



# **SIMULACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA UTILIZANDO SISTEMAS FOTVOLTAICOS, EN UN CIRCUITO ELÉCTRICO DE LA SUBESTACIÓN PUERTO ARAUJO (SANTANDER).**

Autor  
**EDGAR SUAREZ OSORIO**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS MECÁNICA, MECATRÓNICA E INDUSTRIAL  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
PAMPLONA, MAYO 2020.**



**Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz**



# **SIMULACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA UTILIZANDO SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, EN UN CIRCUITO ELÉCTRICO DE LA SUBESTACIÓN PUERTO ARAUJO (SANTANDER).**

**Autor**  
**EDGAR SUAREZ OSORIO**

Propuesta de trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título Ingeniero Eléctrico.

**DIRECTOR:** Jesús Velazco Ochoa. MSc.

**PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS MECÁNICA, MECATRÓNICA E INDUSTRIAL**  
**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**  
**PAMPLONA, MAYO 2020.**

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a Dios, por darme la fortaleza y la tenacidad de seguir luchando por mis metas y mis sueños a pesar de las adversidades.*

*A mis padres por el gran apoyo y confianza que depositaron en mí, es un orgullo tenerlos en mi vida y recibir su motivación día a día para culminar de la mejor manera una meta más en mi camino.*

*Camino que hemos recorrido juntos y que los lleva a convertirse en testigos de la dedicación, responsabilidad y esfuerzo que representa este logro, siendo más importante aún por el aporte entregado a la sociedad y a la investigación.*

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer inicialmente a Dios por darme la oportunidad de comenzar este nuevo reto y llenarme de fortaleza y sabiduría durante todo este proceso de aprendizaje y experiencias que me hicieron crecer en los diferentes aspectos de nuestras vidas.

Al amor incondicional de mis padres: A mi madre María Doris por el apoyo y las palabras de aliento cuando sentía desfallecer en el intento de culminar este logro en mi vida. A mi padre Samuel (Q.E.P.D) por formarme como un hombre trabajador y responsable.

A mis hermanas Sandra Milena y Argenyz que siempre estuvieron hay para darme esa voz de apoyo y aliento para seguir siempre adelante.

A mi futura esposa Stefani que fue mi cómplice durante estos años y apoyo incondicional en todo momento.

A mis docentes de la Universidad de Pamplona, por la orientación constante y adecuada para culminar este proyecto con éxito, Así mismo agradezco su disposición y dedicación para transmitirme todos sus conocimientos.

A la Electrificadora de Santander ESSA por facilitarme el tiempo para poder culminar mis estudios y hacer de cada semana una aventura más.

## INDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	3
AGRADECIMIENTOS .....	4
LISTA DE ABREVIATURAS .....	8
GLOSARIO.....	9
RESUMEN .....	12
ABSTRACT.....	13
INTRODUCCIÓN.....	14
CAPITULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. ....	17
1.1 Descripción del Problema .....	17
1.2 Formulación del Problema .....	20
1.3 Justificación. ....	20
1.4 OBJETIVOS GENERALES.....	21
1.4.1 Objetivo general.....	21
1.4.2 Objetivos Específicos.....	21
1.5 Delimitación de la Investigación. ....	22
1.5.1 Temporal .....	22
1.5.2 Alcance .....	22
CAPITULO 2: MARCO REFERENCIAL.....	23
2.1 Marco teórico.....	23
2.2 El sistema eléctrico convencional y la generación distribuida.....	26
2.2.1 Funcionamiento del sistema eléctrico convencional .....	26
2.2.2 Inclusión de generación distribuida en el sistema eléctrico .....	27
2.2.3 Aplicaciones, ventajas, barreras técnicas y limitaciones de la generación distribuida	31
2.2.4 Red eléctrica convencional.....	38
2.2.5 Redes Inteligentes .....	40

2.2.5 Sistemas Fotovoltaicos .....	42
2.2.6 Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red. ....	43
2.2.7 Calidad de Potencia .....	44
2.3 Marco Jurídico. ....	46
CAPITULO 3: METODOLOGÍA .....	49
3.2 Fase de Ejecución de la Investigación .....	49
3.2.1 Fase 1: Identificar la estructura global del Sistema de Distribución de energía en el circuito N° 72_501.....	49
3.2.2 Fase 2: Determinar los nodos o puntos eléctricos para realizar la simulación de generación distribuida dentro del circuito.....	50
3.2.3 Fase 3: Simulación de generación distribuida utilizando SFV fotovoltaica en el circuito N° 72_501.....	50
3.2.4 Fase 4: Análisis de parámetros de distribución y eficiencia de energía dentro del circuito.....	50
CAPITULO 4: ANALISIS DE RESULTADOS .....	52
4.1 Identificar la estructura global del Sistema de Distribución de energía en el circuito N° 72_501.....	52
4.2 Determinar los nodos o puntos eléctricos para realizar la simulación de generación distribuida dentro del circuito.....	56
4.3 Análisis Simulación de Generación Distribuida en los nodos eléctricos del circuito.....	56
CAPITULO 5: CONCLUSIONES.....	60
RECOMENDACIONES.....	61
BIBLIOGRAFIA.....	62

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 .....	47
Tabla 2 .....	54
Tabla 3 .....	55
Tabla 4 .....	56
Tabla 5 .....	57
Tabla 6 .....	58
Tabla 7 .....	58

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 .....	19
Figura 2 .....	25
Figura 3 .....	25
Figura 4 .....	27
Figura 5 .....	29
Figura 6 .....	38
Figura 7 .....	41
Figura 8 .....	43
Figura 9 .....	49
Figura 10 .....	52
Figura 11 .....	53
Figura 12 .....	54
Figura 13 .....	55

## LISTA DE ABREVIATURAS

**AT:** Alta tensión

**BT** Baja tensión

**CA** Corriente Alterna

**DC** Corriente Directa

**DPL:** Lenguaje de Programación de DigSilent (*DIgSILENT Programming Language*)

**GD:** Generación distribuida

**kWh;** Kilovatio/hora

**kV:** Kilo volts.

**kVA:** Kilo voltiampers.

**NTC:** Norma Técnica Colombiana.

**MW** Megavatio

**MWh** Megavatio hora

**MT** Media tensión

**THD** Distorsión Armónica Total.

**SDL** Sistema de Distribución Local

**STN** Sistema de transmisión Nacional

**STR** Sistema de Transmisión Regional.

**SFV:** Sistema Fotovoltaico.

**W:** Watts:

## GLOSARIO

**Cadena energética:** es el conjunto de todos los procesos y actividades tendientes al aprovechamiento de la energía que comienza con la fuente energética misma y se extiende hasta su uso final.

**Calidad de energía:** es un término utilizado para referirse al estándar de calidad que debe tener el suministro eléctrico de las instalaciones, en términos de:

- Tensión o voltaje constante y de forma sinusoidal. En Colombia 220V en baja tensión.
- Frecuencia de oscilación constante de 60 ciclos.
- Mínimas perturbaciones: Armónicas, parpadeo (flicker). El cumplimiento o no de las anteriores normas técnicas es lo que determina que el suministro sea de calidad.

**Circuito:** Conjunto de materiales eléctricos, conductores de diferentes fases o polaridades alimentados por la misma fuente de energía y protegidos contra las sobre intensidades, por los mismos dispositivos de protección

**Comercialización de la energía:** actividad consistente en la compra de energía eléctrica en el mercado mayorista y su venta a los usuarios finales, regulados o no regulados, bien sea que desarrolle esa actividad en forma exclusiva o combinada con otras actividades del sector eléctrico, cualquiera de ellas sea la actividad principal.

**Distribución de energía:** Transportar electricidad distancias moderadas desde el punto de entrega de la transmisión (subestación), hasta el usuario final.

**Energía alternativa:** Energía procedente de fuentes no convencionales, por ejemplo, la energía solar, la energía eólica, del mar, biomasa, geotérmica, hidráulica.

**Fuente energética:** todo elemento físico del cual se puede obtener energía, con el objeto de aprovecharla. Se dividen en fuentes energéticas convencionales y no convencionales.

**Fuentes convencionales de energía:** son fuentes convencionales de energía aquellas utilizadas de forma intensiva y ampliamente comercializadas en el país.

**Fuentes no convencionales de energía:** son fuentes no convencionales de energía, aquellas fuentes de energía disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleadas o son utilizadas de manera marginal y no se comercializan ampliamente.

**Generación de la energía:** Convertir energía del recurso primario en energía eléctrica: centrales hidroeléctricas, centrales térmicas a gas natural, turbinas eólicas, entre otras.

**Panel Solar:** Es un elemento que permite usar los rayos del sol como energía. Estos dispositivos recogen la energía térmica o foto-voltaica de sol y la convierte en un recurso que puede emplearse para producir electricidad o calentar un sistema

**Sistema fotovoltaico:** un sistema fotovoltaico es un grupo de elementos conectados que sirven como fuente de energía y usan como fuente primaria el sol.

**Transmisión:** transportar electricidad grandes distancias desde centros de generación y cerca de centros de consumo.

**Uso eficiente de la energía:** es la utilización de la energía, de tal manera que se obtenga la mayor eficiencia energética, bien sea de una forma original de energía y/o durante cualquier actividad de producción, transformación, transporte, distribución y consumo de las diferentes formas de energía, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad, vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables.

## RESUMEN

La energía solar fotovoltaica es reconocida a nivel mundial como una fuente renovable, con bajo impacto ambiental y con costos menores comparados con otras fuentes de energía. A nivel de Colombia, las condiciones geográficas son favorables para esta tecnología y esta es beneficiaria de estímulos gubernamentales como la Ley 1715 del 2014; sin embargo, en Colombia no ha tenido una amplia utilización.

En el presente trabajo se hace un análisis o simulando de una metodología de generación distribuida con el fin de identificar los principales impactos sobre los perfiles de tensión, las pérdidas y la cargabilidad de conductores, que genera el uso de forma masificada de los Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red en un sistema de distribución de baja tensión dentro del circuito N° 72\_501 de la Subestación Puerto Araujo del municipio de Cimitarra (Santander).

Dentro de las simulaciones desarrolladas, se utiliza el sistema de potencia de simulación PowerFactoryDigsilent y variables eléctricas como transmisión de energía para modelar el sistema fotovoltaico a (13200 voltios) conectado a red que permite replicar la operación dentro de la red eléctrica y determinar los impactos producidos al masificar este tipo sistemas.

Los resultados de la simulación darán indicadores importantes para determinar el máximo nivel de penetración fotovoltaica permitido en la red propuesta, con el fin de aumentar la cobertura y la calidad de energía en sectores rural del sistema de y transmisión local de Puerto Araujo (Santander).

**Palabras Claves:** Sistemas fotovoltaicos, redes de distribución, potencia, sistemas de simulación, generación distribuida.

## ABSTRACT

Photovoltaic solar energy is recognized worldwide as a renewable source, with low environmental impact and with lower costs compared to other energy sources. At the Colombian level, geographical conditions are favorable for this technology and it is the beneficiary of government incentives such as Law 1715 of 2014; however, in Colombia it has not been widely used.

In the present work, an analysis or simulation of a distributed generation methodology is made in order to identify the main impacts on the voltage profiles, the losses and the chargeability of conductors, which generates the massive use of Connected Photovoltaic Systems. to the Network in a low voltage distribution system within circuit No. 72\_501 of the Puerto Araujo Substation in the municipality of Cimitarra (Santander).

Within the simulations developed, the PowerFactoryDigsilent simulation power system and electrical variables such as power transmission are used to model the photovoltaic system at (13200 volts) connected to the grid that allows the operation to be replicated within the electrical grid and determine the impacts produced by massifying this type of systems.

The simulation results will give important indicators to determine the maximum level of photovoltaic penetration allowed in the proposed network, in order to increase the coverage and quality of energy in rural sectors of the local transmission and system of Puerto Araujo (Santander).

**Key Words:** Photovoltaic systems, distribution networks, power, simulation systems, distributed generation.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, una de las grandes prioridades a escala mundial, es el desarrollo de fuentes alternas de generación de energía eléctrica, y en especial de fuentes renovables que producen una baja contaminación ambiental. Si bien los combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural), recursos no renovables que además de presentar un impacto ambiental negativo por generar gran cantidad de subproductos contaminantes, continuarán supliendo una fracción apreciable del consumo energético, la oferta energética tenderá a ser más diversificada debido a que estos no garantizan un cubrimiento total a largo plazo de la creciente demanda de energía generada por el crecimiento de la población y de la industria. Opciones como la eólica, solar, biomasa renovable, hidrógeno, y celdas de combustible van a jugar un papel importante en el largo plazo y producirán cambios substanciales en el perfil tecnológico ambiental y organizacional del sistema energético global.

La Organización de Naciones Unidas considera el acceso a servicios energéticos de calidad como elemento fundamental para la reducción de la pobreza, precisando que pese a las altas tasas de urbanización en América Latina y el Caribe casi 30 millones de personas aún carecen de energía eléctrica, y de estas, 21,4 millones son pobres (el 71%), demostrando que la ausencia de servicios eléctricos se relaciona de manera directa con la pobreza (CEPAL et al, 2009).

Alrededor del mundo se ha demostrado el potencial de los sistemas de energía solar en proyectos de electrificación rural, especialmente para servicios sociales y comunales, la

agricultura y otras actividades productivas capaces de repercutir significativamente en el desarrollo rural, gracias a la constante disminución de sus precios, así como por la experiencia obtenida en su aplicación para otros sectores (Van, 2000). Además, son muy convenientes para zonas rurales, donde la demanda de energía es dispersa y la conexión a la red es a menudo más costosa (UPME, 2005).

Colombia cuenta con importantes recursos de energía solar debido a su ubicación en la zona ecuatorial, pero aún existen varias poblaciones con serios problemas eléctricos, especialmente en las zonas rurales donde el servicio es costoso y los sistemas de distribución de energía local son menos eficientes.

Teniendo en cuenta lo anterior el estudio actual se encuentra enmarcado en el campo de la energía solar fotovoltaica y busca plantear alternativas de generación distribuida con el fin de mejorar las deficiencias de suministro energético en la subestación de Puerto Araujo, Municipio de Cimitarra (Santander). Específicamente en el circuito N° 72501. Es así como la generación distribuida se convierte en una opción tecnológica interesante y prometedora. Dentro de este contexto de generación distribuida, la conversión fotovoltaica de energía eléctrica es uno de los más firmes candidatos, ya que además de existir un gran potencial solar la región, no genera contaminación ambiental.

En razón a los expuesto anteriormente, la estructura de este documento está organizada en cinco capítulos que atienden el objetivo fundamental de analizar por medio de la herramienta computacional “PowerFactoryDigsilent”, el comportamiento de flujos de potencia y cuantificar la diferencia de potencial eléctrico entre dos o más puntos derivados de la integración de un sistema

fotovoltaico en una red de distribución de un circuito de la Subestación eléctrica de Puerto Araujo, municipio de Cimitarra (Santander), lo cual permite determinar la viabilidad de este tipo instalaciones y la calidad del servicio de energía ofrecido a la población.

**En el Capítulo 1:** Corresponde al marco introductorio de la investigación, en donde describe de manera general el planteamiento del problema, la pregunta de investigación, donde se manifiesta a que es a lo que se le quiere dar respuesta a partir del análisis o diagnóstico a realizar. Por último, que es lo que pretende el proyecto y a donde se quiere llegar.

**En el Capítulo 2:** Se ejecuta los referentes teóricos principales de la investigación donde se enuncian los conceptos fundamentales de Generación Distribuida, con sus respectivas aplicaciones, ventajas, barreras técnicas y limitaciones, y el de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red con su respectiva forma de funcionamiento.

**En el Capítulo 3:** Se encuentran la presentación de la metodología y cada una de las fases de la investigación teniendo en cuenta el desarrollo de cada uno de los objetivos planteados en esta investigación.

**En el Capítulo 4:** Se plasman los resultados obtenidos de la simulación del sistema fotovoltaico que implican variables como: niveles de Tensión, cargabilidad en conductores y transformadores, pérdidas totales, comportamiento del factor de potencia en un circuito eléctrico del sistema de distribución de energía de la electrificadora de Santander ESSA ESP.

**En el siguiente capítulo 5:** se encontrarán las conclusiones, recomendaciones a tener en cuenta y posteriormente la bibliografía.

## CAPITULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

### 1.1 Descripción del Problema

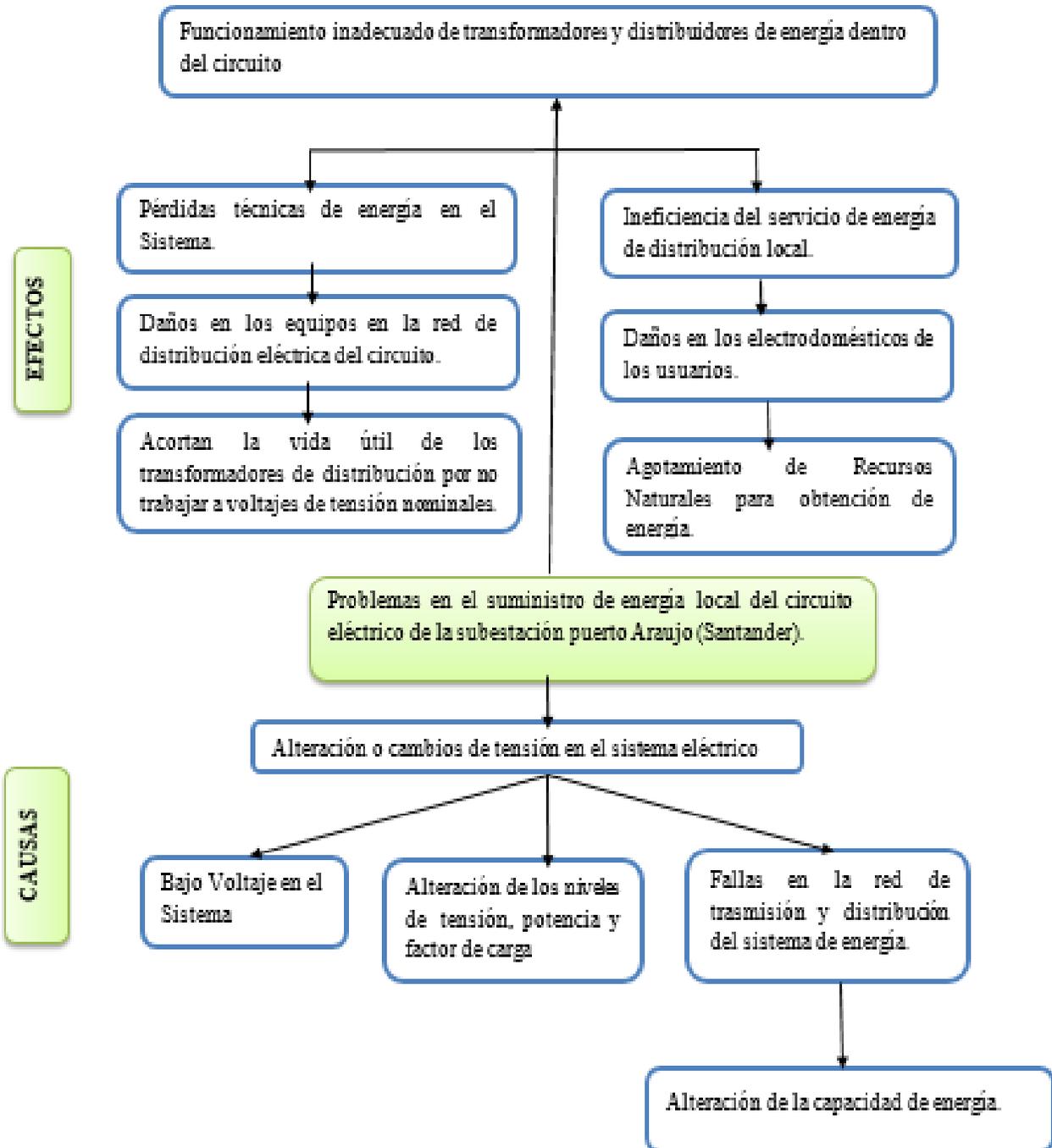
A nivel mundial se está trabajando para hacer frente a problemas importantes relacionados con la generación de electricidad por los métodos convencionales, incluyendo principalmente el calentamiento global, la escasez de hidrocarburos, el incremento en las tarifas eléctricas en muchos lugares, la volatilidad del precio del gas natural, la disminución de la calidad del aire y la salud pública, la amenaza inminente de bajas tensiones o apagones, el envejecimiento de la infraestructura y la congestión de la red, la inseguridad y la ineficiencia energética. Mientras los costos de la generación convencional de electricidad se vuelven cada vez más evidentes, el precio de los sistemas de energía distribuidos y renovables continúa decreciendo. Mucha gente ha reconocido que la necesidad de facilitar la interconexión de fuentes renovables de energía limpia y en sitio, a la red eléctrica se está demorando. (Whitaker,2007).

En Colombia, La masificación de las fuentes de energías limpias en los sistemas eléctricos, y la urgencia de remplazar las fuentes convencionales de energía, han creado la necesidad de estudiar el impacto que tendrían estos sistemas al conectarlos con la red eléctrica para satisfacer la demanda de energía. En el caso de los sistemas fotovoltaicos interconectados, se sabe que, dependiendo de la ubicación de estos sistemas dentro de un sistema, de la capacidad instalada y de la operación del sistema de distribución, se pueden obtener impactos positivos o negativos en la calidad de potencia que se le entrega al usuario (Srisaen & Sangswang, 2006).

Como es el caso de la Electrificadora de Santander, es una empresa prestadora de servicios públicos, mixta, de nacionalidad colombiana y pertenece al Grupo empresarial EPM. ESSA está constituida como sociedad anónima, sometida al régimen general de los servicios públicos domiciliarios y a las normas especiales que rigen el sector eléctrico. Actualmente la Electrificadora tiene interconectada la mayor parte del departamento a la red eléctrica nacional, pero las fallas en sectores alejados se hacen difíciles de solucionar tanto por acceso como por costos. Así mismo tiene la responsabilidad de asignar un suministro energético eficiente acorde a sus necesidades de carga, demanda de energía del Operador de Red -OR- y el incremento de sus clientes y usuarios del sistema. La Electrificadora está constituida por varias subestaciones que cumplen la función de distribuir la energía en diferentes partes de la región de Santander y constantemente se presentan problemas de suministro de energía, esto puede estar asociado: Aumento de los usuarios y la creciente demanda eléctrica de la región, la longitud de todo el sistema y los componentes de la red eléctrica, ocasionando que la calidad del servicio eléctrico disminuya y se presenten apreciables variaciones en los niveles de tensión, voltaje y potencia entre otros. Por otro lado, existen además una cantidad importante de componentes de red con muchos años de servicio y deterioro, lo que afecta su eficiencia provocando pérdidas dentro del sistema.

Los principales problemas de la Subestación Puerto Araujo ubicada en el municipio de Cimitarra, Santander son: el aumento de las pérdidas técnicas de la energía dentro del sistemas causando alteraciones de los niveles de tensión, voltaje, cargabilidad entre otros. Para explicar la problemática global del suministro de energía en el circuito se realizó la metodología del árbol de problemas (**Figura 1**).

Figura 1  
 Análisis de Problemas (Árbol de Problemas)



Fuente: Autoría propia.

## 1.2 Formulación del Problema

¿Cómo a través de herramientas de simulación se puede evaluar el desempeño de un sistema fotovoltaico en condiciones similares a las reales, analizando diferentes parámetros y variables que intervienen (¿Tensión, potencia, eficiencia, distribución, cargabilidad y pérdidas técnicas?

## 1.3 Justificación.

La realización del presente proyecto consiste en la búsqueda de mejores formas para el aprovechamiento de los recursos energéticos en el municipio de Cimitarra (Santander), en especial como lo es la energía solar fotovoltaica, teniendo en cuenta que geográficamente Colombia se encuentra en una de las regiones con mayor incidencia de los rayos solares. Así que, la implementación de metodologías de simulación y análisis de viabilidad de sistemas fotovoltaicos en la red del suministro de energía de la Subestación de Puerto Araujo (Santander) y el desafío de implementar energías más limpias dentro de la región que no generen ningún tipo de contaminación ambiental y sea sostenible dado que es una fuente inagotable, permitiendo reducir el consumo de energía fósil y la demanda energética dentro de los edificios y viviendas.

Por otro lado, una ventaja de la simulación de estos SFV, es que buscan soluciones a los problemas de distribución de energía eléctrica a todos los niveles del sistema analizando factores eléctricos como: factor potencia, niveles de tensión, cargabilidad y la distribución del suministro de energía a través de toda la red, con el fin de disminuir las pérdidas técnicas en las líneas de distribución.

## 1.4 OBJETIVOS GENERALES

### 1.4.1 Objetivo general

Análisis de generación distribuida utilizando sistemas fotovoltaicos, en un circuito eléctrico de la subestación puerto Araujo (Santander).

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- ✓ Caracterizar el sistema de distribución de energía en el circuito N° 72\_501, de la subestación de electricidad de Puerto Araujo, Cimitarra (Santander).
- ✓ Seleccionar los nodos eléctricos o ramales para llevar a cabo la simulación de generación distribuida en la red.
- ✓ Modelar un sistema de energía fotovoltaica para realizar el estudio de los parámetros de la red de distribución: niveles de tensión, cargabilidad, potencia, reducción de fluctuaciones y pérdidas de energía donde se evidencian las diferencias para el sistema de simulación fotovoltaico y el sistema eléctrico.

## 1.5 Delimitación de la Investigación.

### 1.5.1 Temporal

Esta investigación fue desarrollada en el año 2019. Para realizar los análisis y las pruebas de simulaciones aplicando alternativas de generación distribuida utilizando un sistema fotovoltaico en la red de distribución de energía eléctrica del circuito N° 72\_501 de la Subestación de Puerto Araujo Santander, usando como referencia el consumo de energía de la población en el año 2019.

### 1.5.2 Alcance

Este estudio recopila información sobre los distintos componentes que conforman un sistema fotovoltaico y sobre los diferentes parámetros que se necesitan para la modelación y simulación de sistemas de distribución de energía utilizando el programa computacional Digsilent Power Factory. Así mismo se realizaron las pruebas de desempeño para analizar los niveles de tensión, cargabilidad en conductores y transformadores, pérdidas totales, comportamiento del factor de potencia en un circuito eléctrico del Sistema eléctrico de la Subestación Puerto Araujo (Santander).

## CAPITULO 2: MARCO REFERENCIAL

### 2.1 Marco teórico.

#### 2.1.1 Energía Renovable

El consumo de energía eléctrica a nivel mundial está avanzando de manera rápida debido al desarrollo de las industrias, el transporte, los medios de comunicación y otras aplicaciones que las personas le dan a la misma. De esta manera existen diferentes recursos que se explotan para la obtención de energía eléctrica como el carbón, petróleo, gas natural y uranio. (Escamilla, 2011, Cervantes & Muñoz,2010).

El uso de estas fuentes o recursos no renovables conlleva problemas como el impacto ambiental producido por las emisiones del gas de efecto invernadero. Es por eso que al ser recursos limitados se está optando por el uso de energías alternativas a partir de fuentes o recursos renovables.

La Energía Renovable es toda fuente de energía natural e inagotable presente en la naturaleza como la energía del sol la cual es aprovechada de manera directa o indirecta. (Escamilla, 2011, Cervantes & Muñoz,2010).

#### 2.1.2 Energía solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es el aprovechamiento y la conversión de la radiación solar en energía eléctrica utilizando células fotovoltaicas, las cuales por medio del efecto fotoeléctrico

en un material semiconductor generan un flujo de electrones el cual al incidir sobre este producen energía. (Escamilla, 2011, Cervantes & Muñoz,2010).

De esta manera la energía solar captada por un conjunto de células voltaicas puede estar conectadas en serie o paralelo dependiendo del nivel de voltaje o corriente que se requiera. Este conjunto de células fotovoltaicas están encapsuladas formando el panel fotovoltaico.

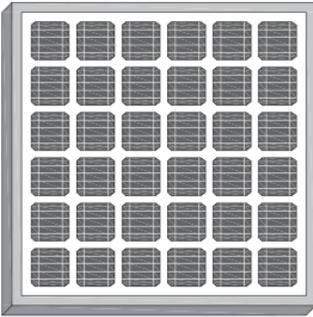
Esta energía se transforma directamente en electricidad a partir de unas células fotovoltaicas, este proceso se produce al incidir luz solar sobre unos materiales llamados semiconductores, por medio de este sistema fluyen electrones al material la cual se obtiene la energía eléctrica. Un panel solar fotovoltaico produce electricidad en corriente continua y sus características de medición es la intensidad y la tensión, que varían con la radiación solar que proyectan en las células fotovoltaicas, la energía fotovoltaica se transforma en corriente alterna, con las mismas características de la electricidad de la red pública, pero en este caso es necesario la utilización de inversores. (Energías renovables y eficiencia energética, 2018).

### 2.1.3 Panel Fotovoltaico

Las células fotovoltaicas se agrupan de tal manera que forman una estructura denominada módulo o panel fotovoltaico, donde se pueden tener diferentes tamaños dependiendo de las exigencias que se tenga. Por lo general los paneles fotovoltaicos están formados por lo general por 36 células conectadas eléctricamente en serie en una superficie de  $0,5m^2$  a los  $13m^2$  como se muestra en la Figura 2.

## Figura 2

*Modulo o Panel Fotovoltaico de 36 Células.*

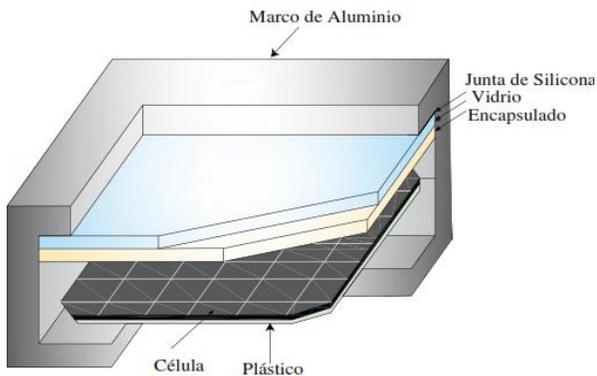


**Fuente:** “Simulación y evaluación de sistemas fotovoltaicos residenciales conectados a la red eléctrica, Jara & Galarza, 2015).

De esta manera en la estructura interna del panel fotovoltaico se muestra en la Figura 3, donde las células están ensambladas entre una lámina superior de cristal con un encapsulado y una lámina inferior de plástico, a las cuales se añaden un marco de aluminio para tener una resistencia mecánica adecuada.

## Figura 3

*Estructura Interna de un Módulo Fotovoltaico.*



**Fuente:** “Simulación y evaluación de sistemas fotovoltaicos residenciales conectados a la red eléctrica, Jara & Galarza, 2015).

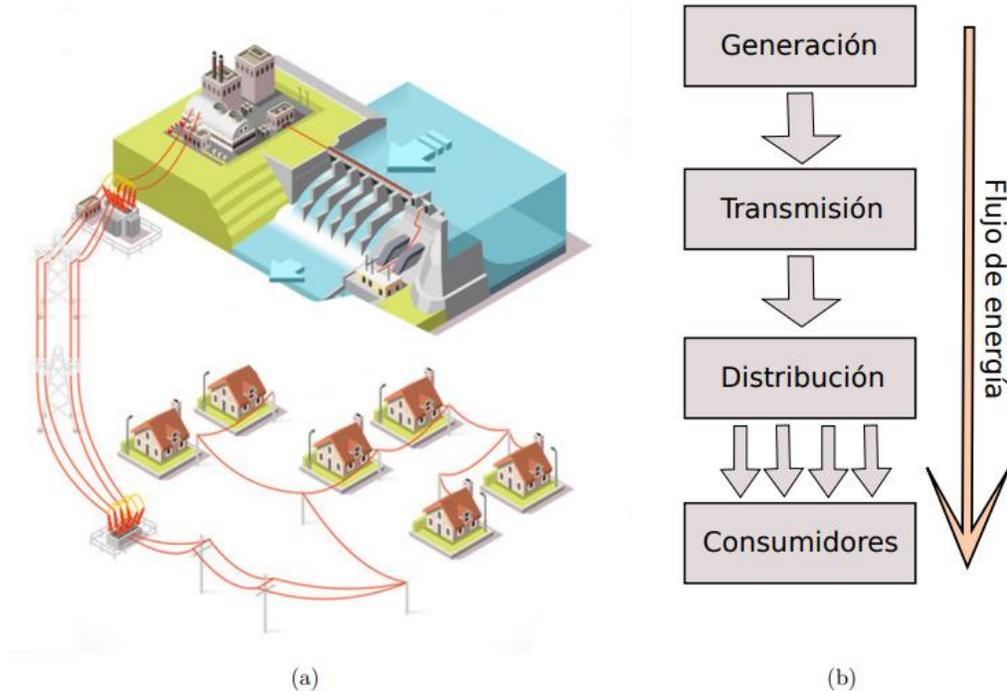
## 2.2 El sistema eléctrico convencional y la generación distribuida

### 2.2.1 Funcionamiento del sistema eléctrico convencional

Los sistemas de potencia tradicionales están integrados por fuentes de generación de energía eléctrica, usuarios que cuentan con dispositivos que hacen uso de la electricidad y una red que los conecta (Figura. 4). El objetivo principal de la red eléctrica es el transporte de la energía eléctrica desde la generación hasta los centros de consumo, garantizando confiabilidad, continuidad y calidad del servicio para todos los agentes del sistema (productores y consumidores) (Chowdhury et al., 2009). En los sistemas convencionales la generación se encuentra cerca al punto de insumo del recurso a transformar (centrales hidroeléctricas cerca a los embalses de agua o ríos, centrales termoeléctricas cerca de las fuentes de carbón) y alejadas a los centros de consumo (Bollen, M.; Hassan, 2011a), por lo que la estructura de transmisión y distribución juega un rol fundamental y está en constante mantenimiento y reestructuración debido a lo cual se hacen necesarias inversiones para su redimensionamiento. Adicionalmente, la inclusión de nuevos generadores en el sistema depende de la autorización de un ente regulador, por lo que su expansión puede tomar más tiempo. Dentro de esta estructura los usuarios finales están normalmente ubicados en los centros de consumo, y tienen un rol pasivo, encargándose únicamente en el consumo de energía, la cual debe estar disponible en cualquier momento.

**Figura 4**

*Esquema Sistema Eléctrico- Paradigma*



**Fuente:** Figura: a) <http://www.fotolia.com> b) Elaboración del autor.

La inclusión de dichas unidades de producción ha generado un cambio en la estructura típica del sistema eléctrico. No solo modificando el rol de los consumidores, sino que la operación técnica del sistema también se ve afectada. En la siguiente sección se detallará en qué consisten la inclusión de estas unidades de producción en los sistemas de distribución y como su presencia en la red cambia el funcionamiento del sistema eléctrico convencional.

### 2.2.2 Inclusión de generación distribuida en el sistema eléctrico

El cambio de paradigma que se presenta en el sistema eléctrico al integrar unidades de producción de energía que emplean fuentes de energía renovables, implica nuevos retos a nivel técnico y regulatorio. Diferentes términos se emplean para referirse a este tipo de producción,

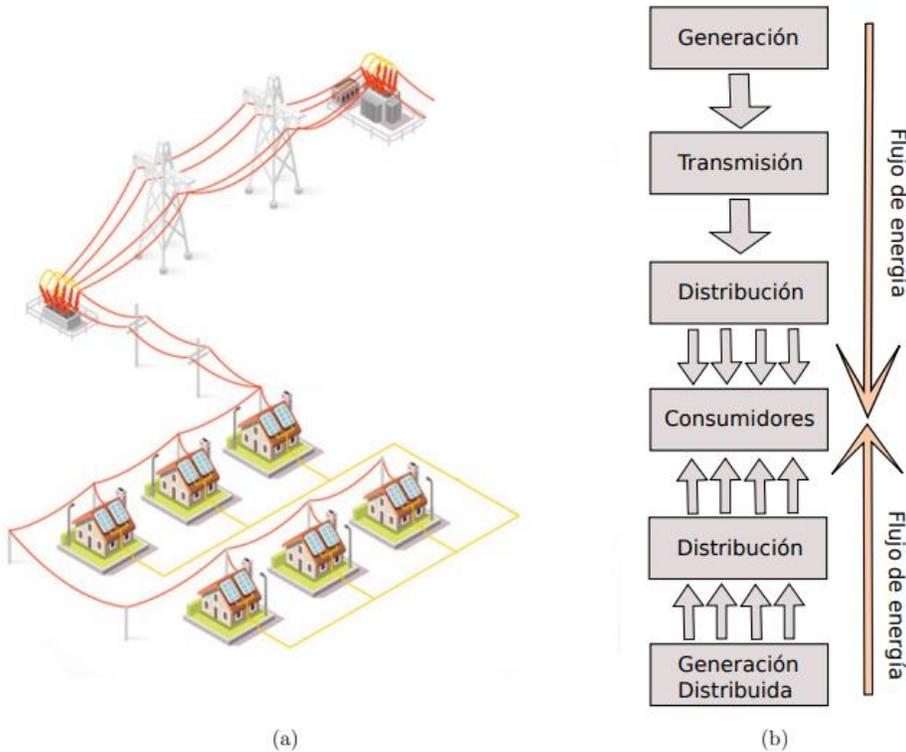
entre ellos se encuentran: “generación embebida”, “generación distribuida”, “generación a pequeña escala”, “fuentes de energía renovables” y “recursos energéticos distribuidos” (Short, 2003), (Ackermann et al., 2001). En esta tesis se empleará el término “generación distribuida” (GD).

Tres definiciones que se pueden aplicar a este tipo de fuentes, de acuerdo a estudios en el tema, normas técnicas y legislación energética son: La generación distribuida se refiere a la generación aplicada en el nivel de distribución con el uso de tecnologías modulares de generación de energía (inferior a 0,5 MW) dispersas en el sistema de distribución de una empresa de servicios públicos (Short, 2003). Instalaciones de generación eléctrica conectadas a instalaciones que entregan energía eléctrica a unas cargas a través de un punto de acople común, por medio de fuentes de energía que no están conectadas directamente a un sistema de transmisión de potencia mayor. Incluye tanto generadores como tecnologías de almacenamiento de energía (IEEE, 2003). Producción de energía eléctrica, cerca de los centros de consumo, conectada a un sistema de distribución local (SDL). La capacidad de la generación distribuida se definirá en función de la capacidad del sistema donde se va a conectar (Congreso de la Republica de Colombia, 2014). Teniendo en cuenta las características planteadas en cada una de las definiciones anteriores, la generación distribuida son todas aquellas unidades de producción de energía conectadas a una red de distribución, cuyo valor de potencia dependerá de las especificaciones normativas de los códigos de redes de cada país, y las cuales dependen de fuentes renovables. (Figura. 5)

La instalación de generadores distribuidos, responde a diversas necesidades tanto de tipo ambiental como técnico, algunas razones para introducir este nuevo tipo de fuentes a los sistemas de energía son:

**Figura 5**

*Esquema Sistema Eléctrico-Nuevo Paradigma*



Fuente Figura: a) <http://www.fotolia.com> b) Elaboración del autor.

- Ampliación de la canasta energética: Se busca disminuir o desaparecer completamente la dependencia al uso de combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica. Incluir nuevos generadores en el mercado mayorista y brindar soluciones energéticas a zonas no interconectadas.
- Implicaciones ambientales: Reducción de la huella de carbono y diversos impactos ambientales que se generan por la construcción de grandes centrales hidroeléctricas, térmicas y nucleares. Se hace necesario el uso de incentivos económicos para el uso de energía renovables debido a la aún existente diferencia de costos frente al uso de combustibles fósiles.

- Balance oferta - demanda: Se debe sobredimensionar el sistema eléctrico para abastecer la mayor demanda existente, aunque solo se presente por periodos cortos de tiempo. Adicionalmente ampliar la oferta por medio de grandes centrales de generación conlleva un costo y tiempo mayor que la construcción de centrales a pequeña escala.
- Beneficios en infraestructura: Reducir la carga a nivel de transmisión y distribución, postergando la reestructuración y redimensionamiento de la infraestructura existente. Adicionalmente, reducir las pérdidas en el sistema.
- Mejorar indicadores del servicio del sistema: Uso de la generación distribuida como respaldo para mejorar la confiabilidad, calidad y continuidad en zonas vulnerables del sistema.

Dentro del marco regulatorio colombiano, dos tipos de generación pueden ser consideradas como generación distribuida, la autogeneración y la cogeneración. Según (Congreso de la Republica de Colombia, 2014) la cogeneración es la “producción combinada de energía eléctrica y energía térmica que hacen parte integrante de una actividad productiva” y la autogeneración se define como “aquella actividad realizada por personas naturales o jurídicas que producen energía eléctrica principalmente, para atender sus propias necesidades. En el evento de generar excedentes de energía estos podrán entregarse a la red”, adicionalmente clasifica a los autogeneradores como de pequeña escala aquellos cuya potencia sea inferior a 1 MW ((UPME, 2015)) y de gran escala a los de potencia superior.

La energía que convierten los generadores distribuidos en energía eléctrica proviene de diversos tipos de fuentes renovables, entre los que se encuentran:

- Energía de la biomasa

- Energía de los mares
- Energía de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos (PCH's)
- Energía eólica
- Energía geotérmica
- Energía solar

Las diferentes tecnologías desarrolladas para la generación distribuida, busca el aprovechamiento de los diversos tipos de fuentes de energía renovable. La selección del tipo de fuente a usar y por lo tanto de tecnología a instalar depende fuertemente de la disponibilidad de la misma en el punto de instalación. Adicionalmente, el comportamiento de cada una de las fuentes renovables está relacionada directamente con el comportamiento del recurso natural del cual provienen, por ejemplo, la producción de energía eólica dependerá del comportamiento de las masas de aire donde se instalan los aerogeneradores, de forma similar pasa con la energía solar, solo puede ser aprovechable cuando hay luz solar, por lo tanto, esta fuente solo tiene una disponibilidad de al menos medio día y su eficiencia también se ve afectada por la nubosidad que pueda existir en la zona de instalación. ((UPME, 2015))

### 2.2.3 Aplicaciones, ventajas, barreras técnicas y limitaciones de la generación distribuida

La aplicación de una u otra tecnología en la GD depende de los requerimientos particulares del usuario. Los arreglos tecnológicos más usuales se citan a continuación (Rabinowitz *et al.*,2000; Buchholz *et al.*, 2003:

\_ Carga base: El sistema opera en paralelo con la red de distribución; puede tomar o vender parte de la energía y usa la red para respaldo y mantenimiento.

\_ El equipo está funcionando permanentemente y reduce el consumo de energía eléctrica de la red.

\_ Proporcionar carga punta: Se utiliza para suministrar la energía eléctrica en períodos punta, con lo que disminuye la demanda máxima del consumidor, ya que el costo de la energía en este período es generalmente el más alto.

\_ Soporte a la red de distribución: A veces en forma eventual o bien periódicamente, la empresa eléctrica o los grandes clientes requieren reforzar su red eléctrica instalando pequeñas plantas, incluida la subestación de potencia, para evitar y resolver congestiones debido a altas demandas en diversas épocas del año, o por fallas en la red.

\_ Calidad del suministro: Si la calidad del suministro está por debajo de las necesidades del cliente, esta aplicación proporciona la calidad requerida, eliminando fluctuaciones.

\_ Almacenamiento de energía: Se puede tomar en consideración esta alternativa cuando es viable el costo de la tecnología a emplear, las interrupciones son frecuentes o se cuenta con fuentes de energía renovables.

\_ Respaldo: Aplicación de stand-by que asegura el suministro de electricidad de forma ininterrumpida. Funciona únicamente cuando se produce un corte en el suministro.

La principal característica de la Generación Distribuida se relaciona con el hecho de que esta permite producir, almacenar y administrar la energía en el mismo lugar de consumo lo cual trae una serie de ventajas, incluso para las empresas distribuidoras. Dentro de las ventajas vale la pena destacar las siguientes (Tomado de: National Rural Electric Cooperative Association, 2007; Servicios Energéticos Básicos Autónomos., 2008).

\_ Evita o aplaza inversiones en transmisión y distribución al ubicar la generación cerca del consumo.

\_ Dependiendo de la configuración de la red, y la ubicación de carga y generación, la energía producida descentralizadamente evita que una cantidad equivalente sea transportada a gran distancia, con las pérdidas añadidas. Por la misma razón, reduce la congestión en los sistemas de transporte hasta el consumidor final.

\_ Mejora la confiabilidad del suministro: Se reducen las probabilidades de fallas por caídas de las líneas de alta tensión al disminuir su porcentaje de uso.

\_ Esto es esencial en aplicaciones que requieren servicio continuo, por ejemplo, en aquellas con implicaciones sobre la salud y seguridad.

\_ Control de energía reactiva y regulación de tensión en la red de distribución: Una de las maneras de regular la tensión es a través del uso de transformadores con taps, o los conocidos búster. Al tener conectada generación distribuida es posible inyectar a la red de distribución una cantidad de potencia reactiva con la consecuente mejora de los niveles de voltaje.

\_ Aplanamiento de la curva de demanda: La producción de energía distribuida puede coincidir con puntas de demanda eléctrica evitando la utilización de potencias lejanas provenientes de centrales eléctricas que funcionen sólo durante éstas horas, a un precio muy alto comparado con la electricidad de las horas valle.

\_ Por ejemplo, los Sistemas Fotovoltaicos tienen su pico de producción en horas donde se incrementa el consumo debido al uso de sistemas de climatización en zonas de clima cálido.

\_ Da una opción de auto suministro en áreas donde la infraestructura de red no existe o es muy costosa, lo cual abre mercados en áreas remotas sin posibilidad de acceso a la red eléctrica o con altas restricciones ambientales.

\_ Aumenta las opciones de suministro eléctrico para los usuarios.

\_ Da mayor flexibilidad en la ubicación gracias a su tamaño pequeño y flexibilidad en la fuente energética.

\_ En casos de contingencia, es factible operar los sistemas en forma fraccionada, dando un mayor soporte a la región afectada.

\_ Permite minimizar el riesgo ante variaciones en el precio de la energía eléctrica suministrada por el comercializador.

\_ Limita el riesgo y la exposición de la inversión dado su tamaño, facilidad de ubicación y cortos plazos de instalación.

\_ Permite la utilización de combustibles baratos que no se usarían de otra forma, tal como residuos agrícolas, biogás de rellenos sanitarios, calor residual, etc.

\_ Incentivo a las energías renovables: Muchas tecnologías de generación por medio de fuentes renovables (como los SFVCR, caso de este proyecto) funcionan a escalas de pequeña generación y pueden ser adaptados hasta por los más pequeños usuarios. Esto abre una

posibilidad al uso de recursos que reducen la contaminación ambiental y están en armonía con el medio ambiente.

Cuando se interconecta una pequeña cantidad de fuentes de GD en un sistema de distribución, generalmente ésta no influye en la operación del sistema comparado con el gran respaldo que puede tener el sistema aguas arriba del mismo. Sin embargo, cuando el grado de penetración de la GD se vuelve significativo, la dinámica del sistema si se puede ver afectada. En este sentido, el análisis de la interconexión de GD es complejo, sobre todo teniendo en cuenta la amplia variedad de tecnologías y la configuración radial típica de las redes de distribución, las cuales han sido diseñadas para operar con flujos de potencia en un solo sentido. Algunos de los retos que van a encontrar los ingenieros y operadores de sistemas futuros donde se incorpore masivamente la generación distribuida son (Trebolle, 2006; Khoan, 2005)

\_ Frecuencia del sistema: Las desviaciones de la frecuencia nominal del sistema son causadas por los desbalances entre la oferta y la demanda. El operador de la red es el encargado de mantener la frecuencia dentro de intervalos estrechos. El incremento en la cantidad de generación distribuida afecta a la frecuencia del sistema, y estos generadores tienen el potencial de convertirse en "free riders" haciendo más complicado el proceso de control.

\_ Niveles de tensión: al instalarse generación distribuida cambia el perfil de voltajes de la red distribución a causa del cambio en las magnitudes de flujo. Generalmente el perfil de voltajes tenderá a subir, lo cual no es un problema en redes congestionadas que presenten problemas de bajo voltaje, pero sí lo es en el caso contrario.

\_ Esquemas de protección: Como ya se ha mencionado, la gran mayoría de las redes de distribución están configuradas en forma radial o como máximo en anillos abiertos. Esto genera patrones de flujo unidireccional, y el sistema de protecciones está diseñado en consecuencia. La instalación de generación distribuida convierte el flujo en bidireccional, haciéndose necesario incluir nuevo equipamiento de protección y redimensionar la red (tierras, corto circuito, capacidad de interrupción, sistemas SCADA, etc.)

\_ Energía reactiva: Muchas de las tecnologías de GD utilizan generadores asíncronos que no suministran energía reactiva a la red

\_ Inversores: Tecnologías como los Sistemas Fotovoltaicos y las celdas de combustible generan corriente directa, que debe “acondicionarse” a la red, vía inversores de potencia y sistemas de baterías. La conexión de estos equipos genera entonces problemas de calidad de potencia en la red como la inyección de armónicos.

\_ Alto costo de instalación: Varias de las tecnologías presentan altos costos de inversión con respecto a las tecnologías convencionales. Teniendo en cuenta que los precios aún no son estables y dependen mucho de los niveles de producción y del desarrollo tecnológico. Esto introduce factores de riesgo en la utilización de GD. El alto costo inicial es también una desventaja para los sistemas pequeños (residenciales) de GD.

\_ Entre los aspectos de seguridad, se encuentra la protección de la red contra operación aislada en el caso de que dicha operación no se desee. Lo que se busca es evitar que ante la ocurrencia de una falla, el sistema empiece a operar en islas. Un GD puede estar alimentando un corto circuito generando la posibilidad de incendio, o energizar un determinado sector de la red,

causando peligro de muerte a operadores que entren en contacto con ella que no son advertidos oportunamente de la posibilidad de que esté energizada. La forma de solución es colocar protecciones como relés (electrónicos o mecánicos) e interruptores de transferencia.

\_ Existen desarrollos tecnológicos que permiten integrar electrónica de potencia en los equipos de GD, que dan la posibilidad de aislarlos en caso de fallas en la red. Pero, por ejemplo, las empresas distribuidoras en los EE.UU (Adelfer et al., 2000) son renuentes a aceptar este tipo de tecnología, básicamente por falta de conocimiento y confianza, exigiendo la aproximación tradicional de relés e interruptores de potencia, lo cual termina duplicando equipos e imponiendo un sobre costo considerable.

\_ Igual situación ocurre en lo que respecta a la calidad de potencia en cuanto a la introducción de armónicos, oscilaciones de tensión y variaciones de frecuencia. A pesar de que los equipos de GD cuentan con protecciones adecuadas ante estos fenómenos, generalmente diseñadas de acuerdo a estándares y normas aceptadas (IEEE, por ejemplo.), las empresas exigen equipos con los cuales están familiarizadas, como relés de sobre y bajo voltaje, relés de frecuencia, etc. (IEEE, 2000-2003).

\_ Los estudios de conexión requeridos por las empresas pueden terminar siendo una barrera para la GD, ya sea por el tipo y costo de los estudios normalmente realizados, o por el plazo de los mismos.

\_ Incertidumbre en los costos: Algunas tecnologías de GD se encuentran en su fase de desarrollo, y por lo tanto sus costos no son estables, presentándose variabilidades que dependen del desarrollo tecnológico, o de las escalas de producción. El inversionista potencial ve entonces

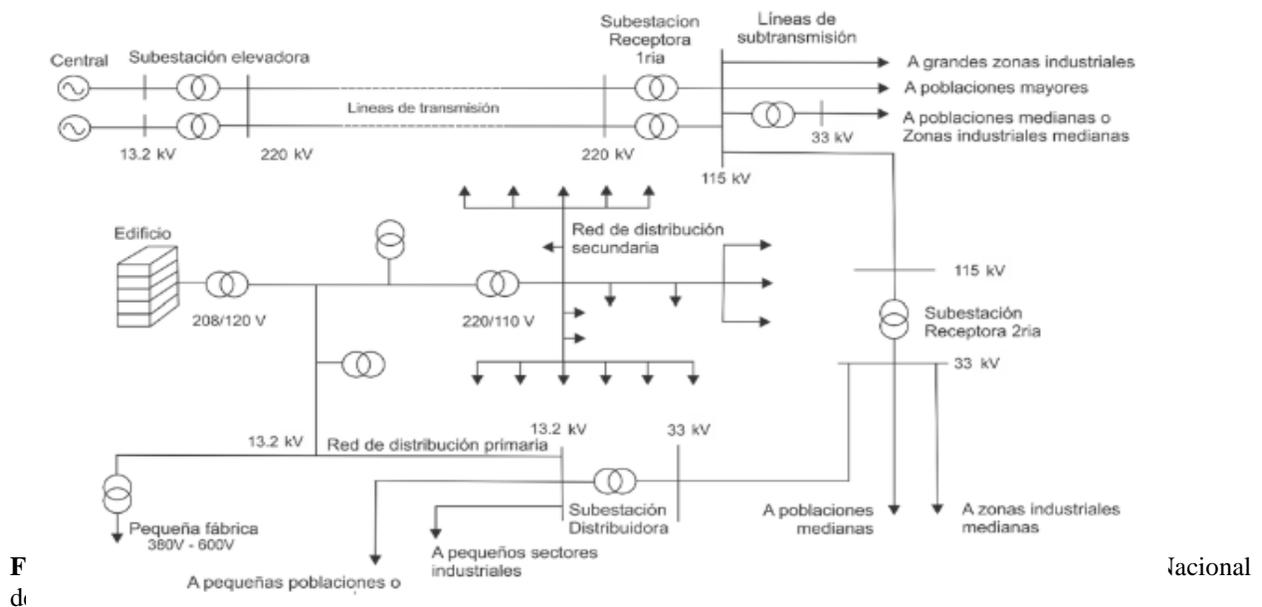
factores de riesgo adicionales, sobre todo en tecnologías que potencialmente presentan ventajas ambientales pero que su ciclo de aprendizaje no ha concluido todavía.

### 2.2.4 Red eléctrica convencional

En la actualidad, las redes eléctricas son fundamentalmente de tipo unidireccional con una infraestructura física implementada hace unas cuantas décadas. Su modo de operación, visto desde el enfoque tradicional, ha consistido en unas cuatro etapas principales, la primera es la etapa generación de energía de forma centralizada utilizando como fuentes principales de energía los recursos fósiles y nucleares (Ortega, 2013), a partir de este punto, arranca y continúan las etapas de transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica por parte de los centros de consumo (Ramírez & Cano, 2006). Este esquema general de operación es representado en la

**Figura 6**

*Etapas del Sistema Eléctrico- Tradicional.*



Si bien la estructura operativa básica de la red tradicional ha permanecido en gran medida igual durante las últimas décadas, las prácticas utilizadas para planificar, operar y regular legislativamente la red eléctrica han evolucionado sustancialmente desde el mismo momento de su creación ocurrido a finales del siglo XIX (Borlase,2012).

Por lo tanto, en la actualidad, debido a la longevidad de los sistemas eléctricos tradicionales, los procesos internos de operación están lejos de ser perfectos y muestran grandes deficiencias como: pérdidas de energía en líneas de transmisión y distribución, picos de consumo que abarcan cerca del 20% de la capacidad de generación y desabastecimiento progresivo en sus circuitos debido a la topología jerárquica al momento de ocurrir un fallo en algún punto del sistema (Farhangi,2010). Además, factores como: aumento de población, crecimiento de demanda de energía, el cambio climático global, fallas en los equipos, problemas de almacenamiento de energía, las limitaciones de capacidad de la generación de electricidad, la comunicación unidireccional y la disminución de los combustibles fósiles (Gungor *et al*; 2011) se han convertido en limitaciones críticas de los sistemas actuales de electricidad.

Por otro lado, el acelerado y elevado consumo de recursos fósiles que desde la segunda mitad del siglo anterior ha sido más severo, constituye la causa más significativa del calentamiento global. (Suarez, 2010). Por consiguiente, los niveles de contaminación pueden ser mayores para los próximos años si no se controla la utilización de los agentes contaminantes, puesto que, según las estadísticas realizadas por la Agencia internacional de Energía (IEA), no se espera un agotamiento de los combustibles fósiles en un corto tiempo sino más bien se prevé que el desabastecimiento inicie en unas cuantas décadas aunado con los pronósticos de un aumento del consumo de energía eléctrica año tras año como se expresa en “*International Energy*

Agency (IEA), *Key World energy Statistics*”, 2017. Un claro ejemplo de este pronóstico, radica en el crecimiento económico e industrial de países asiáticos y algunos de sur y centro América que pueden desencadenar una demanda energética cada vez mayor (Suarez, 2010; Boillot, 2014)

Por lo tanto, las restricciones técnicas expuestas anteriormente complementadas con las exigencias ambientales y sociales en torno a la contaminación y al cambio climático, ha provocado el fortalecimiento de políticas energéticas que buscan por un lado diversificar la matriz energética fomentando el uso de recursos energéticos no convencionales y por el otro, proporcionar las bases para evolucionar hacia nuevas estructuras denominadas redes inteligentes (Smart Grid-SG) (W. Qiao *et al*; 2010).

### 2.2.5 Redes Inteligentes

Una Smart Grid (SG), también llamada red eléctrica inteligente de energía, red inteligente, red del futuro, red integrada entre otros nombres, corresponde a una mejora de la red eléctrica del siglo XX (Fang *et al*; 2012) o un estado de progreso de las redes eléctricas actuales (Ghoravi & Ghafurian, 2011; Yoldas *et al*; 2017).

De acuerdo a la definición del grupo de reguladores europeo de electricidad y gas (ERGEG), una red inteligente es una red eléctrica que puede integrar eficientemente el comportamiento de todos los usuarios conectados a esta, los generadores, los consumidores y aquellos que hacen ambas cosas con el propósito de asegurar un sistema eléctrico económicamente eficiente y sostenible con bajas pérdidas y altos niveles de calidad, seguridad y confiabilidad en el suministro de energía eléctrica. (Ergeg, 2010).

## Figura 7

### *Estructura Básica de una Micro Red Inteligente.*



**Fuente:** E. (ELECTRIC P. R. INSTITUTE), “EPRI SMART GRID DEMONSTRATION INITIATIVE.” California USA, p. 104, 2017.

En la Figura 7 se presenta una topología de red inteligente definida en el Instituto norteamericano de Investigación de Energía **Eléctrica** EPRI, cuyos principales componentes o características son: (Yoldas et al; 2017; Chowdhury et al; 2009; Chaves et al; 2011; Bayindir et al; 2016).

- ✓ Infraestructura de comunicación robusta (Bidireccional)
- ✓ Generadores distribuidos
- ✓ Respuesta a la Demanda
- ✓ Interfaces entre cliente y Operadores de red (OR).
- ✓ Vehículos eléctricos
- ✓ Gestión de Activos
- ✓ Automatización red distribución

- ✓ Sistemas de Almacenamiento
- ✓ Sistemas de medición inteligente

Una de las cualidades más destacadas de las redes inteligentes es la integración de fuentes de generación distribuida que abarcan indiscutiblemente los recursos energéticos no convencionales. Estas políticas han hecho que países industrializados fortalezcan el uso de fuentes renovables con la fuerte intención de ayudar a reducir la generación de agentes contaminantes y de esta manera desacelerar el cambio climático y reducir el calentamiento global (Chowdhury *et al*; 2009). Por tal motivo, es de gran importancia para los objetivos de este trabajo enfocarse en los generadores distribuidos principalmente en los sistemas de generación fotovoltaica.

### 2.2.5 Sistemas Fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos PV (siglas en inglés Photovoltaic Systems) o FV, son los encargados de producir energía eléctrica por medio de la energía solar para dar un uso rentable donde no se puede acceder con las líneas eléctricas convencionales (Escamilla, 2011, Paredes,2014).

Además de ser utilizados en lugares apartados hoy en día se están utilizando para diversas aplicaciones como es la conexión a la red eléctrica (Chamana & chowdhury, 2014).

De esta manera se pueden clasificar a los sistemas fotovoltaicos como:

1. Sistemas aislados de energía solar fotovoltaica
2. Sistemas fotovoltaicos conectados a la red.

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica es el principal objetivo de este trabajo, debido a que tiene ventajas económicas importantes porque no requieren sistemas de almacenamiento para las horas de nula o baja radiación solar (Escamilla, 2011).

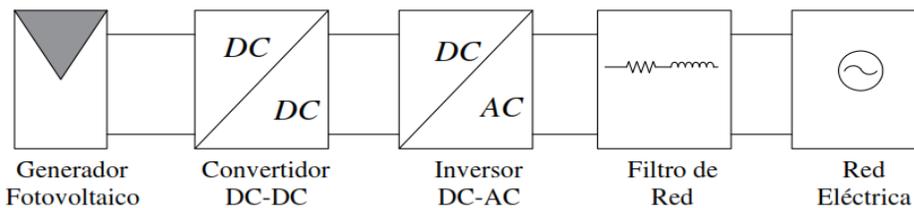
### 2.2.6 Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red.

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica se diferencian de los sistemas autónomos aislados en que estos últimos tienen un sistema de acumulación de energía para lapsos de tiempo en los cuales no se cuenta con la suficiente radiación solar.

Estos sistemas están formados por paneles fotovoltaicos los cuales inyectan potencia a la red de distribución siguiendo los estándares y requerimientos de la empresa eléctrica local para dicha interconexión. De esta manera los principales componentes de un sistema fotovoltaico conectado a la red según (Escamilla, 2011), se muestra en la Figura 4, donde consta de una primera etapa del generador fotovoltaico, una etapa de conversión DC/DC basado en un convertidor, una etapa del generador fotovoltaico, una etapa de conversión DC/DC basado en un convertidor, una etapa del

**Figura 8**

*Componentes Básicos de un Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red.*



**Fuente:** “Simulación y evaluación de sistemas fotovoltaicos residenciales conectados a la red eléctrica, Jara & Galarza, 2015).

### 2.2.7 Calidad de Potencia

Es importante identificar las diversas restricciones y problemáticas reportadas en la literatura en el momento en el cual se lleva a cabo la integración de recursos energéticos distribuidos en las redes eléctricas de distribución tradicionales, enfocado principalmente en los impactos producidos por los sistemas fotovoltaicos conectados directamente a la red eléctrica.

Según lo reportado en (Adefarati & Bansal, 2016), los impactos significativos de la integración de unidades de DG renovables en el sistema de distribución no solo ofrecen beneficios técnicos, ambientales, y económicos a sistema de distribución sino también abarca en gran medida a los consumidores. Algunos de los beneficios reportados por los operadores de red son: el mejoramiento en la regulación de tensión del alimentador y reducción de la cargabilidad de los ramales en el momento de utilizar arreglos fotovoltaicos y/u otro tipo de tecnología (Srisaen & Sangswang, 2006).

No obstante, los sistemas fotovoltaicos distribuidos conectados a la red presentan efectos adversos sobre las características de la carga, la calidad de la energía y la estabilidad de las redes eléctricas regionales debido a su aleatoriedad y volatilidad (Chi et al; 2017). Si los sistemas fotovoltaicos no están ubicados de manera correcta, podría resultar en un aumento en las pérdidas del sistema de energía, caída de tensión, armónicos y problemas en la estabilidad de la tensión (Mahela & Ola, 2016)

Estudios recientes han mostrado que los dispositivos electrónicos que integran el inversor, el cual sirve de interfaz entre el arreglo fotovoltaico y la red eléctrica, influyen en la

calidad de la potencia en el punto de acople, relacionado principalmente con la alteración en el perfil de tensión y en la aparición de corrientes armónicas, provocando aumento en los valores de THD tanto para tensión como para corriente. También pueden provocar problemas de estabilidad, y de desbalance entre muchos otros (Urbanetz *et al*; 2012).

En (Eltawil & Zhao, 2010, Patsalides *et al*; 2012) y se muestra claramente que, en una red de distribución con inversores solares conectados directamente a red, las fluctuaciones en la potencia de salida son causadas por el paso y sombra de nubes los que provoca efectos significativos en los valores de las variaciones de tensión. Esto comprueba, que existe una correlación entre las condiciones climáticas y el comportamiento del sistema que influye directamente sobre la aparición o profundidad de las perturbaciones sobre la red.

Los problemas relacionados con la calidad de la potencia radican básicamente en dos situaciones claramente definidas, la primera es la naturaleza intermitente de la energía solar puesto que el potencial de salida de los arreglos solares dependerá directamente de la radiación y temperatura al cual el panel este expuesto, lo cual ocasionará rápidas y variantes fluctuaciones en la tensión y potencia de salida, y la segunda es la composición interna del inversor de inyección a red, ya que por estar compuesto de convertidores electrónicos de potencia que son dispositivos de conmutación, convierten a este elemento en un dispositivo de naturaleza no lineal, que al momento de hacer la conexión desconexión a la red o en momentos de baja cargabilidad, genera transitorios e inyección de Corrientes armónicas afectando la forma de onda, generando fluctuaciones y muchos otros impactos negativos para la calidad de la potencia (Eltawil & Zhao, 2010).

Según lo desarrollado en (Camilo & Cadavid, 2016), una síntesis de los fenómenos de calidad de la potencia más representativos reportados en literatura caracterizados por anomalías en las formas de onda de las señales de tensión y corriente al utilizar arreglos fotovoltaicos en redes de distribución son los siguientes:

- ✓ Elevaciones y huecos de tensión
- ✓ Desbalance de tensión y corriente
- ✓ Fluctuaciones de tensión.
- ✓ Flujo de potencia inversa.
- ✓ Armónicos de tensión y corriente
- ✓ Resonancias y aparición de componentes DC.

Por otro lado, los problemas en las redes de distribución se pueden profundizar en el momento en el cual los niveles de penetración dentro de los alimentadores tomen elevados porcentajes, problemas relacionados con aparición de flujos de potencia inverso, posibles aumentos en corrientes de corto circuito, aumento de pérdidas, sobrecarga en conductores, problemas en el sistema de protecciones, inyección de armónicos y posibles afectaciones en el comportamiento del factor de potencia son los conflictos que más se destacan (Hernández & Medina, 2006, Bayindir *et al*; 2016, Nguyen *et al*; 2016, Gonzalez,2007).

### 2.3 Marco Jurídico.

De acuerdo a la temática central de la investigación se presenta un breve resumen de la normatividad vigente en Colombia para sistemas de energía eléctrica y solar, según las normas

técnicas colombianas publicadas por el ICONTEC. Se distinguen dos grandes grupos de normas: aquellas que tratan sobre sistemas de energía solar, se refieren a colectores solares, es decir dispositivos para convertir la energía solar en energía térmica; y aquellas que tratan sobre sistemas fotovoltaicos, que permiten convertir la energía lumínica (y por tanto solar) en energía eléctrica. Se presenta un listado de estas normas agrupadas por categorías temáticas: tipo de decreto, terminología, sus objetivos principales y año.

**Tabla 1**

*Normas Técnicas de los Sistemas de Energía en Colombia.*

Ley- Decreto- Artículo	Descripción, regulaciones y objetivos principales.
<b>Normatividad Energía eléctrica</b>	
<b>Ley 1715 de 2014</b>	En el año 2014, fue aprobada por el Congreso de la República de Colombia la Ley 1715 de 2014, “Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional”, Ley por medio de la cual se expide el marco normativo colombiano para la promoción y desarrollo de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable en Colombia. A la fecha el Gobierno y las entidades delegadas por la Ley para su reglamentación han expedido las siguientes normas:
<b>Decreto 2492 de 2014</b>	“Por el cual se adoptan disposiciones en materia de implementación de mecanismos de respuesta de la demanda”.
<b>Decreto 2143 de 2015 “</b>	Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en el Capítulo III de la Ley 1715 de 2014.”
<b>Resolución UPME 0281 de 2015</b>	“Por la cual se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala”
<b>Resolución CREG 024 de 2015</b>	“Por la cual se regula la actividad de autogeneración a gran escala en el Sistema Interconectado Nacional (SIN)”.
<b>Decreto 1623 de 2015</b>	“Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política para la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional y en las Zonas No Interconectadas”
<b>Resolución Ministerio de Ambiente 1312 de 11 agosto de 2016 “</b>	Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA, requerido para el trámite de la licencia ambiental de proyectos de uso de fuentes de energía eólica continental y se toman otras determinaciones”.

<b>Resolución Ministerio de Ambiente 1283 de 8 agosto de 2016</b>	“Por la cual se establece el procedimiento y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energías renovables – FNCER y gestión eficiente de la energía, para obtener los beneficios tributarios de que tratan los artículos 11, 12, 13 y 14 de la Ley 1715 de 2014 y se adoptan otras determinaciones”
<b>Decreto 348 de 2017</b>	“Por el cual se adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política pública en materia de gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala”.
<b>Decreto 1543 de 2017</b>	“Por el cual se reglamenta el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía, Fenogé”
<b>Resolución CREG 167 de 2017</b>	“Por la cual se define la metodología para determinar la energía firme de plantas eólicas”
<b>Resolución CREG 201 de 2017</b>	“Por la cual se modifica la Resolución CREG 243 de 2016, que define la metodología para determinar la energía firme para el Cargo por Confiabilidad, ENFICC, de plantas solares fotovoltaicas”
<b>Resolución CREG 015 de 2018</b>	“Por la cual se establece la metodología para la remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional”.
<b>Resolución CREG 030 de 2018</b>	“Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional”
<b>Resolución CREG 030 de 2018 y 038 de 2018</b>	“Por la cual se regulan las actividades de generación a pequeña escala y generación distribuida. Define las reglas que permiten a los usuarios conectarse al Operador de Red (OR) de manera fácil y sencilla, sea como autogeneradores o generadores distribuidos”.
<b>NTC 1736, ENERGÍA SOLAR. (24/8/2005):</b>	Esta norma define la nomenclatura para variables de radiación solar, parámetros meteorológicos, y parámetros de orientación y localización superficial.
<b>NTC 2775 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.</b>	Esta norma sólo contiene definiciones referentes a sistemas fotovoltaicos, acordes con la simbología establecida en la norma NTC 1736.
<b>NTC 5513, (29/8/2007):</b>	Dispositivos fotovoltaicos parte 1: medida de la característica intensidad tensión de los módulos fotovoltaicos
<b>NTC 5549, (16/11/2007):</b>	sistemas fotovoltaicos terrestres, generadores de potencia. generalidades y guía.
<b>NTC 4405, (24/06/1998):</b>	Eficiencia energética. evaluación de la eficiencia de los sistemas solares fotovoltaicos y sus componentes.

**Fuente:** Elaboración propia en base algunas normas técnicas sobre generación de energía eléctrica y sistemas fotovoltaicos en Colombia.

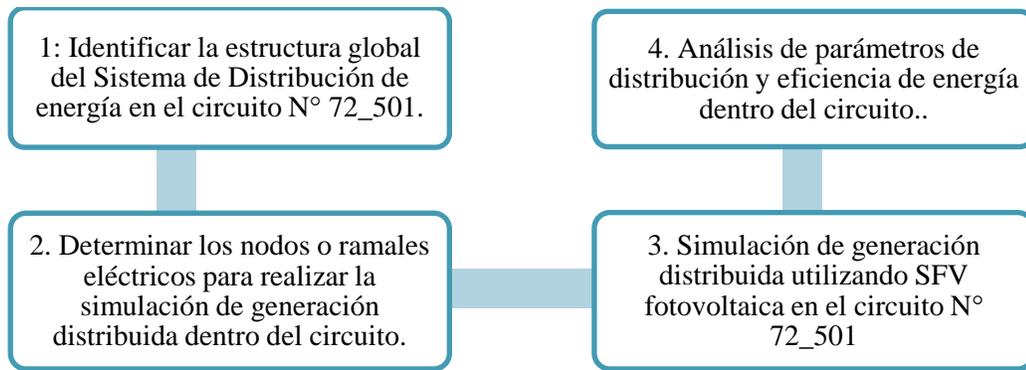
## CAPITULO 3: METODOLOGÍA

### 3.2 Fase de Ejecución de la Investigación

La realización de este proyecto se llevará a cabo mediante 4 fases que se explican a continuación.

**Figura 9**

*Metodología para la Simulación de Generación Distribuida en una Red de Distribución de Energía en el Circuito N° 72\_501 de la Subestación Puerto Araujo (Santander)*



**Fuente:** Autoría Propia.

#### 3.2.1 Fase 1: Identificar la estructura global del Sistema de Distribución de energía en el circuito N° 72\_501.

En esta fase se realizará una caracterización global de la red de la Subestación Puerto Araujo, ubicada en el Municipio de Cimitarra (Santander), se especificarán los circuitos que la componen, la longitud, los puntos de apoyo y la ubicación geográfica del sistema de distribución de Red.

### **3.2.2 Fase 2: Determinar los nodos o puntos eléctricos para realizar la simulación de generación distribuida dentro del circuito.**

Se realizó una evaluación de los posibles sitios o puntos de apoyo dentro de la red del Circuito N° 72\_501. Teniendo en cuenta los aspectos técnicos de la red como: perfiles de tensión, niveles de corto circuito, capacidad de conductores, pérdidas, etc.). Estos puntos son los que presentan más alteraciones y niveles bajos de tensión dentro del sistema.

### **3.2.3 Fase 3: Simulación de generación distribuida utilizando SFV fotovoltaica en el circuito N° 72\_501**

En esta fase se aplicaron varias simulaciones para el análisis de los efectos que tiene la localización de SFVCR en distintos puntos de distribución de baja tensión del circuito N° 72\_501 para determinar los efectos que tiene la metodología de generación distribuida sobre el sistema de distribución de energía.

### **3.2.4 Fase 4: Análisis de parámetros de distribución y eficiencia de energía dentro del circuito.**

Posteriormente después de obtener los datos y parámetros eléctricos de cada una de las simulaciones del SFV dentro de la red del circuito, se analizan los parámetros de distribución de energía donde se observan características como: capacidad de rendimiento energético como el voltaje, tensión, potencia, cargabilidad, pérdidas técnicas dentro del circuito. Así mismo se establecer los beneficios de la implementación de energías renovables o SFV dentro de los Sistemas de distribución de energía de la región.

Las simulaciones realizadas en Digsilent, consisten en el balance de energía del circuito. Dichas simulaciones nos permitirán establecer mejoras en el suministro de energía estabilizando los perfiles de tensión a (13200 voltios) en los 4 nodos o ramales seleccionados, con el fin de reducir las pérdidas de potencia en el sistema.

## CAPITULO 4: ANALISIS DE RESULTADOS

En esta fase se realiza el análisis de cada una de las fases metodológicas teniendo en cuenta los objetivos planteados.

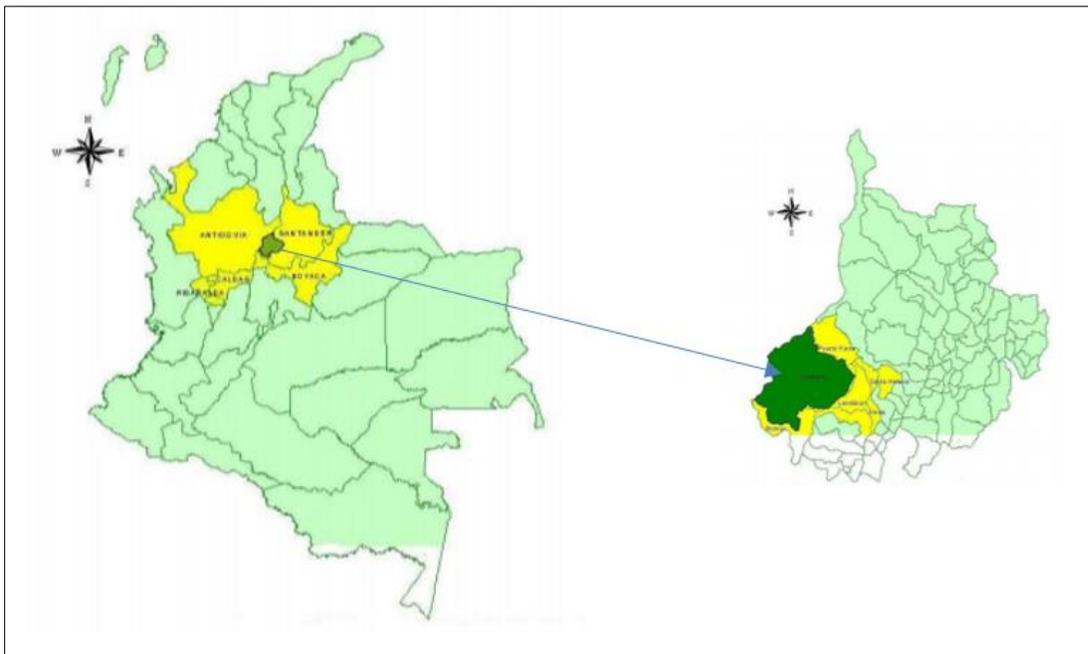
### 4.1 Identificar la estructura global del Sistema de Distribución de energía en el circuito N° 72\_501.

#### 4.1.1 Área de Estudio

El presente trabajo de investigación se realizó en la Subestación de Puerto Araujo ubicado en el Municipio de Cimitarra (Santander), específicamente en el circuito 72\_501.

#### Figura 10

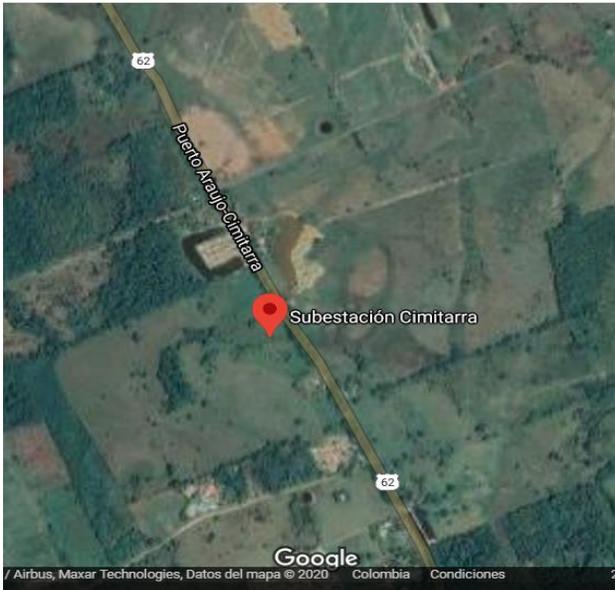
*Ubicación General del Municipio de Cimitarra (Santander)*



Fuente: [http://www.cimitarra-santander.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.cimitarra-santander.gov.co/informacion_general.shtml)

## Figura 11

### *Ubicación Satelital de la Subestación Puerto Araujo (Santander)*



**Fuente:** Google maps

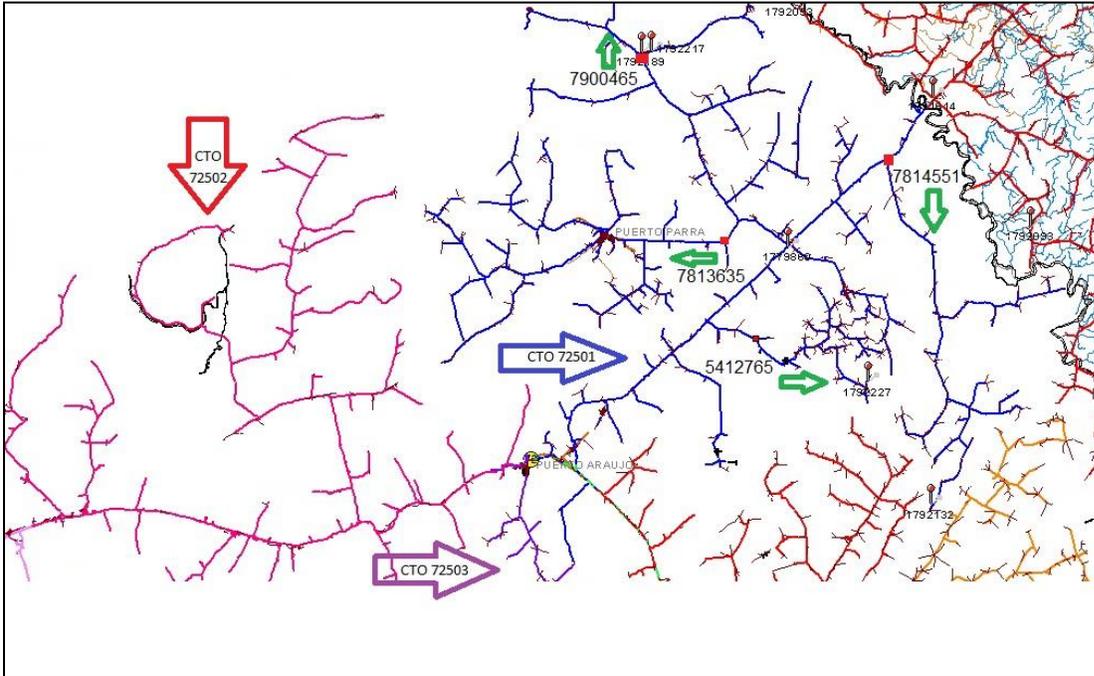
#### 4.1.2 Estructura global del Sistema de Distribución de energía en el circuito N° 72\_501.

Este circuito distribuye el suministro de energía para el municipio de Cimitarra (Santander) y pertenece a la electrificadora ESSA y las veredas que se benefician de este suministro son las siguientes:



**Figura 13**

*Descripción de los Circuitos que Integran el Sistema de Distribución de Energía de la Subestación Eléctrica Puerto Araujo (Santander).*



**Fuente:** Planos Técnicos de la Electrificadora de Santander (ESSA)

**Tabla 3**

*Características Generales del Circuito N° 72\_501.*

<b>Longitud del Circuito</b>	<b>432.20 kms aprox</b>
Cantidad de transformadores	448
Carga Instalada	8543 KVA
Clientes o Usuarios del SDL	4578

**Fuente:** Elaboración propia.

## 4.2 Determinar los nodos o puntos eléctricos para realizar la simulación de generación distribuida dentro del circuito.

Los nodos y puntos eléctricos donde se aplicó la simulación de generación distribuida dentro de la red del circuito fueron 4 puntos donde se analizaron los niveles de tensión, voltaje, cargabilidad. Así mismo este tipo de simulaciones permite identificar y analizar los parámetros que varían en el sistema a lo largo del tiempo, además de dimensionar los valores de pérdidas de potencia en las líneas y en los transformadores del sistema. A continuación, se detallan los nodos que se utilizaron:

**Tabla 4**

*Nodos o Ramales Seleccionados en el Circuito.*

5412765
7813635
7814551
7900465

**Fuente:** Elaboración Propia.

## 4.3 Análisis Simulación de Generación Distribuida en los nodos eléctricos del circuito.

Se realizaron las simulaciones aplicando en cada uno de los nodos eléctricos o ramales diferentes kilovatios al sistema con el fin de estabilizar los parámetros de tensión. Los escenarios de simulación dentro de circuito se ajustaron según las cargas presentes en los ramales y se fue inyectando cargas hasta lograr estabilizar el sistema de distribución de energía a 13.200 voltios, buscando una similitud entre el sistema real y el modelado.

Para estudiar e identificar el impacto de la GD en los sistemas de potencia se ajustaron las simulaciones utilizando dos alternativas que se describe a continuación. Así mismo se ajustó nivel de tensión de cada uno de los nodos, basándose en los datos del sistema con generación alternativa ofrecidos por DigSilent® Powerfactory.

En la primera Alternativa se ajustaron las simulaciones y se inyectaron los nodos utilizando una potencia entre 100-300 KW, esto se debe a que en esa hora el sistema presentaba más fluctuaciones.

### Tabla 5

*Alternativas de Simulación con Potencias Diferentes.*

Alt 1	
Nodo	FV [kW]
5412765	100
7813635	300
7814551	300
7900465	100

**Fuente:** Elaboración propia

En la segunda alternativa se inyectaron potencias homogéneas a los cuatro (4) ramales eléctricos porque las fluctuaciones de energía eran similares.

**Tabla 6**

*Alternativas de Simulación Con Potencias Homogéneas.*

Alt 2	
Nodo	FV [kW]
5412765	100
7813635	100
7814551	100
7900465	100

La carga máxima de inyección de potencia en el sistema estuvo entre 100 -300 KW teniendo en cuenta los niveles de tensión de cada uno de los ramales.

#### 4.3.1 Comportamiento de las variables eléctricas del Circuito

El comportamiento de las variables eléctricas del Circuito N° 72\_501, utilizando las alternativas de simulaciones arrojó los siguientes datos globales:

**Demanda Máxima del circuito:** 1,673 MVA.

**Tabla 7**

*Variables Eléctricas del Circuito N° 72\_501.*

Escenarios de Simulación	72.501	Carga %	Vmin p,u	S [MVA]	P [MW]	Q [VAR]	I [kA]	Perdidas [MW]
	Sin Proyecto	30,14	0,814	1,660	1,563	0,560	0,070	0,155
Alt1	Con Proyecto	14,93	0,903	0,768	0,642	0,421	0,032	0,031
Alt 2	Con Proyecto	21,99	0,863	1,186	1,086	0,476	0,050	0,075

De acuerdo con los resultados obtenidos en la simulación del Comportamiento de los parámetros eléctricos del sistema concuerda con los análisis reportados por (Hernández, 2013), es de gran importancia en cualquier proceso de simulación, control o supervisión de un sistema eléctrico que haya similitud entre el sistema real y el modelo, y esta debe ser tal que los resultados que se obtengan sean lo más precisos posibles.

Ese mismo autor menciona que al agregar una fuente de generación a la red de distribución se debe garantizar que la máxima inyección de potencia de esta fuente durante el análisis sea la misma potencia máxima real que podría entregar, o que los parámetros de cualquier elemento del sistema tengan un valor pertinente de acuerdo con el nivel de tensión o tipo de red. Por tal razón, a lo largo de la simulación las fuentes de GD están entregando el 100 % de su capacidad instalada.

En relación al comportamiento del circuito según los resultados obtenido y la aplicación de métodos de GD, nos sirve para reducir las pérdidas de potencia en el sistema del 0,155 al 0,031 MW inyectándole diferentes potencias al sistema.

La manera en que los nodos en los que están presentes los sistemas de generación distribuida suplen la demanda de las cargas presentes en el sistema ocasionan que los niveles de corriente presente en la mayoría de nodos y transformadores del sistema disminuya del 30,14% que se encuentra en el sistema real a valores entre el 14,23- 21,99%.

## CAPITULO 5: CONCLUSIONES.

En el presente trabajo se dio cumplimiento a todos los objetivos planteados en el proyecto, y adicionalmente, se utilizó una metodología o herramienta que permitió dar cumplimiento a la principal meta del proyecto que consistió en simular y analizar el impacto positivo que tienen la Generación distribuida (GD), utilizando SFV sobre la estabilidad de los parámetros eléctricos que influyen en el suministro y distribución de energía dentro del circuito como son: tensión, voltaje, cargabilidad de conductores generando una disminución en las pérdidas técnicas y la inclusión de energías limpias en el sistema juegan un papel importante a largo plazo y producirán cambios substanciales en el perfil tecnológico ambiental mejorando la calidad del suministro de energía en la subestación eléctrica de Puerto Araujo (Santander).

Los transformadores presentes en el sistema cumplen originalmente la función de adecuar el nivel de tensión de los nodos de generación convencional para suplir la demanda de las cargas. Al utilizar alternativas de simulación de generación distribuida que suplen la demanda de ciertos nodos del sistema, la demanda total de las cargas presentes en el sistema disminuye, lo que ocasiona que los valores de pérdidas en los nodos disminuyan en la mayoría de ellos, ya que las corrientes presentes son menores a las de los sistemas originales.

Se debe tener en cuenta que, para obtener resultados óptimos de la GD, se debe realizar una buena planeación y distribución a través de la red de los generadores a instalar, esto se puede cumplir validando los puntos donde los perfiles de tensión están bajos y el consumo de cada circuito.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudio previo de ubicación óptima de GD en los sistemas, cuyo objetivo sea determinar la ubicación y el tamaño de múltiples fuentes de GD y minimizar las pérdidas de potencia totales del sistema, permitiría aumentar las ventajas de la inclusión de GD en el sistema, y restringiría la cantidad de líneas que presentaron un aumento en el nivel de pérdidas. Así mismo se recomienda realizar estudios más detallados y exhaustivos del comportamiento de las variables eléctricas incorporando todos los circuitos que componen el sistema de distribución y suministro de energía de la Subestación eléctrica de Puerto Araujo Santander.

Si bien la implementación de GD es de gran contribución para el sistema y los clientes del mismo, se deben realizar estudios económicos para validar la rentabilidad de la ejecución de estos proyectos, y las inversiones que se deben realizar a todos los sistemas con el fin de obtener buenos y confiables resultados, frente a los múltiples beneficios que conlleva su desarrollo.

## BIBLIOGRAFIA

- Ackermann, T., Andersson, G., and Söder, L. (2001). Distributed generation: a definition. *Electric power systems research*, 57(3):195–204.
- Adelfer, Eldridge, Starrs, “Making Connections: Case Studies of Interconnection Barriers and their Impact on Distributed Power Projects”, National Renewable Energy Laboratory, May 2000.
- Adefarati. T and Bansal. R. C, “Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, no. 7, pp. 873–884, 2016.
- Alexis. F, and Mera. D, “Modelamiento y control de una microrred en modo isla,” Universidad de los Andes, 2015.
- Ayache. K, Cheriti. A, Labar. H, and Sandali. A, “Practical considerations for a photovoltaic system connected to the network,” in *2015 IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, IEEE, may 2015.
- Bayindir. R, I. Colak, G. Fulli, and K. Demirtas, “Smart grid technologies and applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 66, pp. 499–516, Dec. 2016.
- B.M. Buchholz and C. Boese, *The Impact of Dispersed Power Generation in Distribution Systems*. CIGRE/IEEE International Symposium, pp. 198-203, 2003.

- Borlase. S, *Smart grids : infrastructure, technology, and solutions*, Primera Ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- Bollen, M. ; Hassan, F. (2011a). Power System Performance. In *Integration of Distributed Generation in the Power System*, pages 84–101. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- Boillot. M, *Advanced Smart Grids for Distribution System Operators*, vol. 1. EEUU-ENGLAND: Wiley, 2014.
- Cervantes. D and Muñoz. O, “Diseño de control y simulación de un sistema de generación de energía eléctrica basado en paneles fotovoltaicos un inversor trifásico conectado a la red y una unidad de almacenamiento smes,” 2010.
- Chamana. M and Chowdhury. B. H, “Impact of smart inverter control with PV systems on voltage regulators in active distribution networks,” in *2014 11th Annual High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies (Photonics for Energy)*, IEEE, dec 2014.
- Chaves. C, Chaves.L, and J. Villota, “Generación Distribuida y Redes Inteligentes “Administración y Control Efectivo de la Red Eléctrica mediante Smart Grid, Beneficios Sociales y Económicos en la Ciudad de Pasto,” Universidad de Nariño, 2011.

- Chi. Z, Pandian. L, Xueying. Z, Jie. Z, Wei. Z, Jiajian. H, Yu. X, and Qi. X, “Research on the impacts of grid-connected distributed photovoltaic on load characteristics of regional power system,” *Proc. 2017 Int. Conf. Green Energy Appl. ICGEA 2017*, pp. 95–99, 2017.
- Chowdhury, S., Chowdhury, S., and Crossley, P. (2009). Microgrids and active distribution networks
- Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), C. (2015). Resolucion CREG 024 de 2015.
- Congreso de la Republica de Colombia (2014). Ley 1715 de 13 de mayo de 2014, Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.
- ERGEG, “Position Paper on Smart Grids An ERGEG Conclusions Paper Treatment of Responses,” p. 38, 2010.
- E. (ELECTRIC P. R. INSTITUTE), “EPRI SMART GRID DEMONSTRATION INITIATIVE.” California USA, p. 104, 2017.
- IEEE STANDARD 1547; Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. 2003.
- Escamilla. J, “Sistemas fotovoltaico de 8kw interconectado a la red”, 2011.
- ESSA. (s.f.). Normas para el Cálculo y Diseño de Sistemas de Distribucion. Bucaramanga, Santander.

- Farhangi, H. “The path of the smart grid,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 8, no. 1, pp. 18–28, Jan. 2010.
- Gharavi. H. and R. Ghafurian, “Smart Grid: The Electric Energy System of the Future [Scanning the Issue],” *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 917–921, Jun. 2011.
- González. P-Castrillo, “Influencia de una Instalación Fotovoltaica Conectada a Red sobre la Calidad de Potencia de una Red de Distribución,” *Peandes.Unex.Es*, 2007.
- Gungor. V.C, Sahin. D, Kocak. T, Ergut. S, Buccella. C, Cecati. C, and Hancke G. P, “Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 7, no. 4, pp. 529–539, Nov. 2011.
- Haynes, R., Whitaker C. Connecting to the Grid. A Guide To Distributed Generation Interconnection Issues. International Renewable Energy Council (IREC), North Carolina Solar Center, 2007.
- Hatziargyriou. N, Asano. H, Iravani. R, and Marnay. C, “Microgrids,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 5, no. 4, pp. 78–94, Jul. 2007.
- Hernández A. F. P., Localización de fallas en alimentadores primarios de distribución de energía eléctrica considerando incertidumbres en la carga y con presencia de Generación Distribuida, Pereira: Universidad Tecnológica De Pereira, 2013.
- Hernández. J.C, and Medina. A, “Conexión de Sistemas Fotovoltaicos a la Red Eléctrica: Calidad de Suministro,” *Sumuntán*, vol. 23, pp. 33–44, 2006.

- IEEE Std 929-2000, “Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems”.
- IEEE (2003). IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. Number July.
- IEEE (2009). IEEE Std 1159 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- IEEE (2012). IEEE Std 1366TM-2012 - IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices, volume 2012.
- IEEE, *IEEE 1547.3 guide for monitoring, information exchange, and control of distributed resources interconnected with electric power systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007.
- International Energy Agency(IEA), “Key world energy statistics,” 2017.
- Jara. C and Galarza. P, “Simulación y evaluación de sistemas fotovoltaicos residenciales conectados a la red eléctrica,” 2015.
- Khoan Tran; Vaziri, M. “Effects of dispersed generation (DG) on distribution systems”.  
IEEE
- Power Engineering Society General Meeting. June 2005.

- Kopacak. N and Aydin. M, “Sample criteria for integration of solar plant systems to electrical distribution network,” in *2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, IEEE, nov 2015.
- Li. F, Qiao. W, Sun. H, Wan, Wang. H, J, Xia. Y, Xu. Z, and Zhang. P, “Smart Transmission Grid: Vision and Framework,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 2, pp. 168–177, Sep. 2010.
- [20] X. Fang, S. Misra, G. Xue, and D. Yang, “Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 14, no. 4, pp. 944–980, 2012.
- Mahela O.P, and Ola. S.R, “Impact of grid disturbances on the output of grid connected solar photovoltaic system,” in *2016 IEEE Students’ Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, 2016, pp. 1–6.
- Ministerio de Minas y Energía (2015). Decreto No. 2143.
- Ministerio de Minas y Energía (2017). Decreto 348 de 1 marzo de 2017.
- Mora J. A. H., “Metodología para el Análisis Técnico de la Masificación de Sistemas Fotovoltaicos como opción de generación distribuida en redes de baja tensión,” universidad nacional de Colombia sede Bogotá, 2012.
- Ministerio de Minas y Energía Colombia, “Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas

- RETIE,” p. 205, 2013.
- National Rural Electric Cooperative Association. “White Paper on Distributed Generation”. August 2007
- Nguyen. A, Velay. M, Schoene. J, Zheglov. V, Kurtz. B, Murray. K, Torre. B, and Kleissl. J, “High PV penetration impacts on five local distribution networks using high resolution solar resource assessment with sky imager and quasi-steady state distribution system simulations,” *Sol. Energy*, vol. 132, pp. 221–235, 2016.
- Ortega M. J. “Calidad de potencia en la interconexión de plantas FV en redes de distribución,” UNIVERSIDAD DE JAÉN, 2013.
- Puttgen. H.B., MacGregor.P.R., and Lambert F. C., “Distributed generation: semantic hype or the dawn of a new era?,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 1, no. 1, pp. 22–29, Jan. 2003.
- Rabinowitz, M. “Power systems of the future. 4”, *Power Engineering Review*, IEEE Volume 20, Issue 8, Aug. 2000.
- Ramírez. S. Castro and E. A. Cano Plata, *Calidad del Servicio de Energía Eléctrica*, Primera Ed. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2006.
- Servicios Energéticos Básicos Autónomos., “Tejados Fotovoltaicos: Energía solar conectada a la red eléctrica”, ProgenSA. Sevilla, España (2004)

- Srisaen. N and Sangswang. A, “Effects of PV grid-connected system location on a distribution system,” *IEEE Asia-Pacific Conf. Circuits Syst. Proceedings, APCCAS*, vol. 0, pp. 852–855, 2006.
- Santander, A. d. (Abril de 2014). Sitio Oficial de Cimitarra Santander. Obtenido de [http://www.cimitarra-santander.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.cimitarra-santander.gov.co/informacion_general.shtml).
- Short, T. (2003). *Electric Power Distribution Handbook*. Number C. CRC Press
- Suarez. P, “Impacto de la Generación Eólica y Solar en el Sistema Eléctrico de Baja California Norte,” Instituto Politecnico Nacional, 2010.
- Treballe, D. “La Generación Distribuida en España”. Tesis de Máster, Universidad Pontificia de Comillas, Madrid, 2006
- Unidad de planeación Minero Energética (UPME) (2016). Resolución No. 143 de 2016.
- Upme (2015). Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2015. page 184.
- UPME (2015). Resolución 281 del 2015.
- Urbanetz. J, Braun. P, and Rüther. R, “Power quality analysis of grid-connected solar photovoltaic generators in Brazil,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 64, pp. 8–14, 2012.
- Yoldas. Y, Ahmet. O, Muyeen. S. M, Vasilakos. V, and Alan.I, “Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, no. October 2016, pp. 205–214, 2017.