promedio de un sistema fotovoltaico en el lugar es de 11 años, y se estimó VAN y la TIR validaban la solvencia de la inversión.

- Sheekhar, Tan, Yatim y Yiew (2017) realizaron un *“Análisis de viabilidad del sistema híbrido de energía fotovoltaica / batería / pila de combustible para una residencia indígena en el este de Malasia”*. Este trabajo analiza la potencialidad de la energía renovable en Sarawak, Malasia oriental. La velocidad del viento es insuficiente, pero la energía solar es abundante en la ubicación. Por lo tanto, la viabilidad de los sistemas basados en células fotovoltaicas (PV), baterías y pilas de combustible (FC) son investigados por la carga de una casa comunal de pueblo que comprende 50 familias ubicadas en Kapit, Sarawak. Ambos sistemas, incluyendo FC (PV / Battery / FC) y excluyendo FC (PV / Battery) son analizados y comparados con un sistema convencional basado en Diesel. El análisis se centra en el costo actual neto (NPC) y el costo de la energía (COE). Otros parámetros de costos como el precio de instalación, operación y mantenimiento (O&M), y el costo operativo, también fueron analizados. El software HOMER provisto por el National Renewable Energy Laboratory (NERL) se usa como una herramienta de análisis. Los resultados de optimización de HOMER y el análisis de sensibilidad muestran que el sistema de PV / batería es económico y amigable con el medio ambiente con un costo actual neto total de \$335,297 y un costo de energía de  $0.323 \frac{\$}{kWh}$  sin emisión. Por lo tanto, puede ser un reemplazo adecuado del sistema basado en diesel.
- *“Un estudio de viabilidad de un sistema fotovoltaico residencial en Camerún”* fue realizado por Abanda, Manjia, Enongene y Pettang (2016). Ese trabajo presenta un estudio de factibilidad de sistemas solares fotovoltaicos (PV) autónomos para la electrificación de tres edificios residenciales de estudio de

caso en la ciudad capital de Yaundé, Camerún. El sistema fue dimensionado teniendo en cuenta la carga de los edificios y la energía disponible del sol. Se determinó que el costo promedio de electricidad unitaria para cada caso era: €0.52kWh, €0.50kWh y €0.51kWh, más alto que el costo unitario de la electricidad de la red residencial en Camerún.

- Hussein, Albadib, Al-Waelic, Ahmed, Miqdam y Chaichane (2017), presentaron el trabajo “*Análisis de viabilidad tecno-económica de una red fotovoltaica de 1MW, conectado en Omán*”. Con datos de radiación hora a hora, se simuló una configuración de paneles solares para realizar una evaluación técnica y económica. Este estudio realizó una evaluación de diseño y tecnología económica de un sistema fotovoltaico conectado a la red pública en la ciudad de Adam, Omán con un tamaño de 1MW. La simulación numérica se realizó utilizando el código desarrollado por *MATLAB*. Los resultados de la evaluación muestran que la tecnología PV a nivel de inversión es muy prometedora, el factor de capacidad del sistema propuesto es 21.7%. El costo de la energía encontrada para la planta es de alrededor de  $0.2258 \frac{USD}{kWh}$ , y tiene un periodo de amortización de 10 años, lo cual es económicamente factible y muestra gran promesa.

En Latinoamérica se han realizado estudios de viabilidad económica, donde se tienen en cuenta variables que permiten establecer si un sistema fotovoltaico es o no rentable.

- En México se han desarrollado investigaciones de viabilidad económica, para la implementación de paneles solares. Armendáriz (2017) realizó el trabajo de titulado: “*Costo-Beneficio de Sistemas Fotovoltaicos en el Sector Residencial en la Ciudad de Chihuahua*”, para analizar la viabilidad económica de un sistema fotovoltaico policristalino, considerando diferentes escenarios de consumo en el sector residencial en dicha ciudad. A partir del

uso de un archivo meteorológico TMY generado en *METEONORM*®, se simuló computacionalmente en el software *TRNSYS*® la producción de electricidad del sistema fotovoltaico policristalino. Posteriormente, se estimó el Factor de Costo-Beneficio caracterizando escenarios de consumo eléctrico en residencias desde  $25kWh$  a los  $400kWh$  promedio mensual. Se concluyó que invertir en sistemas fotovoltaicos en consumos promedio mensuales inferiores a los  $150kWh$  no es rentable. En general, el costo del sistema fotovoltaico es superior a los consumos de electricidad que se tienen a lo largo del año. Por otro lado, en algunos casos se alcanzarían retornos de inversión superiores a los 20 años. Cuando los consumos mensuales promedio de energía eléctrica superan los  $200kWh$ , las inversiones económicas alcanzan un tiempo de retorno de la inversión de 10.26 años. Conforme se incrementan los consumos promedio mensuales, los tiempos de retorno de inversión son de mayor interés, principalmente cuando se superan los  $300kWh$ , en donde el tiempo de retorno de la inversión son inferiores a los 5 años y medio.

- En Chile, Figueroa, Parra y Rodríguez (2014), realizaron el trabajo: *“Evaluación de la Factibilidad Técnica y Económica de la Instalación de Paneles Solares Fotovoltaicos en Hogares de Familias de Escasos Recursos de la Comuna de San Nicolás”*. Para realizar la evaluación se recopiló información mediante la aplicación de una encuesta a familias de escasos recursos de la comuna de San Nicolás, que permitió conocer los gastos en el periodo de un año por consumo de energía eléctrica. Por otro lado, se solicitó información a la empresa *COPELEC* de los gastos reales de las familias encuestadas; junto a esto se solicitó una cotización a la Universidad del Bío-Bío. Red de Bibliotecas - Chile para la instalación de paneles solares, con el fin de evaluar los costos y el ahorro potencial que se podría producir. Con la información obtenida, se realizó el análisis del ahorro que significaría para estas familias la instalación de los paneles solares fotovoltaicos. Al evaluar los ahorros potenciales de las familias de escasos recursos al utilizar

paneles solares fotovoltaicos, así como los costos de la instalación de estos, se determinó que los paneles solares fotovoltaicos mejoran la calidad de vida de las personas de escasos recursos de la comuna de San Nicolás, al producirse un ahorro por concepto de energía eléctrica y que genera una disminución del consumo de energía del sistema interconectado central.

- Igualmente en Chile, Aliaga, Fuentes y Gonzales (2009) realizaron el trabajo “*Estudio de Factibilidad Económica de la Instalación de Luminarias Solares para la Ciudad de Tocopilla*”, para determinar si la instalación de luminarias con tecnología solar en todo el alumbrado público de la ciudad de Tocopilla resultaba rentable respecto a una situación actual con luminarias convencionales, mostrándose resultados positivos: VAN: \$532.203.353, TIR: 15,35%, Período de Recuperación de la Inversión: 4,5 años.
- En Perú, también se han realizado estudios relacionados con la viabilidad económica de los sistemas fotovoltaicos. “*Un Estudio de Viabilidad Técnica y Económica de un Sistema Fotovoltaico Autónomo en las Instalaciones de la UCSP*”, fue realizado por Banda (2017) con el fin de estudiar la viabilidad técnica y económica de un sistema fotovoltaico aislado dentro del Campus de la UCSP (Universidad Católica San Pablo), para lo que determinaron las características y condiciones del lugar, la energía solar incidente en la localización, evaluaron el desempeño y nivel de eficiencia del sistema, diseñaron el sistema fotovoltaico y lo evaluaron económicamente. Como resultado se obtuvo una viabilidad técnica, pero no económica pues aunque el potencial energético solar en la ciudad de Arequipa es alto, se estimó que para la implementación del sistema se requiere una inversión inicial de *USD 26.344.80* y que a lo largo de los 25 años de vida se tienen que renovar componentes, lo cual genera una inversión total de *USD 46.296.80*. Por otra parte, el sistema no sería rentable respecto de la tarifa de energía proveniente de la red eléctrica, ni existiría un punto de equilibrio.

A nivel nacional se han realizado estudios para calcular costos y predecir beneficios económicos, si los hay, de las instalaciones de sistemas fotovoltaicos.

- Morales (2011) realizó el trabajo: *“Cálculo de una Tarifa de Alimentación para Instalaciones Fovoltaicas Residenciales en Colombia”*, con el fin de estimar el valor de una tarifa de alimentación residencial que incentivara la producción de energía fotovoltaica en Colombia. Para eso se aplicó una metodología que combinaba el análisis de punto de equilibrio propuesto por Rigger y Vidican, con la representación de una instalación fotovoltaica diseñada en el programa Homer Energy. Con una representación del desempeño de un sistema fotovoltaico residencial urbano sin la tarifa preferencial, a través del software de modelación de sistemas eléctricos Homer, se calculó la prima fotovoltaica. Con los datos arrojados por el programa, se calculó la prima como la solución de una función de valor presente neto que iguala a cero los ingresos y los egresos; posteriormente se incluye la tarifa calculada en el software, se refina el cálculo de la tarifa misma y se obtiene información sobre su impacto en la compra y generación de energía en la vivienda. Para un sistema fotovoltaico de  $3kW$  de potencia en Bogotá, la tarifa de alimentación mínima ese año era de 4359 pesos el kilovatio hora; en el caso de San Andrés, el costo era de 4056 pesos mientras que en Riohacha la tarifa de alimentación era de 3411 pesos. Se concluyó que el costo de la prima es bastante elevado si se compara con el valor medio del kilovatio residencial (350 pesos), sin embargo, se quedó en espera que la rápida evolución de las tecnologías implicadas en las instalaciones fotovoltaicas y las condiciones del mercado mundial implique que este valor baje de forma considerable año tras año.
- Sanabria (2016), trazo como objetivo, realizar un análisis de la implementación de un sistema de paneles solares fotovoltaicos en la E.S.E. Hospital San Cristóbal en el trabajo: *“Análisis Costo/Beneficio de la Implementación de Tecnologías de Energía con Paneles Solares en la ESE*

*Hospital San Cristóbal*”. Para realizar el análisis se adquirieron los datos de gasto eléctrico en la sede administrativa del hospital, luego, por medio de los atlas de radiación solar generados por entidades competentes en el tema se obtuvieron los datos de radiación y se asumió un total constante de cuatro horas de aprovechamiento (entre las 10:00 y 14:00 horas del día), para la ciudad de Bogotá, posteriormente se calculó el costo de  $\frac{KW}{mes}$  y el ahorro que se obtendría al implementar el sistema, para calcular los beneficios y el retorno, tomando como base principal el funcionamiento de la sede de estudio con un total de veinte días hábiles de trabajo. Se analizó las especificaciones de los paneles en cuanto a potencia de energía solar para el complemento del uso del recurso energético en la Sede Administrativa. Se contó con un total de cubrimiento de  $1488 \frac{kW}{mes}$  por todos los paneles adquiridos (62) en dicha inversión. Con la cantidad de paneles solares implementados en la sede no alcanza a cubrir el consumo que equivale a  $6211 \frac{kWh}{mes}$  (\$2'561.545); sin embargo, el sistema de paneles tiene una cobertura de  $1440 \frac{kWh}{mes}$  que equivale al 23,18% del promedio de gasto mensual de energía en dicha sede. Este porcentaje equivale a un ahorro de \$593.886 el cual se descontaría al valor (\$2'561.545) que se ha venido pagando en años anteriores de forma mensual, dando como resultado \$1'967.659. Con una inversión de solo 62 paneles solares se puede realizar un ahorro de más del 20% de energía en cada una de las sedes de la institución. Desde el punto de vista económico la implementación del proyecto es completamente viable, ya que presenta una inversión de un monto considerable que se convierte en una retribución mayor con el paso del tiempo (análisis costo beneficio); generando así, un incremento no solo en los activos de la organización sino en la sostenibilidad de recursos para una próxima inversión de este tipo.

- Ortiz (2013) realizó el trabajo: “*Viabilidad Técnico-Económica de un Sistema Fotovoltaico de Pequeña Escala*”, con el objetivo de calcular la viabilidad de



la instalación y aprovechamiento de un sistema solar fotovoltaico de pequeña escala en la ciudad de Bogotá. Desde el punto de vista técnico encontraron que no existe ninguna dificultad o inviabilidad para la instalación, sin embargo, es poco probable obtener un resultado económicamente atractivo con la instalación con el tipo de sistema de aprovechamiento de la energía solar que usaron (pequeña escala). La razón principal radica en los altos costos de adquisición y de instalación del sistema solar fotovoltaico que no tornan competitiva esta tecnología frente a la electricidad disponible en la red nacional que abastece los centros urbanos, a un costo considerablemente menor dado su origen principalmente hidráulico. Plantean como conclusión que la presión internacional por el uso de energías renovables como la fotovoltaica puede acelerar la reducción en los precios y hacer económicamente viable este tipo de proyectos, al menos en el mediano plazo.

- Garzón y Salamanca (2017) hicieron un “*Estudio de Factibilidad para la Implementación de Energía Solar Fotovoltaica en la Zona Preescolar del Colegio Agustiniiano Suba*”, para elaborar una alternativa que permita reducir los consumos energéticos de la Zona de Preescolar del Colegio Agustiniiano Suba y con base en ella, elaborar una propuesta de red eléctrica alimentada con Energía Solar Fotovoltaica. Se llevó a cabo el cálculo del sistema mediante un simulador On-line y una guía especial en el cálculo de instalaciones fotovoltaicas, y posteriormente se realizó su comparación. Adicional, se contemplaron los costos de inversión y los beneficios que tendría la implementación de Energía Solar Fotovoltaica en la Zona de Preescolar del Colegio Agustiniiano Suba. Se obtuvo que la implementación de Energía Solar Fotovoltaica para la Zona de Preescolar del Colegio Agustiniiano Suba tendría un costo de \$14.065.000 (Este costo puede variar con respecto al Índice de Precios al Consumidor - IPC). En el Análisis Financiero, se evidencia que la implementación de Energías Solar Fotovoltaica es factible, pues los egresos son menores a los ingresos, con

un Beneficio Neto en 25 años del 74% y la recuperación de la inversión se daría en un periodo de 9 años, teniendo en cuenta que la vida útil del sistema es de 25 años.

- E. Bitar y Chamas (2017) realizaron un estudio de factibilidad técnico/financiera para la comercialización de paneles solares en el mercado de Colombia enfocado al sector industrial identificando la tecnología más adecuada para ello. El título del trabajo fue: “*Estudio de Factibilidad para la Implementación de Sistemas Fotovoltaicos como Fuente de Energía en el Sector Industrial de Colombia*”. Para llevar a cabo ese trabajo se identificó la tecnología de células fotovoltaicas más adecuadas para el entorno colombiano y su potencial de retorno económico, se determinó el potencial de mercado de Colombia para esta tecnología con base a las estadísticas del sector industrial; y adicional se evaluó la viabilidad tomando en cuenta costos de la energía de acuerdo con la zona geográfica y tipo de industria. Como resultados presentados se llega a que los proyectos de instalación de sistemas fotovoltaicos se hacen viables económicamente contemplando los beneficios tributarios que el Gobierno otorga, tales como la deducción del 50% de renta y la depreciación acelerada en 5 años de los activos. Esto se evidencia en el ejercicio financiero ejecutado para el proyecto modelo cuya inversión alcanza los \$60.000.000. Se concluye además que sin aplicar beneficios tributarios el tiempo de retorno es 8 años. En relación con la ubicación geográfica, aquellas ciudades donde la irradiancia del sol es mayor como por ejemplo Barranquilla y Cartagena, se hace más atractiva la instalación de un sistema fotovoltaico, pues el potencial de generación eléctrica por  $m^2$  será mayor.

En cuanto a los antecedentes de estudios referentes a optimización de paneles fotovoltaicos con el fin de obtener sistemas rentables económicamente, se presentan los siguientes estudios:

- *“Desarrollo de Estrategias para la Optimización de la Rentabilidad de una Instalación Fotovoltaica Basadas en el Diseño”*. Realizado por Ramón Gero en 2014. El objetivo general del trabajo era desarrollar un método de optimización del diseño de plantas fotovoltaicas, para determinar la potencia pico a instalar para conseguir el menor coste por unidad de energía producida. Para esto se generó una función de Matlab que determine el diseño óptimo de cada instalación dependiendo de sus características. Para ello se han construido dos herramientas informáticas: un modelo de la instalación que permite estimar su producción, así como una red neuronal que estima su coste, en ambos casos en función de sus características básicas, que se encuentran fácilmente accesibles al inicio del diseño de una instalación. El modelo construido en Matlab permitió estimar la producción a partir de las características del panel, la potencia nominal del inversor, y la estimación del rendimiento del resto de elementos. Para validar el modelo, se tomaron datos de irradiancias, temperatura ambiente y producción en una instalación real, a lo largo de un año, comparándolos con los valores estimados que proporciona el modelo. El programa permitió, variar la potencia pico, y generar una curva que mostraba el cociente entre coste y producción, indicando al diseñador la potencia pico del campo solar a implantar que minimiza dicho cociente, optimizando su rentabilidad. Se concluyó que hay un decrecimiento progresivo del precio de la energía necesario con el aumento de la potencia pico instalada, hasta llegar a un mínimo, lo que se traduce en un aumento progresivo de la rentabilidad del sistema fotovoltaico.
- Kornelakis (2009) escribió: *“Metodología para la Optimización del Diseño y el Análisis Económico de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red”*, donde se presentó una metodología para la optimización del diseño y el análisis económico de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red (PVGCS). El propósito de la metodología propuesta fue sugerir, entre una lista de dispositivos comercialmente disponibles, el número y tipo óptimos de

dispositivos de sistema y los valores óptimos de los detalles de instalación del módulo fotovoltaico (PV), de modo que el beneficio económico neto total logrado durante el período de vida operativa del sistema se maximizara. Las variables de decisión incluidas en el proceso de optimización son la cantidad y el tipo óptimos de los módulos fotovoltaicos y los convertidores CC/CA, los módulos fotovoltaicos, ángulo de inclinación óptimo, la disposición óptima de los módulos FV dentro del área de instalación disponible y la distribución óptima de los módulos fotovoltaicos entre los convertidores CC/CA. La viabilidad económica de la configuración de PVGCS resultante se exploró de acuerdo con el valor actual (del estudio) neto, el período de recuperación descontado y los métodos de tasa interna de retorno. El estudio se realizó en Grecia, una isla de Creta. Concluyen en el trabajo que la viabilidad económica de PVGCS depende del precio con que la energía generada de PV se venda a la red eléctrica y la tasa de subsidio de PVGCS ofrecida al inversor.

- Mao, Peng y Chang (2014) presentaron un trabajo cuyo objetivo general era Proponer un modelo de diseño óptimo de microrredes con sistemas fotovoltaicos de pequeña escala (SS-PV) y baterías de almacenamiento para las industrias, junto con tres indicadores de evaluación. En: “*Análisis económico y diseño óptimo en Microrredes con SS-PV para Industrias*”, los autores usaron como indicadores los costos de energía nivelados, beneficios de reducción de emisiones y período de recuperación de la inversión. A través de simulaciones basadas en datos de operación real de 4 meses de una microrred fotovoltaica de 500kW para industrias en Guangdong, China, lograron verificar que es posible optimizar las microrredes para las industrias de tal manera que se encuentren beneficios económicos (reducción de hasta el 20% en costos y 4 años en la tasa de retorno) y ambientales.
- El estudio: “*Optimización Financiera de Matrices Fotovoltaicas Utilizando el Algoritmo de Evolución Diferencial en Grandes Espacios Dimensionales*”, desarrollado y escrito por Schaar, Pope y Schenck (2013), fue realizado en

Estados Unidos de América, que tenía como objetivo desarrollar un modelo teórico que optimizara el diseño de la red de cableado de CC en una matriz fotovoltaica a escala de utilidad, en términos de rendimiento financiero para el propietario del sistema. Para realizar el diseño se definieron los valores óptimos para el calibre del conductor, el material conductor, el tipo de circuito (con o sin estrella), el diseño de la matriz y el número de circuitos paralelos. Se calculó una mejora de  $2.6 \frac{\text{¢}}{\text{WDC}}$ , en relación con un diseño de matriz típico para una planta de energía fotovoltaica a escala de servicio público, con una pérdida de energía de cableado de CC optimizada <0.3%. Lo anterior, e acuerdo a los autores es debido a la combinación entre algoritmos evolutivos y avances a nivel de computación que proporcionan una excelente convergencia para diseños óptimos en tiempos de simulación razonables. Los autores emplearon la heurística de búsqueda Parallel Tabu para determinar el diseño óptimo de la red de cableado CA de media tensión de una planta de energía y usaron algoritmos evolutivos para optimizar la entrega de potencia reactiva y activa en sistemas de potencia a gran escala. Con la optimización se alcanzó una reducción de costos del 2,8% y se mostró que los diseños de la próxima generación deberían reducir el número de filas, aumentar el número de módulos por estructura de montaje y usar conductores de aluminio.

## 2. MARCO TEÓRICO

La teórica que involucra la energía proveniente del Sol, así como la transformación efectuada por los módulos solares aplicando teorías físicas, permiten comprender el alcance y la magnitud de los proyectos fotovoltaicos y sirve como base al análisis en locaciones exactas, como en el caso de estudio referente a Colombia y su potencial solar energético con el objetivo de su óptima implementación.

El cálculo de los dispositivos intervinientes en un sistema fotovoltaico y su funcionamiento es crucial en el desarrollo de un algoritmo de optimización permitiendo obtener los valores adecuados en los escenarios de estudio.

Las teorías económicas son el parámetro de evaluación de viabilidad y son suministradas en gran medida a conceptos recolectados por Yogi Goswami sumado a las condiciones económicas de localidad y definidas por el usuario alimentando el medio matemático de optimización.

Por último, la elección y construcción del algoritmo de optimización que cuente con la capacidad de encontrar los parámetros más rentables con base a las condiciones de estudio es el cierre del marco teórico.

### 2.1. ENERGÍA SOLAR

Debido al comportamiento simétrico que manifiesta la naturaleza existe una ley que gobierna todos los fenómenos conocidos y permite que en un sistema físico que se analiza en dos instantes de tiempo diferentes se presente una conservación de sus propiedades. A esta ley se le conoce como *conservación de la energía*. Dicha ley afirma que la energía no varía en relación con los cambios que sufre la naturaleza, por consiguiente, en un sistema aislado se mantiene constante y como consecuencia no se puede crear ni destruir, sólo transformarse.

Este concepto abstracto entendido como energía está definido en forma general como la capacidad de realizar un trabajo. En la naturaleza existen fenómenos que son capaces de suministrarla, son conocidos como recursos naturales de energía. Una de las fuentes principales de energía es el Sol que hace parte de las REC, *Renewable Energy Carries* o Fuentes Renovables de Energía, que a diferencia de las fuentes convencionales fósiles se pueden regenerar de forma natural o artificial. La energía solar está subdividida en *Solar Térmica*, que consiste en convertir la radiación solar en calor aplicada principalmente en fluidos para la generación de vapor que acciona turbinas para producir electricidad y en *Solar Fotovoltaica*, que mediante sistemas basados en celdas solares compuestas de un material semiconductor convierten la radiación en energía eléctrica. (Klaus , Olindo , Arno H.M. , René A.C.M.M., & Miro, 2014)

Al ser una fuente de fácil acceso y actualmente en crecimiento, la energía solar se centra en el aprovechamiento de la radiación electromagnética proveniente del Sol mediante su captación y concentración.

## **2.2. RADIACIÓN SOLAR**

La radiación solar es la fuente natural de energía más importante debido al suministro masivo que incide en el planeta gracias al constante proceso de fusión nuclear que se presenta en el Sol que representa el 99,68 % de la masa del sistema solar y que está compuesto principalmente de Helio e Hidrógeno. En su interior, específicamente en el núcleo existen condiciones de presión y temperatura propicias para una interacción molecular que permiten la fusión. La generación de energía proveniente del Sol en forma de onda electromagnética es recibida por la atmosfera terrestre en un plano perpendicular y es conocida como *constante solar* y su valor es de  $1361 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  , que fue estandarizado en 1981 por World Meteorological Organization (WMO).

En el espacio la radiación solar es prácticamente constante, pero en la tierra cambia con respecto a la época del año, la ubicación y el estado de la atmosfera e interactúa con el globo de diferentes formas. Por ende, no es la misma radiación solar recibida en Medellín a la recibida por Bogotá, o la recibida en mayo a la recibida en diciembre. La radiación solar total en un plano horizontal (H) o inclinado (I) consta de tres componentes, radiación directa, radiación reflejada y radiación difusa. (Foster, Ghassemi Majid, & Costa, 2010). La directa como su nombre lo indica es la que incide de lleno en el dispositivo de captación, la difusa es producto de la dispersión electromagnética y es reflejada por moléculas de agua, nubes, viento y la reflejada generalmente se entiende como la proveniente de la reflexión del suelo al dispositivo de captación.

La energía proveniente del Sol se puede entender como una magnitud física que puede ser medida y recibe el nombre de Irradiancia (G) y se entiende como la potencia que incide en una superficie con un área determinada y sus unidades en el sistema internacional son  $W/m^2$ . También se puede denotar como Irradiación (H) que es la energía incidente en una superficie de área determinada con un periodo de tiempo y sus unidades son  $Wh/m^2$ .

El aprovechamiento de la radiación solar está estrechamente relacionado con el conocimiento de las condiciones solares a lo largo del año y cómo varía con respecto a la latitud y longitud en el globo para realizar una correcta instalación del dispositivo de captación. Por lo tanto, es imperativo conocer la ubicación del sol en el cielo por medio de dos coordenadas solares, el Azimut  $\theta$  y la Elevación  $\phi$ .



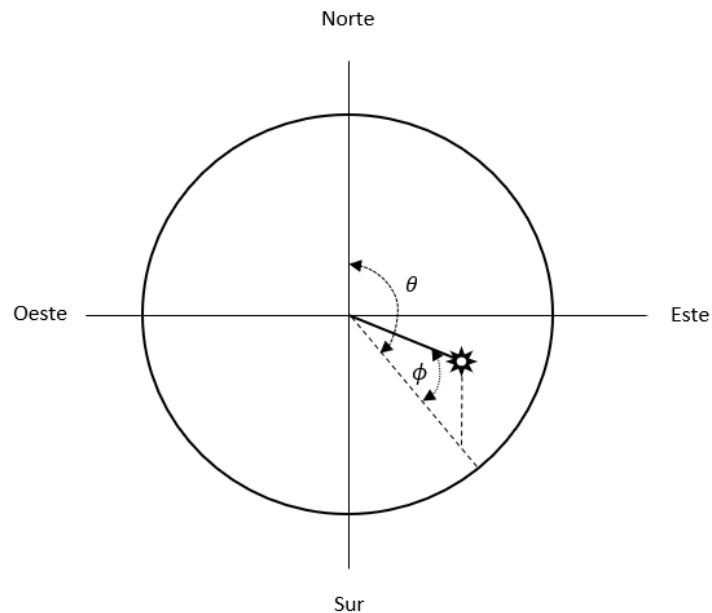


Figura 1. Coordenadas solares.

Fuente: Propia

El Azimut  $\theta$  es ángulo que se forma entre el sol y la vertical del norte, también llamado como ángulo de incidencia del haz de luz sobre la superficie horizontal y es medido en el sentido de rotación de las agujas del reloj.

La Elevación  $\phi$  es el ángulo que se forma entre el sol y la horizontal de observación o línea ecuatorial. El cambio de la elevación se presenta con respecto a la traslación de la tierra alrededor del sol, presentando un punto máximo de  $23^{\circ} 45'$  en los solsticios y de  $0^{\circ}$  en los equinoccios.

Por lo general la medición de la irradiancia es realizada por entidades meteorológicas o agencias nacionales como la NASA y en sistemas de transporte aéreos como los aeropuertos, las medidas son tomadas por medio de instrumentos llamados piranómetros que a través de sensores captan la cantidad de energía concentrada en un punto exacto y la traducen a unidades estándar y los heliógrafos los cuales miden la cantidad de horas solares a lo largo de un día y entregan un factor denominado HPS.

El concepto de horas solares pico HPS, es ampliamente utilizado en el diseño de sistemas fotovoltaicos por su amplia maleabilidad y su representación global. El número de horas del sol por un día en una ubicación determinada es equivalente (en horas) a la condición pico del sol que produce la misma insolación total. La condición solar pico es un estándar que equivale a  $1000 \text{ W/m}^2$ . (Klaus , Olindo , Arno H.M. , René A.C.M.M., & Miro, 2014).

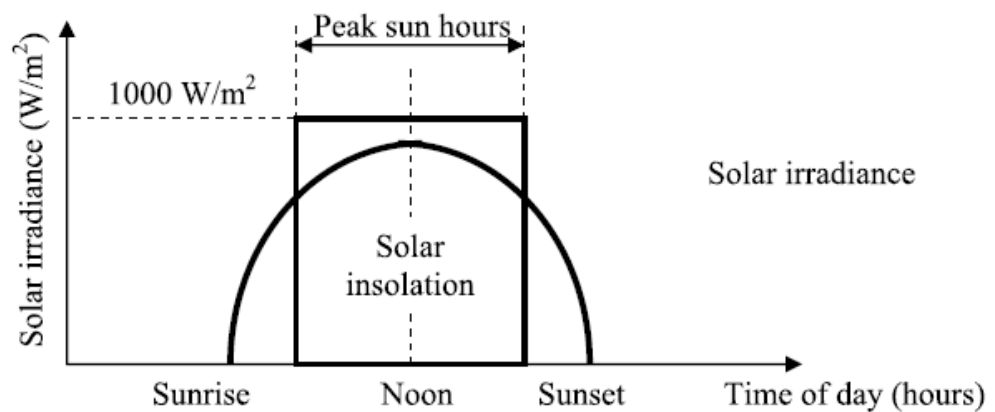


Figura 2: Diagrama de Horas solares pico.

Fuente: Klaus, J., Olindo , I., Arno H.M. , S., René A.C.M.M., v., & Miro, Z. (2014). Solar Energy Fundamentals, Technology and Systems. Netherlands: Delft University of Technology.

Conociendo la irradiación (H) que incide sobre una superficie inclinada en condiciones ideales en un determinado día se pueden obtener las HPS de la siguiente forma:

$$HPS (\text{día}) = \frac{H_o (\text{día})}{1000 \text{ W/m}^2} \quad [ 1 ]$$

### 2.3. ENERGÍA SOLAR EN COLOMBIA

La energía solar ha cobrado mayor importancia en los últimos 20 años principalmente en países europeos debido a leyes y políticas que han incentivado el crecimiento en esta zona del mundo. En Latinoamérica este tipo de generación

de energía ha incursionado incipientemente en los últimos años, permitiendo una aplicación innovadora de la tecnología y un aprovechamiento de la ubicación privilegiada de varios países en el globo.

El espacio geográfico que evalúa este estudio es Colombia, un país ubicado en la zona noroccidental de América del Sur con una gran diversidad de climas y ecosistemas debido a su localización en la zona ecuatorial lo que facilita una radiación solar muy similar en el transcurso del año. Estudios realizados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) han permitido obtener un Atlas de condiciones naturales en Colombia, dónde es posible conocer las condiciones de radiación en cada zona del territorio nacional en el tiempo (Ver Anexo 1).

A mediados del siglo XX Colombia comenzó con su incursión en el sector energético alternativo con la implementación de calentadores solares en zonas rurales y expandiéndose a diversos sectores del territorio nacional. En la actualidad se estima que el 83 % de los proyectos energéticos que se encuentran en desarrollo involucran sistemas fotovoltaicos.

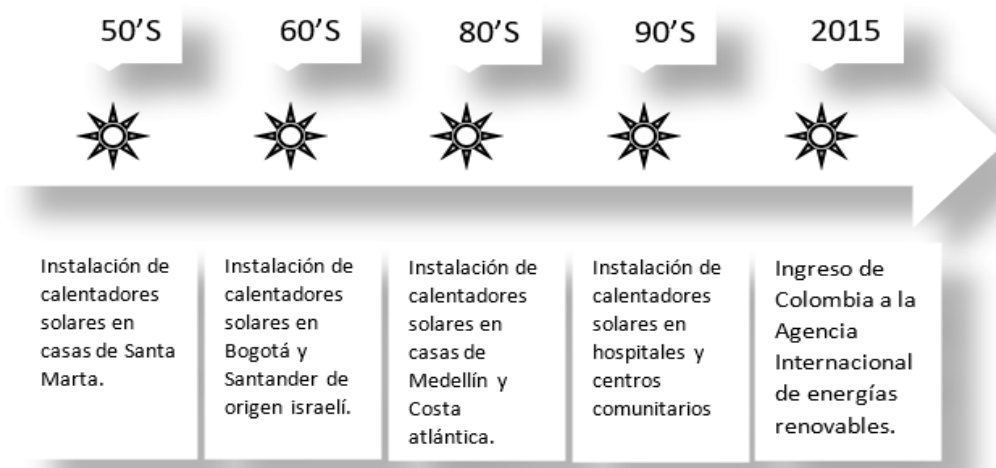


Figura 3: Línea de tiempo de implementación de Sistemas Fotovoltaicos en Colombia.

Fuente: Propia

En general, Colombia tiene un buen potencial energético solar en todo el territorio, con un promedio diario multianual cercano a 4,5 kWh/m<sup>2</sup> (destacándose la península de La Guajira, con un valor promedio de 6,0 kWh/m<sup>2</sup> y la Orinoquia, con un valor un poco menor), propicio para un adecuado aprovechamiento. (IDEAM, 2005, pág. 20). Se tiene en cuenta que el potencial mundial se encuentra en 2,5 kWh/m<sup>2</sup> diario se observa que Colombia supera el promedio ubicándolo como uno de los países naturalmente más favorecidos para el aprovechamiento solar. La UPME estima que para el año 2030 cerca del 10% del consumo energético colombiano será proveniente de proyectos fotovoltaicos. Esta característica en el globo que tiene el país se ve reflejada en las horas solar promedio en su territorio.

Como se mencionó anteriormente una forma efectiva de comprender el potencial solar de una región es mediante las horas efectivas de sol HPS que se toman en promedio al año y contribuyen al desarrollo de proyectos fotovoltaicos. Si se analizan las principales regiones de Colombia se observa el siguiente promedio de horas solares.

- Región Caribe: En el norte se cuenta con un promedio entre 7-9 horas de sol al día; hacia el centro las horas solares disminuyen con un valor entre 6-7 horas y en el sur el mínimo con 4-6 horas.
- Región Orinoquía: La mayor parte de la región cuenta con un promedio entre 6-7 horas de sol al día y en el resto de las regiones entre 5-6 horas.
- Región Andina: El centro presenta un promedio más bajo con un valor de 5-6 horas solares.

El municipio de Totoró en el Cauca presenta el promedio más bajo de horas solares del país con 1.6 HPS, mientras que el más alto se encuentra en Uribia en el departamento de la Guajira con 8.4 HPS. (IDEAM, 2005). Estos puntos máximos de irradiación solar se pueden apreciar en el atlas colombiano.

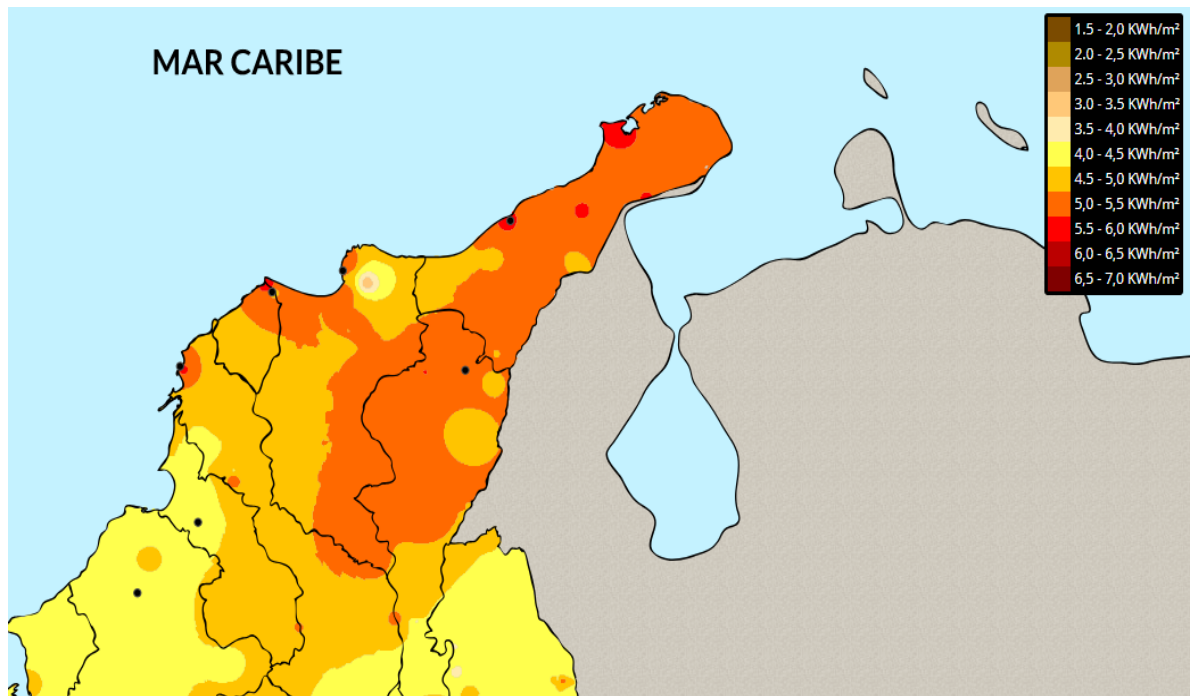


Figura 4: Atlas de Radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia.

Fuente: IDEAM. (2005). Atlas de Radiación de Colombia. Bogotá

Actualmente Colombia cuenta con una producción de energía eléctrica proveniente principalmente del recurso hídrico en un 64%, o 3045 GWh que es aprovechada a gran escala en la zona central y el gas natural en un 26.3 %. Esta concentración energética hace que el sistema pueda ser vulnerable a corto plazo debido a los cambios hidrológicos en el país, y en mediano y largo plazo, a la disponibilidad de gas natural, por hallazgos en el país o por disponibilidad de importaciones. (Ministerio de Minas y Energía , 2015). La cogeneración se encuentra al 0.5 % del nivel de producción total, a pesar de su crecimiento en la última década.

## TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN ELÉCTRICA EN COLOMBIA

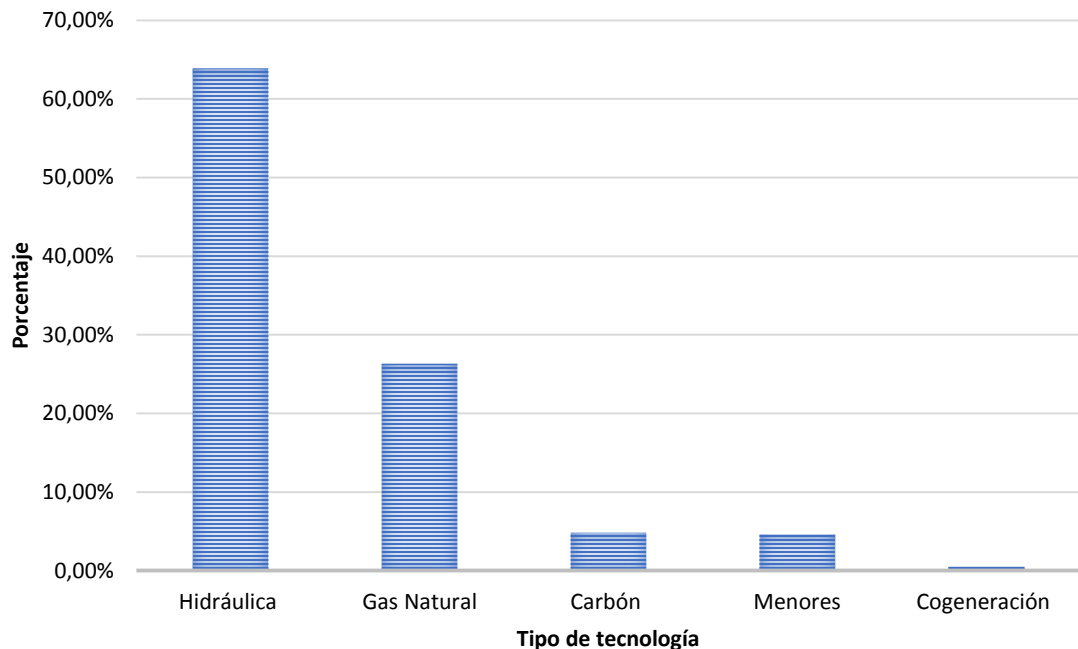


Figura 5: Tecnologías de producción eléctrica en Colombia.

Fuente: Propia

El panorama energético colombiano está compuesto por el Sistema Interconectado Nacional SIN, que cubre el 48% del territorio y es la principal fuente de distribución eléctrica y las zonas no conectadas o remotas que son lugares aislados a los que no se les provee el servicio de energía. En estas zonas se estima que cerca de 1 millón de familias no cuentan con el servicio de energía eléctrica.

### 2.4. PRINCIPIO FOTOVOLTAICO

A finales del siglo XIX se observó un fenómeno relacionado con la capacidad de conducción eléctrica en un metal al ser expuesto a la luz, esta observación más adelante se denotaría como el efecto fotoeléctrico, el cual es el principio de funcionamiento de las celdas solares que se han venido desarrollando desde el siglo

XX y que actualmente brindan energía a más de un millón de hogares en el mundo y se han presentado como el método de generación de energía con más crecimiento debido a sus grandes ventajas.

### 2.4.1. Efecto Fotoeléctrico

La luz como radiación electromagnética presenta una dualidad onda-partícula y está formada por partículas elementales sin masa llamadas fotones que transportan una cantidad de energía, dichas energías son correspondientes a una determinada longitud de onda  $\lambda$  y están relacionadas con la frecuencia  $f$  de una manera directa a la velocidad de la luz.

$$c = \lambda \cdot f \quad [2]$$

En la naturaleza existen materiales que debido a su composición presentan un comportamiento conductivo o aislante dependiendo de su interacción eléctrica como por ejemplo el silicio el cual es el segundo material más abundante de la superficie terrestre después del oxígeno y que como semiconductor es aplicado en las celdas fotovoltaicas.

Un átomo de silicio tiene en su último orbital cuatro electrones de valencia que comparte con otro átomo, formando un enlace covalente conocido como octeto estable. Cuando se presenta un cambio de energía suficiente para liberar los electrones de valencia se genera un flujo de electrones por la red, dejando atrás espacios con cargas positivas. La energía mínima necesaria para romper un enlace depende del material semiconductor y en silicio es de  $1.2 \text{ eV}$ . (Castejón & Santamaría, 2010).

Cuando los fotones como paquetes de energía discreta interactúan con los electrones del silicio generan una corriente eléctrica que depende de la cantidad de energía transportada por la luz. La energía depende estrechamente de la frecuencia

de onda de la luz, es decir, a mayor frecuencia mayor será la cantidad de energía que se suministra al material semiconductor:

$$E = h \cdot f \quad [3]$$

Donde  $h$  es la constante de Planck,  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ . Dado que la frecuencia tiene una relación inversa con la longitud de onda, entre menor sea la longitud de onda mayor será la energía transportada. Por lo tanto, al aumentar la intensidad de la luz aumentará la cantidad de electrones libres en el material, pero en realidad la energía cinética de dichos electrones depende de la frecuencia de onda. La relación existente entre la luz que incide en un material semiconductor y el potencial eléctrico se conoce como efecto fotovoltaico.

Para mejorar las propiedades eléctricas del silicio se implementan impurezas que pueden ser tetravalentes o pentavalentes, las cuales se consiguen con materiales como el fósforo y boro. Cuando la impureza es tetravalente el conductor se denomina tipo N y cuando es pentavalente es tipo P.

## 2.5. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Las instalaciones fotovoltaicas son conjuntos de elementos con funciones individuales que se agrupan para la transformación óptima de la energía solar en energía eléctrica, y usualmente se clasifican en:

- Instalaciones Aisladas de la red: Son aquellas que funcionan sin suministro de energía eléctrica, es decir, son independientes de la red eléctrica que cuentan únicamente con el suministro del sol como fuente de energía. Se emplean principalmente en lugares que no tienen acceso a la red pública de energía.



- Instalaciones con conexión a la red: Es un sistema que está conectado a la red eléctrica y al sistema fotovoltaico alternando el suministro de energía. A diferencia de las instalaciones aisladas, estas instalaciones no necesitan de un subsistema de almacenamiento (Baterías) y se apoya en el regulador para indicarle al inversor la energía disponible en cada momento en los paneles.
- Instalaciones Híbridas: En este caso las instalaciones fotovoltaicas se combinan con otra fuente auxiliar de energía, como por ejemplo un aerogenerador, o un motor Diesel.

Tabla 1: Configuración de un sistema fotovoltaico general.

<b>Subsistema</b>	<b>Componente</b>	<b>Función</b>
Módulo fotovoltaico	Panel fotovoltaico	Transformar la energía proveniente del sol en electricidad.
Módulo de almacenamiento	Baterías	Almacenar la energía que no es consumida instantáneamente.
Módulo de regulación	Regulador de carga	Regular el voltaje que es suministrado a la batería.
Módulo de inversión	Inversor (DC/AC)	Convertir el tipo de alimentación de corriente directa a alterna.

Fuente: Propia. Esta configuración es habitualmente utilizada en sistemas aislados.

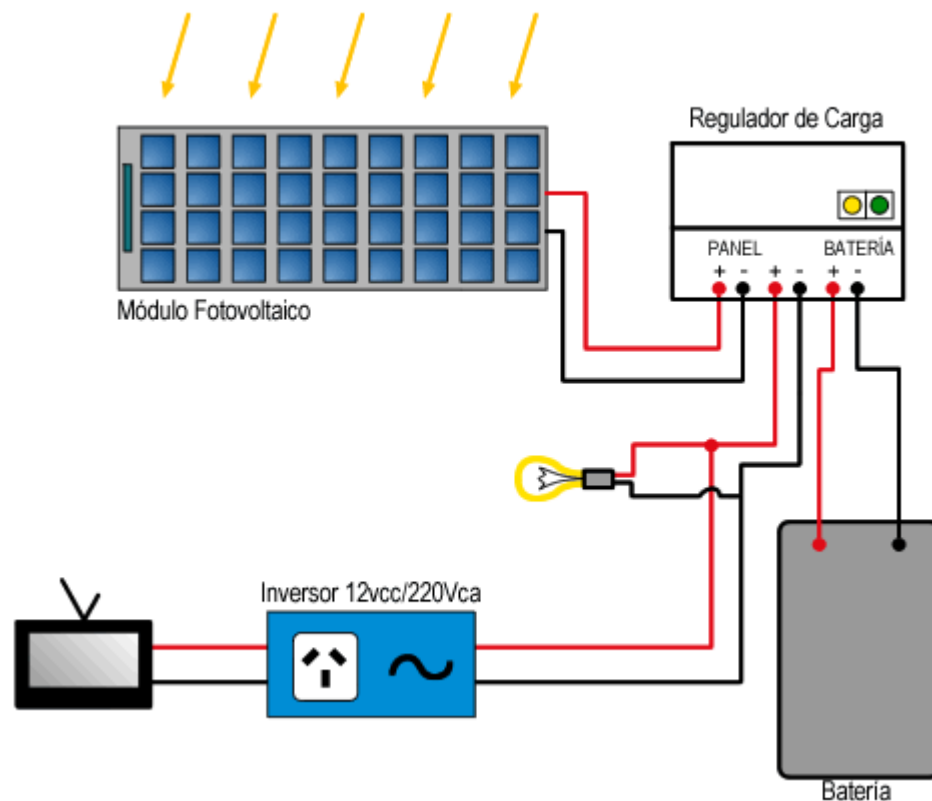


Figura 6: Gráfico de Instalación fotovoltaica no conectada a la Red Eléctrica

Fuente: Econologika. (2017). El proceso de obtención de energía del sol es sencillo. Recuperado de: <https://econologika.com/paneles-solares/como-se-genera-la-energia-solar-fotovoltaica>.

## 2.5.1. Componentes de los Sistemas Fotovoltaicos

### 2.5.1.1. Panel fotovoltaico

La unidad básica de un sistema fotovoltaico es la célula solar que es una unión P-N con dos terminales en los extremos que permiten la conexión de tipo circuito eléctrico y que está encargada de recibir la radiación solar y convertirla en electricidad de tipo directa DC.

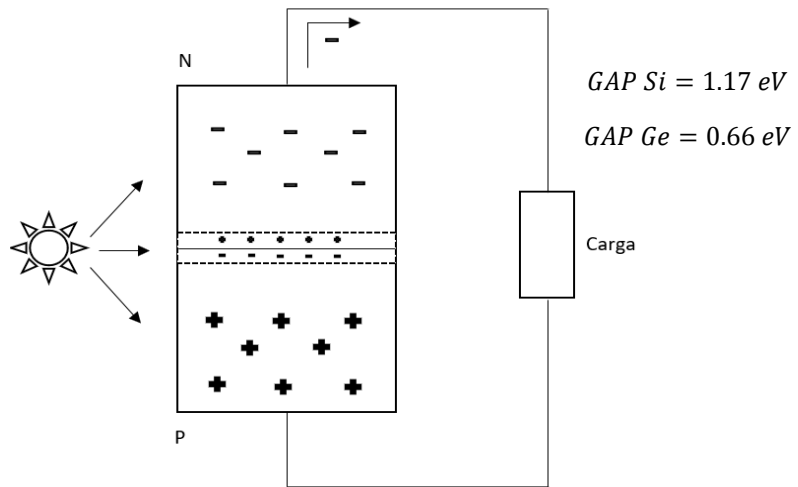

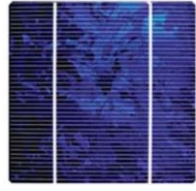



Figura 7: Diagrama de Panel Fotovoltaico: Principio básico de funcionamiento de un Panel Fotovoltaico.

Fuente: Propia

En la actualidad se cuenta con tres tipos de células solares con diferentes características físicas como la eficiencia y la potencia máxima. “La eficiencia, también denominada rendimiento de conversión,  $\eta$ , indica la fracción de energía solar recibida sobre la superficie de la célula que se convierte en energía eléctrica”. (Castejón & Santamaría, 2010, pág. 25)

Tabla 2: Tipos de células solares.

Tipo de Silicio	Eficiencia	Aspecto
Monocristalino	$15\% \leq \eta \leq 18\%$	
Policristalino	$12\% \leq \eta \leq 14\%$	

Fina	$6\% \leq \eta$ $\leq 9\%$	
------	----------------------------	---

Fuente: Propia.

La potencia máxima es una característica de la célula solar y describe la potencia máxima que le puede entregar la célula a un receptor o carga y se relaciona con la eficiencia de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{P_{m\acute{a}x}}{G \cdot A_c} \quad [4]$$

Donde  $G$  es la irradiancia en condiciones estándares ( $1000 \frac{W}{m^2}$  y  $25^\circ C$ ) y  $A_c$  es el área superficial de la célula.

En general las celdas solares tienen un voltaje de salida de 0.5 y una corriente de 3 amperios por lo que se conectan varias celdas en serie o paralelo para alcanzar los voltajes y corriente deseados. Esta unión de celdas se conoce como arreglo o modulo fotovoltaico y usualmente se comercializan en un marco base fijo metálico que proporciona una buena conductividad eléctrica con una capa de material cristalino de 3-4 mm en su superficie para la protección de factores medioambientales en exteriores. La *dimensión* de un arreglo de células solares generalmente se comprende en  $Wp$  y es directamente proporcional a la energía que produce el sistema solar.

Comúnmente los sistemas solares con el avance del tiempo caen en una disminución progresiva de la energía producida. El valor de la pérdida depende del fabricante y del tipo de tecnología empleada, por lo general el porcentaje promedio se maneja alrededor del 3 - 7% anual para una calidad estándar. El factor de

degradación puede variar y si se implementa otro porcentaje se relaciona con la siguiente ecuación:

$$\text{Degradación} = (1 - \%)^{t-1} \quad [5]$$

Dado el cambio en la degradación en periodos de tiempo  $t$  (generalmente son años) la energía que producen los módulos solares depende de este, así como de las horas solares pico:

$$E_{prod} = \text{Dimensión} * HPS_t * (1 - \%)^{t-1} \quad [6]$$

### 2.5.1.2. Baterías

En los sistemas fotovoltaicos se utilizan dispositivos capaces de acumular la energía que no se consume al instante de ser producida y que suplen electricidad en condiciones nocturnas o donde el módulo fotovoltaico no se encuentra generando la cantidad suficiente de energía para suplir el consumo. Las baterías consisten en celdas varias celdas individuales electroquímicas con ánodo y cátodo que almacenan la energía de tipo DC generada por el módulo solar y cada una presenta un voltaje nominal de celda de 2V en general.

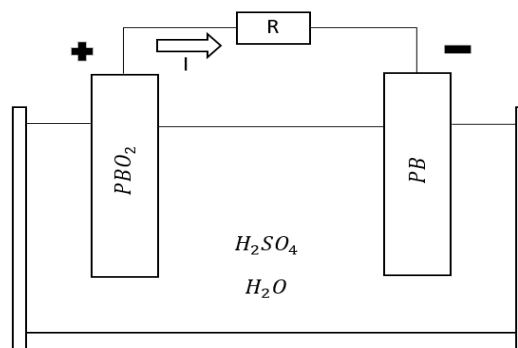


Figura 8: Esquemático de Batería: Principio básico de funcionamiento de una batería.

Fuente: Propia

Existen diferentes tipos de baterías, de las más utilizadas y maduras es la tecnología plomo-acido (Lead-Acid), pero también en el mercado se encuentran tipo níquel-metal (NiMH) y níquel-cadmio (NiCd) que son de tipo estacionario a diferencia de las utilizadas en los automóviles. En la actualidad se implementan las baterías ion de litio (LIB) que presentan una alta densidad energética y almacenamiento ligero. Sin embargo, las tipo Lead-Acid y LIB son las dos principales tecnologías de acumulación para sistemas fotovoltaicos. (Klaus , Olindo , Arno H.M. , René A.C.M.M., & Miro, 2014)

Las baterías cuentan con parámetros comerciales y que son útiles para el diseño de módulos de acumulación en los SFV:

- Voltaje: Las baterías se comercializan con voltajes nominales de 2, 6, 12, 24 o 48 voltios y se adquieren dependiendo el SFV.
- Días de autonomía: Hacen referencia a la capacidad del sistema de acumulación de entregar energía (en días) sin recibir energía de entrada por el SFV.
- Profundidad de descarga: Es el porcentaje de carga que se substraer de la batería en un ciclo completo sea de carga o descarga.
- Capacidad: Se suele medir en (Ah) y es la energía necesaria de operación de la batería para suplir las cargas en los días de autonomía requeridos.
- Vida útil: Usualmente se entiende como el tiempo en años o a veces en ciclos que la batería es capaz de desempeñarse óptimamente.

Al igual que con las células solares las baterías se pueden conectar con disposiciones en serie o en paralelo para cumplir con requerimientos de voltaje o corriente, a estos módulos de acumulación se les conoce como bancos de baterías. En los SFV las baterías previamente dependen de un sistema de regulación de carga.

### 2.5.1.3. Reguladores

En los sistemas aislados es fundamental el periodo de alimentación de energía que se produce en el tiempo de baja irradiación. Las baterías cumplen con esta función recibiendo la energía proveniente de los módulos solares. Para que pueda ser posible una carga y descarga adecuada existen los controladores de voltaje también llamados reguladores, que se encargan de mejorar el funcionamiento de los SFV y alargar la vida útil de las baterías.

El control suministrado por los reguladores se ve efectiva cuando se presenta una sobrecarga en las baterías donde interrumpe el proceso de carga, dicha situación se puede dar en diferentes escenarios como por ejemplo una tormenta eléctrica. También presenta protección contra corto circuito, temperatura alta o cuando exista una descarga excesivamente profunda en el sistema.

El principio de funcionamiento de un regulador es controlar la carga de las baterías midiendo la tensión en los bornes de conexión de la batería y a partir de la medida se implementa una acción de control adecuada. (Castejón & Santamaría, 2010). Internamente los reguladores disponen de un medidor de tensión que funciona como la retroalimentación del control y que suele representarse como un voltímetro que acciona un circuito de control tipo MOSFET que activa o desactiva el SFV.

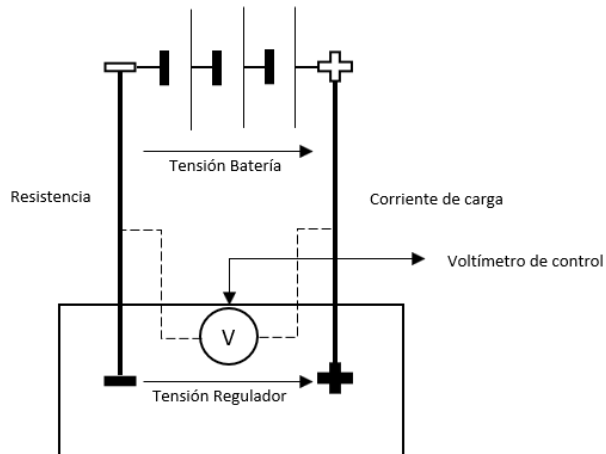


Figura 9: Esquemático de un Regulador: Principio básico de funcionamiento de un Regulador.

Fuente: Propia

En la selección de reguladores de voltaje para SFV, se tienen en cuenta dos parámetros técnicos como lo son la tensión y la intensidad. La tensión es el valor del que disponen los sistemas de acumulación ya sea cualquier tipo de voltaje de batería mientras que la intensidad hace referencia a la corriente que controlará el regulador con respecto al módulo solar en condiciones estándares.

#### 2.5.1.4. Inversores

El objetivo general de un inversor de voltaje es transformar la corriente directa DC que suministran los paneles solares en corriente alterna AC, que es la forma de alimentación de los electrodomésticos en una vivienda. Al contar con una onda sinusoidal de salida el inversor cuenta con dos características que dependen de su locación de aplicación, el voltaje y la frecuencia. En Colombia se suele usar un voltaje en los hogares de 120 V y una frecuencia de 60 Hz.

Los inversores son comercializados por las características de la onda sinusoidal producida, la corriente de arranque exigida por la carga y la eficiencia valorada con respecto a la distorsión armónica, cambiando consigo el precio y la calidad del



producto. La selección del inversor también dependerá si es para un sistema aislado o interconectado. (Messenger & Ventre, 2005)

Dentro los inversores en sistemas aislados se encuentran los de onda pura y onda modificada, los cuales se diferencian por el comportamiento de la corriente en el tiempo, como se aprecia en la figura 10.

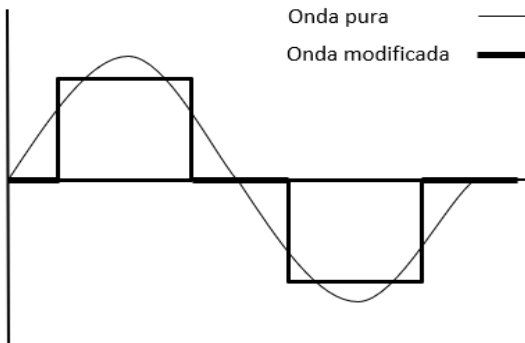


Figura 10: Principio básico de funcionamiento de un Inversor.

Fuente: Propia

Los inversores que se fabrican en onda modificada cuentan con precios menores en el mercado, pero a cambio sacrifican eficiencia a causa de los lapsos de tiempo sin polaridad que pueden producir interferencias y ruido en la señal.

Por lo tanto, un inversor aislado debe cumplir con las siguientes características en base a sus parámetros:

- Potencia nominal en base a las cargas que se encuentran en el hogar, contando con un factor de protección al arranque.
- Protección al cortocircuito, desconexión del sistema de baterías y sobrecargas.
- Alta eficiencia en la conversión de DC en AC y suavizar sobre picos de salida.

- Funcionamiento óptimo en las condiciones ambientales dadas y confianza en bajo mantenimiento a corto plazo.

#### 2.5.1.5. Mantenimiento y remplazo de sistemas fotovoltaicos

Los SFV requieren mantenimientos periódicos que garantizan una producción energética constante y que cubra las necesidades requeridas, además, de prolongar los ciclos de vida de los elementos del sistema, disminuyendo costos de cambio y reparación.

Tabla 3: Mantenimientos de SFV.

<b>Componente</b>	<b>Mantenimiento</b>	<b>Periodicidad</b>
Modulo solar	Limpieza	Trimestral, de acuerdo con el grado de suciedad.
Módulo de carga	Ajuste de terminales	Cada revisión, p.e. cada 6 meses
Módulo de almacenamiento	Para baterías abiertas, recargar agua desmineralizada.	Mensual
Modulo inversor	Ajuste de terminales	Cada revisión, p.e. cada 6 meses

Fuente: Propia

Los costos designados para los sistemas fotovoltaicos son sumamente bajos pueden variar desde el 0.5% hasta el 2% del costo total del sistema. Se pueden realizar disminución de costos de mantenimiento capacitando al usuario que recibirá la instalación como también adquiriendo elementos de mínima intervención.

También existen componentes con ciclos de vida limitados como es el caso de las baterías que son regularmente cambiadas cada cinco años o los reguladores de carga e inversores que pueden cambiarse cada diez años aproximadamente.

## **2.6. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN COLOMBIA**

El potencial solar que presenta la región puede brindar beneficios muy importantes en materia social que proveerían de electricidad a zonas rurales que no cuentan con el servicio, en materia tecnológica representa un avance hacia la aplicación de nuevas formas de generación de energías limpias y en el ámbito económico podría significar una disminución del precio energético actual y una apertura de mercado con nuevas ofertas laborales y de producción. Por lo anterior la captación adecuada de este recurso en Colombia se representa en proyectos de implementación fotovoltaica que satisfagan las necesidades de la nación e impulsen el desarrollo científico.

En Colombia principalmente el consumo se suple mediante la red eléctrica que cuenta con precios que oscilan entre \$280/KWh y \$620/KWh, según el estrato socio económico de la población. La implementación de sistemas fotovoltaicos convierte estos costos de energía en ahorros para los usuarios de estos sistemas.

Desde los años 80's en se han desarrollado proyectos fotovoltaicos en Colombia siendo al principio complejos por su implementación y costos. Estas tarifas han ido disminuyendo y en la actualidad el marco tarifario se encuentra contenido en la resolución CREG 091 de 2007, donde se exponen los precios de los componentes fotovoltaicos en el mercado, así como el estándar de desarrollo de proyectos fotovoltaicos en Colombia.

Cabe resaltar que la información sobre los precios ha sido sustraída de proveedores colombianos y la información es correspondiente a precios de septiembre de 2012 incluyendo IVA, teniendo como ciudades de estudio Bogotá, Medellín, Cali y Cartagena. (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2012).

Componente	Tipo	Capacidad	Unidad	Precio	Ecuación	Rango		R2
						Valor Inferior	Valor Superior	
Modulos	Amorfo	100	Wp	\$ 450,000	$y = 1000x + 350000$	100	150	$R^2 = 1$
Modulos	Si Mono	100	Wp	\$ 436,100	$y = 0.4664x^2 + 2191.1x + 212326$	75	300	$R^2 = 0.7031$
Modulos	Si Poli	100	Wp	\$ 417,612	$y = 2.4476x^2 + 3994x - 6263.9$	200	325	$R^2 = 0.8534$
Reguladores	MPPT	10	A	\$ 109,208	$y = 192.93x^2 + 17392x - 84005$	15	60	$R^2 = 0.8127$
Reguladores	PWM	10	A	\$ 189,484	$y = 10.143x^2 + 10115x + 87320$	5	60	$R^2 = 0.6594$
Baterías	AGM	1200	Ah	\$ 558,690	$y = 392.72x + 87426$	500	3000	$R^2 = 0.9101$
Batería	OPzS	1200	Ah	\$ 966,384	$y = 0.1231x^2 + 253.56x + 484848$	2100	2700	$R^2 = 0.8346$
Inversores	Sinusoidal modificad	300	W continuo	\$ 79,161	$y = 0.053x^2 + 247.97x$	400	2300	$R^2 = 0.9818$
Inversores	Sinusoidal pura	300	W continuo	\$ 846,225	$y = 0.1863x^2 + 214.4x + 765138$	180	3000	$R^2 = 0.6148$
Inversores	Conectados a red	240	W continuo	\$ 847,213	$y = -4.2299x^2 + 8612.3x - 976097$	240	1100	$R^2 = 1$

Figura 11: Precios de componentes de Sistema Fotovoltaico.

Fuente: Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2012). Determinación de Inversiones y Gastos de Administración, Operación y Mantenimiento para la Actividad de Generación en Zonas No Interconectadas Utilizando Recursos Renovables. Bogotá: Cooperación EMA.

Los precios están expresados regresiones cuadráticas R2 en relación con la unidad de medida que represente la capacidad o tamaño del componente, así como el grado de ajuste del modelo matemático R2.

El Departamento Nacional de Planeación expone un documento denominado PROYECTO TIPO que presenta una forma simple para el desarrollo de proyectos de instalación de sistemas fotovoltaicos en Colombia para viviendas ubicadas en zonas no interconectadas. El documento incluye el procedimiento común de instalación e implementación de este tipo de proyectos y consigo mecanismos para la operación y mantenimiento de este tipo de sistemas buscando una inversión eficiente y que supla las necesidades de estas zonas del país con esta tecnología. (Departamento Nacional de Planeación , 2016)

## 2.7. ECONOMÍA EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Implementar un sistema fotovoltaico depende de una inversión de capital del usuario que lo requiere y como cualquier inversión en un proyecto se espera que las retribuciones adquiridas por el riesgo tomado sean significativas para que el proyecto sea factible. Al momento de evaluar parcialmente el proyecto aspectos

como el espacio y locación de instalación cobran importancia debido a que influyen directamente en el dimensionamiento del sistema, así como en el precio. También, se resalta el tiempo de vida del sistema porque es la proyección de la inversión donde se espera que se supla la necesidad constantemente. Las condiciones locales del país influyen notablemente en el tamaño y precio de un SFV, así como los parámetros específicos del usuario como el capital disponible de inversión y el consumo de su hogar. Por consiguiente, se denominan costos del ciclo de vida a todos los movimientos económicos durante el tiempo que el sistema funcione a optima capacidad. Así mismo, deben tenerse en cuenta, incentivos, sanciones, subsidios, penalidades, impuestos, incentivos, inversiones gubernamentales y cualquier tipo de movimiento económico referente al sistema.

El precio de la energía del país donde se realiza la instalación es tan importante como el precio inicial del sistema, porque en una instalación aislada los ingresos económicos y los ahorros energéticos dependen del consumo individual del usuario y lo que representa en dinero. Este valor de energía en Colombia depende del estrato socioeconómico de la población y se expresa en \$/KWh y así como se puede medir mensualmente en el análisis de factibilidad se visualiza anualmente.

Por lo tanto, en un análisis económico de un sistema fotovoltaico se deben considerar los siguientes factores.

Tabla 4: Factores de análisis económico.

<b>Internos al usuario</b>	<b>Externos al usuario</b>	<b>Mixtos</b>	<b>Descripción</b>
Consumo			La energía en KWh de consumo mensual.
Capital de inversión			Cantidad porcentual del costo asumido.

Años de deuda			Los años de duración de la deuda
	Costo de la energía		Valor por KWh designado para el país.
	Energía producida		Energía que produce el SFV según diseño.
	Valor monetario		Valores asignados a tasas de interés, tasa de descuento, etc.
	Inflación		Inflación porcentual esperada del país
	Incentivos		Ingresos económicos legales asignados para los SFV
	Impuestos		Valores asignados por legislación para los SFV, como el IVA.
		Costo del sistema	Costo total de los componentes según el diseño
		Anualidad	Valor anual de la deuda que se abona.
		O&M	Costos debidos a la operación y mantenimiento.
		Reemplazo	Costos por reemplazo de componentes que cumplieron ciclo de vida.

---

Fuente: Foster, R., Ghassemi Majid, & Costa, A. (2010). Solar Energy Renewable Energy and the Environment. New Mexico: CRC Press.

## **2.8. ANÁLISIS ECONÓMICO**

El análisis económico de un proyecto se realiza con base a su rentabilidad, las cantidades comúnmente calculadas son la amortización simple, el costo de la energía y el flujo de efectivo, se pueden realizar análisis más complejos teniendo en cuenta el valor temporal del dinero, las tasas de descuento etc. (Foster, Ghassemi Majid, & Costa, 2010). Estos análisis complejos pueden reunir conceptos como la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN) que dan una estimación de la rentabilidad de un proyecto. La aplicación de estas técnicas depende del método análisis utilizado, como por ejemplo el de D. Yogi Goswami.

### **2.8.1. Modelo de Yogi Goswami**

D. Yogi Goswami es director del Centro de Investigación de Energía Limpia de la Universidad de Florida y profesor distinguido con amplios conocimientos en energías renovables. Este estudio se enfoca a la implementación de su modelo económico en sistemas fotovoltaicos para la estimación de factibilidad de un proyecto haciendo uso de las técnicas económicas avanzadas en base al cambio valor del dinero en el tiempo.

#### **2.8.1.1. Valor Presente y futuro**

Una operación financiera que realiza un importe de un capital en el tiempo se conoce como valor presente y permite saber el valor de un monto de dinero o inversión futura en una determinada fecha. De igual forma se puede realizar el cálculo contrario, es decir el valor futuro para conocer el valor de una inversión realizada en el presente definido de la siguiente forma:

$$X = P(1 + i)^t \quad [ 7 ]$$

Donde  $t$  es el tiempo futuro expresado en años u otra unidad de tiempo dependiendo la base del cálculo,  $P$  se define como el valor presente e  $i$  el tipo de interés asignado. Al utilizar el valor presente se implementa el factor de valor presente PWF. El efecto de la inflación en el futuro de una suma invertida es reducir el valor futuro en un factor  $(1 + j)$  por año, donde  $j$  es la tasa de inflación por año. Esto es importante para determinar los ahorros futuros. (Goswami , 2015). El PWF se puede expresar como:

$$P = X(1 + i)^{-t} = X \cdot PWF(i, t) \quad [ 8 ]$$

$$PWF(i', t) = (1 + i')^{-t}, \text{ donde } i' = (i - j)/(1 + j) \quad [ 9 ]$$

#### 2.8.1.2. Series de pagos

Es muy usual que las inversiones de SFV estén acompañadas de la financiación de un préstamo ( $S$ ), ya sea parcial o total. El usuario define el porcentaje de inversión para deuda, así como la cantidad de tiempo  $t$  que tendrá la deuda de duración. La entidad financiera que realiza el préstamo define la tasa de interés  $i$  o precio financiero que da el valor monetario.

Los abonos a la deuda se realizan en una unidad temporal  $t$  que suele ser en años, a este compromiso financiero se le conoce como anualidad  $P_{ann}$  y se describe así,

$$S = P_{ann}[(1 + i)^{-1} + (1 + i)^{-2} + (1 + i)^{-3} + \dots] \quad [ 10 ]$$

Al representar una serie temporal expresada en el tiempo de la deuda y con base al porcentaje capital se puede escribir como:



$$P_{ann} = S[i/(1 - (1 + i)^{-t})] \quad [ 11 ]$$

La anualidad no necesariamente se tiene que realizar anualmente pero sí en periodos de tiempo iguales en cantidades de dinero iguales.

#### 2.8.1.3. Valor actual neto (VAN)

Es un indicador de inversión que permite actualizar los flujos de caja futuros de una inversión y sirve como parámetro de rentabilidad de los proyectos que se estén llevando a cabo. Es importante tener en cuenta que si el VAN es:

- Mayor a cero ( $> 0$ ): el proyecto genera unos beneficios, es decir, es rentable.
- Igual a cero ( $= 0$ ): el proyecto no genera ganancia ni de pérdida, por lo tanto, es igual a la inversión realizada.
- Menor a cero ( $< 0$ ): el proyecto no genera ganancias, se considera no rentable debido a que la inversión hecha en el proyecto es mayor que los ingresos que podrían obtenerse de él.

El resultado que se obtiene del VAN se expresa en valor monetario.

#### 2.8.1.4. Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR es la tasa interna de retorno de la inversión inicial necesaria para convertir el flujo de efectivo futuro de un proyecto igual a la inversión inicial. Si la inversión inicial se considera como un flujo de efectivo negativo, entonces la TIR es la tasa de descuento que hace que todos los flujos de efectivos descontados a su valor presente sean igual a cero: (Goswami , 2015). La TIR es una tasa de actualización del VAN y su relación se ve reflejada en la siguiente ecuación:

$$VAN = 0 = \sum_{n=1}^N \frac{CF_n}{(1 + TIR)^n} - CI \quad [ 12 ]$$

$CF_n$ , representa los flujos de caja del año  $n$ ,  $CI$  es la inversión inicial de capital y  $N$  son los años de vida útil del proyecto. El TIR se refleja en un porcentaje que define la rentabilidad o no de un proyecto,

$$TIR = \sum_{n=0}^N \frac{CF_n}{(1 + CI)^n} \quad [ 13 ]$$

El valor de la TIR sirve para realizar comparaciones entre sistemas de energía solar con otro proyecto de inversión energética, por eso en el análisis económico es tan imprescindible.

#### 2.8.1.5. Costo Nivelado de Energía LCOE

El LCOE es el costo por unidad de energía es el cociente entre el VAN de las inversiones y costos por mantenimiento y el VAN de la energía producida por el sistema \$/KWh. Este cálculo se realiza durante la vida útil del sistema y se representa así:

$$LCOE = \frac{TLCC}{\sum_{n=1}^N \left( \frac{E_n}{(1 + i)^n} \right)} \quad [ 14 ]$$

$E_n$ , es la energía producida por el sistema solar en el año  $n$  y TLCC son los costos totales del ciclo de vida. Si se asume que la producción del sistema solar es la misma cada año la ecuación se puede simplificar,

$$LCOE = \frac{TLCC}{E_n} CRF(i, n) \quad [ 15 ]$$

Debido a que el LCOE es independiente al usuario es idóneo para comparar tecnologías de aplicación energéticas disponibles.

## 2.9. OPTIMIZACIÓN

Desde que se comenzaron a desarrollar modelos matemáticos para representar el comportamiento de la naturaleza se han buscado formas de hacer más eficientes estos modelos. Para alcanzar el objetivo deseado se implementan métodos o políticas de optimización que se representan por conjuntos de valores que pueden ser modificables para alcanzar una respuesta deseada. Dentro de la investigación operativa, las técnicas de optimización se enfocan en determinar la política a seguir para maximizar o minimizar la respuesta del sistema. Dicha respuesta, en general, es un indicador del tipo “Costo”, “Producción”, “Ganancia”, etc., la cual es una función de la política seleccionada. Dicha respuesta se denomina objetivo, y la función asociada se llama función objetivo. (Baquela & Redchuk, 2013, pág. XIII)

Existen diferentes políticas de optimización como por ejemplo en base al cálculo que se refiere a la búsqueda de puntos máximos y mínimos mediante derivadas y procesos matemáticos que conllevan consigo un gran costo computacional pero una gran exactitud. También existen métodos que buscan convergencia por medio de restricciones a la función de optimización y que más que generar una salida estática, tiene una gama de posibles soluciones que satisfacen el problema de optimización ya sea encontrando máximos o mínimos. Dentro de las técnicas por restricción se encuentra la programación lineal un método muy eficaz para encontrar solución a problemas reales y complejos donde se necesita una respuesta de selección a un abanico de posibilidades.

### 2.9.1. Programación Lineal

Como muchos desarrollos de la humanidad la Programación Lineal (PL) surgió con una aplicación militar después de la Segunda Guerra Mundial y desde su surgimiento se ha venido utilizando para resolver problemas de optimización en diversas áreas. La PL tiene como objetivos resolver problemas reales como la clasificación de elementos, asignación de recursos, mezclas de productos, maximización de beneficios, minimización de costos, entre otros. Este método debe contar con cinco características para ser implementado correctamente (Puente Riofrío & Gavilánez Álvarez , 2018):

- Linealidad: Hace referencia a una relación lineal entre las variables del proceso.
- Homogeneidad: Enfatiza en la igualdad de condiciones de las variables, es decir que cuentan con la misma rigurosidad.
- Divisibilidad: Existe cuando todas las variables del sistema son divisibles en fracciones.
- Limitación de recursos: Las cantidades que intervienen en la optimización deben ser acotadas como, por ejemplo, horas de trabajo, número de trabajadores, suministros, materiales, etc.
- Objetivo explícito: Es importante saber el objetivo de la optimización ya sea maximizar o minimizar.

Para desarrollar un modelo de Programación Lineal se profundiza en tres componentes específicos que definen la política de optimización las variables, objetivos y restricciones. Cada uno de estos componentes se define con diferentes propiedades dentro del modelo.

- Función Objetivo: Se define entre los objetivos del problema de optimización y es una función matemática que de ser maximizada o minimizada alcanzará la meta de la política, por ejemplo:

$$\max \quad z = cx \quad [ 16 ]$$

- Variables de decisión: Es un tipo de variable controlable que define la salida del modelo mediante su variación.
- Variables de problema: Son variables que se definen cuando se ha resuelto el problema con las cuales se alcanza el objetivo de la optimización.
- Coeficientes: Son parámetros definidos de la función objetivo y pueden ser constantes numéricas.
- Restricciones: Existen limitaciones físicas u conceptuales que debe cumplir el modelo para poder optimizarse adecuadamente.

Principalmente existen dos tipos de restricciones, las lineales que cuentan con una ecuación convencional para definirse y las restricciones por desigualdad que como su nombre lo indica están definidas por una inecuación:

$$\begin{aligned} \max \quad & z = cx \\ & Ax = b \\ & x \geq 0 \end{aligned} \quad [ 17 ]$$

Con las anteriores características la metodología para la resolución de problemas por programación lineal cuenta con la siguiente lógica.



Figura 12: Metodología para la resolución de problemas por programación lineal.

Fuente: Propia

### **3. MARCO LEGAL**

En Colombia se han venido generando estrategias oportunas en el sector eléctrico para incentivar la aplicación y uso de energías con fuente renovable. Las entidades que están encargadas de regular la normatividad son el Ministerio de Minas y Energía (MME), la Comisión Reguladora de Energía y Gas (GREG) y la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). A continuación, se hará una breve citación de las principales estrategias intervinientes en la energía fotovoltaica en Colombia.

#### **3.1. PLAN ENERGÉTICO NACIONAL**

Este es un plan energético desarrollado por la UPME con el objetivo principal de hacer una proyección futura del sector eléctrico nacional para un desarrollo sostenible del país y sirve como base para el desarrollo de políticas energéticas. Se abarcan varios subíndices tales como: 1. Asegurar la disponibilidad energética en base a la demanda nacional y garantizar su sostenibilidad a largo plazo. 2. Conseguir la integración energética de todo el territorio. 3 y 4. Estudio de mercado con respecto a los precios para asegurar la competitividad energética. 5. Potenciar la cobertura enfocándose en las fuentes no convencionales de energía, el medio ambiente y la salud, la tecnología y la ciencia, la normatividad nacional y la capacitación. El documento especifica que el plan debe ser conjunto con el Ministerio de Minas y Energía por lo que se considera un Ideario Energético. (Ministerio de Minas y Energía , 2015)

#### **3.2. LEY 1 DE 1984**

En el cual se reforma la estructura administrativa del Ministerio de Minas y Energía y se determinan las funciones de sus dependencias. En el artículo 63 se presenta la “División de Fuentes No Convencionales” que enuncia tres ítems claves: a. Promover la aplicación de fuentes alternativas de energía especialmente en áreas

donde los servicios públicos son deficientes. b. Efectuar estudios para el desarrollo de las fuentes alternas de energía con el fin de adoptar políticas a nivel nacional. c. Evaluar el uso masivo de las fuentes alternas de energía como consecuencia de cambios estructurales de los mercados de las fuentes tradicionales. (Congreso , 1984)

### **3.3. DECRETO 3652 DE 2003**

Este decreto define el fondo de apoyo financiero para la energización de las zonas rurales no interconectadas además de condiciones y reguladores de normas para impulsar la implementación de energías renovables en zonas de no cobertura. El objetivo del presente decreto es reglamentar el uso racional y eficiente de la energía, de tal manera que se tenga la mayor eficiencia energética para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad del mercado energético colombiano, la protección al consumidor y la promoción de fuentes no convencionales de energía, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables. (Ministerio de Minas y Energía, 2003).

### **3.4. LEY 1715 DE 2014**

Esta ley tiene como objetivo promover el desarrollo y utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente las de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad de abastecimiento energético. (Ministerio de Minas y Energía, 2014).

Mediante esta ley los interesados en realizar inversiones en proyectos energéticos de fuentes no convencionales de energía pueden acceder a los beneficios e incentivos amparados por la ley. Para el desarrollo de los incentivos previstos en la ley se tiene en cuenta el Decreto 2143 de 2015 del Ministerio de Minas y Energía. Además, para acceder a dichos beneficios existen las resoluciones 520 y 638 de 2007, la resolución 143 de 2016, la 045 de 2016, la 1283 de 2016 y la 186 de 2012, que reglamentan el procedimiento para adquirir los incentivos.

Los incentivos contemplados por la Ley 1715 de 2014 son:

- Deducción especial en la determinación del impuesto sobre la renta: El artículo 11 expone que los contribuyentes declarantes del impuesto sobre la renta que realicen directamente nuevas erogaciones en investigación, desarrollo e inversión para la producción y utilización de energía a partir de FNCE o gestión eficiente de la energía, tendrán derecho a deducir hasta el 50% del valor de las inversiones.
- Depreciación acelerada: El artículo 14 expone que el gasto que la ley permite que sea deducible al momento de declarar el impuesto sobre la renta, por una porción del valor del activo que no puede superar el 20% anual.
- Exclusión de bienes y servicio del IVA: El artículo 12 expone que, por la compra de bienes y servicios, equipos, maquinaria, elementos y/o servicios nacionales o importados habrá una exclusión del impuesto al valor agregado.
- Exención de gravámenes arancelarios: El artículo 13 expone la exención del pago de los derechos arancelarios de importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos destinados exclusivamente para labores de pre-inversión y de inversión de proyectos con FNCE.



#### **4. DESARROLLO METODOLÓGICO**

En un proceso de optimización de un sistema es imperativo identificar el objetivo principal que permitirá conocer la solución al caso de estudio. Al referirse a la búsqueda de rentabilidad de un sistema fotovoltaico en base a la arquitectura se busca una maximización de ganancias con el sistema más adecuado. Para conseguir el resultado óptimo es oportuno realizar una transición asociada de los aspectos de ingeniería que involucran el desarrollo de un sistema fotovoltaico, así como los del punto de vista administrativos del desarrollo de un proyecto de esta magnitud. Teniendo en cuenta lo anterior, se debe contar con condiciones económicas y de necesidad propias del usuario, como también con las condiciones naturales del país.

El objetivo se puede definir en base a entradas definidas por diversos parámetros de entrada y una salida lógica como la rentabilidad máxima.

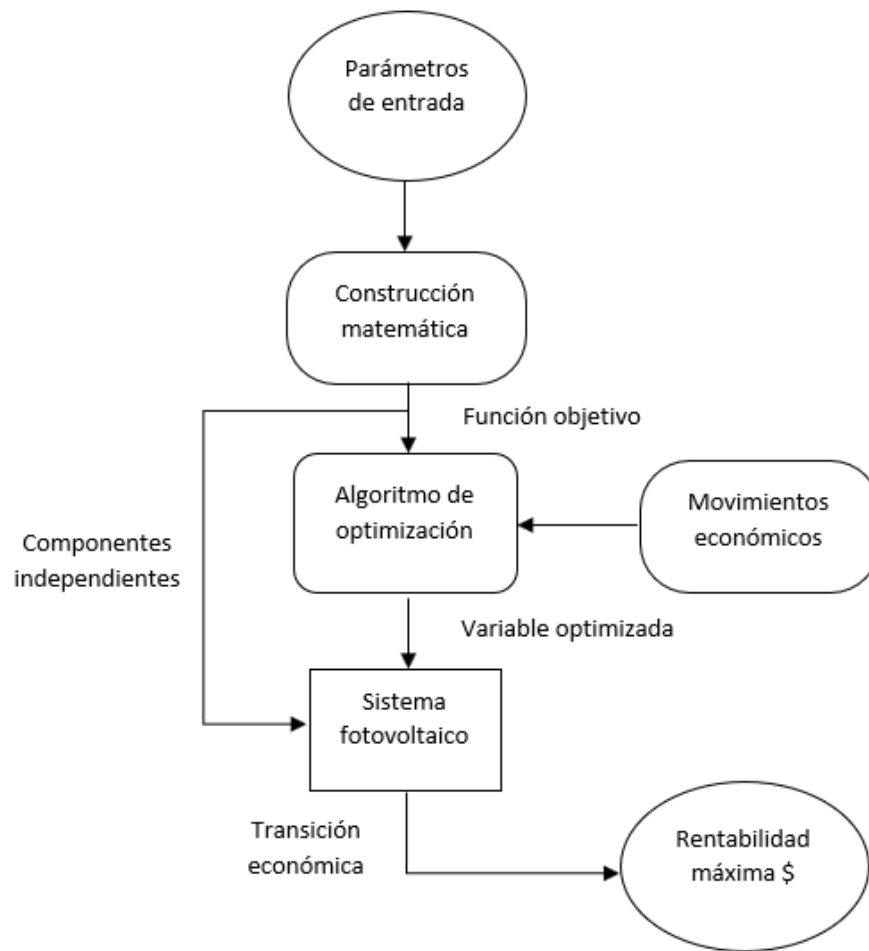


Figura 13: Diagrama de Flujo de Desarrollo Metodológico.

Fuente: Propia

En el esquema anterior se aprecia la arquitectura lógica para la implementación de un SFV con una rentabilidad máxima. Cada etapa está compuesta de diferentes subíndices que definen la construcción del sistema optimizado. Para ello se definen las entradas del sistema.

## 4.1. PARÁMETROS DE ENTRADA

### 4.1.1. Parámetros energéticos según usuario

El desarrollo de la investigación parte con la definición de diversos parámetros de entrada dependientes e independientes al usuario. Cada uno define un proceso matemático que permite obtener una optimización eficiente, por lo que su debida asignación es imprescindible.

#### 4.1.1.1. Consumo

La cantidad de energía eléctrica que se demanda en un punto por un periodo de tiempo se define como consumo. Este aspecto está denotado en kWh y determina la proporción económica que el usuario debe cancelar en dinero. El consumo eléctrico depende de la cantidad de electrodomésticos dispuestos en un hogar, así como el tiempo de uso de cada uno. La distribución energética del consumo en Colombia promedio se muestra en la siguiente figura:

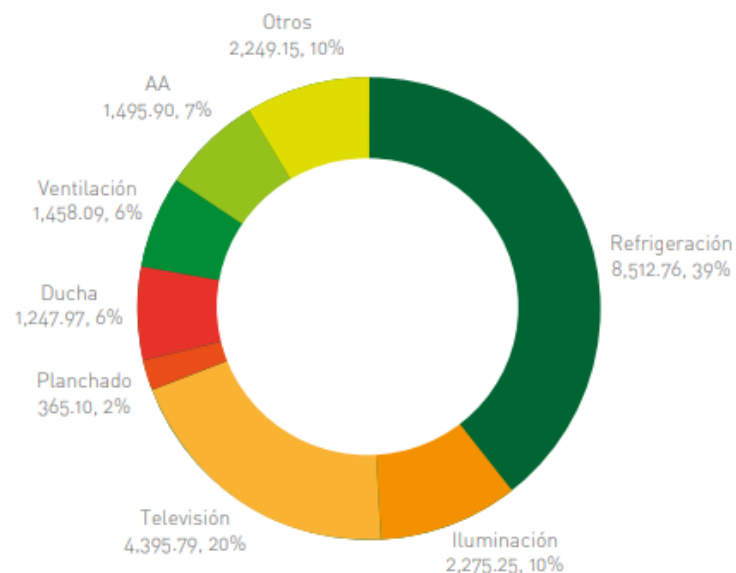


Figura 14: Distribución energética del consumo promedio en Colombia.

Fuente: Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2016). Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética 2017-2022. Bogotá: UPME.

La distribución de consumo tiene un valor mayoritario dispuesto para los sistemas de refrigeración con un 39%, seguido de la televisión con un 20% y en tercer lugar

la iluminación con un 10%. (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2016)

La potencia de cada electrodoméstico influye directamente en la disposición de un sistema fotovoltaico, como en sus componentes, por ejemplo, en el cálculo del inversor de corriente, es decir que la potencia nominal por electrodoméstico aumenta o disminuye la capacidad del inversor.

#### 4.1.1.1.1. Perfil de consumo

Existen curvas de carga que representan gráficamente el consumo eléctrico y su variación en el tiempo. Lógicamente en un día el consumo es variable debido a que en las horas altas de la noche no se encuentran encendidos la misma cantidad de electrodomésticos que en otras horas del día. Según una investigación llevada a cabo en la Universidad Distrital de Colombia llamada Análisis de la Curva de Demanda Eléctrica para Usuarios Residenciales Estrato 4 en la ciudad de Bogotá Ante los Diferentes Escenarios de los Hábitos de Consumo se obtuvo una curva de potencia en Watts que evidencia el cambio de consumo eléctrico de un hogar a lo largo del día para un consumo promedio de 168 kWh/mes. (Hernández Hernández & Carillo Cruz, 2017)

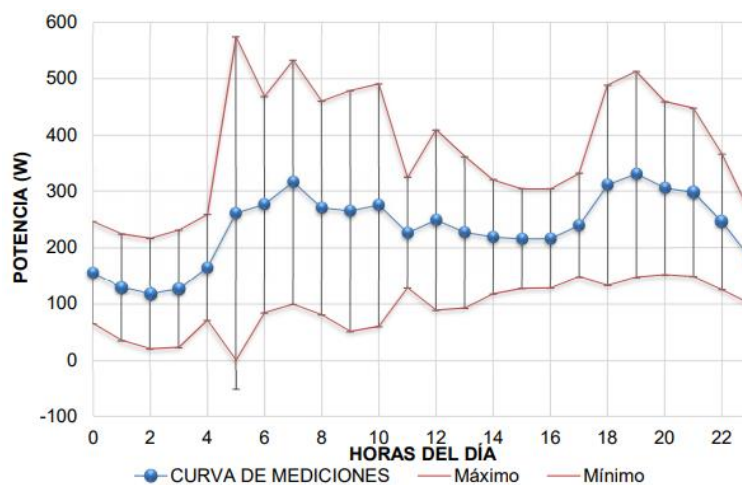


Figura 15: Perfil de consumo promedio estrato 4 Bogotá.

Fuente: Hernández Hernández, K., & Carillo Cruz, J. (2017). Análisis de la Curva de Demanda Eléctrica para Usuarios Residenciales Estrato 4 en la Ciudad de Bogotá Ante Diferentes Escenarios de los Hábitos de Consumo. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Para un SFV es importante contar con el perfil de consumo promedio diario del hogar de instalación porque dependiendo la proporción de energía eléctrica que se consume durante las horas de sol se asigna un porcentaje denominado *factor de simultaneidad* o porcentaje de autoconsumo que se relacionan con la efectividad instantánea de los módulos solares.

#### 4.1.1.2. Irradiación Local

Como se estudió anterior mente cada ubicación en el mundo tiene unas condiciones solares diferentes y que son cambiantes a lo largo del año. Para el diseño de un sistema fotovoltaico este factor se considera un parámetro de entrada dado que el cambio de su valor influye directamente en el objetivo del sistema.

Dado que se busca obtener como resultado suplir el consumo en el lugar donde se pretenda implementar el módulo solar en cualquier momento del año se puede asumir como irradiación de trabajo la mínima medida en el periodo de tiempo de estudio. Por ejemplo, en la ciudad de Bogotá existen cambios en la irradiación solar dependiendo del mes del año como se observa en la figura 16:

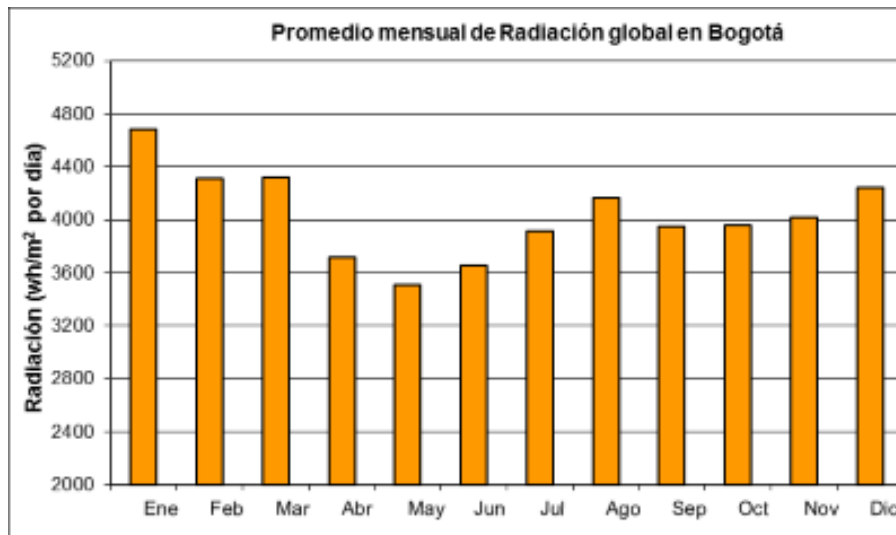


Figura 16: Promedio mensual de radiación global en Bogotá.

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2005). Atlas de Radiación de Colombia. Bogotá.

El promedio mensual de radiación global en Bogotá muestra que la irradiación máxima se encuentra en el mes de enero con un valor aproximado de  $4700 \frac{Wh}{m^2}$ . Sin embargo, como se pretende garantizar el consumo eléctrico en cualquier periodo de tiempo el valor de trabajo adecuado sería el del mes de mayo que tiene una irradiación mínima promedio de  $3500 \frac{Wh}{m^2}$ . Este parámetro permite calcular las horas solares pico claves en el diseño del módulo solar.

#### 4.1.2. Parámetros económicos según usuario

##### 4.1.2.1. Financiamiento

En el análisis económico existen parámetros que dependen exclusivamente del usuario que requiere hacer la instalación del sistema fotovoltaico. Este es el caso del financiamiento del costo del sistema que puede ser al 100% en la inversión inicial o también segmentado en un porcentaje de deuda con una entidad financiera que define la respectiva tasa de interés conforme al tiempo de deuda. La duración del

préstamo generalmente se evalúa en periodos de tiempo anuales y depende del beneficiado.

### 4.1.3. Parámetros económicos que no dependen del usuario

#### 4.1.3.1. Precio de la electricidad

La tarifa de la electricidad es un valor cambiante en el tiempo y el país de evaluación. El precio depende en gran medida el movimiento del mercado con respecto al combustible principal utilizado, los subsidios gubernamentales distribuidos, las condiciones climáticas y las características económicas del país.

En Colombia a pesar de tener una fuente de energía principal de fuente hídrica según la revista Dinero tiene costos altos a comparación de Estados Unidos y regionalmente se encuentra como el cuarto país con el precio de electricidad más elevado. (Dinero, 2015)

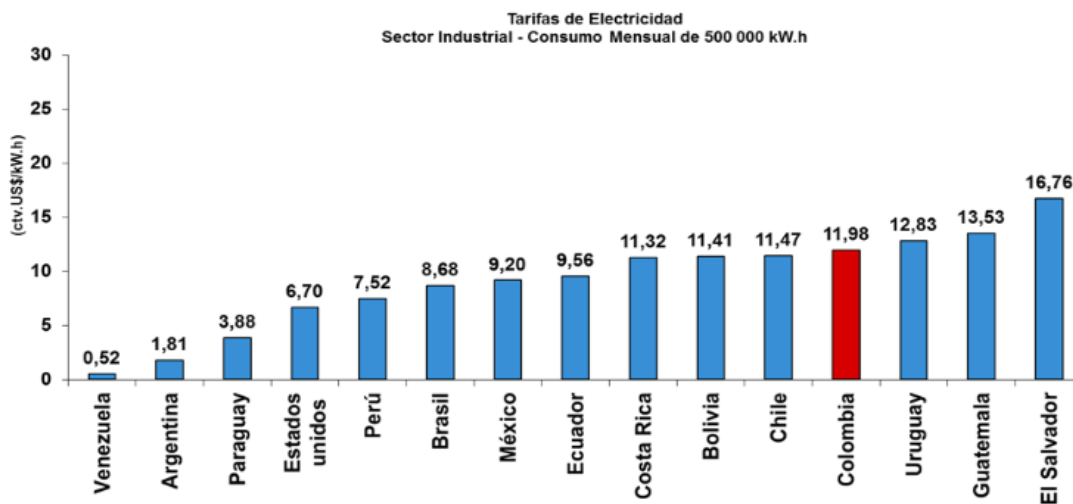


Figura 17: Tarifas de Electricidad Sector Industrial América Latina.

Fuente: Dinero. (13 de agosto de 2015). Dinero . Obtenido de <https://www.dinero.com/pais/articulo/costos-energia-colombia/212216>.

La importancia del análisis del precio energético en los sistemas fotovoltaicos radica en que el ahorro de energía eléctrica en un hogar por instalar sistemas solares se traduce en un ahorro de dinero proveniente de la factura en periodos de tiempo:

$$E_s = E_{ahorrada} \cdot \text{Precio de la electricidad} \quad [ 18 ]$$

#### 4.1.3.2. Inflación

El aumento general de los precios referentes de los bienes y servicios en un país durante un periodo de tiempo se conoce como inflación. Este valor porcentual se evalúa en años y refleja el poder adquisitivo de una moneda. En los SFV se evalúa en el año de la adquisición del producto, así como en los años posteriores donde se realicen compras referentes al sistema, por lo que se utilizan índices de medición de inflación para hacer una estimación de este parámetro en periodos de tiempo futuros.

#### 4.1.3.3. IVA

El Impuesto al Valor Agregado es un tributo destinado como comisión para un bien o servicio en una nación que se obtiene en base a la producción industrial. En Colombia el IVA se encuentra en el 19%, sin embargo, este valor puede cambiar al 14% o 15% o también como se observó en la Ley 1715 para los sistemas fotovoltaicos hay una exención de este gravamen. La valoración del IVA influye directamente en el costo total del sistema y puede ser un factor clave para tener en cuenta en una inversión si su magnitud es muy elevada.

#### 4.1.3.4. Incentivos

Existen impulsos económicos aplicados independientemente por las naciones que quieren implementar masivamente energías alternativas por medio de leyes y



normas. Estos incentivos en el análisis económico se comprenden como un ingreso que contribuye a la rentabilidad de un proyecto basado en energías limpias. Como se observó anteriormente Colombia cuenta con diversos incentivos como la deducción del impuesto a la renta o la exención del gravamen arancelario.

## 4.2. MODELO DE SIMULACIÓN

A través del paquete de simulación TRNSYS se dimensiono el posible sistema fotovoltaico que pueda suplir el consumo energético de acuerdo con las características de demanda de las zonas de estudio.

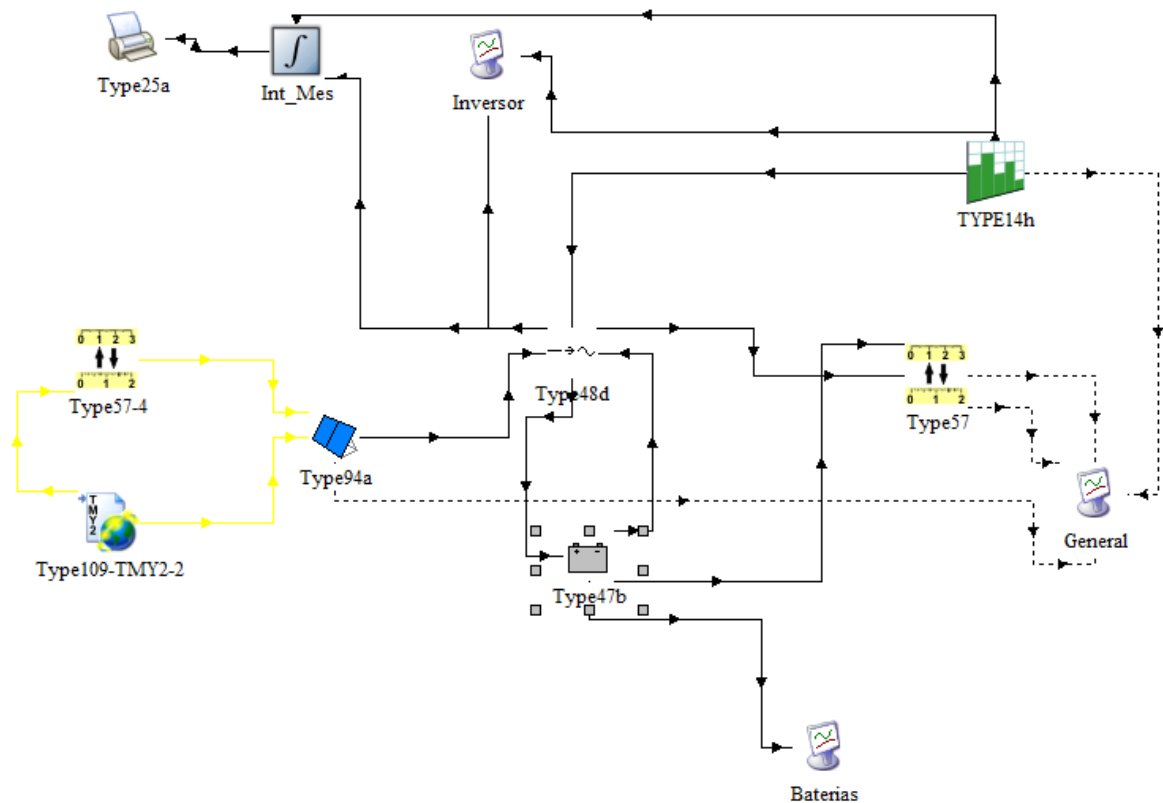


Figura 18: Dimensionamiento del Sistema Solar Fotovoltaico

Fuente: Propia

Este modelo está diseñado por medio de diferentes unidades que permiten caracterizar los componentes importantes dentro de un sistema Solar fotovoltaico. A continuación, describiremos algunos de ellos:

- *Type 57*: permite realizar de forma sencilla conversión de unidades dentro de un archivo de entrada del TRNSYS. Es importante que el usuario defina las unidades de entrada y salida de cada variable, de tal manera que la unidad ejecute la conversión de acuerdo con la magnitud física definida para la variable.
- *Type 109*: lee los datos meteorológicos en intervalos regulares de tiempo desde un archivo de datos convertirlos en un sistema deseado de unidades y generar salidas de radiación directa y difusa para un número arbitrario de superficies con orientación e inclinación arbitrarias. El type 109 lee varios formatos estándar (TMY2, TRY) y también en formato libre especificado por el usuario.
- *Type 94a*: este componente modela el rendimiento eléctrico de un panel fotovoltaico. El type 94 se puede emplear para simular sistemas que involucran el almacenamiento de energía por medio de baterías o conexiones a red eléctrica. Así mismo el TYPE 94a que recrea los módulos solares fotovoltaicos de silicio monocristalino y policristalino mediante un seguimiento al punto de máxima potencia, emplea ecuaciones para un tipo de circuito equivalente empírico que contempla las características de corriente y voltaje de un solo panel y luego las extrapola para predecir el rendimiento de una matriz multi-módulo (TRNSYS, 2016).
- *Type 48d*: esta unidad es el regulador – inversor. En sistemas de Energía Fotovoltaica es importante contar con dos componentes que acondicionan la energía. El primero de ellos es el regulador que protege a las baterías de sobrecargas, regulando la intensidad de carga que proviene de las células solares y así alargar la vida de las baterías. El segundo componente es el inversor el cual transforma la energía producida por la instalación

fotovoltaica, que se transmite en forma de corriente continua, en corriente alterna con el fin de que los electrodomésticos y otros dispositivos funcionen de manera adecuada.

- *Type 47d*: Modela el banco de baterías de plomo-acido, el cual funciona con un conjunto de células solares y componentes de acondicionamiento de energía. Especifica cómo varía el estado de carga de la batería con el tiempo, dada la velocidad de carga o descarga. En los modos superiores, esta unidad también utiliza fórmulas relacionadas con el voltaje de la batería, la corriente y el estado de carga (TRNSYS 2016).
- *Type 14h*: define los perfiles de carga dependientes del tiempo. Este perfil se puede definir para periodo de tiempo (un día, una semana, etc.) y luego se repite.
- *Type65d*: el componente de gráficos en línea se usa para mostrar las variables del sistema seleccionadas a intervalos de tiempo específicos mientras la simulación progresa. Este componente es altamente recomendado y ampliamente utilizado, ya que proporciona información variable valiosa y permite a los usuarios ver de inmediato si el sistema no está funcionando como se desea. Las variables seleccionadas se mostrarán en una ventana de trazado (TRNSYS, 2016).

### **4.3. CONSTRUCCIÓN MATEMÁTICA**

#### **4.3.1. Variable de optimización**

Puede considerarse como una variable de decisión que según los valores que tome afectará el objetivo final de la optimización. Para la maximización de la rentabilidad existe una relación estrecha con la dimensión del arreglo solar, puesto que la selección más optima permitirá producir la energía precisa para suplir el consumo de un hogar promedio en Colombia y también para ser la que presente menores costos y por consiguiente produzca mayores ingresos.

Como cualquier variable de optimización debe ser delimitada para que el algoritmo tenga una cantidad limitada de opciones para escoger, por lo que la restricción de dimensión viene definida como:

$$\text{Mínimo} \leq \text{Dimensión} \leq \text{Máximo}$$

Al ser una variable interna de la optimización el algoritmo trabaja paralelamente bajo iteraciones hasta convergir en la dimensión optima que permita alcanzar el objetivo.

#### 4.3.2. Función Objetivo

En cada periodo de tiempo  $t$ , los cambios monetarios presentados tanto de ingresos como de egresos se relacionan en el flujo de fondos. Las entradas de dinero pueden ser debido al ahorro o a una ganancia neta, mientras que las salidas están relacionadas con los pagos o la deuda en base al costo del sistema, es por eso por lo que en general el balance de flujos se evalúa al final del periodo contable:

$$CF_t = Entradas_t - Salidas_t \quad [ 19 ]$$

Para los sistemas fotovoltaicos las entradas se encuentran definidas con los siguientes factores que no necesariamente deben estar en su totalidad:

$$Entradas_t = Ingresos_t + Ahorros_t + Incentivos_t \quad [ 20 ]$$

En los ingresos se tienen en cuenta los valores económicos positivos que proporciona el SFV ya sea por la venta de energía en sistemas interconectados o cualquier tipo de comercialización de energía. Los ahorros están relacionados con la tarifa eléctrica domiciliaría que al ser remplazada por la nueva generación de energía se transforma en un ahorro por parte del usuario. Finalmente, los incentivos

promovidos por las entidades estatales también son considerados una entrada por su aporte al flujo de fondos.

De igual forma las salidas monetarias evaluadas en el periodo contable representan los egresos que se obtuvieron debido a la instalación u operación del sistema fotovoltaico a instalar:

$$Salidas_t = Anualidad_t + Impuestos_t + O\&M_t + Costo SFV_t \quad [ 21 ]$$

Cada periodo contable cuenta con un balance de salidas distinto, por ejemplo, la anualidad se encuentra en los años donde esté presente la deuda y se efectúa mediante cuotas fijas. Los impuestos son dependientes de la legislación activa del país y pueden existir o no. La operación y mantenimiento representan los gastos ocasionados por el sistema debido al uso, se puede establecer una cantidad fija anual destinada al mantenimiento dependiendo la gestión del área y en los años donde se presenten cambios de dispositivos del sistema se incursiona en los cambios en base a la operación, usualmente en baterías, reguladores e inversores. Los costos del sistema fotovoltaicos pueden ser incluidos en el flujo de caja o bien en la función objetivo en sí y equivalen al valor total de los subvalores de los costos de cada elemento del sistema:

$$Costos SFV_t = \sum Costos individuales \quad [ 22 ]$$

En los costos del sistema fotovoltaico se pueden contemplar la instalación, transporte y elementos de instalación en general. El costo se suele incluir cuando el usuario cancela al 100% la totalidad del sistema y no cuando lo financia en dado caso de existir financiación se emplea un nuevo concepto denominado inversión inicial,

$$CI = \text{Costo SFV} * \% \text{ capital} \quad [ 23 ]$$

Teniendo en cuenta lo anterior el *CF* de cada periodo de tiempo permite construir la función objetivo de la optimización:

$$MAX VAN = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1 + TD)^t} - CI \quad [ 24 ]$$

La función objetivo basada de en las ecuaciones de Goswami evalúa la sumatoria del movimiento económico anual durante el ciclo de vida del sistema teniendo como objetivo principal maximizar el VAN con la *Dimensión* más pequeña posible y que represente los mínimos costes que puede abarcar el usuario.

Si el VAN tiende a cantidades positivas con la menor dimensión que supla el consumo y tenga los menores costos se puede afirmar que la inversión es rentable y por el contrario si el VAN tiende a cantidades negativas no es un proyecto de inversión rentable en base a las condiciones económicas de evaluación y sería mejor desistir del proyecto.

#### 4.3.3. Restricciones

Al momento de establecer la función objetivo se deben ligar las restricciones de trabajo en donde se limita la maximización de la función. Generalmente las restricciones van ligadas a ecuaciones fundamentales que se presentan en el sistema de forma interna y que no pueden ser modificadas por el algoritmo.

En un SFV las restricciones están definidas por la Ley de la Conservación de la Energía y el balance energético presentado en un sistema aislado, por consiguiente, es imperativo conocer la transformación que sufre la energía en todo el proceso.

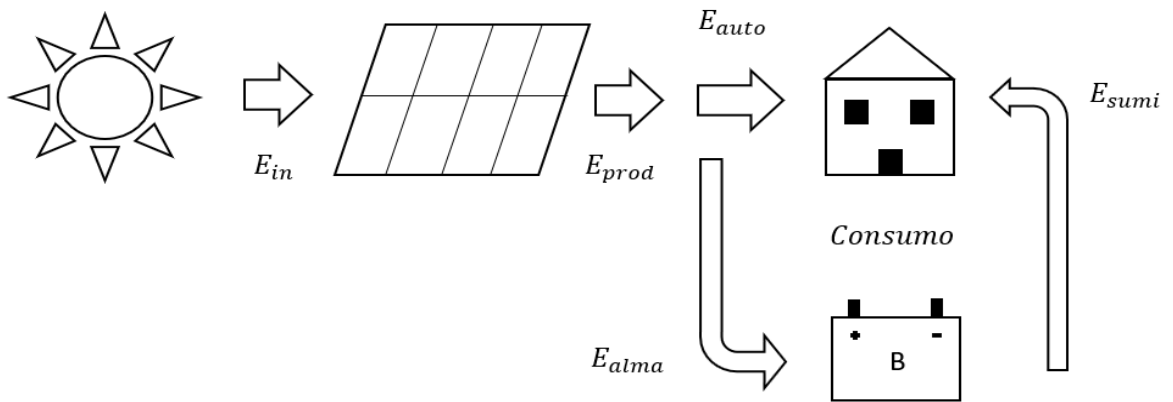


Figura 19: Proceso de transformación de energía: Ley de la Conservación de la Energía y el balance energético presentado en un sistema aislado.

Fuente: Propia

La  $E_{in}$  es la entrada energética proveniente del sol y captada por el modulo solar durante las horas donde exista el suministro.

Como se mencionó anteriormente la energía producida por el arreglo  $E_{prod}$ , depende de la cantidad de horas solares pico y la dimensión del módulo solar. Esta energía se subdivide en dos tipos  $E_{alma}$  y  $E_{auto}$ :

$$E_{prod} = E_{alma} + E_{auto} \quad [ 25 ]$$

La energía de almacenamiento es la cantidad de energía que al no ser consumida de forma instantánea se aloja en el sistema de baterías para ser utilizada posteriormente y se puede denotar como:

$$E_{alma} = E_{prod} - E_{auto} \quad [ 26 ]$$

Por otra parte, la energía auto consumida es la energía que se aprovecha simultáneamente a las horas de sol y cubre la necesidad del hogar en los instantes de efectividad de los paneles. Por lo tanto, la energía que se consume de manera

instantánea depende del factor de contemporaneidad que es referente a la cantidad de energía producida que se consume simultáneamente:

$$E_{auto} = E_{prod} * Factor\ de\ Contemporaneidad \quad [ 27 ]$$

Al no consumirse instantáneamente toda la energía producida por lo paneles solares se suele almacenar en sistemas de baterías el excedente para ser utilizado en momentos del día de condiciones de baja irradiación. Esa energía de suministro acompañada de la energía que se auto consume, son equivalentes al consumo del hogar,

$$Consumo = E_{auto} + E_{sumi} \quad [ 28 ]$$

También se implementan restricciones en base a desigualdades que garantizan que la energía que se produce supla el consumo del hogar en evaluación:

$$E_{prod} \geq Consumo \quad [ 29 ]$$

Así como las restricciones de existencia donde los valores energéticos sean mayores a 0,

$$E_{prod} \geq 0 \quad [ 30 ]$$

Por último, se puede tener en cuenta el rendimiento diario del módulo fotovoltaico con el cociente entre la energía producida por el arreglo, por consiguiente:

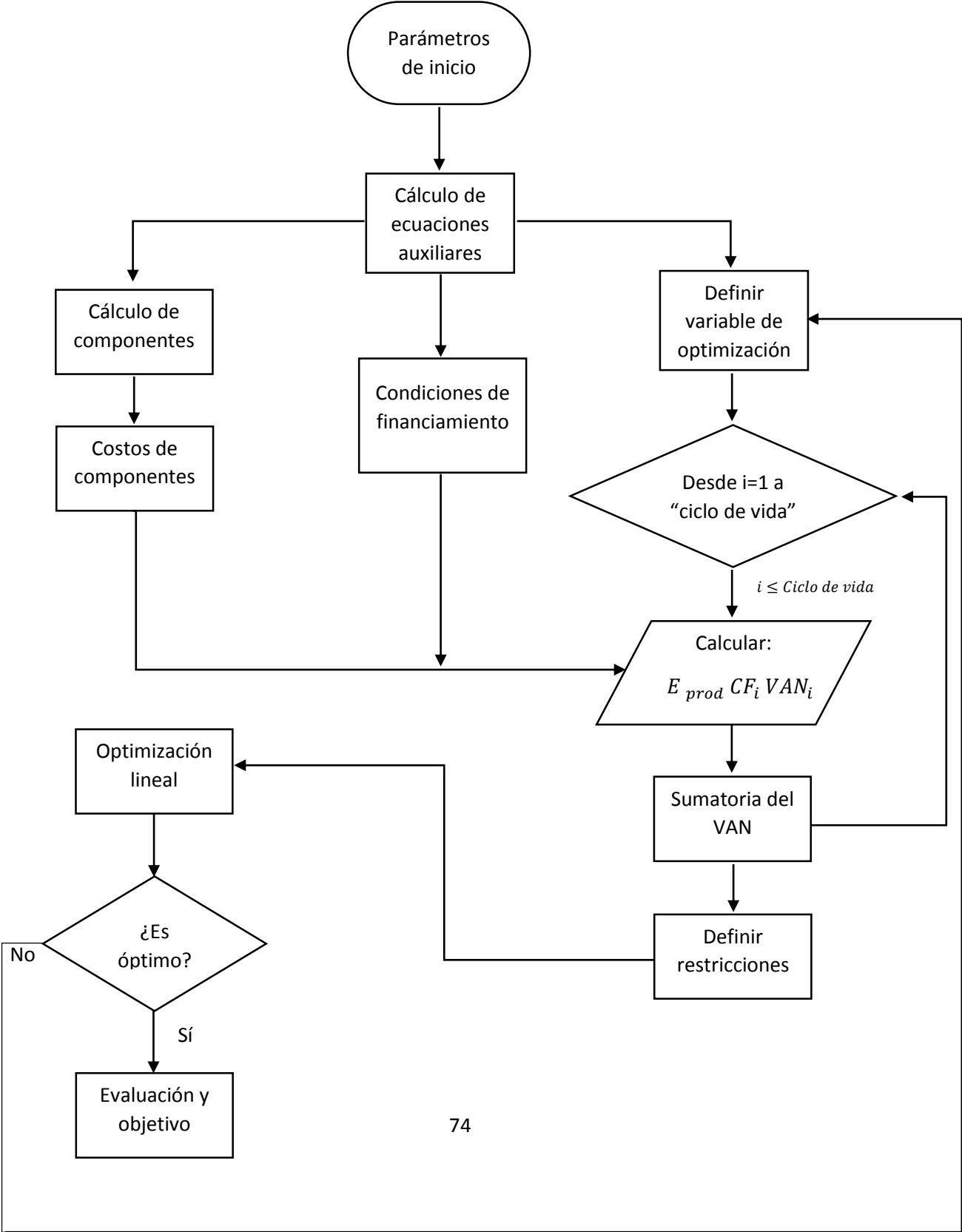
$$\eta_{FV\ día} = \left( \frac{E_{Generada}}{E_{Incidente}} \right) * 100 \quad [ 31 ]$$

Con las respectivas restricciones se puede adecuar el sistema de optimización lineal para que cumpla con el objetivo principal. Es importante aclarar que también pueden existir ecuaciones restrictivas económicas dependiendo el caso de estudio o



también restricciones definidas por el usuario en base a requerimientos técnicos o internos.

### 4.4. ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN



## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1. X|APLICACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OPTIMIZADOS

Teniendo como base la optimización lineal aplicada a sistemas fotovoltaico se presentan dos casos de estudio en Colombia, el primero definido en la ciudad Bogotá D.C. y el segundo en la región de la Guajira. Para cada uno se expondrá las condiciones naturales, la legislación que se puede aplicar y los parámetros económicos promedio para evaluar si en condiciones controladas el sistema es una inversión rentable o no. La construcción del modelo OL se definirá individualmente con sus respectivas restricciones y límites de optimización.

### 5.2. BOGOTÁ D.C.

La ciudad de Bogotá D.C. es la capital de la República de Colombia perteneciente al departamento de Cundinamarca con una altura de 2.625 metros sobre el nivel del mar. La ciudad se encuentra ubicada en el centro del territorio natural con una oscilación térmica que va de los 5° a los 19° C, debido a que se encuentra cerca al ecuador cuenta con temporadas anuales de lluvia en mayo y noviembre principalmente y sequía en enero y agosto aproximadamente.

Los parámetros naturales de Bogotá que se tienen en cuenta para la implementación de un sistema fotovoltaico se observan en la siguiente tabla:

Tabla 5: Parámetros naturales de Bogotá.

Parámetro	Especificación
Ubicación de Bogotá	Latitud Norte 4°35'56"57 Longitud Oeste de Greenwich 74°04'51"30.
Temperatura promedio	14° C
Irradiación mínima	3.500 Wh/m <sup>2</sup>

Irradiación máxima	4.700 $Wh/m^2$
HPS mínima	3.5
HPS máxima	4.7

Fuente: Propia.

En el mes de enero se presenta la irradiación máxima anual donde se puede realizar la mayor producción de energía con el SFV mientras que la mínima se presenta en el mes de mayo con un valor  $3.500 Wh/m^2$  y unas HPS promedio diaria de 3.5 horas. Las condiciones naturales influyen directamente en la energía producida por el módulo solar que garantiza o no la cobertura de la demanda energética del usuario. Dicha demanda se encuentra en base al consumo promedio en Bogotá. Las condiciones energéticas de la ciudad se presentan de acuerdo con un hogar medio.

Tabla 6: Parámetros energéticos de un hogar promedio en Bogotá.

Parámetro	Especificación
Tipo de sistema	Aislado
Consumo	126 kWh/mes
Potencia nominal	3.080 W
Factor de simultaneidad	0.6

Fuente: Propia.

Según el Instituto de Estudios Urbanos en la ciudad de Bogotá los estratos 4, 5 y 6 consumen mensualmente 126 kWh en promedio frente a un promedio mensual de 58 kWh en los estratos 1,2 y 3. (Instituto de Estudios Urbanos, 2017). Mientras que la potencia nominal se define en base a los electrodomésticos existentes en un hogar promedio de Bogotá. Que además de definir el consumo también se establecen para dimensionar los dispositivos del sistema como inversores de voltaje.

Tabla 7: Potencia Nominal de Electrodomésticos de un Hogar Promedio en Bogotá estrato 4.

Electrodoméstico	Potencia Nominal	Cantidad
------------------	------------------	----------

Bombillas	20 W	4
Televisores	60 W	2
Sistemas sonido	100 W	1
Computadoras	565 W	2
Lavadora	450 W	1
Nevera	130 W	1
Horno Microondas	770 W	1
Licuadaora	300 W	1
<b>Total</b>	<b>3080 W</b>	

Fuente: Propia.

La potencia nominal de los electrodomésticos puede variar con respecto al fabricante y a múltiples factores independientes, sin embargo, los valores mostrados se basan en estimaciones promedios de Codensa y de un hogar promedio en Bogotá.

En los SFV implementados en la ciudad se aplica la Ley 1715 y todas las legislaciones y parámetros económicos influyentes de Colombia, por lo tanto, se pueden establecer de la siguiente forma:

Tabla 8: Parámetros Económicos de Bogotá.

<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>
Inflación	3.3 %
Estrato socioeconómico	4
Precio de la electricidad	0.5243 \$/Wh
Tasa de crecimiento eléctrico	3%
IVA	0%
Impuestos	0%
Ingresos de venta	0%

Fuente: Propia

El precio de la electricidad varía según el estrato socioeconómico y el año de estudio, por lo que se tiene en cuenta el promedio de los precios y una proyección de crecimiento establecida por EPM. Debido a que el sistema es aislado no se tienen en cuenta ingresos por venta de energía ni impuestos por comercialización. La inflación esperada se toma en cuenta para la adquisición de remplazos de componentes en los periodos de tiempo designados.

También existen parámetros económicos dependientes del usuario que se refieren a la financiación del costo total del sistema y pueden cambiar respecto al usuario y su forma de asumir la deuda. Para esta delimitación se establece un punto de financiamiento común con valores estándar que pueden ser cubiertos por un hogar promedio en Bogotá.

*Tabla 9: Parámetros Económicos Según Usuario y Forma de Financiación.*

<b>Parámetro</b>	<b>Definición</b>
Tasa de Capital	60%
Tiempo de la deuda	5 años
Tasa de interés	4.25% anual
Tasa de descuento	5%

Fuente: Propia

El capital que el usuario asume a cancelar enteramente por fuera de la deuda es una consecuencia del porcentaje adherido a deuda que según una entidad financiera asigna una tasa de interés a un tiempo de deuda determinado. El Banco de la Republica de Colombia para el 2019 estableció una tasa de interés base de 4.25%. (Dinero, 2019).

La deuda al ser una proyección económica de salida en un tiempo específico debe ser reflejada en la actualidad por medio de la tasa de descuento. Cada uno de los anteriores parámetros dependen específicamente del usuario y de la forma de pago

que busque emplear, se asume que los estratos socioeconómicos más elevados tienen mejor posibilidad de realizar un correcto financiamiento y así adquirir el sistema fotovoltaico.

Teniendo definidos los parámetros que alimentan la optimización se procede a la delimitación de la variable de decisión utilizada por el modelo de programación lineal que como se mencionó anteriormente hace referencia a la dimensión del módulo solar:

$$100 \leq \text{Dimensión} \leq 10000$$

Al designar los dos límites de dimensión en los que el algoritmo busca el tamaño óptimo se tiene en cuenta que entre más grande sea el conjunto de posibilidades más carga computacional se empleará, por lo que mediante el sentido común se puede hacer una primera deducción del tamaño posible necesario y realizar una delimitación favorable.

En cuanto a la función objetivo se utiliza la maximización del VAN antes vista con los flujos de efectivo procedentes anualmente. Las restricciones de la función vienen dadas por el balance energético anual del sistema y para este caso en concreto no se utilizan restricciones económicas.

En un escenario residencial en la ciudad de Bogotá sin amortizaciones de la inversión, con un análisis económico proyectado a 20 años se busca instalar un sistema fotovoltaico con la máxima rentabilidad. El módulo solar se estableció con alta eficiencia con un factor de degradación del 0.25 % monocristalino obteniendo así, el SFV más óptimo según las condiciones.

Tabla 10: Resultados óptimos del módulo solar.

Parámetro	Especificación
Dimensión	1.241,2 Wp

Inclinación óptima	15.38°
N° de módulos	4
N° en serie y paralelo	1 ^ 4

Fuente: Propia.

Con la dimensión óptima se analizan los precios individuales del sistema y el costo total que servirá para definir la inversión inicial.

Tabla 11: Costo de Sistema Fotovoltaico Óptimo.

Dispositivo	Dimensión	Precio \$COL
Modulo Solar	1.241, 2 Wp	\$ 4'964.800
Modulo Regulación	50 A	\$ 700.000
Módulo de Almacenamiento	7.000 Wh	\$ 3'430.000
Módulo de inversión	1.848 Wp	\$ 3'696.000
Otros		\$ 50.000
<b>Costo Total</b>		<b>\$ 12' 840.800</b>

Fuente: Propia.

Los precios obtenidos por el sistema fotovoltaico óptimo se basan en los marcos regulatorios de la CREG, donde se establecen costos de energías limpias en Colombia. El costo más elevado se presenta en el módulo solar que contribuye en gran manera al precio total de \$12'840.800 que según Habitissimo una empresa distribuidora de sistemas solares se encuentra cerca al promedio de costos. Según Habitissimo a la fecha los precios en la ciudad de Bogotá oscilan desde los \$450 hasta los \$25'000.000, siendo la media de \$13'125.112. (Habitissimo, 2019)

La energía que produce el sistema debe estar dispuesta para suplir tanto el consumo del año uno hasta el año veinte. Como la proyección en Bogotá se realiza con respecto al mes de menor irradiación (mayo) y con un consumo que se asume constante, se observa en la figura 20 que la energía producida cumple con los



parámetros de diseño en base a la variable de decisión de la optimización garantizando que en el último año en el mes de mayo del ciclo de vida del sistema se supla la demanda.

### Energía Producida Y Consumo

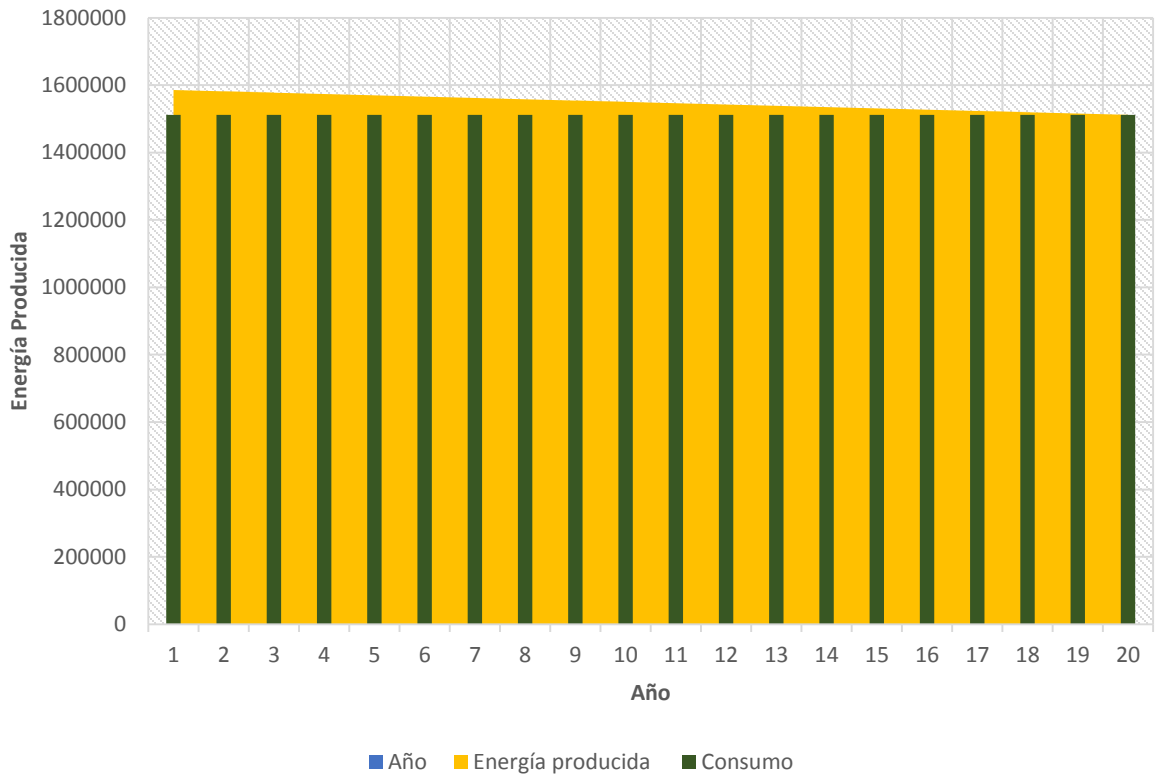


Figura 20: Energía producida y consumo en el tiempo de vida del Panel Solar para Bogotá.

Fuente: Propia.

Además de garantizarse la demanda también se observa que la energía producida por el sistema está de acuerdo con el consumo del usuario y que no existe una producción innecesaria de energía que se pueda perder. Cada estimación anual se realiza teniendo en cuenta que los módulos solares se degradan con el tiempo y no producen la misma cantidad de energía con lo que se asume que 1.241,2 Wp es el valor óptimo de tamaño.

Con una tasa de descuento del 5% se obtiene un VAN de -\$ 878.952 y una TIR de 4.16 %. Según los métodos de evaluación de rentabilidad el VAN al ser negativo indica que bajo estos parámetros no sería una inversión viable, además, el TIR resultante es menor que la tasa de descuento por lo que bajo esa perspectiva tampoco existiría rentabilidad.

Debido a que los parámetros económicos fueron dispuestos de forma general es posible realizar un análisis de sensibilidad que permite observar cómo varía el VAN con respecto al TIR es decir a una supuesta tasa de descuento.

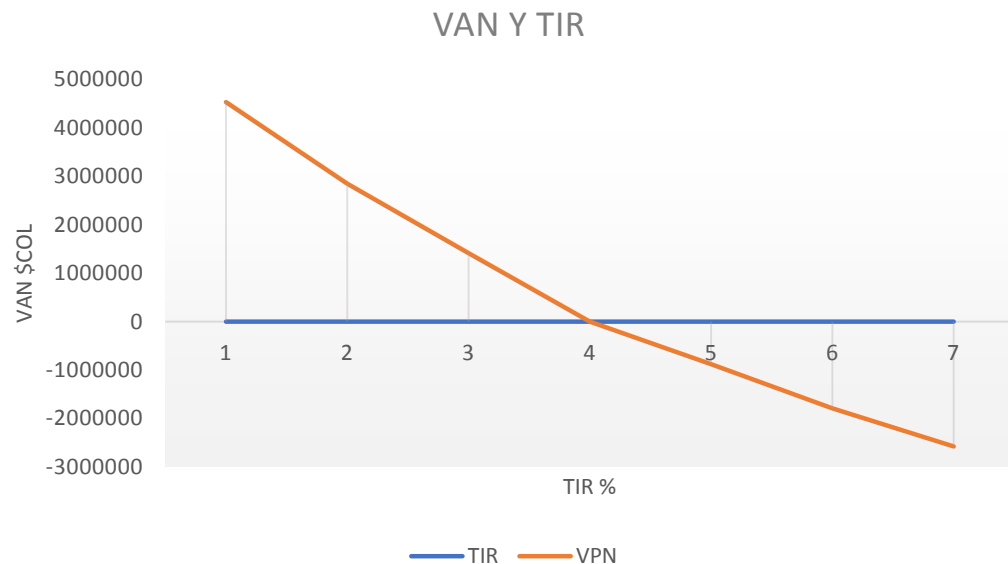


Figura 21: Relación entre el VAN y la TIR para Bogotá.

Fuente: Propia

La figura 21 muestra que el valor de la TIR que hace que el VAN sea 0 es de un 4% y entre más grande sea este porcentaje menos rentable es la inversión. Según lo anterior existe una relación inversa entre el VAN y la TIR. Esto se refleja en el riesgo adquirido para la inversión, el cual no debe ser muy alto para que haya una viabilidad conveniente.

Otro factor crucial para evaluar la rentabilidad de una inversión fotovoltaica radica en la financiación que se establezca. El análisis apropiado se define entre la variación del VAN con respecto al interés.

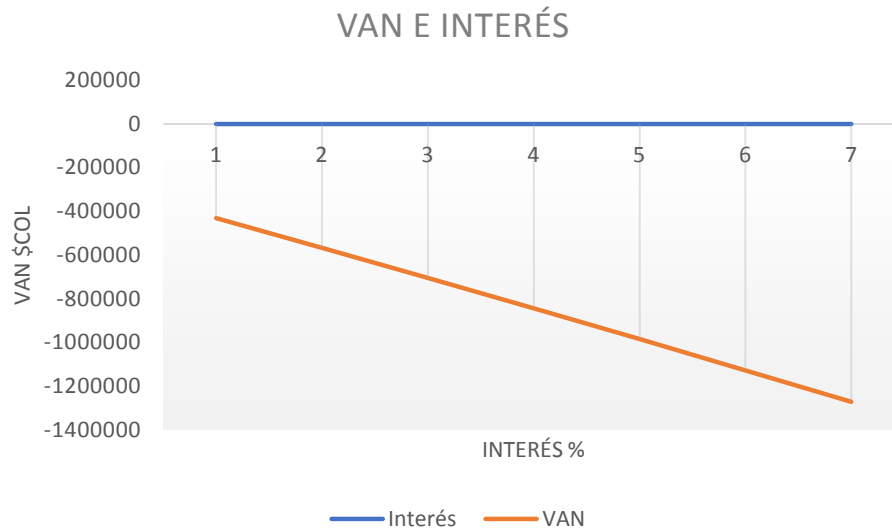
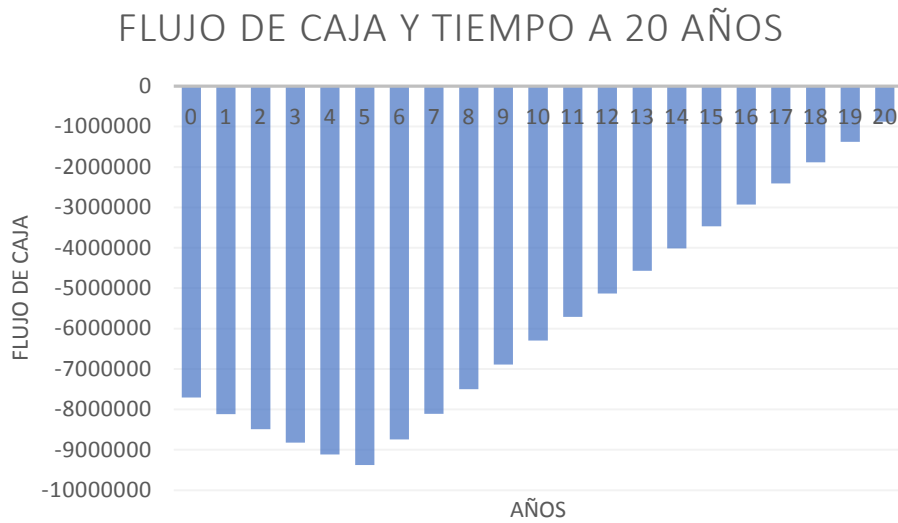


Figura 22: Relación entre el VAN y el Interés de financiación para Bogotá.

Fuente: Propia

El incremento en el interés hace menos rentable el proyecto, con la tasa actual que es de 4.25% anual no es posible obtener una rentabilidad adecuada para hacer la inversión en este escenario específico. Por lo tanto, existe una relación inversa entre el VAN y el interés.

Los flujos de caja presentados en los periodos de tiempo dentro de la vida útil de 20 años muestran lo antes observado en el VAN y su valor negativo. En el periodo de evaluación del proyecto no existe un retorno de la inversión como se observa en la siguiente figura:

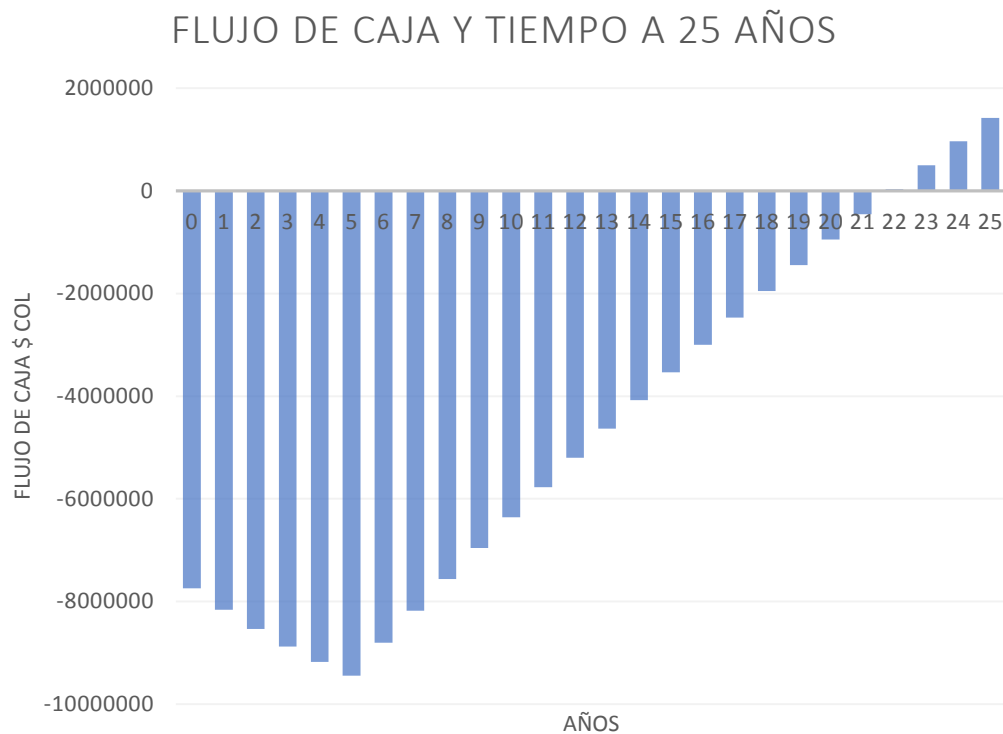


*Figura 23:* Flujos de caja presentados en los periodos de tiempo dentro de la vida útil de 20 años para Bogotá.

Fuente: Propia

Terminado el periodo de tiempo de la deuda que para este caso es de 5 años, los flujos de caja empiezan aumentar año a año hasta el año 20. Después de este periodo no existe un retorno por lo que la inversión bajo estos parámetros no es rentable.

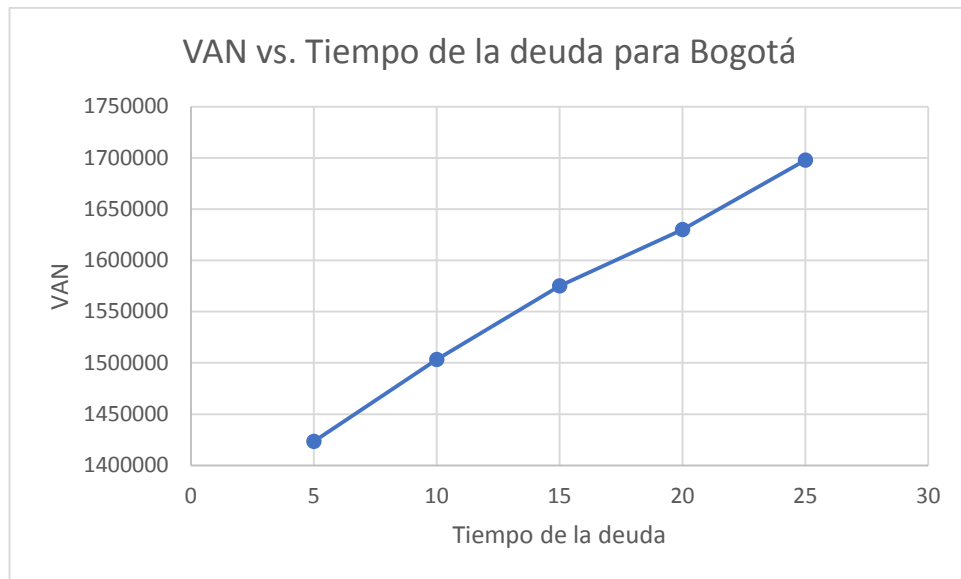
Existe un análisis posible que se basa en extender el tiempo de vida del sistema a 25 años. Como se mencionó anteriormente un panel solar tiene un tiempo de vida útil de 20-25 años, si se garantiza un tiempo de vida óptimo de 25 años la dimensión del módulo cambiará a 1.256,8 Wp y con él los flujos de caja, VAN y TIR como se observan en la figura 22 del flujo de caja a 25 años.



*Figura 24:* Flujos de caja presentados en los periodos de tiempo dentro de la vida útil de 25 años para Bogotá.

Fuente: Propia

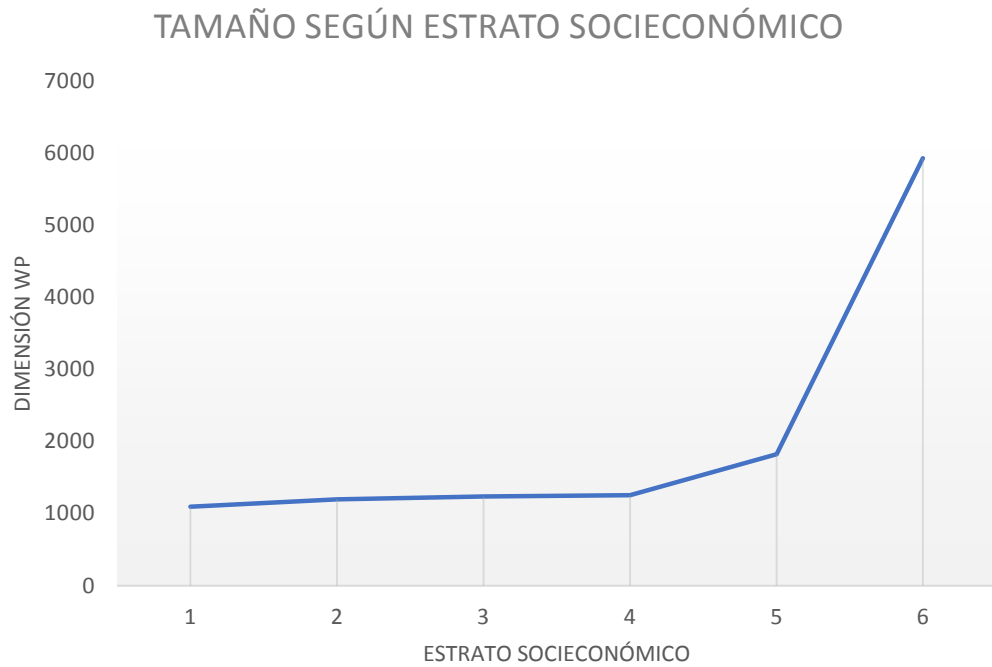
Al realizar una proyección a un periodo de tiempo mayor existe un retorno de la inversión a los 21.94 años o sea 21 años y 11 meses donde el VAN se hace 0. El TIR correspondiente a esa intersección es de 6% que es mayor a la tasa de descuento. Además, el VAN obtenido al final del periodo contable es de \$ 1'423.594, considerando los criterios de rentabilidad se convertiría en una inversión rentable. Por otra parte, al analizar el tiempo diferido de la deuda en relación con el valor actual neto (VAN), se puede observar en la figura 25, como ambos parámetros se comportan de forma directamente proporcional.



*Figura 25:* Relación entre el VAN y el tiempo de la deuda para una instalación solar fotovoltaica ubicada en Bogotá.

Fuente: Propia

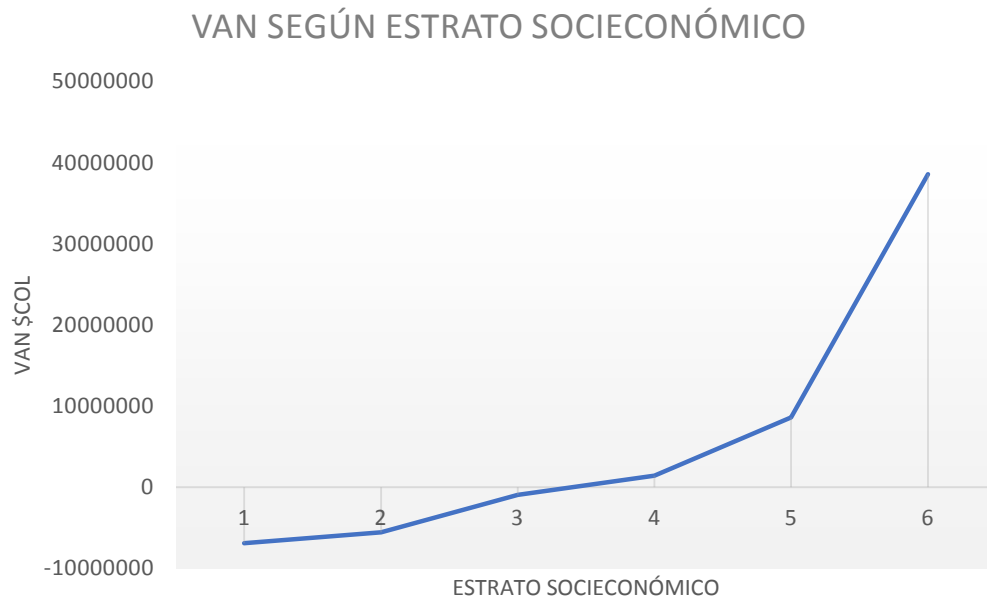
Un parámetro social que varía el dimensionamiento del sistema es el estrato socioeconómico y esto se da debido al cambio de precios que presenta la entidad proveedora de energía dependiendo de la localización en la ciudad de Bogotá. También existe un incremento de consumo proporcional al aumento del estrato por la cantidad de electrodomésticos que posee un hogar con más recursos.



*Figura 26:* Dimensionamiento del sistema en relación con el estrato socioeconómico para Bogotá.  
Fuente: Propia

Como se observa en la figura 26 la dimensión del módulo solar cambia en proporción al estrato del hogar para poder suplir la demanda requerida. En la ciudad de Bogotá el estrato 6 tiene un alto consumo de energía por lo que existe un cambio de dimensión abrupto comparado al 5.

El cambio de estrato también se refleja en los precios de la electricidad y en los factores económicos disponibles para cada proyecto, así que existe un aumento de precios con respecto al estrato y al exceso de consumo que sobresalga en la medición del hogar:



*Figura 27: VAN en relación con el estrato socioeconómico para Bogotá.*

Fuente: Propia

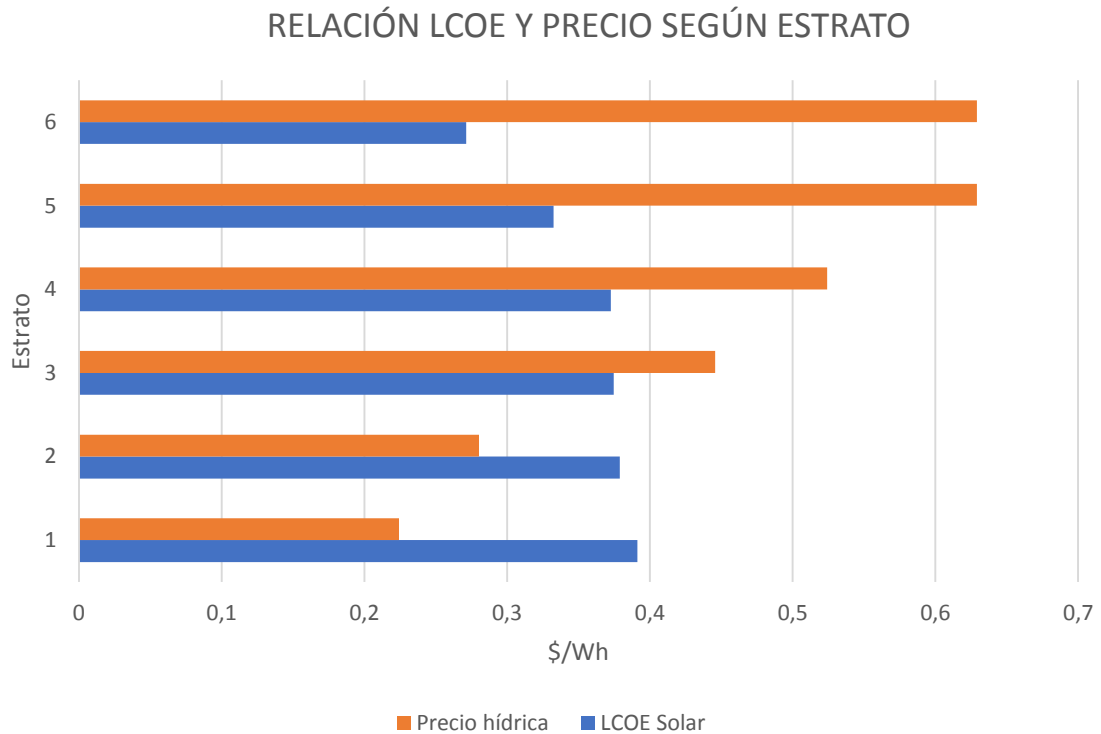
Estos cambios de precios actúan sobre la rentabilidad del sistema mostrado en la figura 27. Se observa que conforme aumenta el estrato la rentabilidad también crece esto se da por el ahorro presentado por los altos consumos de los hogares con mayores electrodomésticos y los precios asignados a ellos.

Por lo tanto, una familia con un alto consumo en un estrato socioeconómico alto debe pagar una mayor cuota de electricidad que al momento de ser remplazada por un SFV se traduce en un alto ahorro económico cosa que no sucede en los estratos más bajos que además de no tener un alto consumo sus tarifas eléctricas no son significativamente altas.

Desde los métodos de evaluación de rentabilidad económica de Yogi Goswami existe la parametrización LCOE que expone el precio neto de inversión tecnológica dispuesto en un sistema fotovoltaico para generar energía.



En la figura 28 se ilustra el costo de inversión de incursión de un usuario que pretenda implementar un SFV con respecto al precio de compra de la energía por parte de la empresa prestadora del servicio.



*Figura 28:* Relación entre el LCOE y el estrato socioeconómico para Bogotá.

Fuente: Propia

Como se observa los estratos socioeconómicos bajos de la ciudad de Bogotá presentan una relación desfavorable entre el costo de producción versus el precio de compra. Por el contrario, en los sectores de mayor adquisición de la ciudad existe un panorama de favorabilidad en comparación a la compra de energía.

### 5.3. GUAJIRA

Es un departamento situado en la región Caribe colombiana hacia el Noreste del territorio teniendo como capital a Riohacha. Sus características climatológicas se

definen como una zona intertropical con temperaturas que oscilan entre los 22° C y los 40°C y tiene una altitud media de 50 metros sobre el nivel del mar.

Los parámetros naturales de la Guajira que se tienen en cuenta para la implementación de un sistema fotovoltaico se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 12: Parámetros naturales de La Guajira.

<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>
Ubicación de La Guajira	Latitud Norte 11°33' Longitud Oeste de Greenwich 72°54'.
Temperatura promedio	30° C
Irradiación mínima	4.900 $Wh/m^2$
Irradiación máxima	6.200 $Wh/m^2$
HPS mínima	4.9
HPS máxima	6.2

Fuente: Propia

La irradiación que incide en esta región de Colombia es considerablemente más alta a la capital y los puntos bajos y altos son también distintos a los medidos en Bogotá debido a la tropicalidad de la zona. Esto mejora indudablemente las condiciones naturales necesarias para la instalación de sistemas fotovoltaicos allí.

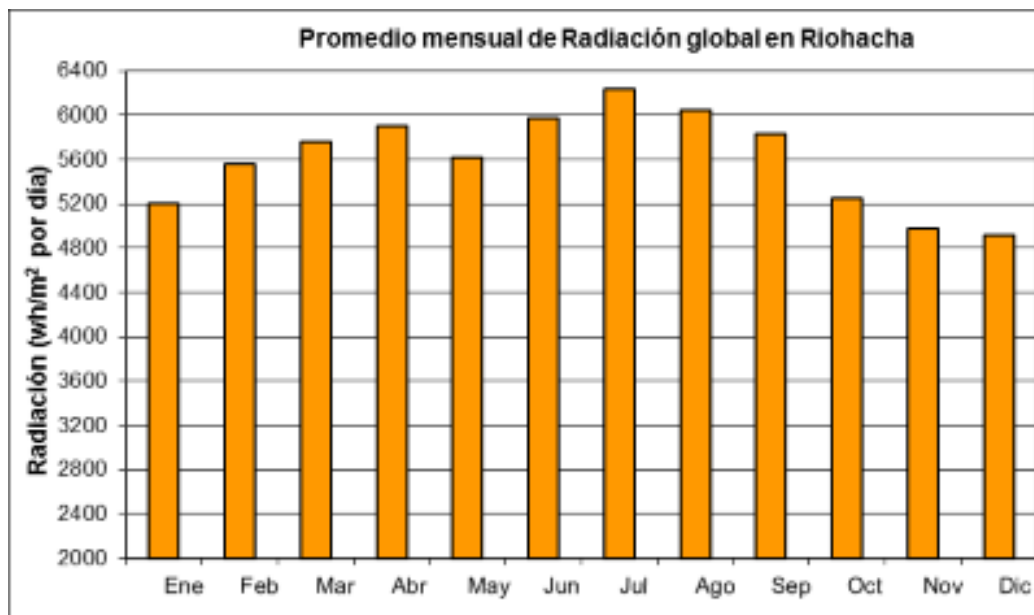


Figura 29: Promedio mensual de radiación global en Riohacha.

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2005). Atlas de Radiación de Colombia. Riohacha.

La irradiación cambiante de la zona Caribe presenta su punto máximo en el mes de julio con un valor de  $6.200 \text{ Wh/m}^2$  y una mínima de  $4.900 \text{ Wh/m}^2$  para el mes de diciembre respectivamente. Con el parámetro menor se puede realizar el cálculo de energía producida que satisfaga la demanda en el peor escenario garantizando el suministro idóneo en el resto de las temporadas anuales.

Tabla 13: Parámetros energéticos de un hogar promedio en la Guajira.

Parámetro	Especificación
Tipo de sistema	Aislado
Consumo	173 kWh/mes
Potencia nominal	3.380 W
Factor de simultaneidad	0.6

Fuente: Propia.

En la región Caribe para el mismo estrato socioeconómico se presenta un mayor consumo eléctrico en comparación a la ciudad de Bogotá debido al uso de sistemas de ventilación necesarios para regular la temperatura del hogar.

La entidad encargada de suplir la energía requerida por la región se llama Electricaribe y maneja diferentes precios del kilovatio según el estrato socioeconómico y en base a un consumo medio de 173 kWh/mes como se aprecia en el Anexo 4.

Tabla 14: Potencia Nominal de Electrodomésticos de un Hogar Promedio en la Guajira estrato 4.

<b>Electrodoméstico</b>	<b>Potencia Nominal</b>	<b>Cantidad</b>
Bombillas	20 W	4
Televisores	60 W	2
Sistemas sonido	100 W	1
Computadoras	565 W	2
Lavadora	450 W	1
Nevera	130 W	1
Horno Microondas	770 W	1
Licuadaora	300 W	1
Ventilador	300 W	1
<b>Total</b>	<b>3380 W</b>	

Fuente: Propia.

La guajira al estar comprendida en el territorio colombiano se encuentra regida por la misma legislación de la ciudad de Bogotá por lo que se ve cobijada por los mismos incentivos en cuanto a energías renovables se refiere por lo que los únicos cambios que se observan en los parámetros económicos se ubican en los precios de la electricidad asignados por la empresa encargada.

Tabla 15: Parámetros Económicos de la Guajira.

<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>
------------------	-----------------------

Inflación	3.3 %
Estrato socioeconómico	4
Precio de la electricidad	0.46839 \$/Wh
Tasa de crecimiento eléctrico	3%
IVA	0%
Impuestos	0%
Ingresos de venta	0%

Fuente: Propia.

Para la región Caribe se observa una disminución en el precio del Wh sin embargo el consumo es mayor para el mismo estrato lo que debe tenerse en cuenta para la evaluación económica del sistema.

Como se pretende realizar una revisión comparativa entre la implementación de un sistema fotovoltaico en la región Caribe y Bogotá, se utiliza una disposición inicial igual en cuanto a métodos y formas de financiación debido a que siguen siendo funcionales sin importar la locación.

Tabla 16: Parámetros Económicos Según Usuario y Forma de Financiación en la Guajira.

<b>Parámetro</b>	<b>Definición</b>
Tasa de Capital	60%
Tiempo de la deuda	5 años
Tasa de interés	4.25% anual
Tasa de descuento	5%

Fuente: Propia.

También se observa el cambio de parámetros de financiamiento en esta región y sus consecuencias directas en la rentabilidad del proyecto por lo que también resulta imperativo una medición de la sensibilidad para este escenario.

Los límites de la variable de decisión se mantienen iguales porque a pesar de que la irradiación es mucho mayor que la de la capital no debería existir una salida que exceda al límite inferior por lo que sigue exponiéndose de la siguiente forma:

$$100 \leq \text{Dimensión} \leq 10000$$

La función objetivo sigue siendo el VAN con una vida útil evaluada para empezar a 20 años y con un factor de degradación del 0.25% monocristalino. El objetivo de esta optimización es encontrar el sistema fotovoltaico más rentable para la Guajira por medio del algoritmo de programación lineal dispuesto con las ecuaciones de Goswami.

Tabla 17: Resultados óptimos del módulo solar para la Guajira.

Parámetro	Especificación
Dimensión	1.217,3 Wp
Inclinación óptima	16.81°
N° de módulos	3
N° en serie y paralelo	1 ^ 3

Fuente Propia.

Se observa que al tener una mayor irradiación el tamaño necesario es menor para lo que los precios del sistema fotovoltaicos varían.

Tabla 18: Costo de Sistema Fotovoltaico Óptimo.

Dispositivo	Dimensión	Precio \$COL
Modulo Solar	1.217, 3 Wp	\$ 4'869.200
Modulo Regulación	50 A	\$ 700.000
Módulo de Almacenamiento	9.611 Wh	\$ 4'709.400
Módulo de inversión	2.028 Wp	\$ 4'056.000
Otros		\$ 50.000

<b>Costo Total</b>		<b>\$ 14'384600</b>
--------------------	--	---------------------

Fuente Propia.

Existe un incremento lógico en los precios debido a que necesita un módulo de almacenamiento más grande gracias al aumento de la energía captada por el panel. Sin embargo, el precio total no se sale del promedio aceptable de precios para su implementación.

El SFV debe estar dispuesto a suplir el consumo de un hogar en los meses de diciembre de los próximos 20 años donde se presenta la peor irradiación garantizando que en los siguientes meses no exista problema alguno con el sistema. La producción de energía proyectada a 20 años se observa en la figura 30.

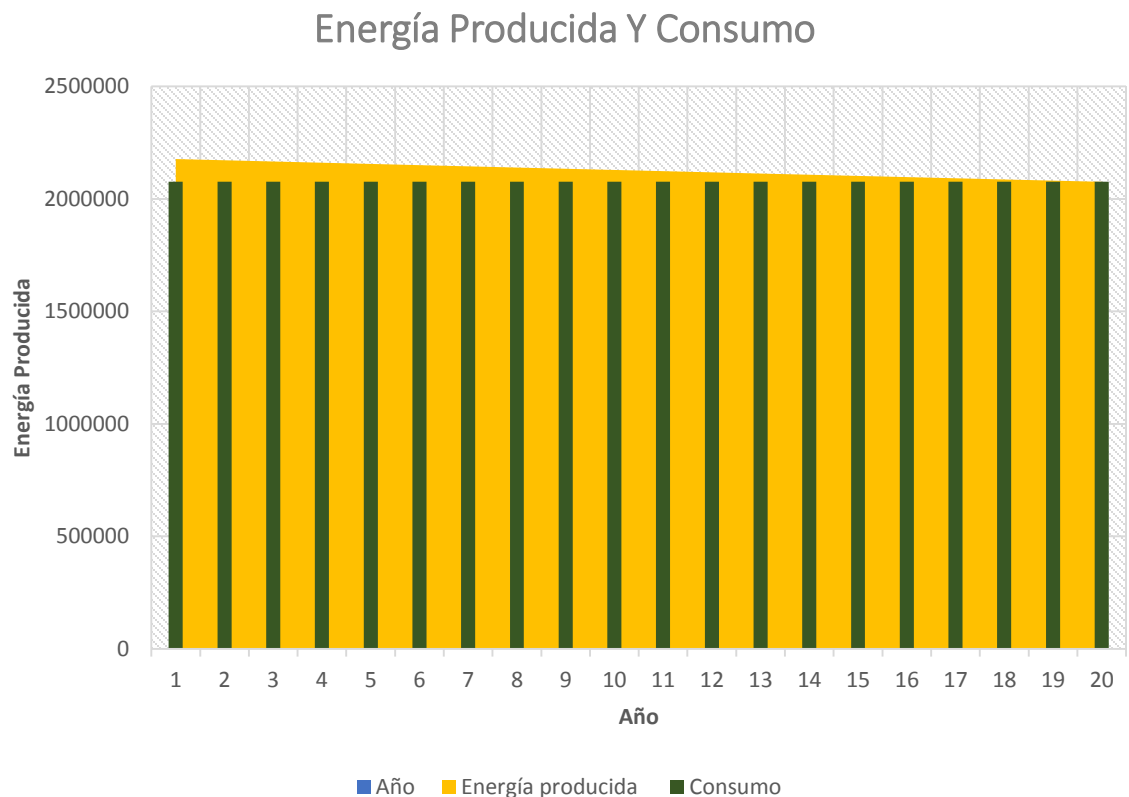


Figura 30: Energía producida y consumo en el tiempo de vida del Panel Solar para Guajira.

Fuente: Propia.

La dimensión óptima de 1.217,3 garantiza el consumo a 20 años teniendo en cuenta la degradación del módulo solar y minimizando la energía desperdiciada en los primeros años.

El VAN que se obtiene para el análisis es de \$358.670 evidenciando una rentabilidad a largo plazo con un retorno de la inversión de 19.4 años o 19 años y 4 meses desde que se realiza la inversión inicial. Bajo estas condiciones la TIR existente es de 5.30% evidentemente mayor a la tasa de riesgo planteada, aunque no significativamente.

Para un análisis exhaustivo también es conveniente evaluar la sensibilidad presentada por el VAN con respecto a la TIR debido a que el sistema presenta una rentabilidad que bajo una revisión subjetiva podría no ser conveniente por sus valores justos.

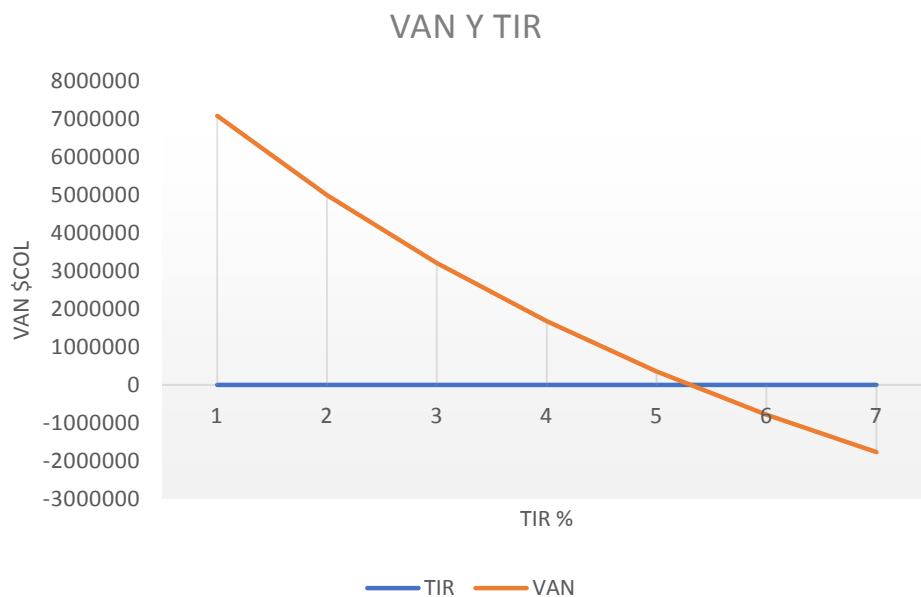


Figura 31: Relación entre el VAN y la TIR para Guajira.

Fuente: Propia



Se observa que el VAN crece en sentido inverso a la TIR teniendo el punto de corte en 5.30 %. Conforme el valor de la tasa disminuye se incrementa más pronunciadamente el crecimiento del VAN.

La sensibilidad del VAN también es pronunciada a la variación de la tasa de interés como se observa en la figura 32. El punto de equilibrio se encuentra en 6.6% donde el valor del VAN es 0.

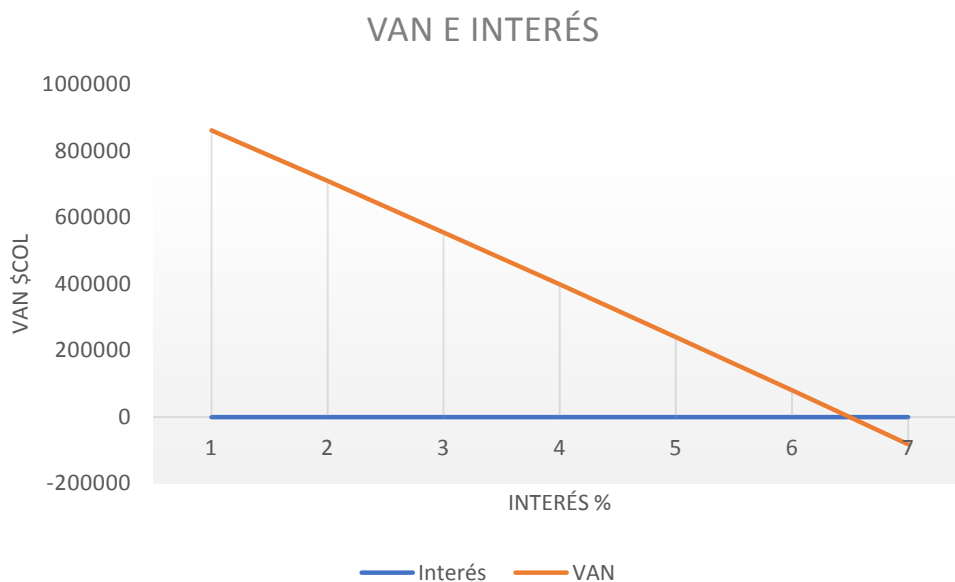
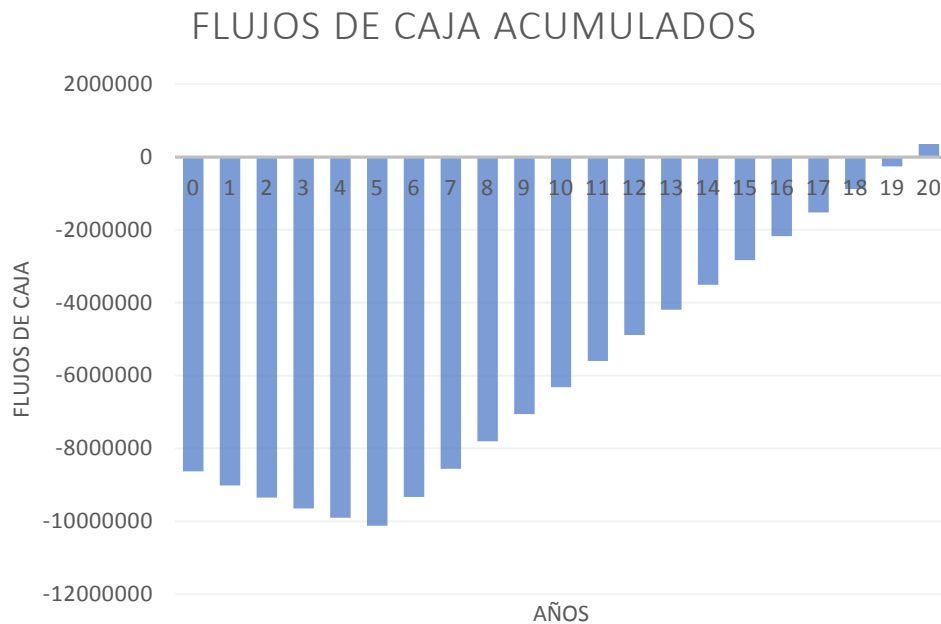


Figura 32: Relación entre el VAN y el Interés de financiación para Guajira.

Fuente: Propia

La relación de los parámetros es inversa debido a que los aumentos de la tasa de interés se evidencian en un decrecimiento del valor actual neto. Sin embargo, existe una menor sensibilidad hacia el aumento del interés que hacia la disminución.

Existe una evaluación de los flujos en el ciclo de vida del sistema implementado en La Guajira a 20 años que se presenta en la figura 33.



*Figura 33:* Flujos de caja presentados en los periodos de tiempo dentro de la vida útil de 20 años para Guajira.

Fuente: Propia

El retorno de la inversión se proyecta a los 19.4 años desde el periodo donde se efectuó la inversión inicial empezando a amortiguarse en el año donde se termina la deuda de financiamiento. Los periodos posteriores se consideran como ganancia neta.

Respecto al tiempo diferido de la deuda y su relación con el valor actual neto (VAN), se puede observar en la siguiente figura, un comportamiento directamente proporcional entre ambos parámetros.

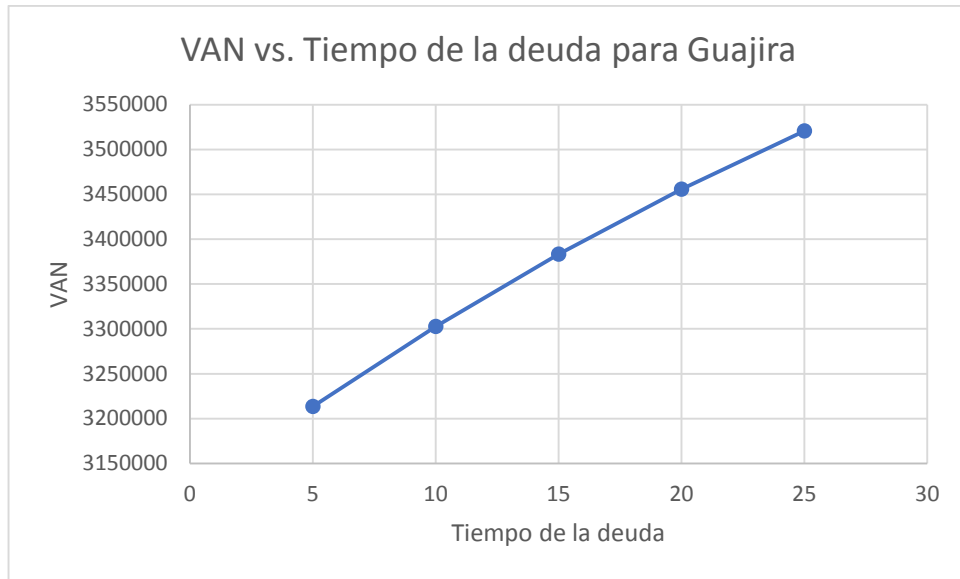


Figura 34: Relación entre el VAN y el tiempo de la deuda para una instalación solar fotovoltaica ubicada en la Guajira.

Fuente: Propia

Otro factor para tener en cuenta es la respuesta que presenta la rentabilidad al cambio del estrato socioeconómico en La Guajira que al igual que la ciudad de Bogotá también cuenta con 6 niveles o estratos:

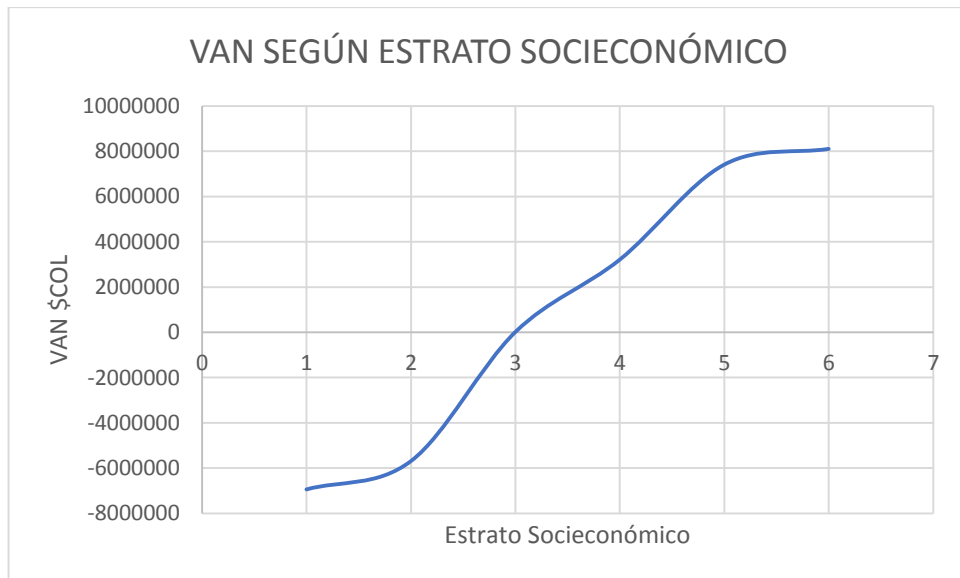
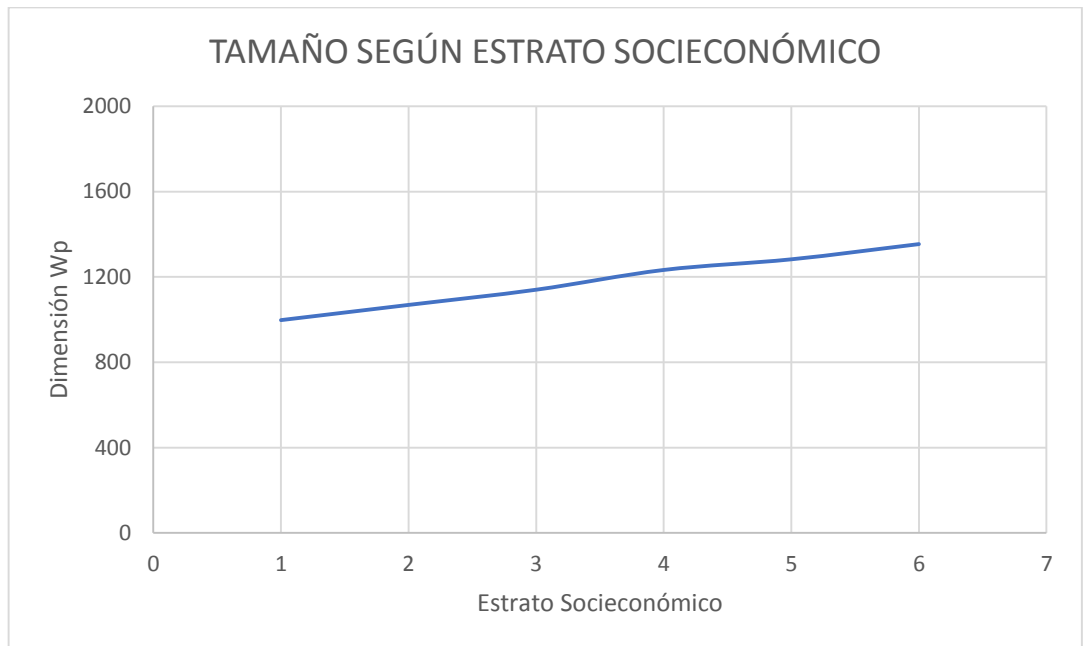


Figura 35: VAN en relación con el estrato socioeconómico para Guajira.

Fuente: Propia

En esta zona del territorio colombiano el cambio de rentabilidad con respecto al estrato socioeconómico no es tan abrupto como el de la ciudad de Bogotá y esto se debe a que los precios presentados por Electricaribe son más seccionados que los de Codensa, además que el consumo entre los estratos más bajos y los altos no es mayormente diferente como el de la capital. Esto se refleja en que los hogares de clase media en adelante tienen los medios y la proyección para realizar la inversión en sistemas fotovoltaicos.

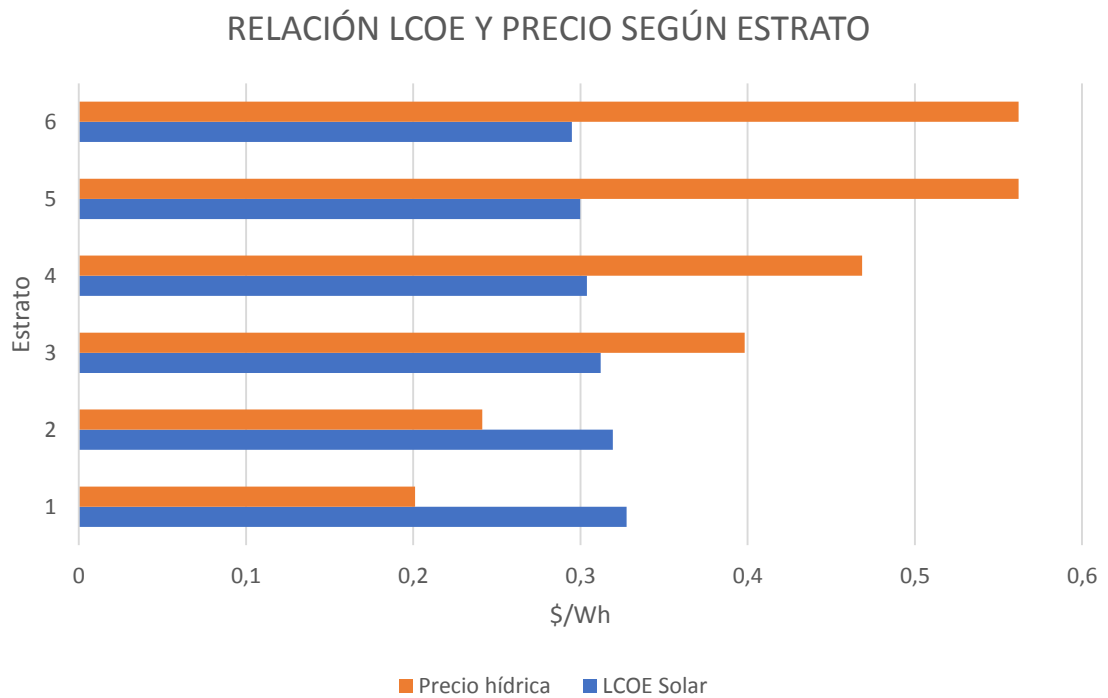
El cambio de estrato también se refleja en un aumento de la dimensión del módulo solar que se evidencia en la figura 36.



*Figura 36: Dimensionamiento del sistema en relación con el estrato socioeconómico para Guajira.*  
Fuente: Propia

Se observa un cambio proporcional del consumo eléctrico entre los estratos de La Guajira presentando el punto más alto en el 6 así como también la dimensión del módulo solar más grande necesaria para suplir las necesidades energéticas promedio de este sector de la población.

Con respecto a la valoración del LCOE dispuesta para la región de la Guajira de forma similar a la ciudad de Bogotá el cambio de favorabilidad económica de la inversión fotovoltaica en los estratos menos favorecidos es sumamente inferior a los estratos altos.



*Figura 37: Relación entre el LCOE y el estrato socioeconómico para Guajira.*

Fuente: Propia

Bajo este parámetro de evaluación no sería pertinente para los estratos 1 y 2 hacer una inversión fotovoltaica debido a que el costo de producción individual de energía es superior al precio de compra. En otras palabras, la entidad prestadora de energía ofrece precios más exequibles que la cogeneración.

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1. CONCLUSIONES**

Las conclusiones que a continuación se relacionan, se organizan de acuerdo con los objetivos específicos planteados en el proyecto:

#### **Objetivo 1**

El dimensionamiento del SFV inicia definiendo la carga, posteriormente las características del panel solar, las baterías y el Inversor/Regular, en ese orden. Con el modelo de simulación elaborado acorde a las condiciones obtenidas de la optimización para el tamaño y capacidad de cada uno de los componentes del sistema solar fotovoltaico, así como con los valores correspondientes según la ficha técnica de cada uno de ellos, se pudo establecer que el sistema cumple con la demanda de consumo requerida, es decir esta dimensionalmente correcto pues la demanda es cubierta en su totalidad por la potencia optima entregada por los paneles y regulada por las baterías, el regulador y el inversor.

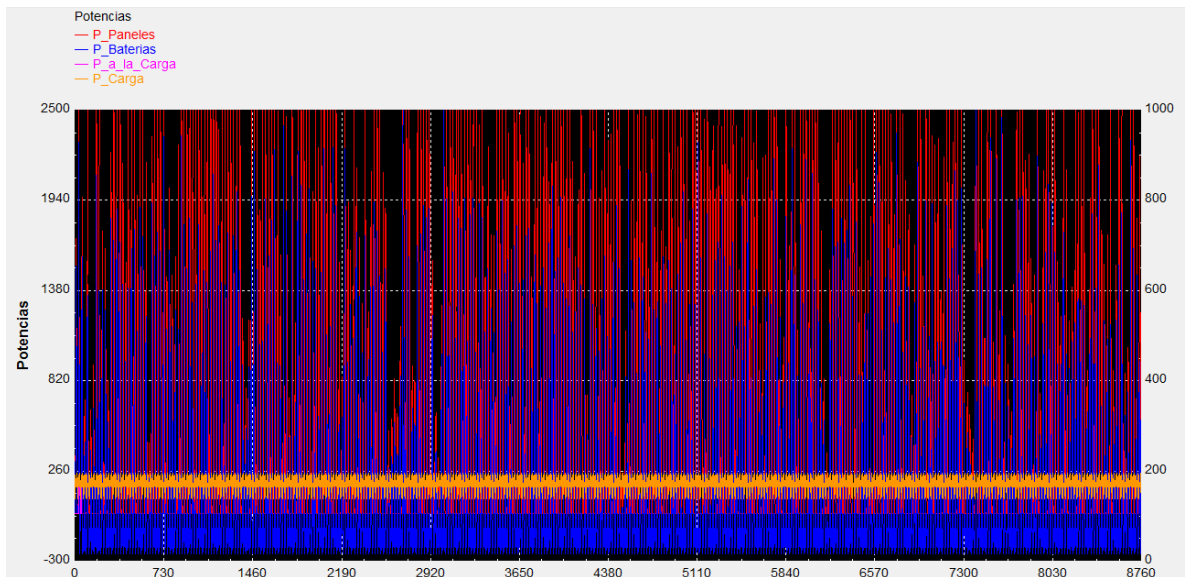


Figura 38: Potencias generadas por el Panel Solar, las Baterías y el Inversor con relación a la carga de demanda, en un año.

Fuente: Propia

Lo anterior se puede observar por medio de la siguiente figura, en la cual la línea de color amarillo es la potencia que demanda la carga (representa el perfil de consumo) y el rosa es la potencia que entrega el sistema para suplir la demanda:

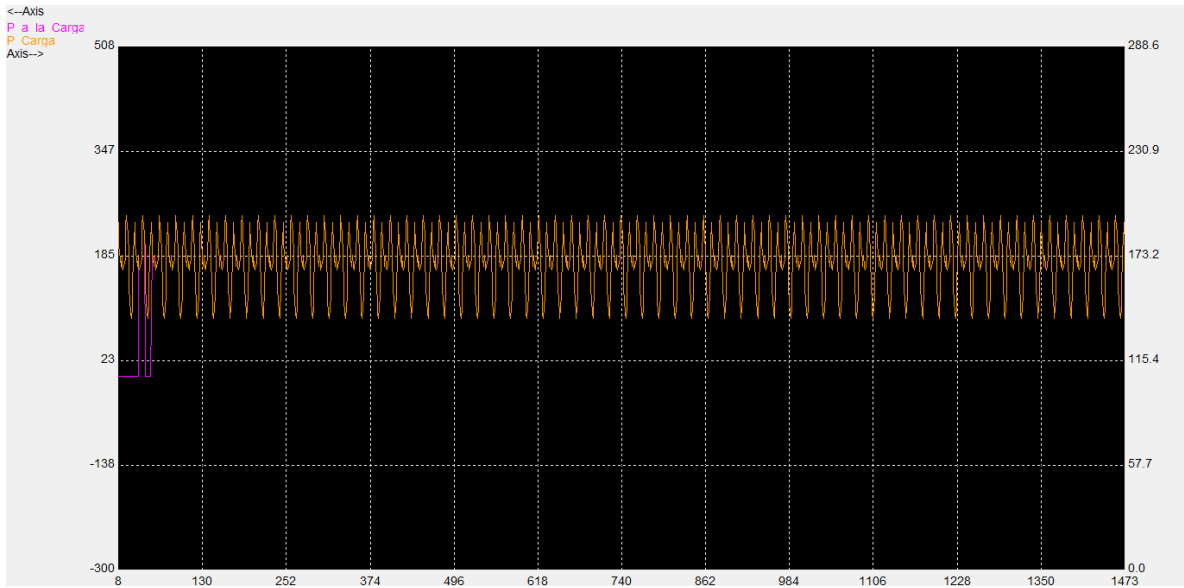


Figura 39: Potencia Suministrada por SFV igual a la Potencia de demanda (Imagen ampliada de los dos primeros meses).

Fuente: Propia

Por otra parte, con la implementación de una unidad propia del TRNSYS conocida como: integrador se logra observar las horas acumuladas por mes, la energía generada por el panel, la energía entregada por las baterías, la energía dada por el inversor a la carga (Energía de suministro) y la energía que demanda la carga, recopiladas en un documento de texto,

SISTEMA SOL_FV.out: Bloc de notas								
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda				
TIME	NAV	E_Panel	NAV	E_bat	NAV	E_Suministro	NAV	E_Carga
+7.44000000000000E+02		+5.0529543223214953E+05		+4.4201153793174351E+04		+1.2322316300153194E+05		+1.308355000000000E+05
+1.41600000000000E+03		+5.2564719364726183E+05		+1.3962122987619567E+04		+1.181740000000000E+05		+1.181740000000000E+05
+2.16000000000000E+03		+6.1097315401755099E+05		+2.4451936031235215E+04		+1.308355000000000E+05		+1.308355000000000E+05
+2.88000000000000E+03		+4.2783902159838652E+05		+1.6102956241201864E+04		+1.266150000000000E+05		+1.266150000000000E+05
+3.62400000000000E+03		+5.8650548148989188E+05		+1.7341808722803893E+04		+1.308355000000000E+05		+1.308355000000000E+05
+4.34400000000000E+03		+5.3353003993521829E+05		+1.6980162474289678E+04		+1.266150000000000E+05		+1.266150000000000E+05
+5.08800000000000E+03		+5.5541166816749796E+05		+1.7136284169326165E+04		+1.308355000000000E+05		+1.308355000000000E+05
+5.83200000000000E+03		+5.6563192694285954E+05		+1.7453549450811584E+04		+1.308355000000000E+05		+1.308355000000000E+05
+6.55200000000000E+03		+5.5976456702705461E+05		+1.6559717971250535E+04		+1.266150000000000E+05		+1.266150000000000E+05
+7.29600000000000E+03		+5.1572920606867428E+05		+1.9339353819659162E+04		+1.308355000000000E+05		+1.308355000000000E+05
+8.01600000000000E+03		+4.3105213153803698E+05		+1.7484283470600334E+04		+1.266150000000000E+05		+1.266150000000000E+05
+8.76000000000000E+03		+4.7208205531774275E+05		+1.7969227116814665E+04		+1.308355000000000E+05		+1.308355000000000E+05

Figura 40: Energías generadas por cada componente del SFV en las horas acumuladas por mes.

Fuente: propia



Analizando las dos últimas columnas, la energía de suministro y la energía que demanda la carga, se visualiza que son iguales, lo que implica que no existe un error en el dimensionamiento del SFV.

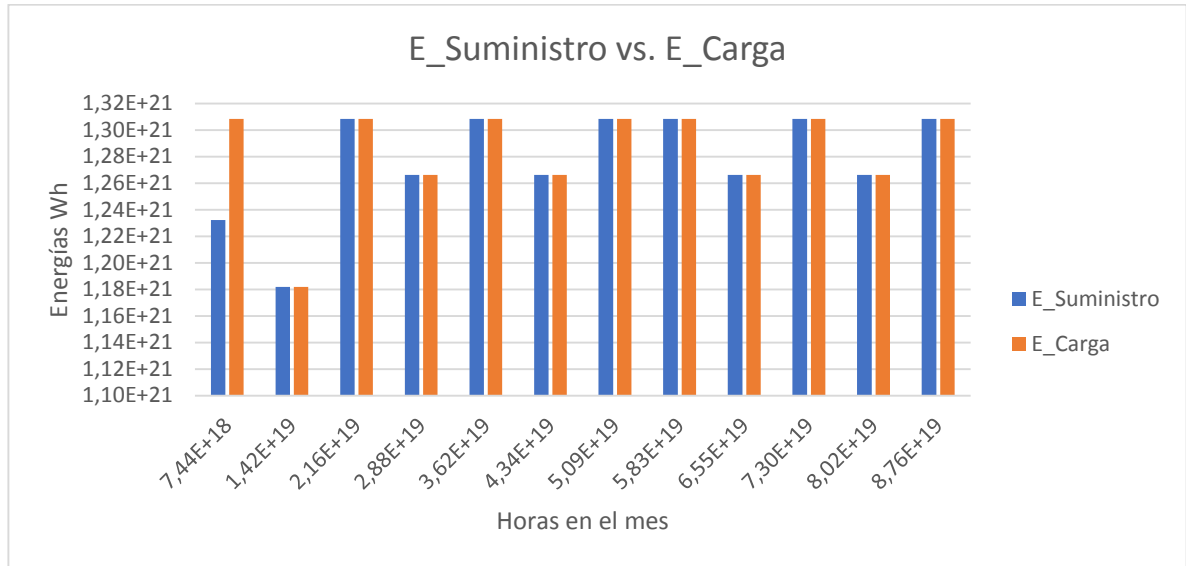


Figura 41: Energía de Suministro vs energía de Carga en horas al año.

Fuente propia

Con lo anterior concluimos que el sistema no solo es óptimo en términos de la potencia sino también de los costos, dando un punto de equilibrio entre la variable económica y el tamaño del sistema.

## Objetivo 2

- Mediante la evaluación de favorabilidad económica expuesta por Yogi Goswami implementada en dos lugares de Colombia como lo son Bogotá y la Guajira con condiciones diferentes se obtienen parámetros como el VAN y la TIR para la toma de decisiones idónea en la aplicación de sistemas fotovoltaicos, como las expuestas en las figuras 21 y 31, en las cuales se

evidencia que a mayor TIR se disminuye la posibilidad de tener ganancias representativas.

- Es fundamental contar con los parámetros económicos del país para la evaluación del proyecto, como los utilizados en las Tablas 8 y 15, así como los parámetros de financiación, que generen los mejores resultados de inversión. Dado lo anterior se observó que es más favorable realizar una financiación del proyecto en vez de realizar el pago del 100% del costo del sistema, como se observa en las figuras 25 y 34, para Bogotá y la Guajira, respectivamente. La financiación con una tasa de interés baja y con un tiempo de deuda considerable genera una mayor rentabilidad.
- Al asegurar una instalación fotovoltaica con un tiempo de vida alto se asegura un retorno de la inversión óptimo, en las instalaciones solución de la Guajira y Bogotá a 25 años cuentan con una rentabilidad mayor en comparación a los evaluados a 20 años, como se observa en la Figura 23 vs la Figura 24 para Bogotá y en la Figura 33 en la Guajira. Por lo tanto, invertir en sistemas de calidad con bajo coeficiente de degradación y larga vida útil favorece enormemente la inversión.
- Teniendo en cuenta la información suministrada por las figuras 21 y 31, para la ciudad de Bogotá y la Guajira respectivamente, el método de evaluación de la TIR demuestra la relación inversa con respecto al VAN, es decir, al momento de realizar un proyecto fotovoltaico se debe buscar una tasa de descuento consecuente al riesgo indicado que garantice la entrada máxima económica al finalizar el periodo contable. En la región de la Guajira, al evaluar un proyecto con el mismo tiempo de vida se tiene un TIR y VAN mayor que en la ciudad de Bogotá, lo que permite tener un riesgo menor y hace más factible la inversión. En este orden de ideas, y señalando que, si se toma la tasa de descuento social del 12% de acuerdo con PND, para la

evaluación de proyectos de orden nacional, se va a generar un VAN negativo implicando que este tipo de proyectos con este porcentaje no se hace viable económicamente, respecto a la tasa de oportunidad bancaria que es del 4,5% al 5%.

- La implementación de SFV está dispuesta para ciertas zonas de las regiones de evaluación. En Bogotá de acuerdo con la figura 27, los estratos socioeconómicos 4, 5 y 6 presentan una favorabilidad idónea de inversión, el estrato 3, depende de condiciones adicionales del usuario y en los estratos más bajos 1 y 2 no sería una buena inversión la implementación de un sistema solar. Por el contrario, en la figura 35, correspondiente a la Guajira, el estrato 3 sí presenta una amplia factibilidad y es creciente en los estratos 4, 5 y 6 y al igual que en la capital no es óptimo realizar un proyecto de este tipo en los estratos 1 y 2.
- En los sistemas no-interconectados se presenta un retorno de la inversión entre los años 16 y 25, siendo un amplio periodo de tiempo que depende de más parámetros para estar totalmente definida. Esto indica que después de este periodo de tiempo los resultados del sistema se representarán en ganancias. Esto se puede ver reflejado en las figuras 23, 24 y 33, para las regiones de estudio.
- Los sistemas aislados son convenientes bajo ciertas condiciones específicas que a su vez dependen de la evaluación subjetiva del inversionista, pero en la mayoría de los casos no tienen la rentabilidad esperada. Todo esto hace a estos sistemas demasiado inestables a las condiciones económicas cambiantes y a entornos difíciles. Así que si se pretende realizar su implementación se deben garantizar las condiciones idóneas observadas en esta investigación para que la rentabilidad sea máxima bajo los parámetros dispuestos por Yogi Goswami.

### Objetivo 3

- El desarrollo de algoritmos basados en programación lineal permite encontrar una convergencia del sistema adecuado con la mayor rentabilidad posible, que produzca la energía demandada en todo el ciclo de vida y evitando costos innecesarios. Por ejemplo, para el estrato socioeconómico 4 en la ciudad de Bogotá la Tabla 10 muestra la convergencia optima del algoritmo para un máximo de rentabilidad con ayuda de una función de maximización.
- Al momento de invertir en un SFV las condiciones de localización son imperativas, se demostró que existe una eficiencia superior de los sistemas implementados en la Guajira a los de Bogotá, contando con tamaños de paneles menores para producir la misma cantidad de energía lo que reduce costos. Por ejemplo, para un estrato socio económico como el 4 en Bogotá se hace necesario un tamaño del sistema solar fotovoltaico de 1.241,2 Wp para un consumo de 126 kWh/mes, mientras que para el mismo estrato socio económico en la Guajira es necesario un Sistema solar fotovoltaico de 1.217,3 Wp para un consumo de 173 kWh/mes. Además, que es más fácil garantizar la cobertura de la demanda en la zona tropical que en una zona andina.
- La relación optima entre el consumo y el precio de la electricidad es crucial en la evaluación de rentabilidad, debido a que representa el ahorro económico del usuario con respecto a la dimensión del sistema, es por lo que, en los estratos más altos al tener un consumo mayor y precios eléctricos altos, el reflejo favorable es más amplio. Sin embargo, no es la única condición para tener en cuenta para la implementación de estos sistemas.

### Objetivo 4

- A partir del costo nivelado de la energía para cada una de las regiones de estudio, se puede observar de acuerdo con la Figura 28, se observa que los estratos socioeconómicos bajos de la ciudad de Bogotá presentan una relación desfavorable entre el costo de producción versus el precio de compra. Por el contrario, en los sectores de mayor adquisición de la ciudad existe un panorama de favorabilidad en comparación a la compra de energía. Esta misma situación se presenta en la Guajira, en donde, para los estratos 1 y 2 no sería pertinente realizar una inversión en un proyecto de Energía Solar Fotovoltaica debido a que el costo de producción individual de energía es superior al precio de compra, como se plasma en la figura 37.

## **6.2. RECOMENDACIONES**

Esta investigación abarcó diferentes campos y localizaciones, sin embargo, sería ideal evaluar distintos escenarios de inversión y contrastar resultados con proyectos similares con condiciones diferentes.

El centro de este proyecto era evaluar sistemas aislados y observar su comportamiento bajo ciertos contextos, para trabajos futuros se puede implementar en sistemas interconectados y comparar los resultados en las mismas localizaciones.

En condiciones ideales existe un comportamiento específico del sistema fotovoltaico por lo que para una posterior investigación se podrían introducir fallos, daños o condiciones que afecten el entorno para evaluar su resultado.

Colombia presenta diferentes condiciones ambientales que pueden modificar la rentabilidad, en esta investigación se evaluaron dos localizaciones diferentes que

representan en su mayoría los escenarios posibles. Para posteriores investigaciones se podrían evaluar otras ciudades y condiciones climatológicas. Es fundamental estar informados sobre las legislaciones nuevas sobre energías alternativas que puedan afectar directa o indirectamente las evaluaciones económicas.

Este trabajo presenta una respuesta de la factibilidad económica de un proyecto solar bajo condiciones económicas y geográficas del lugar de estudio, por tanto, se puede establecer deducciones sobre la oportunidad o evaluación económica más profundas, en las cuales, por medio de la optimización del SFV en relación al precio y tamaño, se puede evaluar de manera correcta el verdadero impacto social de la aplicación de los SFV en Colombia, teniendo en cuenta variables macroeconómicas y ambientales (como la huella de carbono).

## 7. BIBLIOGRAFÍA

1. Abanda. F., Manjia. B. Enongene. K., Tah. J. Y Pettang. C. (oct. 2016). A Feasibility Study of a Residential Photovoltaic System in Cameroon. Sustainable Energy Technologies and Assessments. Vol.: 17. No.; Pág. 38 – 49.
2. Ahumada. Ó. (17 de dic., 2017). Nueve de cada 10 proyectos para generar energía usarán paneles solares. En: EL TIEMPO. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/en-colombia-9-de-cada-10-proyectos-de-energia-usaran-paneles-solares-162616>.
3. Aliaga. C., Fuentes. I. Y González. J. (2009) Estudio de Factibilidad Económica de la Instalación de Luminarias Solares para la Ciudad de Tocopilla. Título de investigación (Ingeniería Comercial Mención Administración) Facultad de Economía y Negocios. Escuela de Economía y Administración. Universidad de Chile. pág. 95.
4. Anglés Ortiz, R., González Deibe, A., Moscoso Mejía, G., & Vega Aldana, C. (23 de 06 de 2008). Proyecto: Energía Renovable en Colombia. Madrid: SER
5. Armendáriz, J. y González, M. (2017). Costo-Beneficio de Sistemas Fotovoltaicos en el Sector Residencial en la Ciudad de Chihuahua. Universidad de Baja California. México.
6. Banda, A. (2017). Estudio de Viabilidad Técnica y Económica de un Sistema Fotovoltaico Autónomo en las Instalaciones de la UCSP. Facultad de Ingeniería y Computación. Escuela Profesional De Ingeniería Industrial. Perú.
7. Baquela, E., & Redchuk, A. (2013). Optimización Matemática con R. Madrid: Burbok Publishing S.L.
8. Bitar, S. y Chamas, F. (2017). Estudio de Factibilidad para la Implementación de Sistemas Fotovoltaicos como Fuente de Energía en el Sector Industrial de Colombia. Colegio de Estudios Superiores de Administración –CESA. Bogotá.

9. Blanco, F y López, A (2009). Estudio de Viabilidad de una Instalación Fotovoltaica de Coste 50.000 Euros en España. Universidad de Santiago de Compostela. Unidad de Energía y Sostenibilidad. España.
10. Castejón, A., & Santamaría, G. (2010). Instalaciones Solares Fotovoltaicas. Editex.
11. Cigüenza Riaño, N. (27 de 03 de 2018). El Gobierno expidió un decreto para diversificar la matriz energética. La República. Obtenido de <https://www.larepublica.co/economia/el-gobierno-expidio-un-decreto-para-diversificar-la-matriz-energetica-del-pais-2705735>.
12. Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2012). Determinación de Inversiones y Gastos de Administración, Operación y Mantenimiento para la Actividad de Generación en Zonas No Interconectadas Utilizando Recursos Renovables. Bogotá: Corporación EMA.
13. Congreso, d. (1984). Ley N° 1 de 1984. Bogotá.
14. Departamento Nacional de Planeación. (2016). Instalación de Sistemas Solares Fotovoltaicos Individuales en Zonas No Interconectadas. Bogotá: DNP.
15. Dinero. (13 de agosto de 2015). Dinero. Obtenido de <https://www.dinero.com/pais/articulo/costos-energia-colombia/212216>.
16. Dinero. (01 de marzo de 2019). Dinero. Obtenido de <https://www.dinero.com/pais/articulo/tasas-de-interes-seguiran-en-425-hasta-enero-de-2019/265754>.
17. Figueroa, C, Parra, N. y Rodríguez, C. (2014). Evaluación de la Factibilidad Técnica y Económica de la Instalación de Paneles Solares Fotovoltaicos en Hogares de Familias de Escasos Recursos de la Comuna de San Nicolás. Universidad del Bío-Bío. Facultad de Ciencias Empresariales. Departamento de gestión empresarial. Chile.
18. Foster, R., Ghassemi Majid, & Costa, A. (2010). Solar Energy Renewable Energy and the Environment. New México: CRC Press.



19. Garzón, D. y Salamanca, J. (2017). Estudio de Factibilidad para la Implementación de Energía Solar Fotovoltaica en la Zona Preescolar del Colegio Agustiniiano Suba. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Facultad De Medio Ambiente Y Recursos Naturales. Bogotá.
20. Gero, R. (2014). Desarrollo de Estrategias para la Optimización de la Rentabilidad de una Instalación Fotovoltaica Basadas en el Diseño”. Universidad Politécnica de Valencia. España.
21. Gómez Ramírez, J., Murcia Murcia, J., & Cabeza-Rojas, I. (2017). G La energía solar fotovoltaica en Colombia: potenciales, antecedentes y perspectivas. Bogotá: Facultad de Ingeniería Mecánica Universidad Santo Tomás. Obtenido de <http://repository.usta.edu.co/handle/11634/10312>.
22. Goswami, Y. (2015). Principles of Solar Engineering. Tercera Edición. CRC Press. Boca Ratón (Florida). EEUU. Pp. 1 – 27.
23. Habitissimo. (19 de 03 de 2019). Obtenido de Habitissimo: <https://www.habitissimo.com.co/cotizacion/paneles-solares/bogota>
24. Hernández Hernández, K., & Carrillo Cruz, J. (2017). Análisis de la Curva de Demanda Eléctrica para Usuarios Residenciales Estrato 4 en la Ciudad de Bogotá Ante Diferentes Escenarios de los Habitos de Consumo. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
25. Himadry, S., Chee, W. Yatim, A. y Kwan, L. (2017). Feasibility Analysis of Hybrid Photovoltaic/Battery/Fuel Cell Energy System for an Indigenous Residence in East Malaysia. Departamento de Ingeniería de Energía Eléctrica, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Malasia. Malasia.
26. Hussein, A., Kazem, M., Albadi, A., Waeli, A., Busaidi, H. Miqdam, T. (2017). Techno-Economic Feasibility Analysis Of 1 MW Photovoltaic Grid Connected System in Oman. Departamento de Ingeniería Eléctrica e Informática, Universidad Sultan. Qaboos, Omán

27. IDEAM, & FOPAE. (S.F). Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelo. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
28. IDEAM. (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá: IDEAM. Obtenido de [http://190.109.167.188:83/imagenes/SIAD/HI\\_GEN\\_DOC\\_ESTUDIO\\_NACIONAL\\_DEL\\_AGUA\\_2014.PDF](http://190.109.167.188:83/imagenes/SIAD/HI_GEN_DOC_ESTUDIO_NACIONAL_DEL_AGUA_2014.PDF)
29. Instituto de Estudios Urbanos. (2017). IEU. Obtenido de Instituto de Estudios Urbanos: <https://www.institutodeestudiosurbanos.info/endatos/0200/02-040-servicios/02.04.04.02.htm>
30. Jimeno, J., Mokotoff, E. (2012). Optimización para el Análisis Económico. Universidad de Alcalá. Recuperado de: [https://www1.uah.es/estudios//asignaturas/descarga\\_fichero.asp?CodAsig=360007&CodPlan=G340&Anno=2011-12](https://www1.uah.es/estudios//asignaturas/descarga_fichero.asp?CodAsig=360007&CodPlan=G340&Anno=2011-12)
31. Klaus, J., Olindo, I., Arno H.M., S., René A.C.M.M., v., & Miro, Z. (2014). Solar Energy Fundamentals, Technology and Systems. Netherlands: Delft University of Technology.
32. Kornelakis A., Koutroulis, E. (2009). Methodology for the design optimisation and the economic analysis of grid-connected photovoltaic systems. *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 4, pp. 476-492.
33. Lee, J., Chang, B., Aktas, C. y Gorhala, R. (2016). Economic Feasibility of Campus-Wide Photovoltaic Systems in New England. Departamento de Ingeniería Civil Ambiental, Universidad de New Haven. Estados Unidos.
34. Mao, M. Jin, P. Chang, L. Xu, H. (2014). Economic Analysis and Optimal Design on Microgrids with SS-PVs for Industries. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1328-1336, Oct. 2014.
35. Messenger, R., & Ventre, J. (2005). Photovoltaic Systems Engeneering. New York: CRC Press.
36. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2005). Atlas de Radiación de Colombia. Bogotá.

37. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2015). Plan Energético Nacional - Colombia: Ideario Energético 2050. Bogotá: UPME.
38. Ministerio de Minas y Energía. (2003). Decreto 3683. Bogotá.
39. Ministerio de Minas y Energía. (2014). Guía Práctica Para la Aplicación de los Incentivos Tributarios de la Ley 1715 de 2014. Bogotá: MME.
40. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2016). Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética 2017-2022. Bogotá: UPME.
41. Mompó, P. (2016). Estudio Técnico y Económico para Instalaciones Fotovoltaicas de Autoconsumo. Universidad Politécnica de Valencia. España.
42. Morales, C. (2013). Cálculo de una Tarifa de Alimentación para Instalaciones Fotovoltaicas Residenciales en Colombia. Universidad Nacional de Medellín. Colombia.
43. Ortiz, J. (2013). Viabilidad Técnico-Económica de un Sistema Fotovoltaico de Pequeña Escala. Universidad Nacional de Colombia.
44. Puente Riofrío, M., & Gaviláñez Álvarez, Ó. (2018). Programación Lineal para la Toma de Decisiones. Ecuador: ESPOCH.
45. Sanabria, F. (2016). Análisis Costo/Beneficio de la Implementación de Tecnologías de Energía con Paneles Solares en la ESE Hospital San Cristóbal. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia
46. Schaar, J., Pope, A., Schenck, M. (2013). Financial optimization of photovoltaic arrays using the Differential Evolution algorithm in large dimensional spaces. *IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Tampa, FL, 2013, pp. 0244-0246.
47. Solar-energía.net. (2018). Energía Solar. Recuperado de: <https://solar-energia.net/>
48. Timmons, D., Harris, J., Roach, B. (2014). La Economía de las Energías Renovables. Global Development and Environment Institute, Tufts University. Medford. Recuperado de:

[http://www.ase.tufts.edu/gdae/education\\_materials/modules/EconomiaEnergiasRenovables.pdf](http://www.ase.tufts.edu/gdae/education_materials/modules/EconomiaEnergiasRenovables.pdf)

49. Tipping, D. (6 de 01 de 2018). <http://funcener.org>. Obtenido de <http://funcener.org/la-energia-solar-en-colombia-es-r>
50. Toledo Arias, C., & Urbina Yeregui, A. (09 de 2013). Evaluación de la energía solar fotovoltaica como solución a la dependencia energética de zonas rurales de Colombia. Obtenido de [upme.gov.co](http://www.upme.gov.co): [http://www.upme.gov.co:81/sgic/sites/default/files/18-2013-Evaluacin\\_de\\_la\\_energa\\_solar\\_fotovoltaica\\_como\\_solucin\\_a\\_la\\_dependencia\\_energtica\\_de\\_zonas\\_rurales\\_de\\_Colombia.pdf](http://www.upme.gov.co:81/sgic/sites/default/files/18-2013-Evaluacin_de_la_energa_solar_fotovoltaica_como_solucin_a_la_dependencia_energtica_de_zonas_rurales_de_Colombia.pdf)
51. TRNSYS. (2016). Recuperado de <http://www.trnsys.com/demo/index.html>
52. Twenergy (2018). Energía Solar. Endesa. Recuperado de: <https://twenergy.com/energia/energia-solar>.
53. UPME. (2018). Incentivos Tributarios - Ley 1715 de 2014 (Fecha de corte: Julio 31 de 2018). Recuperado de: [http://www1.upme.gov.co/Documents/Energias\\_renovables/Incentivos\\_Ley\\_1715\\_2018/InformeNo7\\_31Julio2018.pdf#search=InformeNo7\\_31Julio2018](http://www1.upme.gov.co/Documents/Energias_renovables/Incentivos_Ley_1715_2018/InformeNo7_31Julio2018.pdf#search=InformeNo7_31Julio2018)

## 8. ANEXOS

### 8.1. Anexo 1.

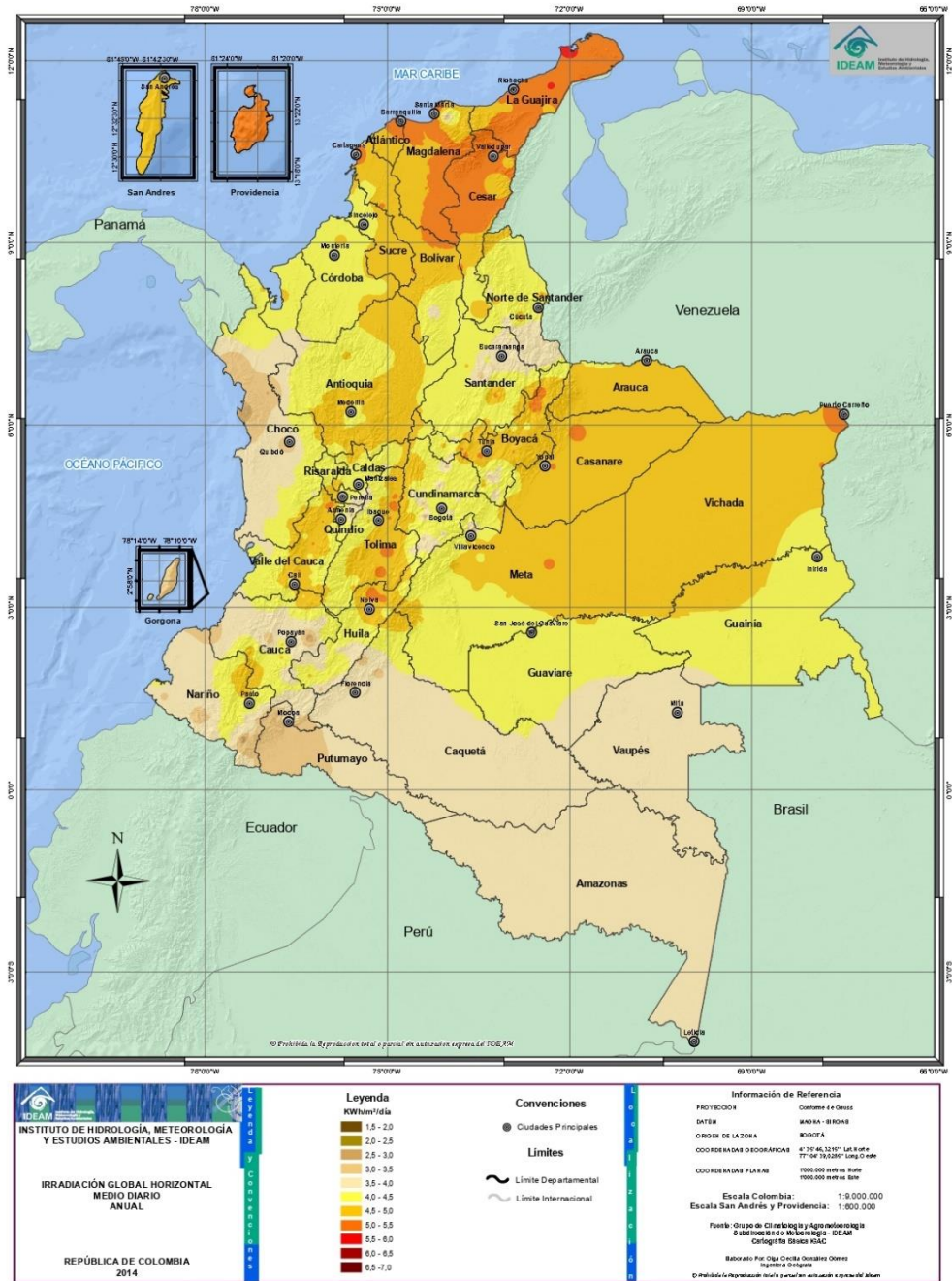


Figura 42: Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2005). Atlas de Radiación de Colombia.

## 8.2. Anexo 2.

ESTACION UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (BOGOTÁ)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m <sup>2</sup> )												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3
1-2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,4	0,5	0,4	0,2	0,4	0,4
2-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,4	0,2	0,3	0,3
3-4	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3
4-5	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,2	0,4	0,3
5-6	0,2	0,1	0,3	1,3	2,5	1,9	1,2	1,2	2,0	3,0	2,7	0,7
6-7	31,8	28,1	39,5	52,9	66,3	62,0	55,2	50,6	60,2	71,0	61,4	50,2
7-8	184,9	162,3	149,3	177,2	188,3	188,0	191,0	172,9	180,6	205,6	198,3	208,9
8-9	351,3	342,2	264,3	309,3	294,4	291,3	313,7	290,8	284,5	346,4	356,3	378,8
9-10	507,6	455,8	366,7	388,1	391,4	389,5	399,7	387,8	399,5	457,6	458,6	504,3
10-11	589,9	543,7	469,8	425,6	431,5	447,8	476,8	467,0	460,2	501,8	519,1	545,5
11-12	607,4	544,1	483,3	433,2	455,7	497,2	520,6	491,4	489,4	458,0	488,2	533,5
12-13	560,1	503,8	433,2	412,9	464,7	490,0	544,6	494,3	481,1	442,4	414,1	491,1
13-14	475,7	465,6	389,8	365,9	404,2	476,3	499,4	457,5	432,5	393,3	355,3	423,4
14-15	375,9	357,0	313,5	307,7	334,2	391,8	404,2	392,0	398,2	315,9	274,7	348,9
15-16	304,4	275,2	231,1	225,1	245,4	275,5	292,9	305,2	298,4	209,9	188,3	254,7
16-17	171,2	145,7	145,0	135,4	143,1	158,6	177,2	168,1	168,4	111,0	90,2	124,9
17-18	46,4	48,7	47,7	35,6	35,7	46,3	59,4	48,9	34,5	16,7	13,0	26,0
18-19	0,5	0,9	0,7	0,2	0,3	0,5	1,1	0,9	0,4	0,3	0,4	0,4
19-20	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2
20-21	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3
21-22	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,2
22-23	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3
23-0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,5	0,2	0,3	0,2
Acumulada diaria	4207,3	3873,1	3334,2	3270,4	3457,9	3716,7	3937,1	3728,5	3690,0	3533,0	3420,7	3891,2



Figura 43: Promedio Horario de Radiación Bogotá (Wh/m<sup>2</sup>)

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2005). Atlas de Radiación de Colombia.


## 8.3. Anexo 3.

Estrato	Consumo medio estrato (kWh/mes)	Rango de consumo (kWh/mes)	Tarifa actual \$ / kWh	Tarifa Unificada \$ / kWh	% Disminución	Valor promedio factura actual \$ / factura	Valor promedio factura con Tarifa Unificada	Reducción valor promedio factura \$ / factura
1	110	0 - 130 kWh	224,2	192,4	14%	\$ 24.662	\$ 21.164	\$ 3.498
		De 131 kWh en adelante	524,3	440,8	16%			
2	120	Rango 0 - 130 kWh	280,3	240,5	14%	\$ 33.636	\$ 28.860	\$ 4.776
		De 131 kWh en adelante	524,3	440,8	16%			
3	124	Todo consumo	445,7	374,7	16%	\$ 55.267	\$ 46.463	\$ 8.804
4	126	Todo consumo	524,3	440,8	16%	\$ 66.062	\$ 55.541	\$ 10.521
5	183	Todo consumo	629,2	529,0	16%	\$ 115.144	\$ 96.807	\$ 18.337
6	595	Todo consumo	629,2	529,0	16%	\$ 374.374	\$ 314.755	\$ 59.619

Figura 44: Tarifas de Energía eléctrica: Valor del vatio y consumo promedio en Bogotá.

Fuente: Enel-Codensa. (2019). Recuperado de: <https://www.codensa.com.co/hogar/valor-del-kilovatio-en-colombia-disminuye>.

#### 8.4. Anexo 4.



**ELECTRIFICADORA DEL CARIBE S.A ESP**  
 Departamentos de: Atlántico, Bolívar, Cesar, Córdoba, Guajira, Magdalena y Sucre  
**TARIFAS - RES 031-119/07, 097/08, 110/09, 173/11, 083/12, 108/12, 010/13, 180/14, 191/14 y 036/15**  
**Costo unitario enero 2019**

**Electricaribe**  
Intervenido por  
Superservicios

TARIFAS PARA CLIENTES RESIDENCIALES				SECTOR SUBNORMAL			
Nivel de tensión al que se conecta el transformador	Consumo (kWh)	2 ó 3	2 ó 3	2 ó 3	Medida N1*	Medida N1*	Medida N2*
		Operador de Red	Compartida	Ciente	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 2
Propiedad de los activos							
<b>Tarifa N1</b>	<b>Consumo (kWh)</b>						
Estrato 1	0-173	201,07	192,68	184,15	179,56	168,99	167,44
Estrato 2	0-173	241,29	231,11	220,95			
Estrato 3	0-173	398,13	383,60	369,08			
Estrato 1-2 -3 y 4*	>173	468,39	451,30	434,21	425,69	404,34	394,59
Estrato 5 y 6	> 0	562,07	541,56	521,05			
<b>Sector Subnormal no residenciales</b>							
Oficiales					425,69	404,34	394,59
Comercial e Industrial					510,83	485,20	473,51
Consumo de subsistencia subnormales 184 kWh, para subnormales ubicados en Pueblo nuevo el CS= 138							
* Para el estrato 4 todo el consumo							

Figura 45: Tarifas de Energía eléctrica: Valor del vatio y consumo promedio en Rioacha.

Fuente: Enel-Codensa. (2019).