



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**Dimensionamiento del factor K de un transformador de distribución para la conexión *On Grid* de una granja de generación fotovoltaica de 300 kW**

**Guillermo Enrique Ospino De La Hoz**

**Universidad Nacional de Colombia**

**Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería eléctrica y electrónica**

**Bogotá, Colombia**

**2023**



# **Dimensionamiento del factor K de un transformador de distribución para la conexión *On Grid* de una granja de generación fotovoltaica de 300 kW**

**Guillermo Enrique Ospino De La Hoz**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería Eléctrica**

Director (a):

**Sandra Milena Téllez Gutiérrez, PhD.**

Línea de Investigación:

**Calidad de potencia**

Grupo de Investigación:

***GRISEC***

**Universidad Nacional de Colombia**

**Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería eléctrica y electrónica**

**Bogotá, Colombia**

**2023**





*A mis padres Ana, Nelson y a mi hermana Susana quienes con todo su amor, paciencia y esfuerzo hicieron posible el hecho de lograr una meta más, gracias por inculcar en mí su forma de afrontar las dificultades con mucho esfuerzo, valentía e integridad. A mi pareja Nathalia por su cariño y apoyo incondicional, a lo largo de todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias.*

*A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento me convirtieron en una persona mejor y que de una forma u otra me acompañaron en todo momento.*

*“Los científicos de hoy piensan profundamente en lugar de claramente. Se debe estar cuerdo para pensar con claridad, pero se puede pensar profundamente y estar completamente loco”*

*Nicola Tesla*

## Declaración de obra original

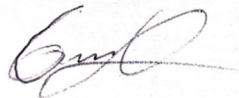
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



---

Nombre: Guillermo Ospino De La Hoz

Fecha 16/06/2023





## Resumen

En el presente documento se desarrolla una metodología por medio de herramientas computacionales, para calcular el factor  $k$  en un transformador de distribución conectado a una granja de paneles fotovoltaicos bajo distintos escenarios de operación, como son diferentes niveles de generación, capacidades de red y condiciones climáticas; esto con el fin de generar cálculos más acertados para el diseño óptimo en cuanto a su soportabilidad a contenido armónico, estos efectos son muy inciertos en este tipo generación cerca a la carga ya que carecen de posibilidades de estudios de calidad de energía conforme a su principal característica de ser proyectos nuevos que van a incorporar potencia a la red. Inicialmente, se hace una revisión bibliográfica de los conceptos claves alrededor de las tecnologías implementadas en proyectos de generación distribuida, se profundiza en el transformador de forma general y específica dirigida hacia los aspectos de diseño necesarios para su soportabilidad de fenómenos armónicos. Finalmente, se plantea una comparativa en cuanto a su desempeño teniendo en cuenta su cargabilidad máxima bajo la norma IEEE C57.12.110 de 2018 con los resultados obtenidos de las simulaciones.

**Palabras clave:** Armónicos, Calidad de potencia, Generación Distribuida, Transformador de Distribución.

# **K-factor sizing of a distribution transformer for the on-grid connection of a 300 kW photovoltaic generation farm.**

## **Abstract**

This paper develops a methodology using computational tools to calculate the k factor in a distribution transformer connected to a photovoltaic panel farm under different operating scenarios, such as different generation levels, network capacities and climatic conditions; this in order to generate more accurate calculations for optimal design in terms of its support to harmonic content, these effects are very uncertain in this type of generation close to the load since they lack the possibility of power quality studies according to its main characteristic of being new projects that will incorporate power to the network. Initially, a bibliographic review of the key concepts around the technologies implemented in distributed generation projects is made, deepening in the transformer in a general and specific way directed towards the necessary design aspects for its support of harmonic phenomena. Finally, a comparison is made regarding its performance taking into account its maximum loadability under the IEEE C57.12.110 standard of 2018 with the results obtained from the simulations.

**Key words: Harmonics, Power Quality, Distributed Generation, Distribution Transformer.**



# Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Abstract .....	X
Contenido .....	XII
Lista de Imágenes.....	XIII
Lista de Tablas .....	XV
Introducción .....	1
<b>1. Antecedentes y Fundamentos.....</b>	<b>7</b>
1.1    Generación distribuida.....	7
1.1.1    Sistemas de cogeneración.....	10
1.1.2    Hidrogeneradores de pequeña escala.....	11
1.1.3    Aerogeneradores .....	13
1.1.4    Granjas de generación solar fotovoltaica.....	14
1.1.5    Ámbito Colombiano.....	18
1.2    Los armónicos y su papel en inversores .....	20
1.2.1    Clasificación de inversores según la onda de tensión de salida.....	21
1.2.2    Tipos de inversores según su operación .....	23
1.3    El transformador .....	26
1.4    El factor K de transformadores .....	35
<b>2. Metodología y Análisis de resultados .....</b>	<b>37</b>
2.1    Parámetros iniciales de simulación .....	37
2.2    Modelo de simulación en MATLAB .....	38
2.3    Resultados obtenidos e interpretación comparativa.....	44
<b>3. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>47</b>
3.1    Conclusiones .....	47
3.2    Recomendaciones.....	48
<b>A. Anexo: Metodología de cálculo de penalización en la potencia nominal bajo norma IEEE C57.12.110 .....</b>	<b>49</b>
<b>B. Anexo: Resultados obtenidos en cada caso de simulación .....</b>	<b>51</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>53</b>

## Lista de Imágenes

Imagen 1. Aumento de proyectos vigentes de generadoras solares en MW 2020-2021. Tomado de [4].....	2
Imagen 2. Forma de onda y espectro de armónicos de los valores efectivos en la salida de corriente monofásica. Tomado de [5].....	3
Imagen 3. Ruta Metodológica .....	5
Imagen 4. Visualización de sistema interconectado a futuro. Tomado de [9].....	7
Imagen 5. Flujo de utilización de energía 1. Con cogeneración, 2. Sin cogeneración. Tomado de [8].....	10
Imagen 6. Ejemplo de turbina de gas a partir del ciclo Brayton. Tomado de [8].....	11
Imagen 7. PCH a filo de agua. Tomado de [12].....	12
Imagen 8. Sistema eólico de pequeña generación. Tomado de [14].....	13
Imagen 9. Capacidad instalada de energía eólica. Tomado de [15].....	14
Imagen 10. Funcionamiento y composición de célula fotovoltaica. Tomado de [8].....	15
Imagen 11. Panel fotovoltaico monocristalino. Tomado de [17] .....	16
Imagen 12. Panel fotovoltaico monocristalino. Tomado de [17] .....	16
Imagen 13. Sistema fotovoltaico conectado a la red. Tomado de [8] .....	17
Imagen 14. Proyectos solares y eólicos a 2023. Tomado de [22]. .....	19
Imagen 15. Proyección anual de la demanda de energía eléctrica (GWh-año). Tomado de [23]. .....	19
Imagen 16. Visualización de la aplicación de la transformada de Fourier en MATLAB....	20
Imagen 17. Equipos convertidores de energía Corriente Continua (CC) a Corriente Alterna (CA). Tomado de [24]. .....	21
Imagen 18. Señal de onda cuadrada. Tomado de [26].....	22
Imagen 19. Señal de onda semi-senoidal. Tomado de [24].....	22
Imagen 20. Señal de onda pura. Tomado de [24].....	23
Imagen 21. Sistema con inversor On-Grid. Tomado de [24].....	24
Imagen 22. Sistema con Microinversores. Tomado de [24].....	24
Imagen 23. Sistema con inversos off-grid. Tomado de [24].....	25
Imagen 24. Esquema monofásico y trifásico de inversor fotovoltaico. Tomado de [25] ...	26
Imagen 25. Diferentes ejemplos de transformadores. Tomado de [27] .....	26
Imagen 26. Esquema simplificado del circuito de un transformador. Tomado de [27].....	27
Imagen 27. Transformador monofásico. A) núcleo de dos columnas, B) Núcleo acorazado o Shell type. Tomado de [28] .....	28
Imagen 28. Transformador Trifásico. Tomado de [28].....	29
Imagen 29. Esfuerzos de cortocircuito radiales. Tomado de [31] .....	30
Imagen 30. Circuito equivalente de transformador. Tomado de [32] .....	32
Imagen 31. Líneas de flujo magnético transformador. Tomado de [32].....	33
Imagen 32. Señal descompuesta en su 3er y 5to.armonico Tomado de [33].....	33
Imagen 33. Señal de neutro con los armónicos de 3er orden de un sistema trifásico en Y. Tomado de [33].....	34
Imagen 34. Barrio Las Ferias Bogotá, Tomado de Google maps [36]. Zona azul 5 MVA, zona roja 45 MVA.....	37

Imagen 35. Configuración de entrada paneles Trina Solar TSM-310PD14.....	38
Imagen 36. Simulación de bloque PV. A. PV panel reducido. B. Salida demultiplexada de corriente, tensión y entradas para mediciones. ....	39
Imagen 37. Simulación de bloque Inversor. A. Inversor reducido. B. Flujo de corrientes en el inversor trifásico .....	40
Imagen 38. Módulo de simulación de transformador Trifásico y sus entradas en MATLAB. ....	41
Imagen 39. Simulación de ventana de núcleo con FEMM. A. Diseño de la malla con la opción fina en el software. B. disposición de las líneas de campo eléctrico por la energización de los devanados. ....	42
Imagen 40. Simulación de sistema de distribución.....	43
Imagen 41. Filtro de potencia para armónicos.....	43
Imagen 42. Relación del factor K promedio según la radiación solar en los paneles solares. ....	44
Imagen 43. Relación del factor K promedio según la temperatura de operación. ....	45
Imagen 44. Relación del factor K promedio debido a la demanda en porcentaje. ....	45
Imagen 45. Relación del factor K promedio debido a la capacidad demanda en MVA. ...	46

## Lista de Tablas

Tabla 1. Tipos de etapas de refrigeración.....	27
Tabla 2. Clasificación de medio aislante de transformadores según IEC 60137.....	30
Tabla 3. Accesorios adicionales de un transformador. ....	31
Tabla 4. Clasificación de factor K. tomado de: [34].....	35
Tabla 5. Coordenadas para uso en el software de simulación FEMM.....	41





# Introducción

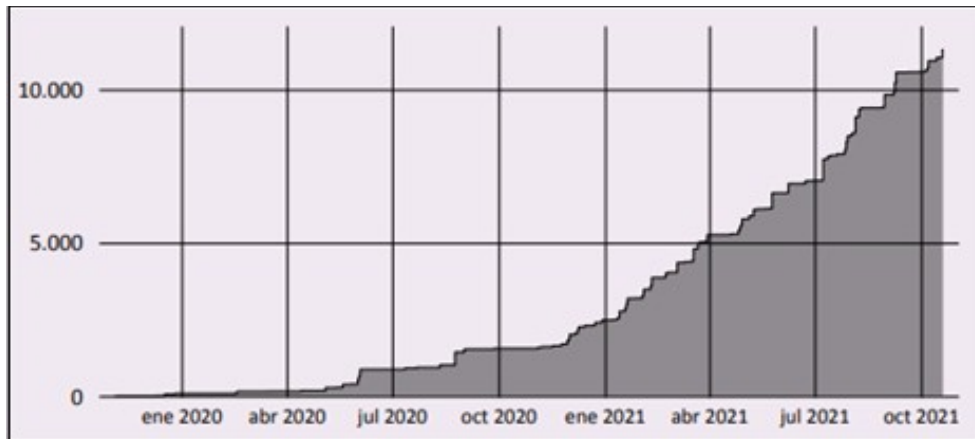
Como bien se sabe la electricidad como medio de transporte de energía desde sus inicios en el siglo XIX, cuando competía con el vapor y el gas natural, se perfilaba como uno de los recursos más prometedores por sus beneficios en cuanto a tecnología limpia y de pocas pérdidas tanto en la transmisión local como a gran distancia. Sin embargo, en su camino de mejora por medio de avances tecnológicos y más en la actualidad, donde se evidencian altas demandas de energía por parte de usuarios residenciales e industriales, estos sistemas han adquirido complejidad enfrentando retos mucho mayores debido a la diversidad de componentes que se han vinculado en todas sus etapas.

Los grandes sistemas eléctricos tradicionalmente cuentan con tres principales etapas las cuales son, generación, transmisión y distribución, luego de esta última etapa encontramos al usuario final o técnicamente conocido como la carga del sistema, el cual representa el consumo de dicha energía eléctrica. Ahora bien, si observamos las conformaciones del sistema eléctrico colombiano, hoy en día son notables los cambios que cada vez se han ido incrementando debido a la necesidad u obligación de disminuir la huella de carbono ya que la electricidad según [1] pertenece a la categoría de primer alcance a mitigar, es decir es un generador de emisiones directas de gases de efecto invernadero (GEI). En esta misma idea, se resaltan dos grandes tecnologías dispuestas para reducir dicha huella las cuales son la movilidad eléctrica y la generación distribuida [2], dándole enfoque a esta última debido a su alto impacto al incluir dos conceptos importantes para la red eléctrica que son, el de bidireccionalidad en nuevos niveles de la red, en gran parte en circuitos radiales de distribución y la incursión del concepto de gestión de la disponibilidad de energía manteniendo la calidad del servicio.

En Colombia se define la generación distribuida como los generadores que se encuentran cerca de los centros de consumo y se clasifican según el nivel de potencia instalada [3], dentro de este

tipo de generación sobresalen los proyectos de obtención de energía eléctrica a partir de paneles fotovoltaicos, en el ámbito colombiano como se puede ver según la siguiente gráfica, tomando como referencia de julio del 2020 a julio del 2021, este tipo de proyectos han aumentado la capacidad de generación renovable no convencional aproximadamente en 7.33 veces.

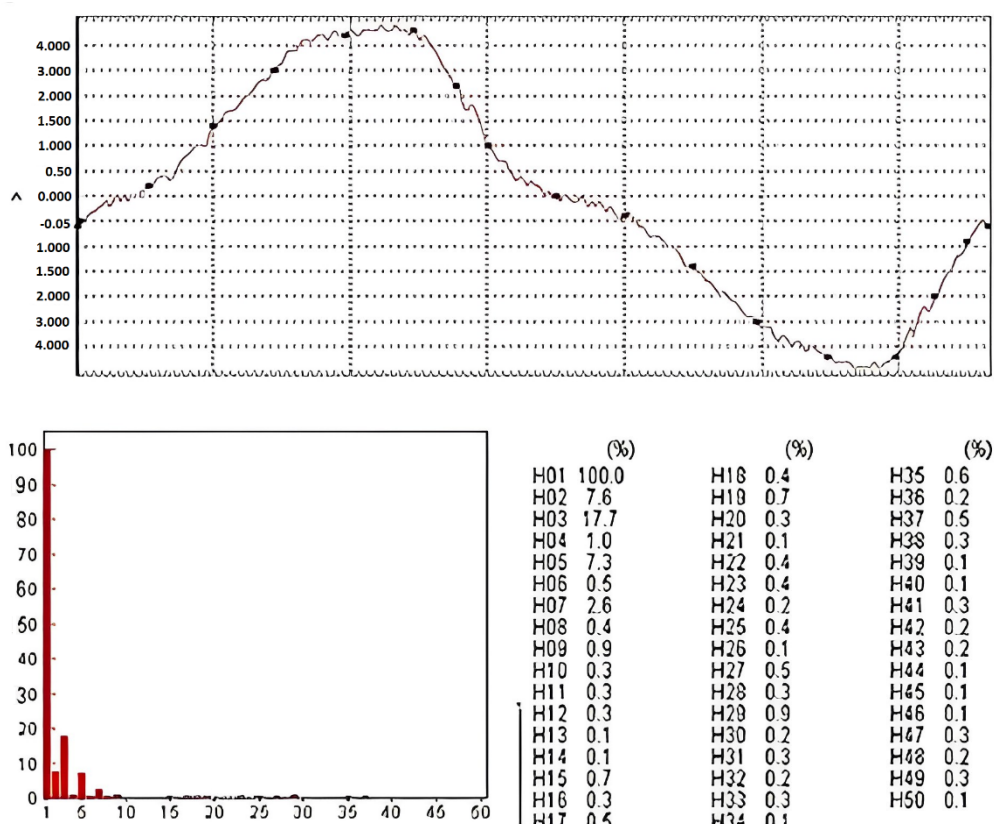
Imagen 1. Aumento de proyectos vigentes de generadoras solares en MW 2020-2021. Tomado de [4]



La generación fotovoltaica es dimensionada de acuerdo con la capacidad deseada a instalar y disponibilidad de radiación solar de la zona, dentro de esto podemos encontrar que en lugares con difícil acceso a la red de distribución local se pueden plantear sistemas con almacenamiento de batería u Off-Grid (no conectados a la red); también, hay configuraciones donde se supe parcial o totalmente la energía del usuario final ya sea residencial o industrial y se complementa con la red para las situaciones donde no se produzca energía de forma alternativa. Finalmente, como configuración objetivo del presente documento, existen composiciones de generación donde se aporte energía a la red en general sin que haya de por medio cargas específicas. Las generadoras solares conectadas a la red u On-Grid (conectados a la red) han impulsado su crecimiento por medio de venta de energía producida bajo los lineamientos de la ley 1715 del 2014, estos sistemas cuentan generalmente con un esquema de paneles captadores de radiación solar, que serán los que convertirán esa energía solar a energía eléctrica en una señal de corriente continua. Luego de ello, está será convertida mediante un inversor de corriente continua a corriente alterna a un nivel de baja tensión y, por último, esta energía en corriente alterna ingresa a un transformador elevador, que podrá incorporarla a la red acoplándose a un nivel de tensión superior.

Al modificar la naturaleza de la señal de corriente continua (DC) en señal de corriente alterna (AC) por medio de inversores de potencia que cuentan con elementos de electrónicos, incorporan modificaciones a la señal principal de corriente que dependiendo de la frecuencia del sistema puede ser otras componentes de señal múltiplos de su misma frecuencia fundamental, a continuación, se muestra un registro de dichos efectos visibles de un inversor monofásico Solar-Max 2000C [5].

Imagen 2. Forma de onda y espectro de armónicos de los valores efectivos en la salida de corriente monofásica. Tomado de [5].



En este tipo de instalaciones fotovoltaicas como se nombró anteriormente, es necesario el equipo elevador de tensión o transformador, el cual será responsable de transferir toda la energía hacia la red; por ello se profundiza el concepto del efecto de los armónicos sobre su buen funcionamiento para garantizar su vida útil. En el ámbito industrial los transformadores para las aplicaciones de granjas solares On-Grid presentan un parámetro de sobredimensionamiento a su potencia nominal el cual es conocido como factor K [6], con él se dimensiona el incremento

de pérdidas adicionales por efectos de armónicos, para que pueda operar a potencia nominal sin generar envejecimientos prematuros de sus aislamientos, fallas a largo plazo como descargas parciales, o corto plazo como descargas de alta energía y salir de servicio por averías.

Para concluir, los armónicos que se manifiestan en la red son de gran importancia y aún más profundizando en los retos que plantean las nuevas tecnologías, principalmente, los presentados en generación, esto con el fin de poder fabricar equipos que operen de forma confiable bajo parámetros técnicos que le permitan al transformador ser comercialmente viable dentro de un mercado altamente competitivo.

### **Objetivo general**

El objetivo general del presente trabajo de grado es:

Determinar la magnitud del factor K en un transformador de distribución basándose en los armónicos producidos en una granja de generación fotovoltaica de 300 kW conectada a la red.

### **Objetivos específicos**

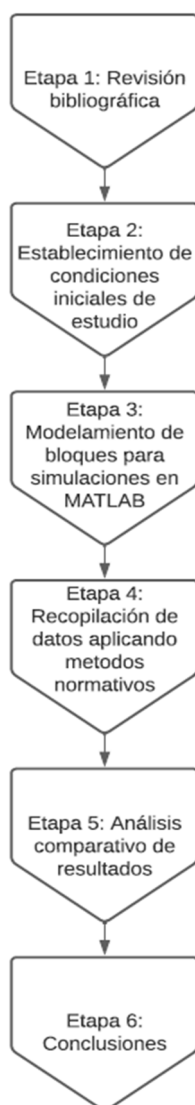
1. Establecer los parámetros iniciales de simulación: Rangos de generación (en porcentajes), capacidades de la red (potencia máxima demandada), condiciones climáticas de generación (temperatura e irradiancia).
2. Proponer un modelo de simulación soportados en MATLAB, que permitan generar los diferentes escenarios de condiciones de armónicos.
3. Interpretar los resultados obtenidos para determinar el factor K con base en los estándares ANSI/IEEE C57.159 de 2016 y C57.110 de 2008.
4. Clasificar y comparar las respuestas obtenidas del factor K en función de los parámetros iniciales de simulación.

### **Ruta metodológica**

En la imagen 3 se observa a un nivel macro la organización y desarrollo del presente documento dividido por etapas, partiendo de la contextualización de la problemática a nivel global y local en cuanto a las tecnologías actuales, luego de ello se plantean

condiciones de funcionamiento del transformador bajo presencia de armónicos, logrando con esto establecer escenarios de trabajo para poder simularlos en MATLAB por medio de bloques representativos de cada elemento haciendo alusión a una red de distribución, para finalmente conseguir una serie de resultados que serán analizados comparativamente y exponer las conclusiones de dicho estudio.

Imagen 3. Ruta Metodológica



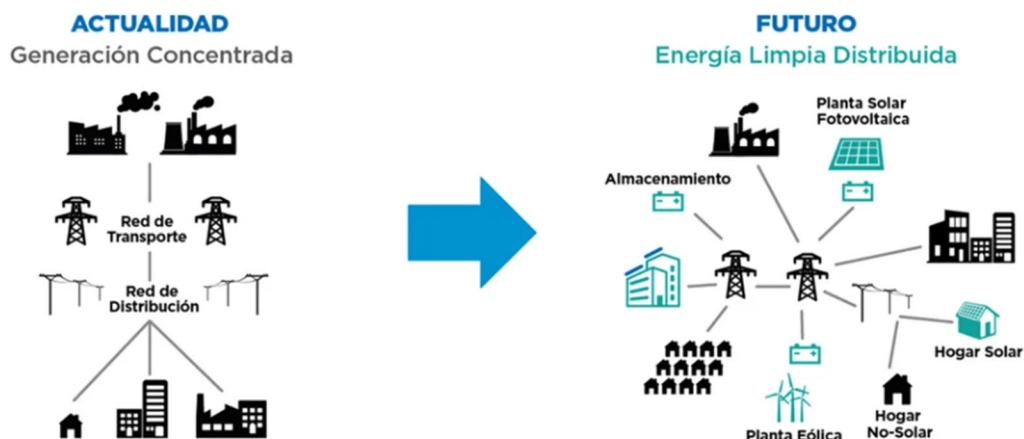


# 1. Antecedentes y Fundamentos

## 1.1 Generación distribuida

La noción de generación distribuida (GD) ha surgido por los cambios a pequeña escala que ha presentado el sistema eléctrico en los últimos años y que tienen la particularidad de estar muy cerca al centro de consumo. Sin embargo, la ejecución de esta forma de obtener energía eléctrica no es tema nuevo, las redes que inicialmente funcionaban con corriente directa (DC) limitadas para la transmisión de energía a largas distancias, solo eran eficientes y rentables para el suministro a los clientes más cercanos al punto de generación, convirtiendo el sistema un interconectado en múltiples sistemas distribuidos de pequeña escala para suplir demandas localizadas.

Imagen 4. Visualización de sistema interconectado a futuro. Tomado de [9]



La manifestación de la corriente alterna (AC) y el concepto de grandes centros de transformación permitieron superar los problemas del transporte de energía a grandes distancias, convirtiendo los sistemas eléctricos aislados a un gran sistema interconectado

robusto con grandes centrales y redes complejas de alta tensión disminuyendo así los costos de dicha energía, con una mejor calidad y confiabilidad.

Desde el siglo pasado por efectos del petróleo y diversas afecciones al medio ambiente aparece la necesidad de cambios muy marcados en el desarrollo de la industria energética. Según la agencia internacional de la energía (EIA) en [7], se listan los siguientes factores principales que obedecen al aumento de proyectos de generación distribuida:

1. El desarrollo de nuevas tecnologías energéticas.
2. Restricción de instalación de nuevas líneas de transmisión.
3. Crecimiento de la demanda.
4. Liberalización del mercado eléctrico.
5. El cambio climático.

La generación distribuida tiene una serie de definiciones dependiendo del lugar o localización donde se emite el concepto, ya que de forma regulatoria cada zona describe los alcances y aplicaciones que esta pueda tener, en el presente documento se toma como referencia la definición del Consejo Internacional sobre Grandes sistemas eléctricos (CIGRE) [8], en la que se reconocen como todos los generadores con una capacidad máxima entre 50 a 100 MW conectados al sistema eléctrico de distribución, y que no están diseñados ni despachados de forma centralizada. La última afirmación, da a entender que este tipo de generación no están incluida en el sistema de control ejercido por el operador de red, mostrándose como nuevos puntos de entrada de energía que en una vista macro representan desbalances a las principales generadoras de un sistema eléctrico.

Por otra parte, las tecnologías de generación distribuida que no son utilizadas como generación básica tienen diversas aplicaciones que pueden ser beneficiosas para el sistema de energía o para los usuarios finales las cuales son, suplir demanda en horas pico, en este caso pueden disminuir el costo de kWh que es dinámico y obediente al nivel de demanda y generación disponible, logrando suministrar energía en los momentos de mayor demanda beneficiando principalmente a los usuarios industriales. Puede tener un uso como reserva, con ello se busca proveer de energía eléctrica las zonas de alta prioridad, que a pesar de que pueden presentar interrupciones, este



---

servicio debe ser permanente como instalaciones hospitalarias, aeroportuarias, etc. Presencia en zonas aisladas o de difícil acceso, principalmente en zonas rurales donde los sistemas interconectados no prestan su servicio, la generación distribuida puede ser una opción viable dependiendo de una configuración con o sin almacenamiento, esta puede ser una respuesta a la demanda diaria para un único usuario como para múltiples usuarios. En sistemas de ciclo combinado, puede ser utilizado como unidad de cogeneración sumando energía calórica a la residual del proceso principal de transformación por combustibles y aumentar la eficiencia de generación de electricidad final.

Los sistemas de generación distribuida tienen una limitante primordial y es la fluctuación por disposición del recurso base, que puede estar por debajo de los niveles mínimos de trabajo de los equipos o ser nula en periodos de tiempo; en consecuencia, es necesario el almacenamiento de los excedentes para compensar una demanda en caso de que el sistema no pueda generar electricidad. Las aplicaciones más utilizadas según [8] dependen de factores como la capacidad deseada de almacenamiento, tiempos de respuesta de conversión de la energía, la vida útil, los costos, eficiencia, dificultad de construcción e impacto ambiental, y son:

- El Bombeo hidráulico.
- La Compresión de aire.
- El Almacenamiento en baterías.
- Uso como volantes de inercia.
- El Almacenamiento de energía magnética por superconductores (SMES).
- La electrolisis de agua y metanación.
- La elevación de cuerpos de agua para posterior uso en hidroeléctricas.
- El Almacenamiento de calor.

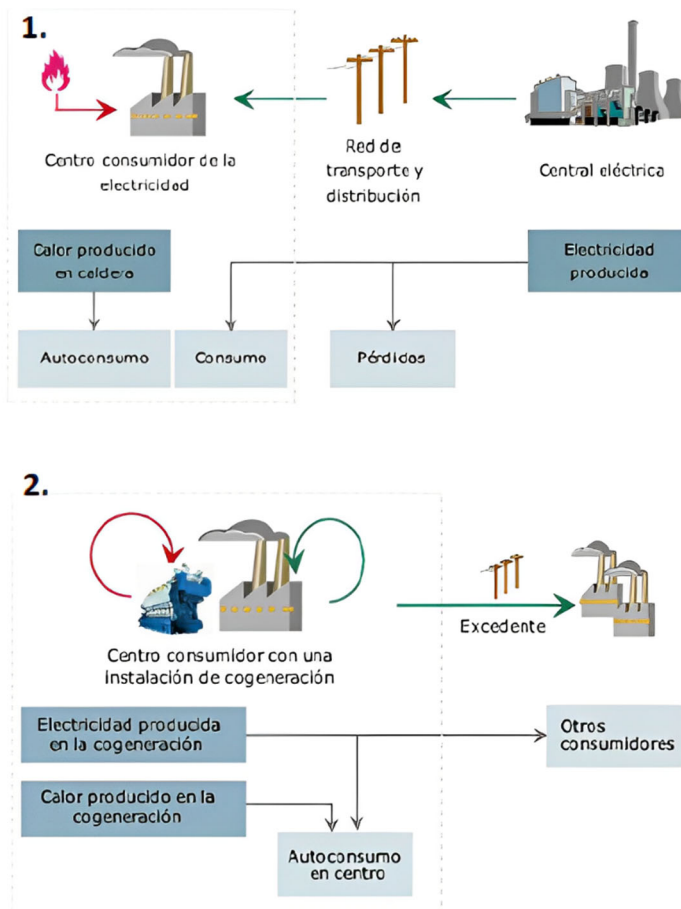
En un sistema de potencia es primordial la conversión de otros tipos de energía en energía eléctrica, esto es posible debido a su variedad de componentes que pueden ser clásicos como son las turbinas, aprovechando la capacidad de la energía cinética de fluidos, igual que modernas, entre ellas están las tecnologías estáticas sacando provecho de fuentes

como el sol; a continuación, se presenta una serie de tecnologías tanto tradicionales como no convencionales desempeñadas en la labor de generación de manera no centralizada.

### 1.1.1 Sistemas de cogeneración

Este tipo de plantas parten del aprovechamiento de la energía térmica resultante de procesos industrializados a gran o a pequeña escala, esta energía es convertida por turbinas en energía eléctrica para uso interno o para inyección a una pequeña red. En la actualidad se busca implementarla a actividades de procesamiento de alimentos a gran escala como el sector azucarero por sus grandes procesos térmicos pueden brindar excedentes energéticos, como la producción de biogás a partir de sus residuos sólidos, que al fin y al cabo puede ser otro combustible para la generación de electricidad.

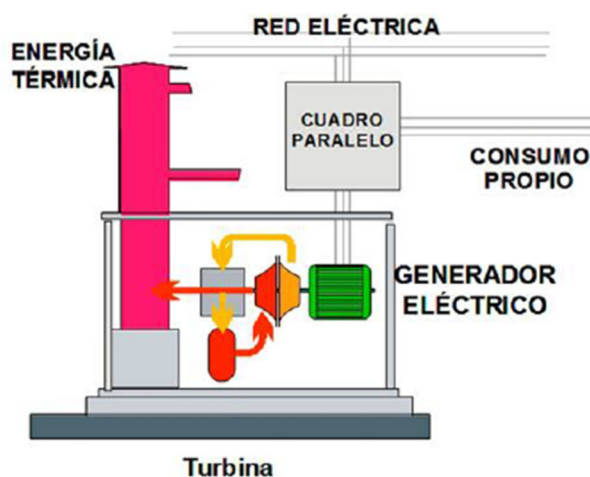
Imagen 5. Flujo de utilización de energía 1. Con cogeneración, 2. Sin cogeneración. Tomado de [8]



A nivel mundial la cogeneración figuró un desarrollo sustancioso, en Europa fue la fuente de electricidad en un 12% respecto a la producción total de electricidad del 2019, también proporciono el 14% del consumo de calor en el mismo año [10], en el año 2006 estados unidos con su implementación evito la emisión de 242 millones de toneladas de CO<sup>2</sup> (aproximadamente el 4% de las emisiones totales) lo que es semejante a retirar 44 millones de automóviles de circulación en un año [11].

En este tipo de plantas encontramos elementos comunes que la conforman, en primera instancia se cuenta con una turbina de gas, vapor o impulsor alternativo que aprovecha el calor almacenado de un proceso principal. Luego de ello, suele tener un alternador que transforma el movimiento a energía eléctrica, por otra parte, se puede contar con etapas de aprovechamiento de los gases de escape como calderas o pueden pasar a intercambiadores de calor, cuentan con sistemas de enfriamiento para minimizar el impacto del calor residual al medio ambiente e incluyen sistemas complejos de control.

Imagen 6. Ejemplo de turbina de gas a partir del ciclo Brayton.  
Tomado de [8]



### 1.1.2 Hidrogeneradores de pequeña escala

Estas centrales de generación trabajan a partir de la conversión de energía hidráulica a eléctrica por medio de una turbina, tienen una estructura parecida a las hidro generadoras

de mayor tamaño y tal como ellas cuentan con controles de tensión y frecuencia por medio de la regulación de velocidad y caudal para cumplir con los estándares básicos de calidad de energía. Este tipo de estructura según su ubicación pueden ser a filo de agua si se alimenta de un caudal en movimiento o con embalse si cuenta con un almacenamiento de agua. Son llamadas picocentrales, microcentrales y minicentrales si están en el rango de 0.5 kW a 500 kW, normalmente estas trabajan a filo de agua y en zonas no interconectadas; ahora bien, al tener una capacidad entre 500 a 10.000 kW son conocidas como pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) y estas pueden estar interconectadas como no interconectadas.

Imagen 7. PCH a filo de agua. Tomado de [12]



En la imagen 6, se observa una pequeña central hidroeléctrica a filo de agua, partiendo de la desviación del cauce principal, para ser captado por una cámara de carga o albergue para cierta cantidad de agua, posteriormente se prepara el caudal que ganará energía cinética a través de una caída por una tubería y se convierte en eléctrica en la sala de máquinas o turbinas, para luego desembocar el agua a la misma fuente sin causar un impacto significativo al medio ambiente, por ello se considera muy limpia.

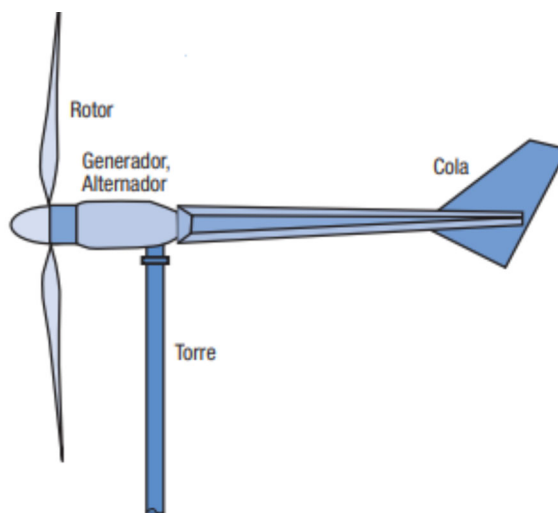
En un informe generado por la Organización de Naciones Unidas para el desarrollo industrial (ONUDI) y el Centro Internacional para la Pequeña Central Hidroeléctrica (CIPCH) se reportó que en el año 2016 a nivel global la capacidad instalada en pequeñas

centrales hidroeléctricas fue del 7%, es decir 78 GW de la capacidad mundial instalada, focalizadas básicamente en el continente asiático con un 65% y europeo con un 23% [13].

### 1.1.3 Aerogeneradores

La energía eólica conforma una de las energías renovables no convencionales más utilizadas en el mundo, con ella se aprovecha la fuerza generada por el viento y es captada en gran medida por grandes aerogeneradores, sin embargo, las tecnologías compactas se encuentran en diferentes fases de desarrollo. El tamaño de las aspas determina la capacidad de producción de energía y oscilan entre una producción de 400 W con un tamaño de aspas de 3 metros de diámetro como de 2.5 MW con un tamaño de aspas aproximado de 80 metros de diámetro. La inclinación de las aspas asegura la recepción óptima de las fuerzas de viento, en la mayoría de las tecnologías eólicas de gran dimensión se debe tener una velocidad mínima de 3,5 m/s y no mayores a 25 m/s, consiguiendo un punto ideal alrededor de los 13 m/s.

Imagen 8. Sistema eólico de pequeña generación. Tomado de [14]

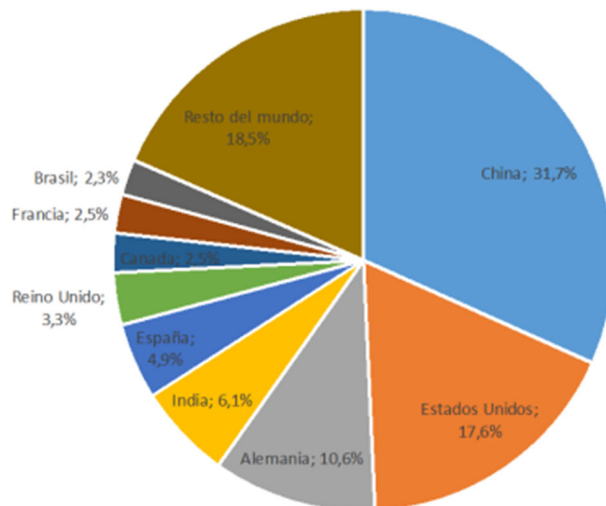


Los aerogeneradores tienen como desventajas la disponibilidad variable del recurso principal, la contaminación visual, el ruido que pueden producir suele ser, no son amigables con la vida silvestre, entre otras; por estas razones, se debe tener una gran superficie para que puedan ser ubicadas de forma segura y dado que las zonas de transiciones de presión en una gran proporción son las zonas costeras, se consideran como los lugares más apetecidos para que estas sean instaladas. Se catalogan como on-shore (en la orilla, hace

alusión a tierra firme) y off-shore (fuera de la orilla), la primera configuración cuenta con instalaciones ya sea en los límites de las costas o internamente de tierra firme, a estos se les puede hacer mantenimientos efectivos muchos más sencillos a diferencia de la segunda, esta al estar instalada sobre la superficie marina como beneficio tiene un nivel de perturbación a sus alrededores y contaminación visual mucho menor.

La energía obtenida por aerogeneradores en el año 2016 tuvo como protagonistas a china con 148.6 GW acumulando el 32% [15] del desarrollo de este tipo de tecnologías seguido de Estados Unidos y Alemania como se puede ver en la siguiente gráfica:

Imagen 9. Capacidad instalada de energía eólica. Tomado de [15]



En la información de la imagen 8, es posible notar que las principales economías del mundo son las que han avanzado con este tipo de tecnologías, esto figura como una respuesta adecuada hacia la mitigación de emisiones de carbono al medio ambiente ya que son ellas las que más aportan al cambio climático.

#### 1.1.4 Granjas de generación solar fotovoltaica

Las granjas de generación fotovoltaica que serán motivo principal de estudio en el presente documento son una forma directa de transformación de la energía solar a energía eléctrica mediante semiconductores que en su mayoría son silicio o arseniuro de galio y con los cuales se aprovecha el efecto fotoeléctrico. EL efecto fotoeléctrico es un concepto desarrollado por Albert Einstein por el cual se le otorgó el premio nobel en el año 1905, en

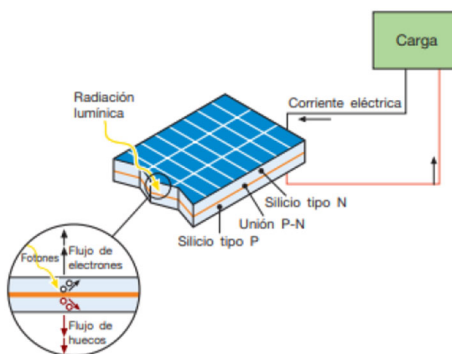
el que se ve plasmado la concepción de emisión y absorción de radiación en un cuerpo [16].

La energía fotovoltaica tiene como ventajas la reducción de materiales contaminantes, menores costos de mantenimiento y de funcionamiento y la minimización de emisión de gases de efecto invernadero. En cuanto a desventajas, al igual que la energía eólica tiene una alta variabilidad de la fuente principal en este caso la exposición a la radiación solar cuenta con rendimientos aun bastante bajos que se reflejan en eficiencias bajas y por último, su eficiencia puede mejorar con sistemas de seguimiento que proporcionan el mayor aprovechamiento de la radiación solar no obstante son de costos elevados.

Las plantas de generación fotovoltaica se componen esencialmente por una cantidad de generadores o paneles fotovoltaicos, los soportes mecánicos necesarios para sostenerlos ubicados en una superficie libre de sombreados y un sistema de inversión los cuales serán ampliados en la siguiente sección de este documento.

Los paneles fotovoltaicos se constituyen de células fotovoltaicas, con ellas se hace la conversión de la radiación solar captada a energía eléctrica. Está compuesta por dos ligeras capas de materiales semiconductores, una de ellas de dióxido de silicio y aluminio cubiertos por una superficie, que no permite reflejar la luz solar para una mejor absorción de la radiación. Los electrones tienden a moverse en el área de contacto entre capas acumulando cargas eléctricas y que al aplicar tensión externamente, fluye corriente en una dirección al igual que el funcionamiento de un diodo.

Imagen 10. Funcionamiento y composición de célula fotovoltaica. Tomado de [8]



En las tipologías de paneles en cuanto a la composición de sus semiconductores se encuentran los paneles monocristalinos, que están formados por cristales homogéneos de silicio cristalino de alta pureza. Es una célula cilíndrica de una dimensión de 13 a 20 cm. de ancho y de alto unos 200 cm. Este es capaz de alcanzar una eficiencia entre 15 y 17%, son de alta durabilidad aproximadamente 20-25 años con pocos mantenimientos preventivos.

Imagen 11. Panel fotovoltaico monocristalino. Tomado de [17]



Los paneles policristalinos se componen de igual forma de células de silicio en diferentes direcciones a diferencia del monocristalino, con este tipo de panel se obtiene una eficiencia entre 12 y 14%, su rendimiento se mantiene aproximadamente 20 años y es fácilmente reconocible ya que sus granos cristalinos son claramente visibles.

Imagen 12. Panel fotovoltaico monocristalino. Tomado de [17]



Por último, se encuentra un tipo de panel llamado de capa fina, está compuesto de material semiconductor, normalmente como una mezcla gaseosa, tiene un grosor de varias micras

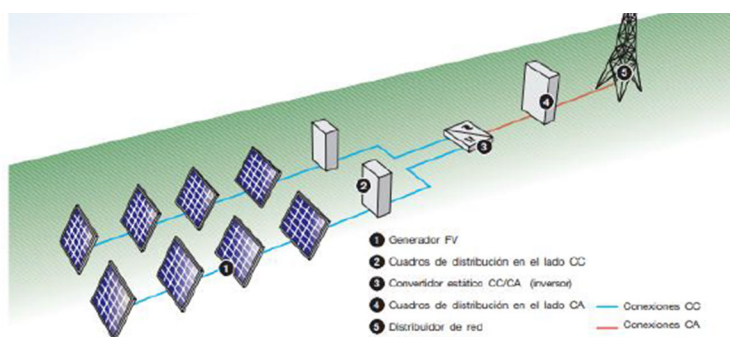


a diferencia de los cientos de micras del silicio cristalino y este panel es más económico al utilizar mucho menos material, pero su eficiencia disminuye sustancialmente, es bueno para trabajo con luz difusa y altas temperaturas.

La clasificación de paneles dependiendo del diseño y de sus elementos se categorizan en los siguientes tipos de sistemas:

- Plantas aisladas: Se conforman de paneles y un sistema de almacenamiento, en algunos casos puede ser requerido un inversor para funcionamiento de equipos con corriente alterna y no son conectados a la red de distribución local, son muy utilizadas en zonas aisladas de difícil acceso, pueden asegurar una autonomía dependiendo de la inversión y alcances de la zona de operación; sus funciones principales son las de bombeos de agua, iluminación, sistemas de señalización, instalaciones publicitarias.
- Plantas conectadas a la red: Esta topología se compone de paneles, un sistema de inversores y un centro de transformación, brinda la posibilidad de abastecer a la carga con la energía de los paneles o de la red en caso de ausencia de generación de energía; en dado caso que la generación sea mayor al consumo, los excedentes serán entregados a la red de distribución local. Esta configuración puede o no tener un centro de almacenamiento, son beneficiosos para el sistema ya que no generan perdidas al sistema de transmisión, pero adicionan otros problemas como son el de la confiabilidad del servicio y calidad de energía al no tener inercia como las hidrogenadores.

Imagen 13. Sistema fotovoltaico conectado a la red. Tomado de [8]

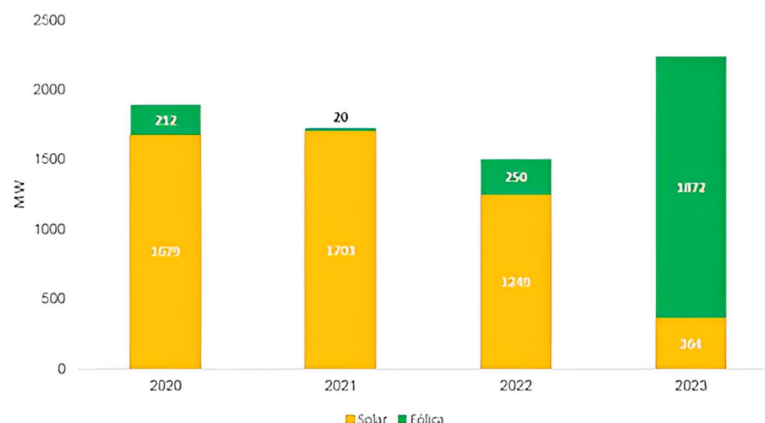


### 1.1.5 Ámbito Colombiano

La generación distribuida en general cuenta con un concepto técnico desarrollado en Colombia, focalizado principalmente en las regulaciones para incentivar su actividad como factor de cambio y ralentización al cambio climático. Para la promoción de su uso, determinación de su integración al sistema eléctrico y establecimiento como un medio para el desarrollo económico sostenible, en el país se cuenta con la Ley 1715 de 2014 [18] que lo regula y busca promover la gestión eficiente de la energía como la apropiada respuesta del sistema eléctrico a la demanda. Algunos de los decretos que se han expedido en el marco de la reglamentación de esta ley son:

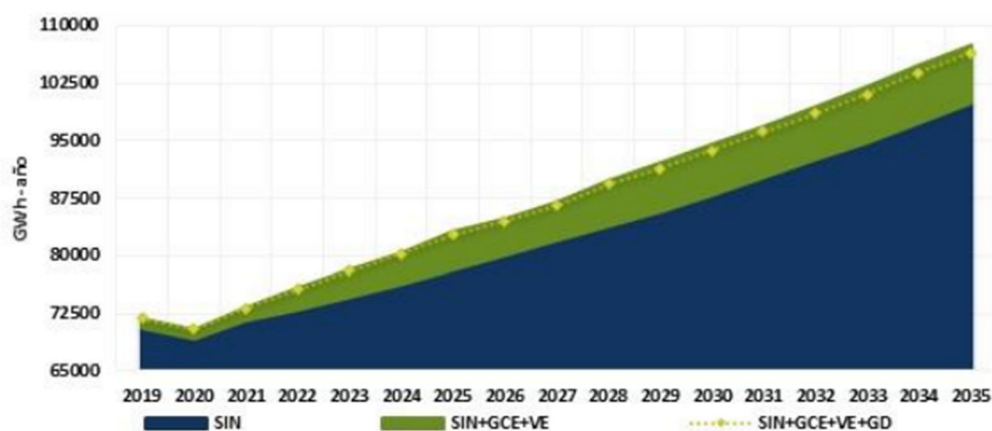
- Resolución UPME (Unidad de Planeación Minero-Energética) 703 del 14 de diciembre de 2018, en ella se establecen procedimientos y requisitos para certificar proyectos de FNCE (Fuentes No Convencionales de Energía), de cara a obtener beneficios de exclusión del IVA (Impuesto al Valor Agregado) y exención de gravamen arancelario [19].
- Resolución 1312 del 11 de agosto de 2016 del Ministerio de Ambiente, que genera licencias ambientales para proyectos de uso de fuentes de energía eólica continental y otras determinaciones [20].
- Resolución 0281 de 2015 de la UPME, que determina el límite máximo de potencia para la autogeneración de pequeña escala. Modificando el decreto 1073 de 2015 para la ampliación de cobertura del servicio de energía eléctrica al sistema interconectado nacional y zonas no interconectadas [21].

Imagen 14. Proyectos solares y eólicos a 2023. Tomado de [22].



Actualmente, en el sistema eléctrico de Colombia se cuenta con 17.5 GW de potencia instalada, en su mayoría se compone de generadores hidráulicos con 11 GW, en proyecciones según la UPME se plantea que Colombia al año 2023 cuente con al menos 2 GW de potencia instalada no sincrónica como se muestra en la gráfica 13. En el Plan Energético Nacional (PEN) [22] que describe el comportamiento energético nacional año 2020-2035, se tienen proyecciones de crecimiento de la demanda en las cuales los grandes consumidores especiales a futuro representen un aumento de la utilización del sistema de potencia entre un 2.02% y un 5.01%, la demanda por parte de vehículos eléctricos particulares y de sistemas masivos de transporte se le proyecta entre el 0.10% y 4.31% de la potencia total instalada.

Imagen 15. Proyección anual de la demanda de energía eléctrica (GWh-año). Tomado de [23].

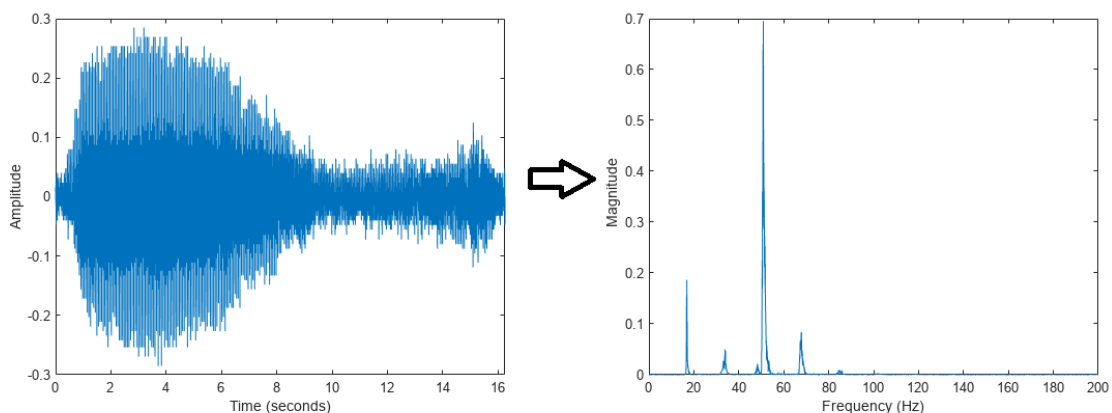


## 1.2 Los armónicos y su papel en inversores

Los armónicos son señales de corriente o voltaje normalmente presentes en un sistema eléctrico, se diferencian de la señal principal debido a sus que se manifiestan en múltiplos de frecuencias de dicha señal, por ejemplo, si la frecuencia del sistema es de 60 Hz, pueden contener armónicos de 120 Hz (doble), 180 Hz (triple), 240 Hz (cuádruple), etc. Tradicionalmente la forma en que se hacen presentes en la red es debido a cargas no lineales como los hornos de arcos, baterías variadores de frecuencia y convertidores de estado sólido, sin embargo, el incremento en nuevas tecnologías de inyección de potencia eléctrica a la red que cuentan con medios electrónicos de funcionamiento han focalizado el análisis de dichos armónicos desde la fuente.

Los armónicos presentan dos características principales que son su magnitud y su frecuencia que pueden ser obtenidas de forma discreta utilizando el análisis por transformada de Fourier, la aplicación de esta formulación convierte la señal en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia calculando el espectro de señales de forma exacta, en el presente documento se utiliza la función FFT de MATLAB para obtener el análisis en frecuencia como se puede ver en la siguiente imagen.

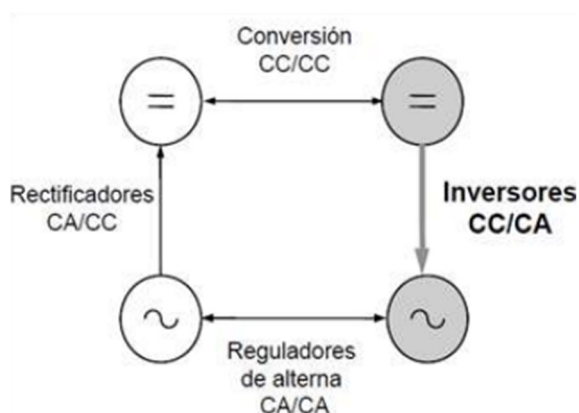
Imagen 16. Visualización de la aplicación de la transformada de Fourier en MATLAB.



Los inversores son uno de los componentes esenciales de un sistema eléctrico fotovoltaico, esto es debido a que los paneles nos entregan una señal de corriente continua (DC) que no puede ser usada en cargas que funcionan con corriente alterna, por esta razón es necesario el dimensionamiento de este equipo que por medio de electrónica de potencia logra dicha conversión. En la historia este dispositivo tiene como punto de partida el

principio del siglo XX, en donde aparecen los tubos de vacío y con gas utilizados como interruptores en circuitos que invertían la señal, posteriormente, la investigación de ciertos materiales semiconductores permitieron que el desarrollo de los primeros diodos y transistores tomaran este papel hasta la actualidad, donde no solo se integran en los inversores modernos sino también en otro tipo de convertidores, reguladores y rectificadores.

Imagen 17. Equipos convertidores de energía Corriente Continua (CC) a Corriente Alterna (CA). Tomado de [24].

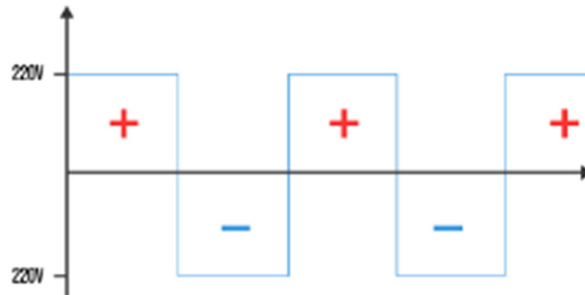


### 1.2.1 Clasificación de inversores según la onda de tensión de salida

Los inversores tienen una clasificación en cuanto a su señal de salida y son:

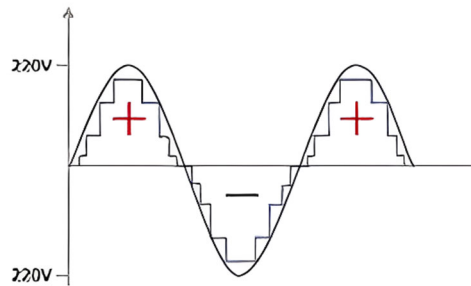
- Inversores de onda cuadrada, estos son económicos y funcionan con un recorte sencillo de la potencia de entrada en DC, cuenta con poco filtrado de la señal, explicando así la razón por la cual tienen un alto contenido armónico de salida, aproximadamente una distorsión armónica total (TDH) de 40% y nos brinda un rendimiento entre el 50 y 60% [25]. La potencia que pueden soportar en sobrecarga oscila entre el 10 y 20%, tienen poca regulación de tensión y se utiliza principalmente para pequeñas cargas resistivas e inductivas.

Imagen 18. Señal de onda cuadrada. Tomado de [26].



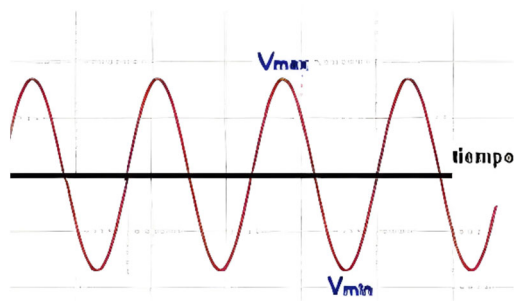
- Los inversores de onda semi-senoidal, brindan rendimientos aproximados de un 90% y una distorsión armónica hasta de 20%. Estos son más costosos que los inversores de onda cuadrada y permiten un mejor funcionamiento de aparatos de alta tecnología que funcionan con corriente alterna, las cargas inductivas pueden tener malos funcionamientos con este tipo de tecnología.

Imagen 19. Señal de onda semi-senoidal. Tomado de [24]



- Los inversores de onda pura o senoidal pura cuentan con un filtrado muy cuidadoso en la señal de salida, presentan una distorsión armónica reducida y son bastante utilizados ya que la norma del instituto de ingenieros electrónicos y electricistas IEEE 519-2014, acompañada de la Norma técnica colombiana NTC 50001:2088 establece que se permite un máximo de 5% de distorsión armónica en la señal para conexión a la red. Funcionan muy bien para alimentación de todo tipo de electrodomésticos y soportan sobrecargas del orden del 30%. Este modelo de inversor está sobreponiéndose a los demás modelos, incluso los más simples.

Imagen 20. Señal de onda pura. Tomado de [24]



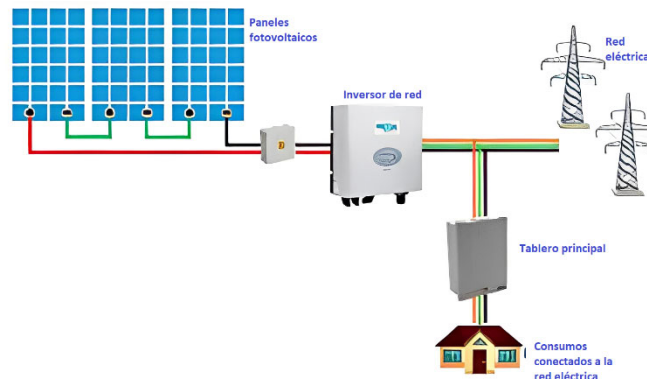
En el caso de las cargas inductivas como motores, la forma de onda debe comportarse como una señal pura por medio de una señal de modulación por ancho de pulso (PWM) con un contenido de primeros armónicos de gran magnitud, ya que el máximo rendimiento de giro del motor se produce en el armónico fundamental y cualquier otro generado no produce giro y se disipa en forma de calor, particularmente esta es una de las múltiples causas de envejecimiento de aislamientos y bobinados en motores. Para lograr obtener una señal senoidal en lo posible pura, utiliza interruptores de semiconductores que controlan la apertura y cierre generando pulsos variables, entre más pulsos pueda producir menor distorsión armónica presentará.

### 1.2.2 Tipos de inversores según su operación

Según la operación que ejecuten los inversores se pueden clasificar en:

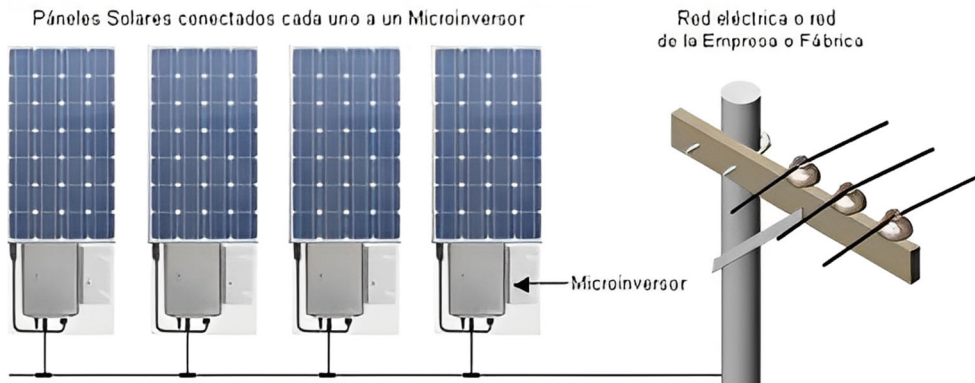
- On- grid o Inversor de conexión a la red, este tipo de inversor se conecta al sistema de distribución local, funciona en ausencia de un sistema de almacenamiento, esto quiere decir que toda su energía es utilizada de forma inmediata ya sea para autoconsumo o como inyección a la red. Permite monitorear la frecuencia y fase de la línea y produce una onda senoidal pura a la misma frecuencia de la red de manera auto conmutada.

Imagen 21. Sistema con Inversor On-Grid. Tomado de [24]



- Microinversores, estos funcionan similarmente a los inversores on-grid, no obstante, trabajan para transmitir la energía de hasta cuatro paneles, permitiendo un monitoreo más eficaz, evitando la dependencia entre módulos en caso de mantenimientos o salidas de servicio sin desaprovechar tiempo de producción de energía.

Imagen 22. Sistema con Microinversores. Tomado de [24]

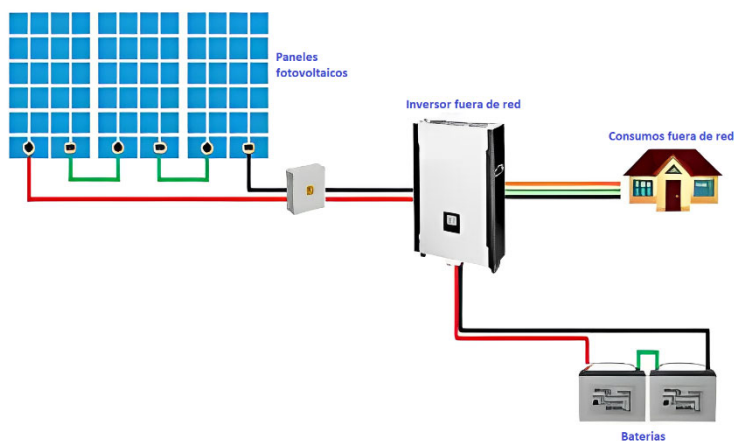


- Off-grid o Inversor aislado, se utilizan con almacenamiento de energía como son baterías y realizan la inversión de la señal cuando sea requerido su uso, puede trabajar de manera paralela almacenando y entregando energía a la carga, se dimensiona bajo especificaciones de autonomía que se requiera para el sistema. Es utilizada para sistemas de bombeo, iluminación, puede soportar la mayoría de



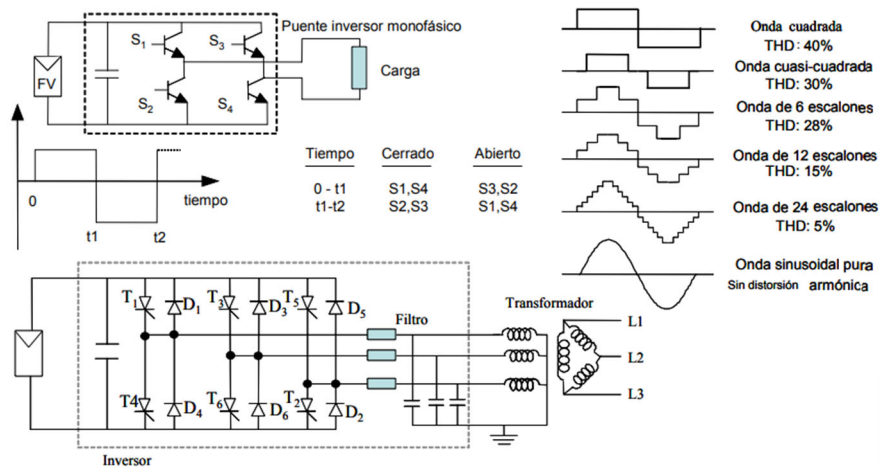
los electrodomésticos de alta demanda energética, como neveras, taladros, licuadoras, etc.

Imagen 23. Sistema con inversos off-grid. Tomado de [24]



Los semiconductores habitualmente utilizados en inversores de generadores fotovoltaicos son fabricados con tiristores (SCR-Rectificados Controlado de Silicio y GTO-Tiristor de Apagado) y transistores de potencia (MOSFET's-Transistores de Efecto de Campo Metal-Oxido-Semiconductor y bipolares como el IGBT-Transistores Bipolares de Puerta de Salida). El funcionamiento de estos componentes es por medio de la aplicación de tensión en la puerta o Gate, permitiendo el paso de corriente desde el ánodo al cátodo en un tiempo establecido dependiendo del ancho del pulso que se requiera. El esquema unifilar de operación de un generador fotovoltaico consta de paneles que producen corriente directa a un nivel de tensión sostenida por un condensador en paralelo, luego de ello entra en los componentes de electrónica de potencia, con ellos se generan los pulsos modulados dependiendo de las cargas ya sean monofásicas o trifásicas mediante transistores. La señal resultante es filtrada y a partir de este punto puede ser utilizada por equipos o para inyección a la red. En la imagen 22 se puede ver al detalle las señales resultantes con sus características en contenido armónico.

Imagen 24. Esquema monofásico y trifásico de inversor fotovoltaico. Tomado de [25]



### 1.3 El transformador

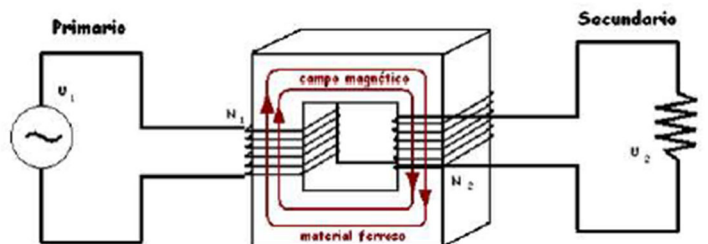
El transformador es un equipo de gran importancia para un sistema eléctrico de potencia, permite elevar o reducir el nivel de tensión en un circuito de corriente alterna. Se emplean en bajas potencias como en altas potencias. Su función principal es la transmisión de electricidad a grandes distancias de manera eficiente, esto se logra haciendo que las pérdidas  $I^2R$  (pérdidas por efecto Joule) se disminuyan muy considerablemente y a su vez aminora los costos en materiales. Las líneas de transmisión en el sistema eléctrico colombiano operan de forma continua hasta un nivel de tensión eficaz de 500 kV, debido a que las tensiones de generación son relativamente bajas, requieren la instalación de transformadores desde sus etapas de generación hasta los centros de consumo. La capacidad de cambiar tensiones es gracias a la ley de inducción de Faraday donde la FEM producida solo se logra con un flujo magnético variable, esto quiere decir que un transformador funciona necesariamente con corriente alterna.

Imagen 25. Diferentes ejemplos de transformadores. Tomado de [27]



Los componentes principales de un transformador convencional de forma simplificada son, un devanado primario y un devanado secundario conectados a sus respectivos circuitos que pueden ser aislados o no y un núcleo ferromagnético que genera el circuito necesario para encerrar el flujo magnético.

Imagen 26. Esquema simplificado del circuito de un transformador. Tomado de [27]



El transformador es un equipo reversible quiere decir que puede funcionar teniendo la fuente y la carga en cualquiera de sus devanados, pueden ser categorizados de muchas maneras según sean los requerimientos del sistema eléctrico; seguidamente serán explicadas los tipos de categorizaciones más comunes.

La primera clase de estos equipos es determinada con base en sus etapas de potencia, estas dependen de la capacidad a la cual será fabricado, precisando de las especificaciones ya sean condiciones climáticas o limitaciones de espacio se plantea su etapa de refrigeración, su clasificación se muestra en la siguiente tabla.

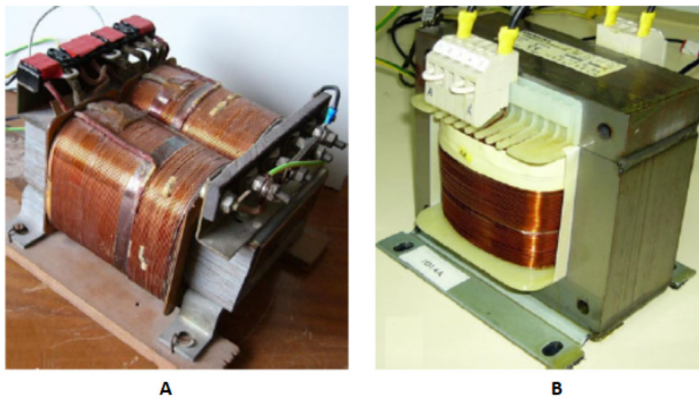
Tabla 1. Tipos de etapas de refrigeración.

Tipo	Descripción
ONAN	Flujo de aceite natural por convección, refrigeración de aire sin forzar.
ONAF	Flujo de aceite natural por convección, refrigeración forzada en radiadores o directos al devanado con ventiladores.
OFAF	Flujo de aceite forzado por bombas, refrigeración forzada en radiadores con ventiladores.
ODAF	Flujo de aceite dirigido por canales a los devanados, refrigeración forzada en radiadores con ventiladores.

OW	Flujo de aceite de forma natural por medio de serpentines con agua internamente.
FOW	Enfriamiento de aceite forzado por agua forzada con bombas.

Según su cantidad de fases, el transformador puede ser monofásico o trifásico, en su clasificación monofásico cuenta con un arrollamiento primario y uno secundario quienes solo convertirán la tensión de un circuito de una única señal, pueden estar devanados sobre la misma pierna y estar encerrados en un núcleo (Shell type) en el que el flujo magnético retorna por ambas piernas laterales (figura 21.1) o pueden estar devanados cada uno sobre una pierna generando un circuito magnético circular de un solo sentido (figura 21.2).

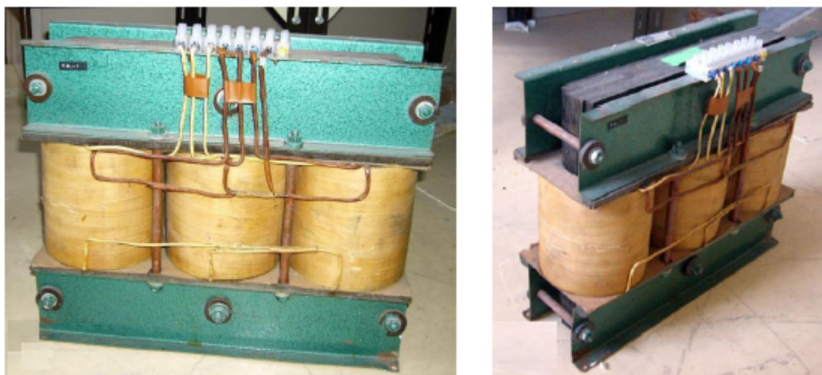
Imagen 27. Transformador monofásico. A) núcleo de dos columnas, B) Núcleo acorazado o Shell type. Tomado de [28]



Los

transformadores trifásicos usualmente tanto en bajas potencias como en altas potencias cuentan con un núcleo de tres piernas, cada una con un circuito independiente desfasado 120 grados entre ellos, pueden tener disposición en delta ( $\Delta$ ) o en estrella (Y), en algunos casos pueden tener una configuración en zigzag (z), pero estos son poco convencionales en transformadores de potencias muy altas. No obstante, los sistemas trifásicos pueden ser a partir de un banco de equipos monofásicos que suelen ser muy utilizados en generación donde debe haber equipos de suplencia para mantenimientos o fallas en alguna de las unidades siendo más económico de esta forma.

Imagen 28. Transformador Trifásico. Tomado de [28]



Los transformadores disponen de una clasificación según su tipo de refrigeración/aislamiento principal, la cual es, inmerso en aceite y tipo seco, el primero tiene como medio albergador de la parte activa (conocida así como la organización de partes vivas o energizadas al interior del tanque) un aceite dieléctrico de clase mineral derivado del petróleo que puede alcanzar temperaturas hasta de 145 °C, pero es inflamable, poco degradable y al alcanzar temperaturas superiores a su límite ocasiona gases compuestos de cadenas de carbono como el metano, etano, etileno, entre otros; con la misma característica de ser altamente inflamable, figurando posiblemente en una falla de este aparato. Análogamente, puede contar con aceite vegetal obtenido de forma natural de extracción de plantas o sintético, este puede alcanzar temperaturas hasta de 300 °C clasificando el tipo de enfriamiento como se expuso en la tabla 1, cambiando la O por K, es decir KNAN y KNAF, este aceite les da mayor soportabilidad y es altamente degradable con un 98% de su total en un lapso corto de tiempo. Por otra parte, se cuenta con aislamientos sólidos a base de papel que se clasifica en tipo A como el Kraft, tipo E que termo estabilizados o superiores como Nomex que es clase B o superior. En la tabla 2 se lista la clasificación de aislamientos según IEC. Además de equipos con este tipo de aislamientos, se encuentran otros transformadores con aislamientos clase H o F que casi siempre son encapsulados en resina epóxica, los cuales son auto extingüibles (no propagan las llamas), su refrigeración consta del intercambio de los devanados con el aire por lo tanto cuenta con canales entre ellos más amplios, son de potencias menores a los sumergidos en aceite ya que su tamaño aumenta considerablemente a mayor potencia y tienen usos más apetecidos como instalaciones residenciales con subestaciones internas de las edificaciones, centros comerciales, centros de datos, hospitales, aerogeneradores,

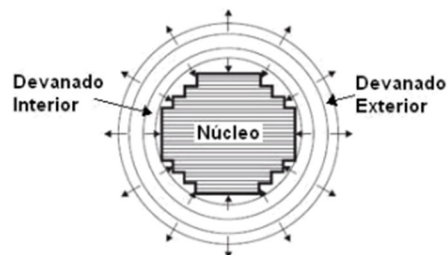
etc. que requieren de un equipo que brinde mayor seguridad contra incendio en caso de una falla.

Tabla 2. Clasificación de medio aislante de transformadores según IEC 60137.

Clase	Tratamiento	Temperatura °C
A	Impregnados o sumergidos en aceite	105
E	No impregnado	120
B	Impregnado	130
F	Impregnado/encapsulado (siliconas modificadas con sustancias orgánicas sintéticas)	155
H	Sustancias aglutinantes como resinas y siliconas.	180

La parte activa como se nombró previamente, cuenta con un núcleo de acero altamente magnético construido en laminas para reducir las corrientes de Eddy. En transformadores de bajas potencias el ancho de las piernas puede formarse geométricamente más cuadradas, pero en mayores potencias se trata de aprovechar un área circular por medio de un escalonado, esto con el fin de que el devanado sea circular consiguiendo la disminución de los esfuerzos radiales a tensión y compresión por cortocircuito.

Imagen 29. Esfuerzos de cortocircuito radiales. Tomado de [31]



Los devanados o arrollamientos que componen los circuitos son de material conductor de baja resistencia, como son el cobre, que tiene mayor costo aparte de mejor rendimiento y el aluminio que tiene menor costo, sin embargo, permiten densidades de corriente mucho menores que el cobre medidas en amperios por milímetro cuadrado. Las fuerzas de cortocircuito además de radiales pueden ser axiales por ello los transformadores tienen un sistema de sujeción al núcleo que sostiene el bobinado en caso de una falla o un evento de sobretensión en las líneas, dándole la capacidad de contener su estructura en su posición original manteniendo su funcionamiento e integridad durante toda su vida útil.

El transformador tiene múltiples dispositivos que cumplen con funciones de aislamiento, operación y protección tanto mecánicas como eléctricas, algunos están resumidos en la tabla 3.

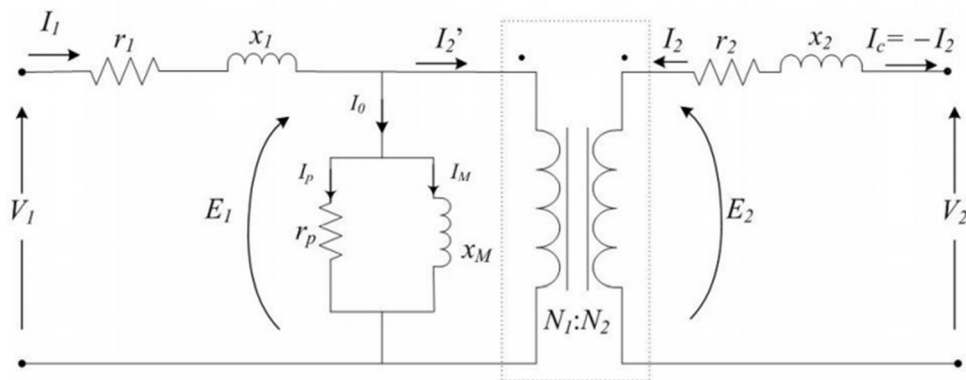
Tabla 3. Accesorios adicionales de un transformador.

Nombre	Función
Pasatapas o bujes	Les permite el paso a los conductores a través de la tapa aislándolos sin riesgo de descarga contra ella.
Pararrayos o descargadores de sobretensión	Brinda una protección de sobretensiones transitorias, se encuentra cercano al pasatapas.
Cambiador de tomas bajo carga o sin carga	Varía la cantidad de espiras regulando la tensión, esto con el fin de mantener la calidad de la señal.
Tanque conservador	Permite la expansión de líquido aislante debido a los cambios lentos de presión por temperatura.
Radiadores	Ayudan al enfriamiento de la maquina por medio de aumento de área.
Transformadores de corriente	Instrumento de medida de corriente usado con fines de generación de imagen térmica y conexión a relés de protección.
ventiladores	Sistema de enfriamiento para etapa de aire forzado que incrementa el intercambio de calor y aumento en la transferencia de potencia eléctrica.
Relés de presión súbita	Ayuda a liberar las presiones rápidas de presión en el tanque.
Desecador de silica gel	Permite la recepción de humedad del aceite aislante con el fin de mantener sus cualidades aislantes y vida útil más prolongada.
Relé Buchholz	Alberga gases residuales de pequeñas descargas de baja energía, actuando como protección en dado caso se presente una alta concentración de ellos.
Analizador de gases	Es un equipo que constantemente monitorea a los gases disueltos en el aceite, con el fin de dar un aviso temprano por si se manifiesta una concentración elevación de gases.

Seguidamente, se enfatiza en puntos necesarios para el desarrollo del presente documento, como son las pérdidas, los armónicos y las normas aplicadas hacia el cálculo de penalización a la potencia del transformador por contenido armónico.

Las pérdidas de un transformador de más fácil cuantificación son en el núcleo y los devanados, las pérdidas en el núcleo también conocidas como pérdidas de vacío o sin carga son las producidas por el consumo energético por histéresis al magnetizarse ( $x_M$ , imagen 28) y las producidas por corrientes circulantes en las láminas de acero ( $r_p$ , imagen 28), estas pérdidas son medidas en la prueba de vacío energizando el transformador en uno de sus devanados y registrando la potencia disipada sin conectar el otro arrollamiento [32].

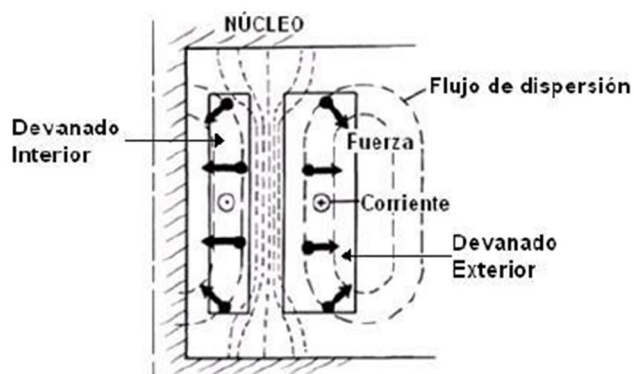
Imagen 30. Circuito equivalente de transformador. Tomado de [32]



Las pérdidas en los devanados conocidas como pérdidas en carga se deben a la potencia disipada por la parte resistiva de los conductores ( $r_1+r_2$ , imagen 28), sumada a los factores inductivos propios y mutuos de los enrollamientos ( $x_1+x_2$ , imagen 28). Se miden en la prueba de carga inyectando tensión en un devanado y cortocircuitando el otro devanado hasta llegar a la corriente nominal del devanado conectado a la fuente [32]. Como bien se sabe, las pérdidas inductivas de los devanados se atribuyen a un comportamiento de flujo contenido en el canal principal o entre bobinados, más aún al analizar al detalle se puede observar que estas pérdidas están compuestas en un porcentaje por la deformación de las líneas de flujo internándose en los cabezales de bobinas (creando corrientes de Eddy en el conductor) y en conjunto del flujo disperso fuera del bobinado que hace camino de retorno por los elementos metálicos adyacente a ellas como el tanque y las sujeciones metálicas de parte activa.

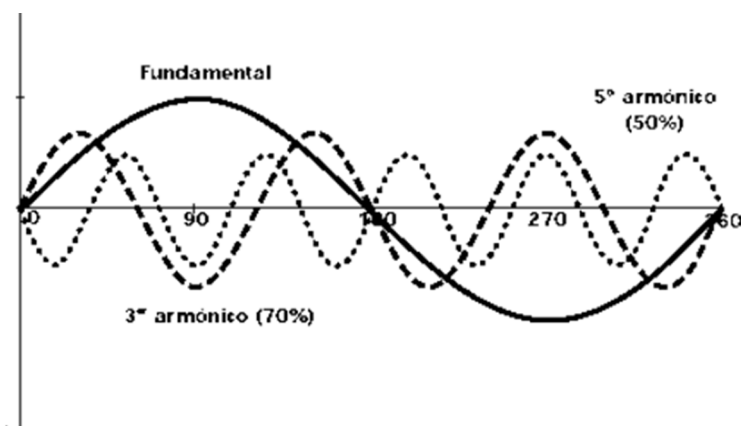


Imagen 31. Líneas de flujo magnético transformador. Tomado de [32]



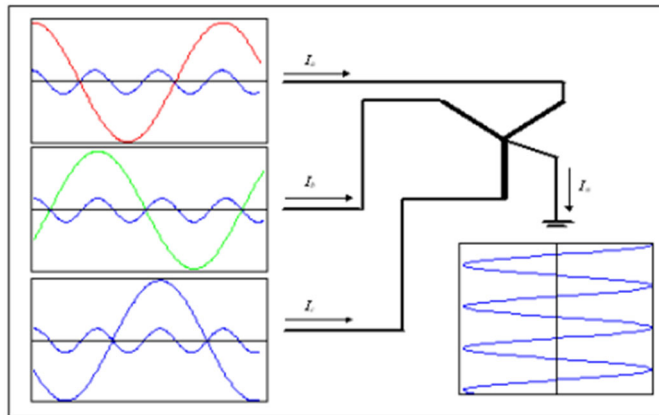
Los armónicos en los transformadores están presentes por varias condiciones, como son la producidos en la prueba de vacío dando forma a una señal de corriente llamada corriente de magnetización necesaria para que el núcleo se energice, esta señal cuenta con un alto contenido de 3<sup>er</sup> armónico, esta señal obedece a la cualidad no lineal del núcleo magnético. Otros casos más relevantes, son tales como la alimentación de cargas no lineales y electrónica de potencia en la fuente. Este tipo de cargas no lineales no están en sintonía con la forma senoidal de la fuente, generan pulsos deformándola, dentro de ellas hay una gran variedad de equipos como computadores, servidores, equipos de telecomunicación, entre otros, teniendo como factor común alimentar equipos electrónicos [33].

Imagen 32. Señal descompuesta en su 3er y 5to. armónico Tomado de [33]



Las corrientes armónicas se transmiten a través de las impedancias del sistema, proporcional a esto ocasionan caídas de tensión decantando en una baja calidad de energía. Uno de los casos más notables se tiene en ciertas configuraciones de transformadores como son con devanados en Y aterrizados, los armónicos triplens ( $3^{\circ}, 9^{\circ}, 15^{\circ}$ , etc) se vuelven relevantes ya que en redes balanceadas quedan en fase sumándose [33], como se muestra en la imagen 31. Para contrarrestar este efecto el transformador se le dimensiona el neutro en caso de estar aterrizado sólidamente (directamente con un conductor) o de otra forma, aterrizarlo con una resistencia o una reactancia, lo cual limita estas corrientes de secuencia cero al momento de su aparición por desbalance en el neutro y por ello no es fuente de análisis en el presente documento.

Imagen 33. Señal de neutro con los armónicos de 3er orden de un sistema trifásico en Y. Tomado de [33]



Eliminando el estudio de los armónicos anteriormente nombrados, aun se tienen armónicos de secuencia positiva (1, 4, 7, 10, 13, 16, 19...) y armónicos de secuencia negativa (2, 5, 8, 11, 14, 17, 20...). Ambas secuencias a frecuencias muy altas provocan pérdidas en el núcleo proporcionales al cuadrado de la corriente RMS; sin embargo, a bajas frecuencias son muy relevantes en las pérdidas en el cobre, puntualmente las pérdidas óhmicas por efecto piel, ya que al aumentar la frecuencia disminuye el área efectiva por donde circula la corriente, lo cuál se evidencia como un incremento en la resistencia ocasionando mayores temperaturas en el funcionamiento del equipo; por otra parte, la presencia de estos armónicos se refleja en corrientes parasitas o de Eddy, que son semejantes al cuadrado de la corriente de carga y frecuencia, ambas causas ocasionan un aumento de

la sección de conductor desde diseño del equipo. Para efectos prácticos del presente documento se utilizarán como estudio los armónicos ejemplificados en la norma C.57.12.110. que son 1, 5, 7, 11, 13, 17, 19.

## 1.4 El factor K de transformadores

En el estudio de armónicos, se presenta las norma para diseño de trasformadores en aplicaciones solares es la C57.159 de 2016 que aplica para transformadores en aceite y secos, para sistemas comerciales, industriales y de servicios públicos, con sistemas fotovoltaicos conectados a través de inversores que proporcionan corriente alterna por el devanado de baja tensión del trasformador, esta hace alusión a parámetros constructivos a grandes rasgos y remitiendo al cálculo de pérdidas por armónicos a la norma C57.12.110 de 2018; esta norma presenta una metodología para dimensionar la capacidad de suplir corrientes no sinusoidales como se muestra en el apéndice A, esta metodología conforma una base de cálculos para el desarrollo de la cuantificación del factor K.

En la actualidad, se cuenta con poca información detallada sobre la clasificación de contenido armónico en generación, presentando una propuesta para siguientes investigaciones la reproducción simplificada de aplicaciones en generación como se muestra en la tabla 4, dada por parte del autor [34] orientado hacia las cargas no lineales.

Tabla 4. Clasificación de factor K. tomado de: [34].

Tipo de carga	Factor K
Lámparas incandescentes (sin dimmers de estado sólido) calefactores eléctricos (sin controles de calor de estado sólido), motores (sin controladores de estado sólido), transformadores de control, dispositivos electromagnéticos de control, motor generador (sin controladores de estado sólido).	K-1
Lámparas de descarga, UPS con filtros de entrada opcional, equipos de calefacción inductivos, PLC y controladores de estado sólido.	K-4
Equipos de telecomunicaciones, UPS sin filtros de entrada.	K-13

---

Servidores de computadores, controladores de estado sólido (variadores de frecuencia), conectores multiconductor para instalaciones de salud, escuelas, etc., conectores multiconductor para alimentadores de equipos de inspección o prueba para líneas de producción.	K-20
Conectores multiconductor para circuitos industriales, médicos y laboratorios educacionales, conectores multiconductor para circuitos comerciales en oficinas, pequeños servidores.	K-30
Oras cargas identificadas como productores de grandes armónicos.	K-40

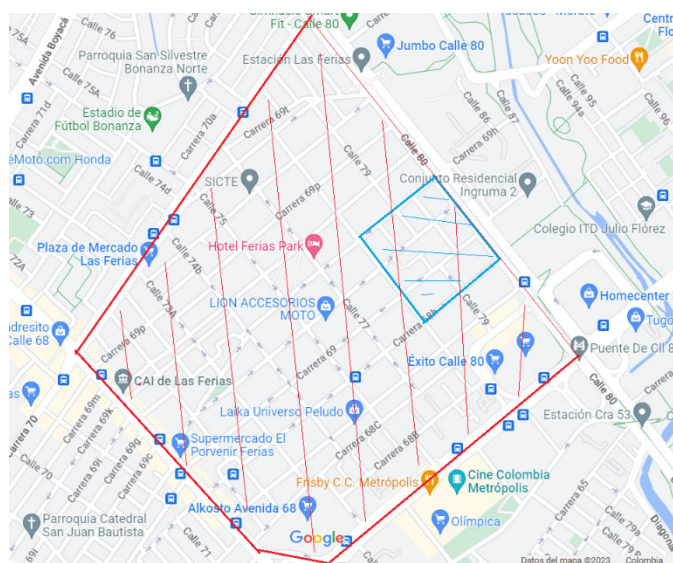
Adicionalmente, se puede observar que estos datos permiten una selección de manera rápida mas no al detalle del factor K indispensable en el momento de diseñar un equipo ya que sus costos pueden verse afectados y hacer un equipo no competitivo, ahora bien, la propuesta de desarrollo puede ser extendida en simulaciones de cargas dependiendo de la tecnología, para afinar dichos cálculos y poder optimizar el transformador elevador o reductor. Todo esto conlleva a que, llegado el momento de calcular proyectos ya sea de alimentación o consumo con equipos electrónicos se cuenta con información normalizada para su diseño, pero es importante presentar simulaciones que aproximen a la realidad dichas situaciones y brinden armónicos semejantes a los que se presentarán en la ejecución del proyecto.

## 2. Metodología y Análisis de resultados

### 2.1 Parámetros iniciales de simulación

En esta sección se expone el procedimiento planteado para dimensionar correctamente el factor K de un transformador tipo sumergido en aceite, partiendo de la selección de las condiciones iniciales como son la potencia demandada, tomada con base en una sección de 9 manzanas comprendidas entre la carrera 68H y 69H y entre la calle 80 y calle 79 del barrio Las Ferias, Bogotá obtenido de la fuente [35], esta terreno cuenta con 12 usuarios residenciales de vivienda multifamiliares o edificios, 10 usuarios industriales de pequeña mediana escala y 207 usuarios residenciales de viviendas unifamiliares o casas, para efectos prácticos con base en la experiencia del autor se le asignaron potencias electricas promedios de 225 kVA, 65 kVA y 8 kVA respectivamente y de forma unitaria ya que no se tiene información de perfiles de la carga, completando con esto un total de 5 MVA. Para efectos de visualización se utiliza la siguiente imagen tomada de Google maps donde se muestra el área de la demanda de 5 MVA y se puede realizar un símil del área total del barrio al que por aproximación se le asignará una capacidad promedio de potencia eléctrica de 45 MVA.

Imagen 34. Barrio Las Ferias Bogotá, Tomado de Google maps [36].  
Zona azul 5 MVA, zona roja 45 MVA.



En el caso de las condiciones de generación se tomarán el valor estándar del inversor ya que su funcionamiento se ve alterado al 90% (zona de confort), 100% (trabajo nominal) y 110% (zona de estrés). La temperatura de operación de igual forma es otro parámetro que afectará el funcionamiento en los equipos de generación por lo tanto se toman como referencia diferentes zonas del territorio donde se presentan como es el caso de 15 °C que pueden presentarse normalmente en territorios de gran altura con respecto al nivel del mar como es la ciudad de Bogotá (2640 m.s.n.m.), 25 °C que es la temperatura a una menor altura en territorios del eje cafetero y Medellín (1450 m.s.n.m.) y aunque las zonas más cálidas del territorio Colombiano oscilan entre 30 y 35 °C como son las zonas costeras, se toma como dato comparativo una temperatura de 40°C para tener información de rendimientos de los equipos bajo un alto estrés térmico. Por último, para las condiciones iniciales se fija el valor de radiación solar nominal de trabajo de los paneles de 1000 W/m<sup>2</sup> instaurando dos medidas adicionales con márgenes sobre el rendimiento de - 20% y + 30% sobre lo nominal para una recopilación más amplia de resultados en el presente estudio.

## 2.2 Modelo de simulación en MATLAB

En el siguiente proceso de la metodología, se parte de los datos de entrada para la ejecución de las simulaciones en MATLAB 2022a, licencia 40830014 de uso académico suministrada por la Universidad Nacional de Colombia. En la simulación de los paneles fotovoltaicos se cuenta con un bloque modelo PV de simulación desarrollado por [36], en él se plantean la configuración de paneles policristalinos marca trina solar TSM-310PD14 de 310 Wp (Vatios Pico), la información detallada se presenta en la imagen 35.

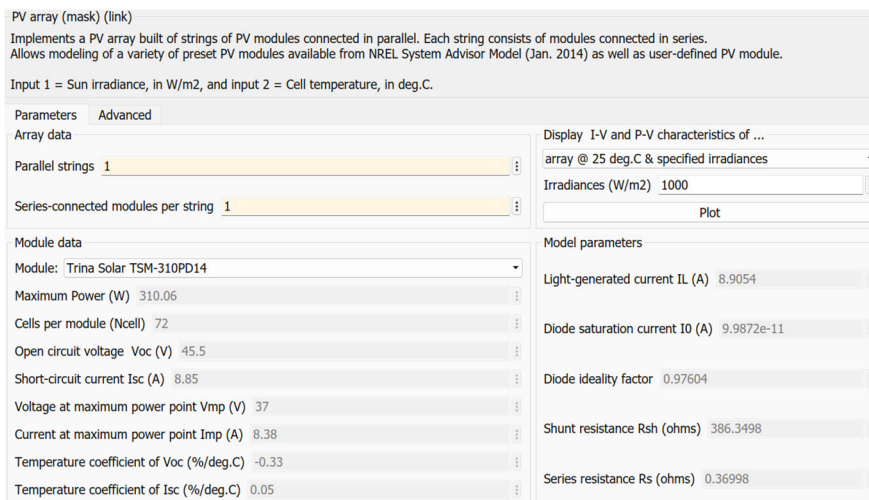
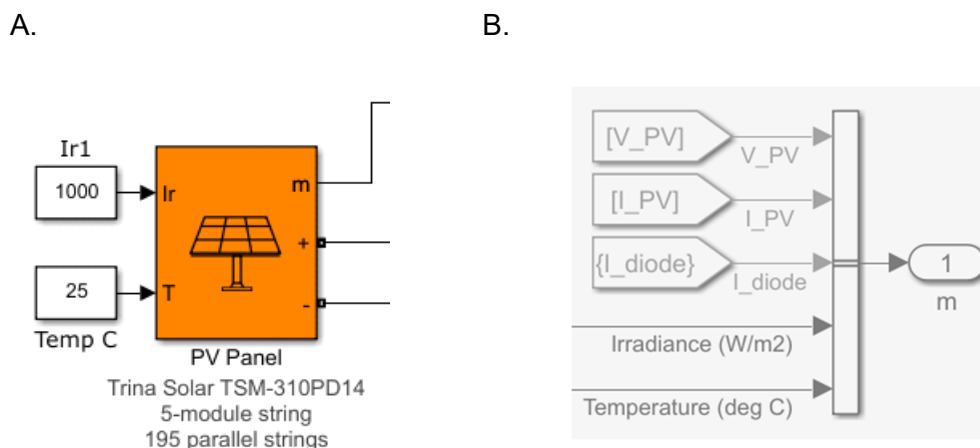


Imagen 35.  
Configuración de  
entrada paneles  
Trina Solar TSM-  
310PD14.

El arreglo de paneles para la simulación dispone de 5 paneles en paralelo para conseguir un nivel de tensión de 220 V en vacío y 195 paneles en serie para un total de 972 paneles con una capacidad de 302.308 kWp (kilovatios Pico). El módulo PV tendrá como principales entradas la temperatura e irradiancia de operación, para ello el estudio abordará radiaciones solares de  $1000 \text{ w/m}^2$  (Vatios por metro cuadrado),  $800 \text{ w/m}^2$  y  $1300 \text{ w/m}^2$ , con una temperatura fija de  $25^\circ\text{C}$  (grados centígrados), luego se deja la radiación de trabajo nominal de  $1000 \text{ w/m}^2$  y se disponen temperaturas de  $15^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$  y  $40^\circ\text{C}$ , para ello se instala en la red el bloque mostrado en la imagen 36.

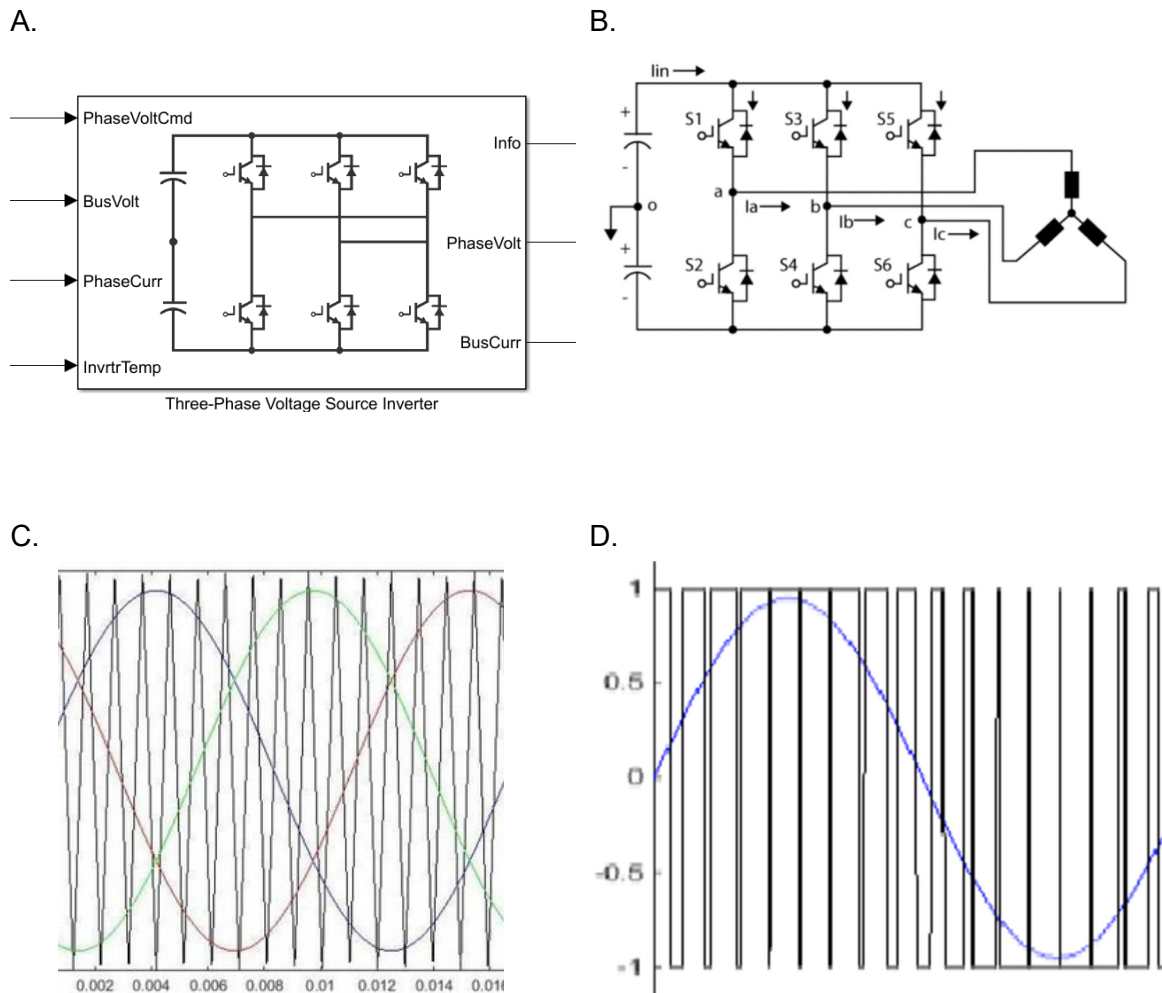
Imagen 36. Simulación de bloque PV. A. PV panel reducido. B. Salida demultiplexada de corriente, tensión y entradas para mediciones.



Para la simulación del inversor trifásico, se dispone un único módulo de inversión trifásico con fines de selección de pocos elementos en la simulación y se pueda iterar en menor tiempo, obtenido de la librería de Matlab Autolibinverter, que dispone de un comando de entrada de tensión trifásica a tierra para su conmutación tipo PWM (PhaseVoltCmd), la tensión DC provista por la fuente (BusVolt) y la corriente de fase que en este caso será la corriente provista por los paneles (PhaseCurr), como parte de la simulación térmica se ingresa el parámetro de temperatura tanto en los paneles como en el inversor y en este caso en la variable (InvtrTemp). Como salidas se tienen parámetros de corriente y tensión trifásica (PhaseVolt y BusCurr) que alimentara el circuito de baja tensión del transformador a un nivel de tensión de 220 VAC en Vacío y 208 VAC en carga.

La entrada que es una señal senoidal a 60 Hz dada en representación de la tensión en la red o señal de referencia y una señal portadora u onda triangular a 2.46 kHz que generarán un total de 21 pulsos por semiciclo de la señal senoidal. Esta será la entrada de los componentes semiconductores del bloque para generar los pulsos que desarrollarán la señal de salida y contando con un retraso entre fases de 0.62 mS para la equivalencia de sistema trifásico a 120° cada fase. La imagen 37 permite ver la estructura, el flujo de potencia en el circuito inversor y el planteamiento de dicha señal.

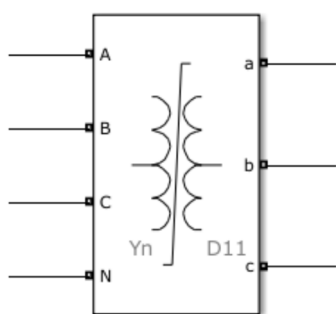
Imagen 37. Simulación de bloque Inversor. A. Inversor reducido. B. Flujo de corrientes en el inversor trifásico. C. Señal diente de sierra y onda senoidal. D. señal PWM resultante v senoidal de entrada.





En la etapa de transformación se hace uso del bloque de transformador trifásico de dos devanados de Matlab en la sección de Powergrids Elements con los datos de entrada como muestra la figura 37.

Imagen 38. Módulo de simulación de transformador Trifásico y sus entradas en MATLAB.



Potencia: 300 kVA.  
 Niveles de tensión: 208/11400 V.  
 Norma de diseño: Norma técnica colombiana NTC.  
 Corriente máxima devanado primario: 832.72 A.  
 Corriente máxima devanado secundario: 8.77 A.  
 Impedancia 5% @ 85°C.  
 Pérdidas de vacío 1092 W.  
 Pérdidas en carga 4959 W @ 85°C.  
 Conexión Ynd11

Dentro de la información necesaria para una correcta simulación se debe obtener las pérdidas por corriente de Eddy en los devanados, con el fin de encontrar esta información se hace uso de FEMM (Finite Element Method Magnetics) software con licencia libre que analiza por medio del uso del método de elementos finitos la potencia consumida en los devanados a causa del flujo disperso que se interioriza en los devanados, en las siguientes ilustraciones se muestran los resultados gráficos de dicha simulación con la siguiente geometría del transformador elegido para la simulación. Para ello las condiciones de frontera en este caso son magnéticas llamada VENTANA ya que el esquema en que se desarrolla la simulación contiene un corte longitudinal del espacio donde se alberga el bobinado.

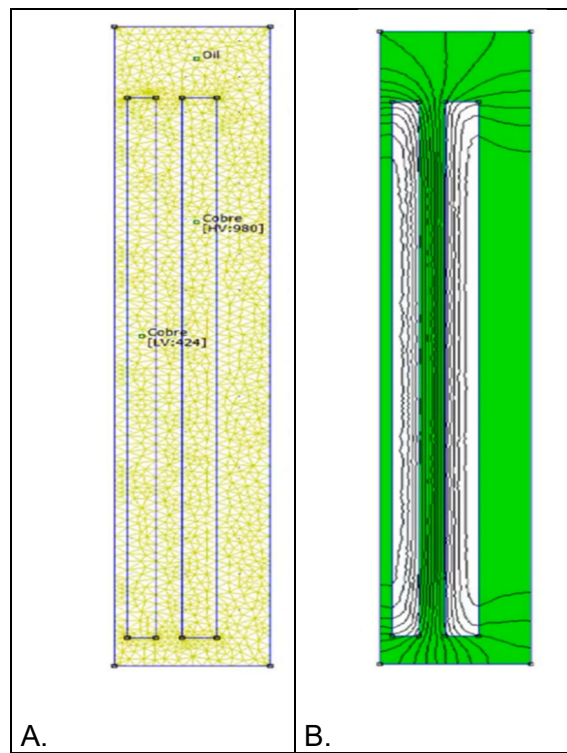
Tabla 5. Coordenadas para uso en el software de simulación FEMM.

Definir las medidas del Transf.		Cálculo de coordenadas					
	mm.		x	y	x	y	
Altura ventana	680	1	180	180	280	280	VENTANA
Ancho ventana	260	2	180	860	280	960	
Altura núcleo	1040	3	440	860	540	960	
Ancho núcleo	180	4	440	180	540	280	
Altura BT	420	5	183	310	283	410	BT
Altura AT	419	6	183	730	283	830	

Dimensión radial BT	31	7	214	310	314	410	AT
Dimensión radial AT	37,2	8	214	730	314	830	
Dimensión radial BT-AT	35,3	10	218,3	310	318	410,5	
Dimensión radial Núcleo-BT	3	11	255	310	355	410,5	
		12	218,3	729	318	829,5	
		13	255	729	355	829,5	

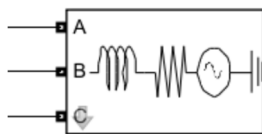
Como se puede observar en la imagen 38.B. los devanados experimentan líneas del flujo magnético internas causando pérdidas por corrientes de Eddy que serán el tipo de pérdidas susceptibles a la presencia de armónicos y de uso en la metodología presentada en el anexo A, para encontrar este dato se seleccionan ambos devanados en FEMM y se calcula la potencia requerida por este flujo dentro del devanado primario y secundario respecto a la potencia total de pérdidas del transformador dando como resultado un porcentaje de 9.57% o 474.57 W del total de 4959 W de pérdidas en carga.

Imagen 39. Simulación de ventana de núcleo con FEMM. A. Diseño de la malla con la opción fina en el software. B. disposición de las líneas de campo eléctrico por la energización de los devanados.



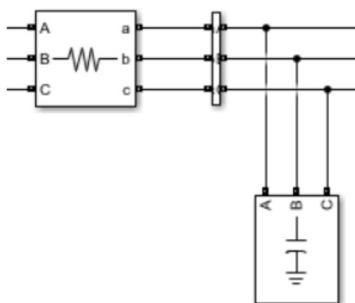
La representación del sistema eléctrico de distribución en este estudio es de tipo radial, se representa mediante un bloque con una fuente, un resistor y un inductor, generando un equivalente a sistema de distribución inductivo a un factor de potencia de 0.9 tomando para las simulaciones la peor situación para la red permitido por la resolución 18 de 2015 de la CREG. Con el fin de dimensionar el sistema de 5 MVA se posiciona una impedancia de  $28.88 + 59.64j \Omega$  y para los casos con el sistema de 45 MVA una impedancia de  $3.21 + 6.63j \Omega$  ambos al nivel de media tensión de 11400 V, siendo estos valores los ingresados al bloque e incluido en el sistema como muestra la imagen 40 y teniendo en cuenta que la condición es nominal ya que la variación de este parámetro no entra en el presente estudio.

Imagen 40. Simulación de sistema de distribución.



El filtro trifásico utilizado en la simulación es encontrado como Power HarmonicFilter provisto de igual forma que el transformador por la librería Powergrids Elements, es de tipo pasivo de primer orden conformado por una parte resistiva (R) y una parte capacitiva (C), se ubica en el devanado de baja tensión del transformador para los casos de estudio donde esta incorporado, la información de entrada está dada para generar un filtro pasa bajos hasta una frecuencia de 60 Hz (correspondiente a la frecuencia industrial), permitiendo eliminar las frecuencias mayores, para el caso de estudio se fija valores de filtro con un valor resistivo de  $18 \Omega$  y un capacitor de  $147,36 \mu\text{F}$ . La conexión del módulo es como se muestra la imagen 40.

Imagen 41. Filtro de potencia para armónicos.



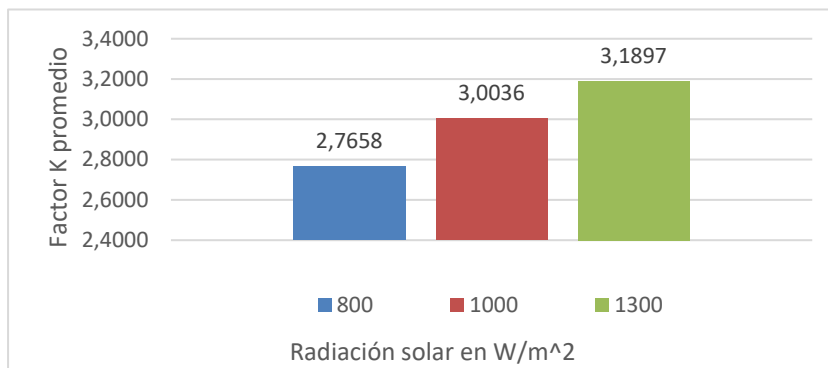
Dentro de la simulación se emplearon bloques diversos de medición de tensión y corriente, adicionalmente medición del espectro de frecuencias mediante la transformada rápida de

Fourier para finalmente ser exportadas a tablas en un archivo de Excel que permitiera optimizar la obtención de información eficientemente de parte del bloque completo de simulación.

## 2.3 Resultados obtenidos e interpretación comparativa

En un resumen de resultados de los casos de estudio planteados en el numeral 2.1, se diseña una matriz comparativa que se clasifica para una red de 5 MVA y la red de 45 MVA, con variaciones al 90%, 100% y 110% en su capacidad de generación, condiciones de temperatura de 15°C, 25°C y 40°C, y de radiación solar recibida de 800 W/m<sup>2</sup>, 1000 W/m<sup>2</sup> y 1300 W/m<sup>2</sup>, exhibidos en la tabla 7 - anexo B, aplicando la formulación del anexo A y obteniendo el factor K que finalmente encuentra la relación entre las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados y el aumento de ellas por la presencia de los armónicos dados por el bloque de simulación. En un primer análisis de resultados obtenidos, se puede relacionar estadísticamente el impacto que tiene la variabilidad del factor K debido a los diferentes valores de radiación solar sobre los paneles como se muestra en la imagen 42.

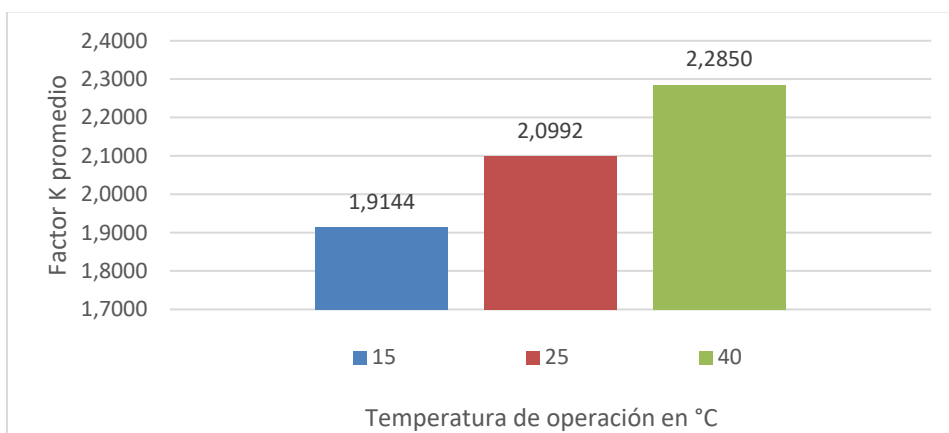
Imagen 42. Relación del factor K promedio según la radiación solar en los paneles solares.



En los resultados de esta relación, se puede observar que en promedio para caso nominal de diseño de paneles que es 1000 W/m<sup>2</sup> presenta un factor K-3 y una reducción de dicho factor en un 7,92% para el caso de recepción de 800 W/m<sup>2</sup> y un aumento del 6.19% para el caso de una recepción mayor a la nominal de 1300 W/m<sup>2</sup>.

En una segunda relación dados los resultados obtenidos, se plantea la variación del factor K debido a las diferentes temperaturas de operación, dentro de la simulación se incorporan parámetros que afectan el rendimiento de los equipos en general y no únicamente los paneles solares. Los resultados obtenidos se exhiben en la imagen 43.

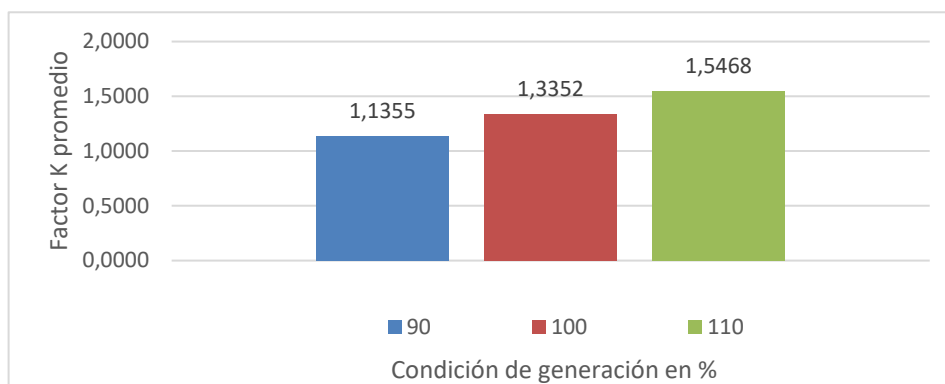
Imagen 43. Relación del factor K promedio según la temperatura de operación.



En esta segunda relación, se puede observar que en promedio para el caso nominal de operación establecido a 25°C el modelamiento del sistema expone aproximadamente un factor K-2.1 y para el caso de 15 °C una reducción del 8.81% y un aumento del 8.85% para el caso de una mayor temperatura de operación de 40°C.

Una tercera relación dada de los resultados obtenidos plantea la variación del factor K debido a los diferentes porcentajes de generación que pueden tener los equipos, esta situación puede darse debido a la demanda variable de dicha energía por parte de la red. Los resultados obtenidos se exhiben en la imagen 44.

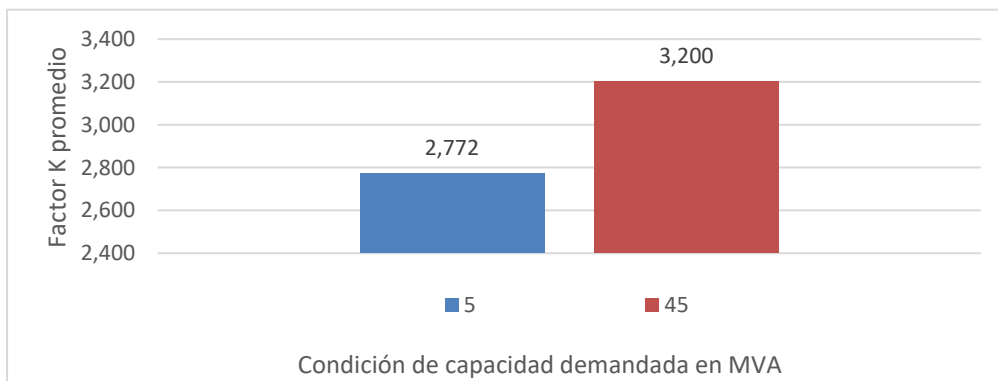
Imagen 44. Relación del factor K promedio debido a la demanda en porcentaje.



En esta tercera relación, se puede observar que en promedio para el caso nominal de operación con energía demandada del 100%, el transformador percibe aproximadamente un factor  $K-1.3$ , para el caso de una demanda disminuida del 10% cuenta con una reducción del 13.5% y un aumento del 15.8% para el caso de demanda energética del 110%.

Por último, se relaciona el papel que tiene la diferencia de dos redes de diferente capacidad demandada en la presencia de armónicos por generación, para establecer esta relación se proponen los resultados de la imagen 45.

Imagen 45. Relación del factor K promedio debido a la capacidad demanda en MVA.



En los resultados obtenidos se puede notar que en condiciones nominales de operación, es decir temperatura a  $25^{\circ}\text{C}$  y radiación solar de  $1000\text{ W/m}^2$  en los sistemas de 5 MVA y 45 MVA sin sobrecarga de generación, la simulación arroja valores por debajo de ser un  $K-3$ , que en la tabla 4 puede ser asemejado a un factor  $K-4$ , congruente con la selección de controladores de estado sólido que contiene componentes electrónicos de potencia, de igual forma, en condiciones extremas de operación es capaz de alcanzar casi un factor de  $K-6$  que en la categorización de la tabla 4 no permite una selección equivalente ya que el factor por encima se encuentra a un múltiplo de  $K-13$ , el cual pertenece a equipos sin filtros que no es el caso de los inversores de potencia y en la condición de menor exigencia se mantiene dentro del factor  $K-1$  que son invariantes las pérdidas por armónicos de la base de pérdidas por corrientes de Eddy propias del transformador sin cargas no lineales.

---

## 3. Conclusiones y recomendaciones

### 3.1 Conclusiones

En el presente estudio se seleccionó un montaje de sistema on grid que consta de un panel solar policristalino de 310 Wp, un inversor PWM de 21 pulsos por semiciclo, un transformador trifásico sumergido en aceite de 300 kVA, un filtro pasivo RLC y una impedancia con la que se simularon dos valores de carga: 5 y 45 MVA, se pudo determinar que la magnitud del factor K para el desempeño óptimo del transformador seleccionado es K-3.2.

Por medio de los modelos de simulación propuestos en MATLAB del numeral 2.2 se logró incorporar la configuración de paneles fotovoltaicos, un modulo inversor, un modulo de transformación, adicionalmente un filtro pasivo y la carga para obtener los resultados de los casos de estudio de armónicos bajo las diferentes condiciones de porcentajes de carga, capacidades del sistema, temperatura e irradiancia.

Por medio del análisis de armónicos propuestos en el modelo de simulación del presente documento de la mano de la normativa IEEE C57.12.110, se obtuvo que las condiciones de armónicos que más impactan al factor K, son la radiación solar superior a la nominal para la cual los paneles y el inversor fueron diseñados, con un factor de 3.19 en el caso de 5 MVA y de igual forma al ser instalado en la red de 45 MVA con un valor promedio de 3.2.

Para este caso de estudio el factor K determinado muestra que la única condición en la cual no se debe tener en cuenta el incremento de pérdidas por contenido armónico, es el caso en la redes de 5 MVA y 45 MVA con las mejores condiciones de temperatura, de sobre carga y de radiación solar, lo que brinda la primicia de que ante cualquier otra condición de operación se debe tener en cuenta este fenómeno, ya que al omitirlo se verá reflejado en las temperaturas de elevación en el transformador y la disminución de la vida útil del mismo por deterioro en aislamientos.

Para la selección del factor K de transformadores se debe tener en cuenta el tamaño de la red, ya que al disminuir la capacidad de la red de distribución radial obtiene más relevancia

la generación por parte de los paneles fotovoltaicos que derivan en mayor contenido armónico, por tanto, deben ser seleccionados filtros de mayor capacidad, en el caso de estudio presenta en promedio un aumento del 16.01% al pasar la granja fotovoltaica de una red de 45 MVA a una red de 5 MVA.

## **3.2 Recomendaciones**

Es necesario establecer una tabla de rangos de factores K como la tabla 4 para cargas no lineales, pero para transformadores dispuestos en generadores fotovoltaicos conectados a la red, basándose en las diversas experiencias de este tipo de proyectos, ya que la información actual es insuficiente para poder determinarlo y en la práctica realizado por aproximación puede agrandar o reducir de forma considerable al equipo, de tal forma que no sea competitivo o presente fallas tempranas. Dicha clasificación debe incluir para trabajos posteriores los diferentes tipos de tecnologías en inversores, en filtros y distintas cargas, bajo las posibles topologías que puede presentar el sistema de distribución al cual será instalado.

Dada la variedad de impactos que pueden tener los armónicos sobre los transformadores, se puede extender la metodología desarrollada en este trabajo como punto de partida de análisis hacia otros efectos como son los térmicos y sus consecuencias sobre la vida útil, ya que otros efectos se encuentran fuera del alcance de la norma C.57.110.



## A. Anexo: Metodología de cálculo de penalización en la potencia nominal bajo norma IEEE C57.12.110

La metodología de cálculo del presente documento se fundamenta en la norma IEEE C57.12.110 de 2018, donde se abordan los armónicos 1,5,7,11,13,17 y 19 propuestos por la misma norma para determinar la disminución de corriente nominal máxima y sea referido de forma similar a la tabla 4, es decir en una escala proporcional a las veces en que aumentan las pérdidas por corrientes armónicas.

$$\mathbf{Factor\ } K = \sum_{h=1}^{\infty} I_h (PU)^2 h^2$$

Donde:

$I_h$  (**pu**) es la corriente R.M.S. para la armónica de orden  $h$  (en pu por unidad)

$h$  corresponde al orden de la componente armónica.

La misma norma presenta una ecuación de evaluación de corriente máxima penalizada por la presencia de armónicos y se puede encontrar mediante la ecuación mostrada a continuación:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=hmax} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=hmax} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2}$$

Donde:

$F_{HL}$  es el factor de pérdida de armónicos para las corrientes de Eddy del devanado

$h$  es el orden de los armónicos

$h_{max}$  es el número de armónicos más significativo

$I_h$  es la corriente eficaz en el armónico  $h$  (amperios)

$I$  es la corriente eficaz de carga (amperios)

Luego, obtenido el factor  $F_{HL}$ , se procede a calcular la corriente máxima permitida por el contenido armónico presente y se realiza de la siguiente manera:

$$I_{max}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + F_{HL} \times P_{EC-R}(pu)}}$$

$I_{max}(pu)$  es la máxima corriente de carga rms no sinusoidal permitida en condiciones nominales

$P_{LL-R}(pu)$  es la pérdida de carga por unidad en condiciones nominales

$F_{HL}$  es el factor de pérdida de armónicos para las corrientes de Foucault del devanado

$P_{EC-R}(pu)$  es la pérdida por unidad de corriente de Foucault del devanado en condiciones nominales

## B. Anexo: Resultados obtenidos en cada caso de simulación

En este apartado se establecen los resultados obtenidos de forma extendida para los parámetros planteados en el numeral 2.1, para lograr estos objetivos se utiliza la metodología del anexo A.

Tabla 7. Matriz de resultados caso de estudio.

	Potencia de la red (MVA)	Condición de generación Inversor (%)	Temperatura de operación (°C)	Radiación solar (W/m <sup>2</sup> )	Corriente penalizada respecto a la nominal (%)	factor de pérdidas aumentado por pérdidas de Eddy en devanados (factor K)
Matriz de resultados	45	90	15	800	98,33	1,0
				1000	98,15	1,1
				1300	97,77	1,3
			25	800	97,86	1,3
				1000	97,37	1,6
				1300	97,04	1,8
			40	800	97,19	1,7
				1000	96,86	1,9
				1300	96,33	2,2
		100	15	800	96,45	2,1
				1000	95,92	2,4
				1300	95,69	2,6
			25	800	95,75	2,5
				1000	95,58	2,6
				1300	95,31	2,8
			40	800	95,15	2,9
				1000	94,99	3,0
				1300	94,86	3,1
		110	15	800	94,71	3,2
				1000	94,12	3,5
				1300	93,64	3,8
			25	800	93,38	3,9
				1000	93,06	4,1
				1300	92,94	4,2

			40	800	92,5	4,5	
				1000	91,91	4,8	
				1300	91,57	5,0	
	5	90	15	800	98,33	1,0	
				1000	97,69	1,4	
				1300	97,31	1,6	
			25	800	97,4	1,5	
				1000	96,91	1,8	
				1300	96,58	2,0	
			40	800	96,73	1,9	
				1000	96,4	2,1	
				1300	95,87	2,5	
			100	15	800	95,99	2,4
					1000	95,46	2,7
					1300	95,23	2,8
	25	800		95,29	2,8		
		1000		95,12	2,9		
		1300		94,85	3,1		
	40	800		94,07	3,5		
		1000		93,91	3,6		
		1300		93,78	3,7		
	110	15	800	93,63	3,8		
			1000	93,04	4,1		
			1300	92,56	4,4		
		25	800	92,3	4,6		
			1000	91,98	4,8		
			1300	91,86	4,9		
		40	800	91,42	5,1		
			1000	90,83	5,5		
			1300	90,49	5,7		

## Bibliografía

- [1] J. C. B. Roa, D. C. S. Villamizar, and R. E. V. Vallejo, "Guía Para El Cálculo De Huella De Carbono Y Sus Implicaciones En La Industria Colombiana," Repository, p. 49, 2015.
- [2] A. J. Bazurto Cubillos, J. Zúñiga Balanta, D. F. Echeverry, and C. A. Lozano, "Perspectiva del transformador de distribución en redes eléctricas con alta penetración de generación distribuida y vehículos eléctricos," *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 26, no. 2, pp. 35–48, 2016, doi: 10.18359/rcin.1710.
- [3] CREG. Resolución 030 de 2018. pp. 1–32, 2018.
- [4] Unidad de Planeación Minero-Energética UPME and Ministerio de Minas y Energía, "Informe de Registro de Proyectos de Generación Inscripción según requisitos de las Resoluciones UPME No. 0520, No. 0638 de 2007 y No. 0143," *Minist. Minas y Energía MME*, no. 0520, p. 42, 2021, [Consultado el 23 de octubre de 2022] Disponible en: [http://www.siel.gov.co/Generacion\\_sz/Inscripcion/2021/Registro\\_marzo\\_2021.pdf](http://www.siel.gov.co/Generacion_sz/Inscripcion/2021/Registro_marzo_2021.pdf).
- [5] I. Stoyanov, T. Iliev, B. Evstatiev, and G. Mihaylov, "Harmonic Distortion by Single-Phase Photovoltaic Inverter," 2019 11th Int. Symp. Adv. Top. Electr. Eng. ATEE 2019, pp. 19–22, 2019, doi: 10.1109/ATEE.2019.8725009.
- [6] A. Gómez, J. Miguel, A. Córdova, R. Alfonso, and I. Salinas, "Estimación del factor K en transformadores de distribución usando modelos de regresión lineal," *Tecnura*, vol. 20, no. 48, pp. 29–40, 2016, doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016. 2. a 02.
- [7] González, M. G. (2014). Sistema de generación eléctrica con pila de combustible de óxido sólido alimentado con residuos forestales y su optimización mediante algoritmos basados en nubes de partículas Doctoral- Universidad Nacional de Educación a Distancia- España, 17–38.

- [8] López Espada, J. M. (2018). Generación Distribuida: Tecnologías de Generación y Sistemas de Almacenamiento de Energía. 139. <https://idus.us.es/xmlui/handle//11441/85419>
- [9] Arbia, C. (2018). Los 6 pasos para poder vender energía eléctrica hogareña y ahorrar dinero en la factura de luz los próximos días, y algunas disposiciones reglamentarias más para que los usuarios y las empresas puedan generar su propia energía renovable. 1–15.
- [10] COGEN. (2021). An ambitious Fit for 55 with cogeneration. Position Paper-An Ambitious European Green Deal with Cogeneration, 1–16.
- [11] International Energy Agency (IEA) – CHP/DHC - Country Scorecard - USA 2006. Disponible en: [www.iea.org](http://www.iea.org)
- [12] Osorio-Londoño, I. (2017). Impactos ambientales, sociales y económicos de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en Antioquia. Universidad EAFIT, 56. [https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/11732/OsorioLondoño\\_Iverson\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/11732/OsorioLondoño_Iverson_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [13] Patarroyo, A., Triana, C. A. R., Beltrán, A. H., Ocaciones, M. A., Matéus, J., Guerrero, O. D., Ovalle, J., & Goyeneche, H. (2020). Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH'S). 1–98. <http://www.unilibre.edu.co/revistaingeniolibre/revista-12/ar9.pdf>
- [14] NREL. (2007). Sistemas Eólicos Pequeños para Generación de Electricidad Una guía para Nuevo México. 27.
- [15] Griffa, B., & Marcó, L. (2017). Actualidad de la energía eólica a nivel mundial: generación, fabricantes, comercio exterior y precios. Ciepe Centro De Investigación En Economía Y Planeamiento Energético, 19. <https://www.unsam.edu.ar/escuelas/economia/Ciepe/pdf/Energiaeolica.pdf>
- [16] Rodríguez-Meza, M. A.; Cervantes-Cota, Jorge L. El efecto fotoeléctrico Ciencia Ergo sum, vol. 13, núm. 3, noviembre-febrero, 2006, pp. 303-311 Universidad Autónoma del Estado de México Toluca, México.
- [17] El consultor solar. 2022. Consultado en: <https://elconsultorsolar.com/diferencias-paneles-monocristalinos-policristalinos/>
- [18] Ley 1715 UPME, consultado en: [http://www.upme.gov.co/normatividad/nacional/2014/ley\\_1715\\_2014.pdf](http://www.upme.gov.co/normatividad/nacional/2014/ley_1715_2014.pdf)

- [19] Resolución 703 de 2017. Consultado en: [https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_upme\\_0703\\_2018.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_upme_0703_2018.htm)
- [20] Resolución 1312 de 2016. Consultado en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-1312-de-2016.pdf>
- [21] Resolución 281 de 2015. UPME. Consultado en: <https://vlex.com.co/vid/resolucion-numero-281-2015-573569346>
- [22] Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). 2022. Consultado en: <https://www1.upme.gov.co/>
- [23] Proyección Demanda Energía Eléctrica y Gas Natural. UPME 2021. Consultado en: [https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/UPME\\_Proyeccion\\_Demanda\\_Energia\\_Junio\\_2021.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/UPME_Proyeccion_Demanda_Energia_Junio_2021.pdf)
- [24] Gonzales Zamora, V. (2020). Tecnología De Inversores En Sistemas Fotovoltaicos. 1–5. [http://www.citeenergia.com.pe/wp-content/uploads/2020/07/Ing.-Victor-Gonzales-Zamora\\_compressed.pdf](http://www.citeenergia.com.pe/wp-content/uploads/2020/07/Ing.-Victor-Gonzales-Zamora_compressed.pdf)
- [25] Alonso, M. (2011). Máster en Energías Renovables y Mercado Energético. Ciemat, 1(1), 59. [http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:45340/componente45338.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45340/componente45338.pdf)
- [26] Autosolar. 2022. Consultado en: <https://autosolar.es/aspectos-tecnicos/como-son-los-inversores-de-onda-senoidal>
- [27] De la Torre, F. (2015). Unidad 2 - Accionamientos Electromecánicos Transformadores. Un Transformador Es Un Dispositivo Eléctrico Que Permite Aumentar o Disminuir La Tensión en Un Circuito Eléctrico de Corriente Alterna., 1–20.
- [28] Silveira, A. M. M. da. (2011). Transformadores. Neutro a Terra, 8. Consultado en: <https://doi.org/10.26537/neutroaterra.v0i8.356>
- [29] Perez, S. M., & Lopez, J. G. (2018). Transformadores eléctricos. In Universidad Tecnológica de Pereira, 2018.
- [30] Mheducation. (2020). Ensayo de transformadores 4. 16. Consultado en: <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448141784.pdf>

- [31] Eléctrica, I., David, J., & Ospina, Z. (2020). Ciencia Unisalle Evaluación del efecto de la saturación magnética del núcleo sobre las fuerzas de cortocircuito en transformadores de distribución.
- [32] De, I., & Linear, C. (2016). Transformadores Resumen Teórico – Parte II.
- [33] AESoluciones. (2014). Los Efectos De Los Armónicos Y Sus Soluciones. 10. aesoluciones@aes.com
- [34] Astorga Gómez, J. M., Aróstica Córdova, R. A., & Iriarte Salinas, Y. A. (2016). Estimación del factor K en transformadores de distribución usando modelos de regresión lineal. Revista Tecnura, 20(48), 29–40. <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/10546>
- [35] Urbanismo Bogotá. (2022). Consultado el 24 de noviembre de 2022 de: <https://www.habitatbogota.gov.co/urbanismo>
- [36] Google Maps (2022.). Consultado el 24 de noviembre de 2022 de: <https://www.google.com/maps/@4.6863394,-74.0856141,16z?hl=es>
- [37] Saad Motahhir (2022). MATLAB/Simulink Model of Photovoltaic Cell, Panel and Array (<https://github.com/motahhir/MATLAB-Simulink-Model-of-Photovoltaic-Cell-Panel-and-Array->), GitHub. Recuperado November 24, 2022.