



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

**TÍTULO:
REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LAS
PÉRDIDAS ELÉCTRICAS ASOCIADAS A EVENTOS DE
CALIDAD DE LA ENERGÍA**

**Autor:
DARCY MARYOLY GARCÉS OJEDA**

**Director:
M.Sc. EDISON ANDRÉS CAICEDO PEÑARANDA**

PAMPLONA-COLOMBIA

JUNIO DE 2022



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

**TÍTULO:
REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LAS
PÉRDIDAS ELÉCTRICAS ASOCIADAS A EVENTOS DE
CALIDAD DE LA ENERGÍA**

**Autor:
DARCY MARYOLY GARCÉS OJEDA**

**Director:
M.Sc. EDISON ANDRÉS CAICEDO PEÑARANDA**

**JURADO CALIFICADOR:
M.Sc. VICTOR MANUEL GARRIDO
M.Sc. LIBARDO GAMBOA ARAQUE
M.Sc. EDISON ANDRÉS CAICEDO PEÑARANDA**

PAMPLONA-COLOMBIA

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres quienes, con su amor, trabajo, compromiso y sacrificio, me llenaron de fortaleza y me dieron los medios para llevar a cabo un proyecto de tal magnitud en mi vida.

A mis hermanos por estar siempre a mi lado, acompañándome en este camino y por el apoyo que me dieron a lo largo de estos últimos 5 años.

En síntesis, mi familia sin duda alguna, es el motor de mi vida, es por ello que este logro es por y para ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a Dios, por ser mi guía y acompañante en el transcurso de mi vida, por darme fuerzas en tiempos de dificultades y por cada día demostrarme su amor.

A mis padres Judith Ojeda y Raúl Garces quienes han sido ese pilar fundamental e incondicional para cumplir hoy un sueño más.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que este trabajo culmine satisfactoriamente, especialmente para las personas que me abrieron sus puertas y me compartieron sus conocimientos para finalizar este documento.

Finalmente, quiero expresar mis agradecimientos al M.Sc. Edison Andrés Caicedo Peñaranda, quien con sus conocimientos, experiencias, enseñanzas y colaboración me han guiado en el desarrollo de este trabajo.

RESUMEN

Inicialmente se hará una identificación de métodos de cálculo o de estimación de las pérdidas eléctricas, estos métodos se categorizaron en 4 categorías que son las siguientes: Métodos para las pérdidas en los transformadores, métodos para el cálculo de las pérdidas en los cables, métodos tradicionales y aquellos métodos basados en inteligencia artificial; en cada categoría se especifican según el comportamiento del sistema, las condiciones de fenómenos de calidad de la energía a las que esté expuesto.

Seguidamente se estructuran los métodos especificando equipos de medidas que se pueden utilizar para establecer las corrientes, voltajes, potencias, armónico, resistencia, etc., según sea el caso y las condiciones de cada método, por otro lado, se hizo referencia al nivel de precisión y complejidad en cuanto a la aplicación de cada uno de los métodos determinados.

Finalmente se describen los métodos viables a implementar en sistemas de distribución del contexto nacional, en el que específicamente se menciona el método por flujo de potencia y el método de algoritmo de red neuronal.

ABSTRACT

Initial identification of methods for calculating or estimating power losses, these methods were categorized into 4 categories which are as follows: Methods for losses in transformers, methods for calculating losses in cables, traditional methods and those methods based on artificial intelligence; in each category the conditions of energy quality phenomena to which it is exposed are specified according to the behavior of the system.

The methods are then structured by specifying measuring equipment that can be used to establish the currents, voltages, powers, harmonic, resistance, etc., according to the case and the conditions of each method, on the other hand, reference was made to the level of precision and complexity in the application of each of the methods identified.

Finally, we describe the viable methods to be implemented in distribution systems of the national context, in which the power flow method and the neural network algorithm method are specifically mentioned.

PALABRAS CLAVES

Pérdidas energía eléctrica, calidad de la energía, sistema de distribución, transformadores, cables, inteligencia artificial, fenómenos electromagnéticos, perturbaciones, corriente, voltaje, potencia.

KEYWORDS

Electrical energy losses, power quality, distribution system, transformers, cables, artificial intelligence, electromagnetic phenomena, disturbances, current, voltage, power.

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del Problema	1
1.2 Justificación	2
1.3 Delimitación	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.3.3 Acotaciones	3
2 MARCO REFERENCIAL	4
2.1 Sistema de suministro eléctrico	4
2.2 Calidad de la energía	5
2.2.1 Calidad del servicio	6
2.2.2 Calidad de la potencia	6
2.3 Pérdidas de energía eléctrica	7
2.3.1 Pérdidas técnicas	7
2.3.1.1 Pérdidas técnicas fijas	7
2.3.1.2 Pérdidas técnicas variables	7
2.4 Fenómenos electromagnéticos	8
2.4.1 Perturbaciones propias de la red	8
2.4.2 Perturbaciones externas a la red	8
2.5 Investigaciones destacadas	11
3 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA	16
3.1 Métodos de estimación de pérdidas en transformadores	17
3.1.1 Método para estimar las pérdidas por efecto de la distorsión armónica	18
3.1.2 Método para estimar las pérdidas por efecto del desequilibrio	20
3.1.3 Método para estimar las pérdidas por efecto del DPF	21
3.2 Métodos de estimación de pérdidas en los cables	22
3.2.1 Método para estimar las pérdidas por efecto de la distorsión armónica	23
3.2.2 Método para estimar las pérdidas por efecto del desequilibrio	24
3.2.3 Método para estimar las pérdidas por el DPF	26
3.3 Métodos tradicionales de cálculo de pérdida de línea teórica	26
3.3.1 Método de resistencia equivalente	27
3.3.2 Método de pérdida de voltaje	28
3.3.3 Método del flujo de potencia	29
3.4 Métodos de estimación de pérdidas de línea basado en AI	29
3.4.1 Método de análisis de conglomerados	30
3.4.2 Método de algoritmo de la red neuronal	31
3.4.3 Método de algoritmo de regresión	32
3.4.4 Método de la máquina de vectores de soporte	33
4 REQUERIMIENTOS DE LAS REDES ELÉCTRICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA	35
4.1 Requerimientos	35
4.2 Descripción de los elementos de medida	39
4.2.1 Analizador de redes portátiles	39
4.2.2 Analizadores de red fijos	40
4.2.3 Registrador de datos	41

4.2.4	Digsilent PowerFactory	41
4.2.5	Matlab ®.....	42
4.2.6	SPARD® OMS.....	43
4.2.7	Internet Industrial de las Cosas IIOT	43
4.2.8	Clases de rendimiento.....	45
5	MÉTODOS IMPLEMENTABLES EN EL CONTEXTO NACIONAL	46
5.1	Método clásico	46
5.2	Método avanzado.....	49
6	ANÁLISIS DE IMPACTOS	53
6.1	Conceptual.....	53
6.2	Económico	53
6.3	Productivo	54
6.4	Competitivo	54
7	CONCLUSIONES	55
8	BIBLIOGRAFÍA	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pérdidas en el flujo del sistema eléctrico.	2
Figura 2: Esquema de Mercado de la Energía Eléctrica	4
Figura 3: Pirámide de la Calidad y Continuidad de la Energía	5
Figura 4: Principales disturbios	9
Figura 5: Métodos de estimación de pérdidas según cada categoría	16
Figura 6: Proceso para estimar las pérdidas en los transformadores.	17
Figura 7: Triangulo de potencias	21
Figura 8: Proceso para estimar las pérdidas en los cables	23
Figura 9: Resistencia de fase para cable de BT $\left(\frac{\Omega}{km}\right)$	24
Figura 10: Factor de potencia VS ángulo	26
Figura 11: Diagrama de los Métodos tradicionales	27
Figura 12: Tipos de Métodos basado en Inteligencia Artificial	29
Figura 13: Estructura de la red neuronal BP	32
Figura 14: Separación de clases por (a) hiperplanos y (b) hiperplano óptimo .	33
Figura 15: Analizador de redes	40
Figura 16: Analizadores fijos	40
Figura 17: Registrador de energía trifásico Fluke 1730.....	41
Figura 18: Interfaz del Software DigSilent	42
Figura 19: Utilidades de Matlab.....	42
Figura 20: Interfaz del programa SPARD OMS.....	43
Figura 21: Internet Industrial de las Cosas IIoT	44
Figura 22: Pasos del método iterativo	47
Figura 23: Características de las redes inteligentes.....	49
Figura 24: Procedimiento de análisis de calidad de la energía	50
Figura 25: Estructura de redes neuronales multicapa para el análisis de problemas de calidad de energía	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Rangos permitidos de la calidad de la potencia suministrada	6
Tabla 2: Pérdidas técnicas de energía	7
Tabla 3: Principales fenómenos que causan perturbaciones electromagnéticas IEC 61000-2-5 1995	10
Tabla 4: Categorías y características de fenómenos electromagnéticos en sistemas de	10
Tabla 5: Algoritmos y Herramientas Inteligentes usados con frecuencia.	30
Tabla 6: Características de los métodos de estimación de pérdidas.....	35
Tabla 7: Clases de rendimientos	45

INTRODUCCIÓN

1.1	Planteamiento del Problema.....	1
1.2	Justificación.....	2
1.3	Delimitación.....	3

1.1 Planteamiento del Problema

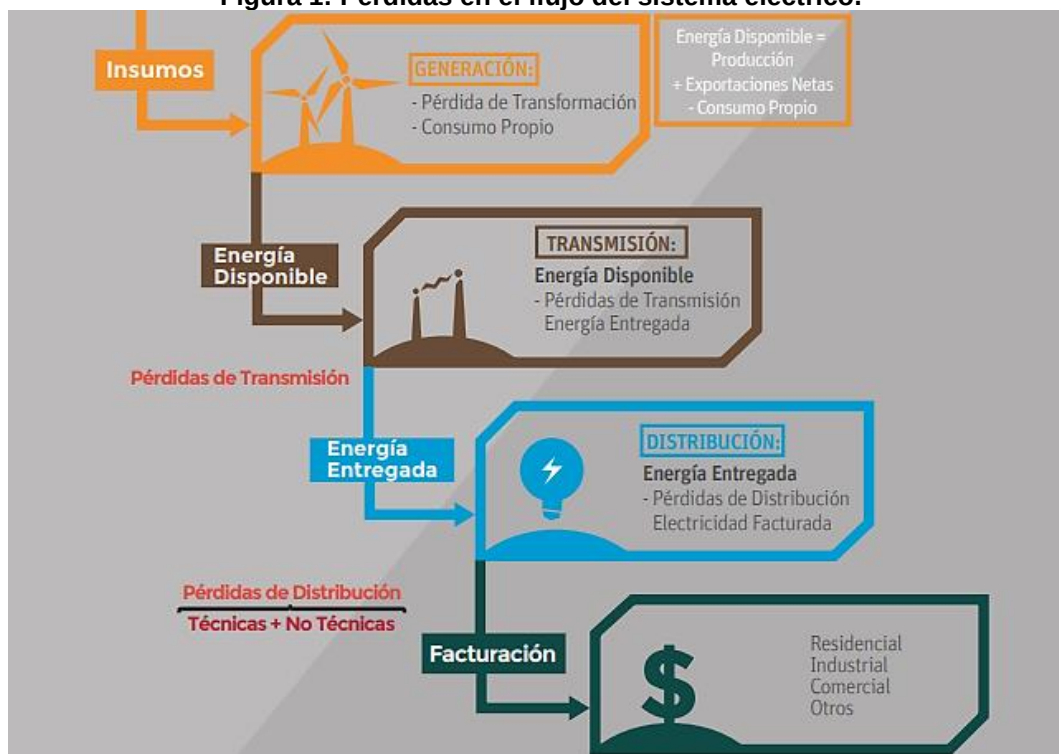
La energía eléctrica se transforma para llegar hasta cada uno de los hogares, consecuentemente estas etapas surgen de la siguiente manera: generación, transmisión, distribución y comercialización, sin embargo, al ser un proceso en cadena hace que en el camino se puedan presentar pérdidas de energía, desde el punto de generación de la energía eléctrica hasta la entrega a su uso final; estas pérdidas que, dependiendo de su naturaleza y su origen, se pueden clasificar en pérdidas técnicas y pérdidas no técnicas [1]. Pérdidas que conllevan a una reducción de los ingresos para los operadores de red por consumos no facturados, de manera que el diagnóstico, control y reducción de las pérdidas son una inquietud para las empresas comercializadoras y distribuidoras, siendo así, en busca de una política permanente para el control y reducción de las pérdidas se debe plantear una mitigación para esta situación o métodos que mejoren las técnicas de las redes, diseño adecuado o innovaciones tecnológicas que permitan mejorar así las áreas de mantenimiento y operación [2].

Las pérdidas técnicas se dan a raíz de las condiciones propias de la conducción y transformación de la energía eléctrica, energía consumida, que se malgasta y no es aprovechada; las cuales se presentan debido a fenómenos físicos [3]. Fenómenos como la distorsión armónica, transitorios, depresiones; los cuales son eventos que conducen al incremento de las pérdidas de energía en los sistemas de generación, transporte y utilización de la energía, a mayores pérdidas por corrientes de Foucault e histéresis y además deteriora el aislamiento de los componentes de la red [4].

1.2 Justificación

Las pérdidas de energía eléctrica juegan un papel importante en la medida de eficiencia y sostenibilidad financiera del sector eléctrico; medida que sirve como un indicador del comportamiento operacional de los operadores de red o de los sistemas eléctricos; de manera que es fundamental buscar métodos para estimar los niveles de pérdidas eléctricas que inherentes de cada etapa del proceso del sistema eléctrico, siendo las pérdidas un cálculo clave que contribuye en la eficiencia y mejoramiento de la capitalización del sector eléctrico [5].

Figura 1: Pérdidas en el flujo del sistema eléctrico.



Fuente: “Dimensionando las pérdidas de electricidad en los sistemas de transmisión y distribución en América Latina y el Caribe” [5].

1.3 Delimitación

1.3.1 Objetivo General

Determinar los métodos para estimación de las pérdidas de energía eléctrica asociadas a eventos de calidad de la energía.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar los métodos de estimación de pérdidas asociadas a eventos de calidad de la energía.
- Determinar los requerimientos de las redes eléctricas para realizar la estimación de pérdidas asociadas a eventos de calidad de la energía.
- Establecer los métodos de estimación de pérdidas asociadas a eventos de calidad la energía implementables en el contexto nacional.

1.3.3 Acotaciones

La presente guía se enmarca dentro de los lineamientos que se deben tener en cuenta para las pérdidas técnicas en los sistemas de distribución de energía.

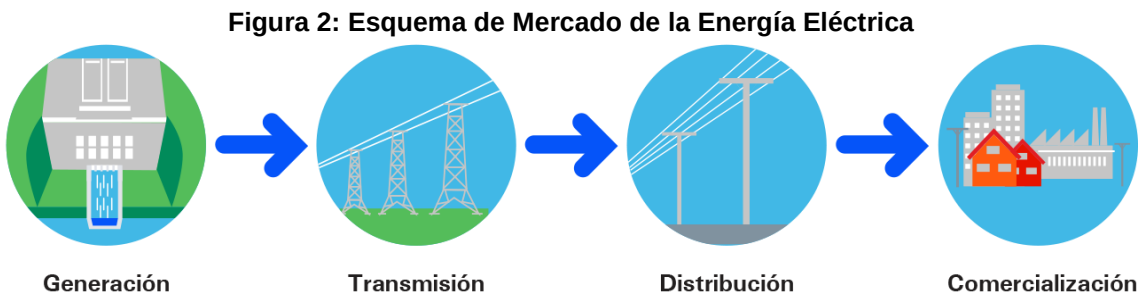
Se utilizarán las bases de datos de la Universidad de Pamplona.

Marco referencial

2.1	Sistema de suministro eléctrico	4
2.2	Calidad de la energía	5
2.3	Pérdidas de energía eléctrica	6
2.4	Fenómenos electromagnéticos.....	7

2.1 Sistema de suministro eléctrico

En un SEP¹ existen procesos de la energía eléctrica (generación, transmisión, distribución y comercialización) que permiten llevar la energía desde las centrales de producción a la etapa de consumo para finalmente brindar energía al usuario con total seguridad y dentro del rango de calidad establecido por CREG².



Fuente: "Como se genera la electricidad | Enel Colombia". Enel Colombia la empresa de energía en Bogotá y Cundinamarca [6].

Desde el punto de vista económico, una parte importante de la inversión en el sistema eléctrico se destina al proceso de distribución y a su vez en esta etapa se presenta el mayor porcentaje de pérdidas de energía debido a la cantidad de elementos que lo componen y por los niveles de tensión. Por lo tanto,

¹ SEP: Sistema Eléctrico de Potencia.

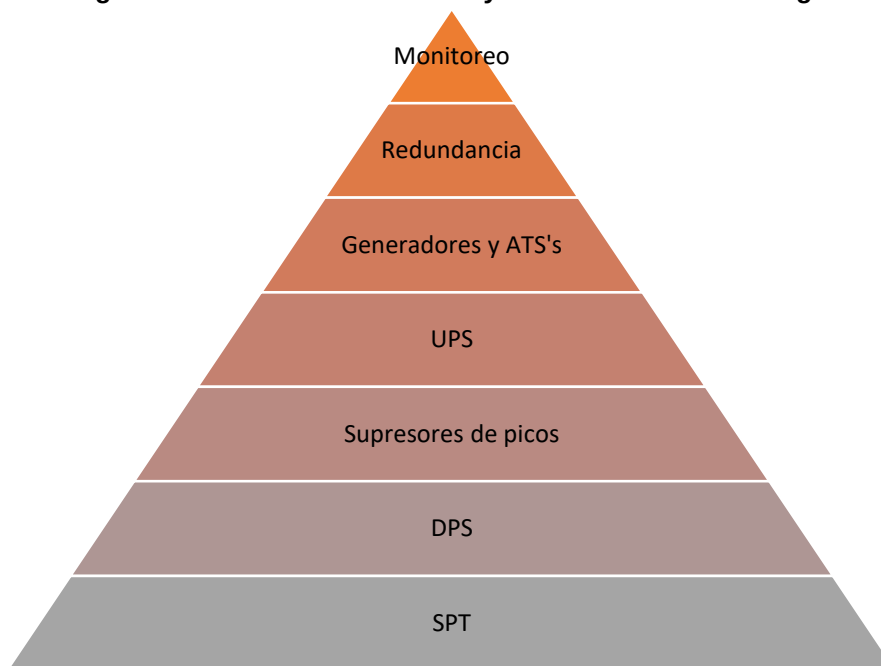
² CREG: Comisión de Regulación de Energía y Gas. Institución gubernamental con el único propósito de regular el suministro de los servicios públicos de electricidad y gas domiciliarios, de conformidad con el Decreto Núm. 1260 de 2013.

es muy importante y adecuado planificar, diseñar, construir y operar un sistema de distribución [7].

2.2 Calidad de la energía

Ausencia de eventos que provocan los fenómenos electromagnéticos que inciden en los parámetros del sistema eléctrico (voltaje, la corriente y la frecuencia) en un tiempo determinado [4] y provocan desviación de sus valores nominales, afectando el comportamiento de los componentes del SEP a través de la producción de armónicos en la red y variaciones en el voltaje, entre otros. Al hablar de calidad de la energía se hace énfasis o referencia a un sistema con estabilidad del voltaje, de frecuencia y con continuidad del servicio [8].

Figura 3: Pirámide de la Calidad y Continuidad de la Energía



Fuente: V. Mercado Polo, J. B. Peña y L. Pacheco. "Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra" [9]

En la *figura 3* se hace referencia a la importancia de los SPT ³ y su importancia radica en que un SEP cuente con un diseño seguro, permitiendo minimizar las

³ Sistemas de puesta a tierra

fallas afines con interrupciones, eventos transitorios y variaciones en los parámetros fundamentales [9].

2.2.1 Calidad del servicio

Característica del SEP de acuerdo con las interrupciones⁴ del sistema en cuanto a duración y frecuencia de las mismas, según lo establecido en la CREG 070 del 1998 se deben cumplir con unos rangos mínimos los cuales son estimados por el SAIDI⁵ y el SAIFI⁶ anteriormente llamados DES y FES [10] .

2.2.2 Calidad de la potencia

Está relacionada con los parámetros del voltaje, contenido armónico (voltaje y corriente), balance (voltaje y corriente) y factor de potencia [11].

Tabla 1: Rangos permitidos de la calidad de la potencia suministrada

CARACTERÍSTICAS	REQUISITOS
Frecuencia	Nominal= 60 Hz ; Rango [59.8 – 60.2] Hz.
Voltajes nominales	Para redes de BT y MT se acepta una tolerancia del 5% y -10%, según lo establecido en la NTC 1340.
Contenidos de armónicos de voltaje y corriente	IEEE 519 de 1992 (recomendación)
Factor de potencia de la carga conectada, en nivel superior a 1 kV	0.9

Fuente: “Análisis de la calidad del transporte de potencia” [10].

⁴ Las interrupciones pueden presentarse debido a fallas en el SEP, en cualquiera de sus equipos o por el mal funcionamiento de los controles y estas pueden ser categorizadas de la siguiente forma: Instantáneas, momentáneas, temporales y sostenidas. Según la IEEE 1999, pág. 20.

⁵ SAIDI: System Average Interruption Duration Index

⁶ SAIFI: System Average Interruption Frequency Index

2.3 Pérdidas de energía eléctrica

Es la energía que es suministrada más no es factura, es decir que los usuarios no pagan y que siempre están presentes en cualquier SEP; en la etapa de distribución se alcanzan niveles de hasta el 50% de las pérdidas totales del sistema, siendo este el talón de Aquiles del sector eléctrico [12].

2.3.1 Pérdidas técnicas

Energía disipada la cual no es aprovechada, está presente en conductores, en líneas de transmisión, transformadores y líneas de distribución; en relación con las características de la red y la operación de la misma. Se divide en dos tipos: fijas y variables [12].

2.3.1.1 Pérdidas técnicas fijas

Estas pérdidas son a consecuencia de deficiencias, ya sean físicas, como las pérdidas en el núcleo de los transformadores por el efecto de la histéresis o por el efecto corona en las líneas transmisión [5].

2.3.1.2 Pérdidas técnicas variables

Estas pérdidas se dan a consecuencia del flujo de corriente en las líneas, cables y transformadores de la red [5].

Tabla 2: Pérdidas técnicas de energía

FIJAS	VARIABLES
• Pérdidas de corona • Pérdidas de corriente de fuga • Pérdidas dieléctricas • Pérdidas de circuito abierto • Pérdidas causadas por carga continua de elementos de medición • Pérdidas causadas por carga continua de elementos de control	• Pérdidas de joule en líneas en cada nivel de tensión • Pérdidas por impedancia • Pérdidas por resistencia de contacto

Fuente: “*Losses in Distribution & Transmission Lines*” [12].

2.4 Fenómenos electromagnéticos

Los fenómenos o perturbaciones que afectan la calidad de la energía se evidencian en la red o en los sistemas por medio de la presencia de perturbaciones, algunas de estas perturbaciones son las variaciones de voltaje, interrupciones, armónicos, en general eventos transitorios en sistemas eléctricos [9].

Básicamente estos fenómenos causan problemas en los SEP, provocando interrupciones de cargas eléctricas o de circuitos grandes y también pérdidas en la operación del equipo eléctrico y del sistema de suministro eléctrico [9].

2.4.1 Perturbaciones propias de la red

Son aquellas que se presentan por la operación de la red. En la etapa de transmisión o distribución de energía, dado a la manipulación de la red se presentan muchas perturbaciones los cuales se deben a deterioros en los materiales utilizados en la red, en el proceso de generación de la corriente, en los instrumentos de medición o en la maniobra del sistema eléctrico, inclusive se puede dar por cuestiones climáticas ya sean descargas atmosféricas o altas oleadas de calor, entre otras posibles causas [13].

Estas perturbaciones suelen ser: Caídas y elevaciones permanentes de tensión, caídas y elevaciones momentáneas de voltaje, transitorios de tensión propios de la red o causados por descargas atmosféricas, entre otros [13].

2.4.2 Perturbaciones externas a la red

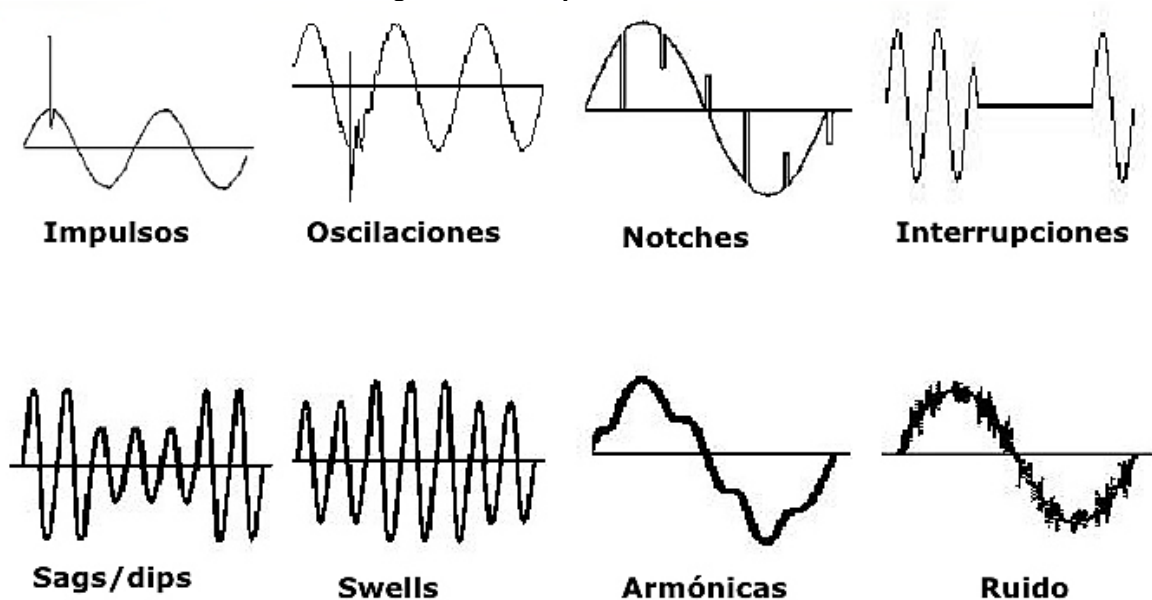
En este tipo de perturbaciones observamos cargas inductivas y cargas no lineales, con respecto a las cargas, en las inductivas están los motores y reactancias, mientras que en las no lineales se encuentran los reguladores de tensión, fuentes de alimentación conmutadas, hornos de arco eléctrico, instrumentos de soldadura, variadores de velocidad, entre otros. Estas cargas

aportan perturbaciones de modo que las generadas por los usuarios se suman con las aportadas por la red [13].

Entre los efectos que producen las perturbaciones externas a la red podemos encontrar [13]:

- Huecos de tensión
- Impulsos de tensión
- Distorsión armónica (THD)
- Desequilibrios de tensión
- Variaciones de frecuencia
- Variaciones lentas de tensión
- Fluctuaciones de tensión (Flícker)
- Variaciones de frecuencia

Figura 4: Principales disturbios



Fuente: "Respaldo de energía para la industria". [14]

El principal objetivo para clasificar este tipo de eventos se debe a la necesidad de emplear las técnicas adecuadas para adquirir mediciones, solucionar problemas, extraer parámetros característicos o establecer métodos de clasificación que dependen del tipo o clase de evento en cuestión [15].

Debido a la variación o los parámetros que cambian de la forma de onda ideal a la onda real de un sistema, aparecen criterios para la clasificación de eventos de calidad de la energía [15].

A continuación se presenta una clasificación de acuerdo con los criterios establecidos por la IEC y la IEE [15].

Tabla 3: Principales fenómenos que causan perturbaciones electromagnéticas IEC 61000-2-5 1995

GRUPO	EJEMPLOS
Fenómenos de baja frecuencia – conducidos	Armónicos, Interarmónicos Señales de sistema (Power Line Carrier) Fluctuaciones de Voltaje Huecos e Interrupciones de Voltaje Desbalance de Voltaje Variaciones en la frecuencia Voltajes inducidos de baja frecuencia Tensiones de continua en redes de corriente alterna.
Fenómenos de baja frecuencia – radiados	Campos Magnéticos Campos Eléctricos
Fenómenos de alta frecuencia – conducidos	Señales de onda continua inducidas (Corriente o Voltaje) Transitorios unidireccionales Transitorios oscilatorios
Fenómenos de alta frecuencia – radiados	Campos Magnéticos Campos Eléctricos Campos Electromagnéticos Ondas continuas Transitorios
Fenómenos de descarga electro estática (ESD)	_____
Pulsos electromagnéticos de origen nuclear (NEMP)	_____

Fuente: “Calidad de la Energía Eléctrica” [4].

Tabla 4: Categorías y características de fenómenos electromagnéticos en sistemas de potencia (Estándar IEEE 1159 – 1995)

Categorías	Contenido espectral típico	Duración típica	Magnitud de voltaje típica
1.0 Transitorios			
1.1 Impulsivos			
1.1.1 Nanosegundos	5 ns de elevación	< 50 ns	
1.1.2 Microsegundos	1 µs de elevación	50 ns - 1 ms	
1.1.3 Milisegundos	0.1 ms de elevación	> 1 ms	
1.2 Oscilatorios			
1.2.1 Baja Frecuencia	< 5 kHz	0.3 - 50 ms	0 - 4 pu
1.2.2 Frecuencia Media	5 - 500 kHz	20 µs	0 - 8 pu
1.2.3 Alta Frecuencia	0.5 - 5MHz	5 µs	0 - 4 pu
2.0 Variaciones de Corta duración			
2.1 Instantáneas			
2.1.1 Interrupción		0.5 - 30 ciclos	< 0.1 pu
2.1.2 Sag (dip)		0.5 - 30 ciclos	0.1 - 0.9 pu
2.1.3 Swell		0.5 - 30 ciclos	1.1 - 1.8 pu
2.2 Momentáneas			
2.2.1 Interrupción		30 ciclos - 3 s	< 0.1 pu
2.2.2 Sag (dip)		30 ciclos - 3 s	0.1 - 0.9 pu
2.2.3 Swell		30 ciclos - 3 s	1.1 - 1.4 pu
2.3 Temporal			
2.3.1 Interrupción		3 seg - 1 min	< 0.1 pu
2.3.2 Sag (dip)		3 seg - 1 min	0.1 - 0.9 pu
2.3.3 Swell		3 seg - 1 min	1.1 - 1.2 pu
3.0 Variaciones de larga duración			
3.1 Interrupción, sostenida		> 1 min	0.0 pu
3.2 Bajos voltajes		> 1 min	0.8 - 0.9 pu
3.3 Sobrevoltajes		> 1 min	1.1 - 1.2 pu
4.0 Desbalance en el voltaje		Estado Estable	0.5 - 2%
5.0 Distorsión de la forma de Onda			
5.1 Componente de directa (DC offset)		Estado Estable	0 - 0.1%
5.2 Armónicas	De la armónica 0 a la armónica 100	Estado Estable	0 - 20%
5.3 Interarmónicas	0 - 6 kHz	Estado Estable	0 - 2%
5.4 Muestras en el voltaje (notching)		Estado Estable	
5.5 Ruido	Banda ancha	Estado Estable	0 - 1%
6.0 Fluctuaciones de Voltaje	< 25 Hz	Intermitente	0.1 - 7%
7.0 Variaciones de la frecuencia		< 10s	

Fuente: “Calidad de la Energía Eléctrica” [4].

2.5 Investigaciones destacadas

En este apartado, se relacionan artículos de mayor relevancia, de acuerdo con el tema de interés; las bases bibliográficas consultadas fueron Scopus y la IEEE Xplore.

1. En el artículo *“Technical Loss Calculation in Distribution Grids Using Equivalent Minimum Order Networks and an Iterative Power Factor Correction Procedure,”* hacen referencia a la importancia de las pérdidas de energía en un sistema de distribución y enfatizan en el monitoreo continuo de las pérdidas de manera que se mantengan dentro de los rangos aceptables para la rentabilidad del operador de red y por supuesto debido a la importancia de la buena calidad de la energía suministrada. Además, este trabajo presenta una metodología modificada para el cálculo de pérdidas técnicas [16].
2. La disminución de la calidad de la energía trae consecuencias para el sistema eléctrico, en *“Estimation and classification of power losses DUE to reduced Power Quality,”* se presentan tres fenómenos que provocan pérdidas adicionales, siendo estos, la distorsión armónica, el desequilibrio y el bajo factor de potencia de desplazamiento y además se realiza un análisis para el cálculo de estas pérdidas [17].
3. *“Loss Analysis Due to Influence of Harmonics in a Distribution System,”* El sistema eléctrico está sujeto a reglas para garantizar un estándar, donde varios factores pueden reducir su calidad. Esto puede tener consecuencias no deseadas, como el aumento de las pérdidas eléctricas en la distribución. Con el avance de la tecnología y la constante presencia de cargas no lineales, la red eléctrica está sujeta a distorsiones armónicas que aumentan el valor efectivo de la corriente, trayendo como consecuencia efectos inconvenientes, como el aumento de pérdidas. En otras palabras, una fracción mayor de la energía se pierde por efecto Joule y una fracción menor llega a los consumidores finales. En Brasil, la agencia reguladora, en sus recomendaciones, no considera el efecto de

los componentes armónicos, obteniendo resultados inferiores para pérdidas. Entonces, para analizar la influencia de estas distorsiones en la operación de una red de distribución, se realizaron simulaciones con el sistema de prueba LVTestCaseNorthAmerican, con 390 buses. Se analizaron tres casos climáticos distintos, cada uno con una forma de carga generada a partir de lógica difusa, todos considerando la presencia de cargas no lineales. Las simulaciones se realizaron en OpenDSS y se demostraron las pérdidas para las tres situaciones. Finalmente, se discute la importancia de considerar estas distorsiones en el cálculo de pérdidas.[18]

4. En *“Power System Reconfiguration in Distribution Network for Improving Reliability Using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization,”* se presenta un método para mejorar los problemas de la red de un sistema de eléctrico con el fin de mejorar la confiabilidad y reducir las pérdidas eléctricas. El objetivo principal del artículo es optimizar el sistema planteando un método que permita reducir las fallas permanentes de la red y las pérdidas de potencia. Inicialmente, se propone el uso de un algoritmo genético (GA) y optimización de enjambre de partículas (PSO) en una red de distribución eléctrica IEEE de 33 buses y se evalúa del desempeño de la topología de la red de distribución contribuyendo significativamente en el mejoramiento del sistema [19].
5. En este documento *“A Review of Line Loss Analysis of the Low-Voltage Distribution System,”*, se muestran algunos métodos de estimación de las pérdidas de energía siendo estos los métodos para el cálculo teórico tradicional y los métodos basados en inteligencia artificial para el análisis de pérdida de línea del sistema de distribución de bajo voltaje, y se analizan las pérdidas de línea del sistema de distribución de bajo voltaje [20].
6. *“Optimal Allocation of Distributed Generation with Reconfiguration by Genetic Algorithm Using Both Newton Raphson and Gauss Seidel Methods for Power Losses Minimizing,”* Uno de los objetivos de este

artículo es mostrar lo factible que son los métodos de Newton Raphson (NR) y de Gauss Seidel (GS) con respecto a las redes de distribución. De acuerdo con el método de Newton-Raphson (NR), este tiene unas ventajas más predominantes en comparación al método de Gauss Seidel, ya que este necesita un menor número de iteraciones para alcanzar la convergencia prematura, requiere menos tiempo de computadora cuando el costo de cálculo es menor y la convergencia es definitiva. También es más preciso y es insensible a factores como la selección de barras flojas, la regulación de transformadores. y el número de iteraciones requeridas en este método es casi independiente del tamaño del sistema [21].

7. *“The Effects of the Smart Grid System on the National Grids,”* este artículo hace referencia a los criterios de las redes inteligente con respecto a las redes convencionales y propone convertir un sistema de una red clásica a un sistema de red inteligente pensando en el monitoreo de la red además de otras ventajas que aporta la implementación de un sistema de este tipo [22].
8. En el siguiente artículo, *“Design, Deployment and Performance Evaluation of an IoT Based Smart Energy Management System for Demand Side Management in Smart Grid,”* se menciona la importancia de la Red Inteligente (SG), la cual permite el desarrollo de los sistemas eléctricos anudado a la incorporación de tecnologías digitales y métodos avanzados de monitoreo que permiten la comunicación, el flujo de datos y responder ante las variaciones o perturbaciones presentes en la red y que afectan el consumo de electricidad [23].
9. El siguiente artículo *“Implementation of a decentralized real-time management system for electrical distribution networks using the internet of things in smart grids,”* tiene como objetivo mostrar el desarrollo de la implementación del telecontrol inteligente combinado con técnicas de comunicación para la red de distribución eléctrica. La solución de la red del bus IEEE 33 se centra en un modelo gráfico y una estructura de

comunicación segura utilizando el internet de las cosas para garantizar la flexibilidad en cuanto a la gestión de la red inteligente [24].

10. *“Energy Loss Impact in Electrical Smart Grid Systems in Australia,”* En esta investigación se hace referencia a las influencias potenciales y contextuales con respecto a las pérdidas de energía en el mercado eléctrico de Australia y los sistemas de redes inteligentes. La principal contribución de este estudio destaca el impacto de los usuarios finales individuales mediante el control y la automatización de los perfiles de electricidad domésticos individuales dentro del conjunto de funciones objetivo (AV) de los rangos de demanda óptimos [25].
11. En la siguiente investigación *“Development of DSTATCOM Optimal Sizing and Location Technique Based on IA-GA for Power Loss Reduction and Voltage Profile Enhancement in an RDN,”* dan el enfoque de acuerdo con la eficiencia de los sistemas de distribución eléctrica con relación a las consecuencias que conlleva el aumento de las caídas de tensión y las pérdidas de potencia. Siendo así, en el artículo se propone una opción para minimizar estos problemas de caída de voltaje y pérdida de energía mediante la incorporación de un compensador estático de distribución (DSTATCOM) en la red de distribución usando una técnica innovadora basada en el algoritmo inmunológico y genético híbrido (IA-GA) para la ubicación y el dimensionamiento óptimos de DSTATCOM para tres niveles de carga distintos. La simulación y el análisis del algoritmo propuesto se realizaron utilizando la red de distribución radial (RDN) de bus IEEE-33 en MATLAB [26].
12. *“Power losses evaluation in low voltage distribution network: a case study of 250 kVA, 11/0.416 kV substation,”* La investigación de este documento se enfocó en la cantidad de pérdidas de cobre en redes de distribución de baja tensión debido a las cargas desiguales presentes en las tres fases. Por tanto se propone una metodología eficiente y económica para equilibrar correctamente el sistema de distribución y lograr determinar los cálculos requeridos [27].

13. *“Artificial neural network based short term electrical load forecasting,”*

Este documento presenta un pronóstico de diseño de sistemas carga a corto plazo utilizando redes neuronales artificiales (ANN), ya que normalmente las redes neuronales artificiales ANN vienen en configuraciones diferentes, este documento analiza la mejor opción de ANN de acuerdo con cada configuración a través del método de prueba y error. Además, para entrenar la ANN, se implementa un tipo de ANN de avance simple con una capa oculta, donde Se utilizan 48 neuronas en la capa de entrada. Para capa oculta, un 50 arbitrario se eligen las neuronas y se utilizan 24 neuronas en la capa de salida para generar un día Perfil de carga de 24 horas por delante [28].

14. En el siguiente documento *“Power quality detection and classification using wavelet and support vector machine,”* los autores plantean un modelo matemático y la simulación de perturbaciones que afectan el sistema de energía, luego aplican la transformada discreta de Wavelet, para clasificar los fenómenos que afectan la calidad de la energía, partiendo de los patrones característicos de cada señal y del entrenamiento de las neuronas; comedidamente analizan la información obtenida y determinan los resultados de acuerdo con la predicción de la clase a la que pertenece cada evento [29].

15. En este artículo *“Detection and classification of power quality events based on wavelet transform and artificial neural networks for smart grids,”* se presenta un método de procesamiento de señales para detectar eventos de calidad de energía a través de las ANN como sistema de clasificación; siendo así, se usa la Transformada de Wavelet para representar un algoritmo de procesamiento de señal eficiente, de modo que se generan y filtran eventos mediante wavelet, extrayendo sus características en diferentes frecuencias [30].

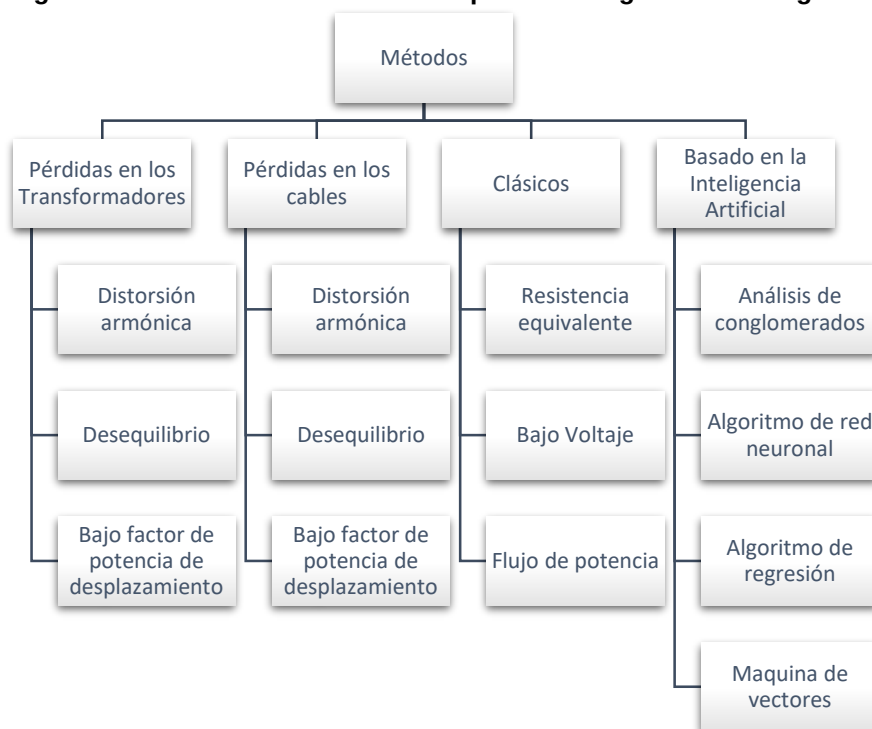
MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA

4.1	Métodos de estimación de pérdidas en los transformadores	17
4.2	Métodos de estimación de pérdidas en los cables.....	22
4.3	Métodos tradicionales de cálculo de pérdida	26
4.4	Métodos de estimación de pérdidas de línea basado en AI	29

En esta sección se identificarán los métodos posibles para el cálculo de las pérdidas en el sistema de distribución, cuya fuente de iniciación de estas pérdidas se debe a los eventos que afectan la calidad de la energía y a su vez el aumento de las mismas.

Las pérdidas son inherentes a la maniobra normal de un SEP y son causadas por aspectos físicos como: El flujo de energía, materiales y métodos constructivos de la infraestructura [31].

Figura 5: Métodos de estimación de pérdidas según cada categoría



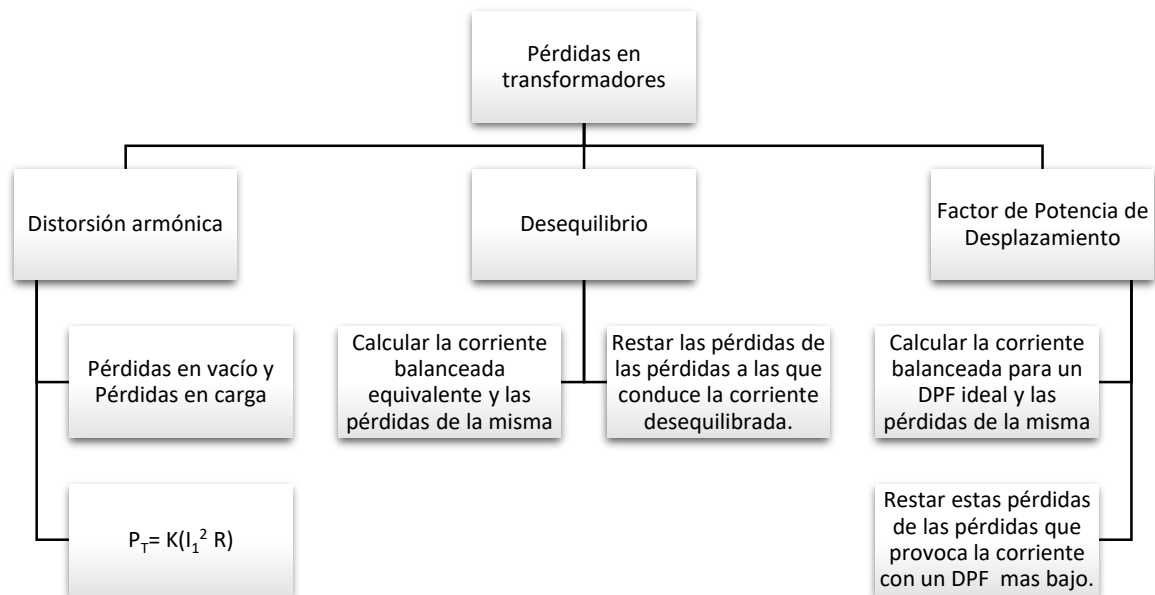
Fuente: Autor

3.1 Métodos de estimación de pérdidas en transformadores.

Los transformadores presentan pérdidas y ese fenómeno lo observamos cuando se conecta una bobina de reacción a una red de corriente alterna, al cabo de un tiempo determinado, su núcleo se calienta. Esta condición presente en el núcleo quiere decir que parte de la energía aplicada a la bobina se ha perdido en forma de calor [32].

A continuación, se presentan los métodos que se pueden utilizar para estimar las pérdidas de energía en los transformadores asociados a los siguientes eventos que afectan cualquier sistema eléctrico: la distorsión armónica, el desequilibrio de las fases y a un bajo factor de potencia de desplazamiento.

Figura 6: Proceso para estimar las pérdidas en los transformadores.



Fuente: Autor

3.1.1 Método para estimar las pérdidas por efecto de la distorsión armónica

El contenido armónico en sistemas eléctricos ejerce efectos importantes según el tipo de conexión, es decir, la forma de onda de las corrientes de excitación en los transformadores conectados en triángulos solo circulará armónicos de tercer, sexto, noveno orden, múltiplos del tercero; mientras que en una conexión estrella, la corriente que circula por el neutro, solo contiene armónicos impares de frecuencia múltiplo de del tercero [33].

Entonces cuando las corrientes armónicas aumentan, las pérdidas y a su vez la demanda de potencia aparente de la red también aumentan, lo que provoca que los transformadores tengan que suministrar una potencia adicional [17].

Estas pérdidas de los transformadores pueden catalogarse en dos grupos: *pérdidas en vacío* y *pérdidas en carga*. Las pérdidas en vacío se presentan debido a la distorsión de la tensión, cuya distorsión provoca el aumento de las pérdidas. Las pérdidas en carga se subdividen en pérdidas en I^2R y en “pérdidas por dispersión”, esta última es la pérdida producida por el flujo electromagnético disperso en el devanado, el núcleo, las abrazaderas del núcleo y los blindajes magnéticos [17].

$$P_T = P_{CU} \left(\frac{I_L}{I_1} \right)^2 + P_{WEI} \left(\sum_1^n \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 n^2 \right) + (P_{SE1} + P_{CE1}) \left(\sum_1^n \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 n^{0.8} \right) \quad (1)$$

Donde:

P_{CU} : Pérdida total del cobre

P_{WEI} : Pérdidas por corrientes de Foucault a 60 Hz (P.C)

P_{CE1} : Pérdidas adicionales por corrientes de Foucault a 60 Hz (P.C)

P_{SE1} : Pérdidas desviación en las piezas de construcción a 60 Hz (P.C)

I_n : Corriente RMS (p.u) en el armónico 'n'

I_L : Valor eficaz total de la corriente de carga (p.u)

I_1 : Componente fundamental de la corriente de carga (p.u) a 60 Hz

n : Número armónico

Con la ecuación anterior (1), se pueden determinar las pérdidas totales de un transformador con la presencia de armónicos en la red de distribución.

La vida útil de los transformadores se reduce debido a los armónicos ya que aumenta la temperatura local y las pérdidas en el transformador; sin embargo, los transformadores pueden diseñarse para evitar el sobrecalentamiento a través del factor K^7 del transformador de distribución estimando el adecuado para soportar la distorsión armónica [17].

$$K = \left[1 + \frac{\ell}{1 + \ell} \left(\frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{n=2}^{n=n_{\max}} \left(h^q \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right) \right]^{0.5} \quad (2)$$

Donde:

ℓ : Es la pérdida por corrientes parasitas a la frecuencia fundamental dividida por la pérdida causada por una corriente continua igual al valor eficaz de la corriente sinusoidal (ambas a la temperatura de referencia).

n : Es el orden del armónico

I : Es el valor eficaz de la corriente sinusoidal incluyendo todos los armónicos

Es decir que, I viene dada por:

⁷ “Factor opcional que puede ser utilizado en transformadores y que indica la capacidad que tiene un transformador para manejar corrientes no sinusoidales”

$$I = \left(\sum_{n=1}^{n=n_{\max}} I_n^2 \right)^{0.5} = I_1 \left[\sum_{n=1}^{n=n_{\max}} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

I_n : Es la magnitud del armónico n^{th}

I_1 : Es la magnitud de la corriente fundamental

q : Es una constante exponencial y depende del tipo de devanado y de la frecuencia. El valor típico para los transformadores con conductores de sección redonda o rectangular en ambos devanados es de 1.7 y para los que tienen devanados de lámina de baja tensión es de 1.5

Finalmente, dado a que el factor K calcula la reducción de potencia del transformador causado por el efecto térmico adicional de los armónicos, se propone usar este factor para estimar el aumento de las pérdidas fundamentales de la siguiente manera [17]:

$$P_T = K \left(I_1^2 R \right) \quad (4)$$

Donde, I_1 es la corriente fundamental y R la resistencia del transformador.

3.1.2 Método para estimar las pérdidas por efecto del desequilibrio

El desequilibrio o desbalance de tensión o corriente, se presenta cuando los fasores son desiguales en cuanto a la magnitud, y a su vez cuando la separación angular entre ellos se aparta de los 120° entre sí. Siendo así, este efecto se produce en los sistemas eléctricos trifásicos y depende directamente de las cargas que son alimentadas, variando por el tipo de alimentación o por el tipo de carga [34].

Las magnitudes de corrientes desiguales en el transformador no permiten funcionar en sus valores nominales, por tanto, el desequilibrio contribuye al aumento de las pérdidas de energía. Dado a que las pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente, las pérdidas totales aumentan; además cuando se presenta desequilibrio o desbalance en las fases, la corriente fluye hacia el neutro del transformador, lo que provoca pérdidas adicionales [17].

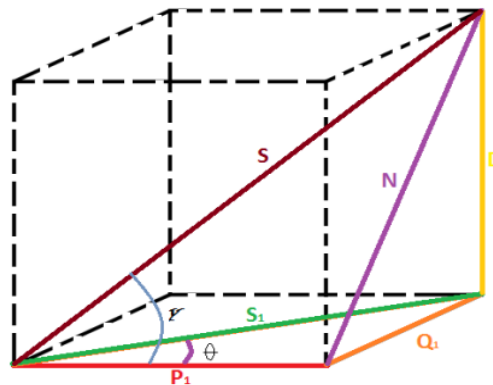
Para estimar estas pérdidas adicionales causadas por el desequilibrio se siguen los siguientes pasos:

1. Calcular la corriente balanceada equivalente que conduciría a la transferencia de la misma cantidad de energía.
2. Calcular las pérdidas que provocaría esta corriente.
3. Restar las pérdidas de las pérdidas a las que conduce la corriente desequilibrada.

3.1.3 Método para estimar las pérdidas por efecto del DPF

En un sistema eléctrico, el factor de potencia de desplazamiento se precisa como la analogía entre la potencia activa y aparente fundamental del sistema, o a su vez trigonométricamente como el coseno del ángulo que forman los fasores de la corriente y voltaje como se muestra en la *figura 7*. De manera que al tener estos componentes fundamentales relacionados entre sí, se puede estimar el factor de potencia de uso común [35].

Figura 7: Triangulo de potencias



Fuente: “Análisis de factor de potencia en variadores de velocidad conectados a un sistema eléctrico” [35]

Cuando en un sistema hay un bajo DPF^8 el efecto que se presenta es el aumento de las corrientes de fase de un transformador y por ende, aumentan las pérdidas [17].

La cantidad de potencia que se pierde en un transformador debido a un menor factor de potencia de desplazamiento se estima de forma similar a las pérdidas por desequilibrio [17], es decir:

1. Calcular la corriente balanceada para un $DPF = 1$ ideal, que llevaría a la transferencia de la misma cantidad de energía.
2. Calcular la pérdida que supondría esta corriente.
3. Restar estas pérdidas de las pérdidas que provoca la corriente con un DPF más bajo.

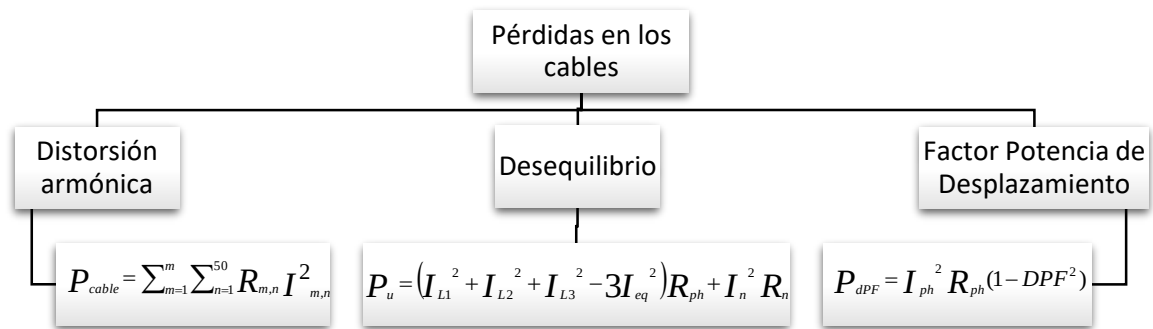
3.2 Métodos de estimación de pérdidas en los cables

Actualmente se le da mucha importancia a la relación entre la longitud, la sección transversal y la corriente en un conductor, ya que al elegir mal estos componentes para cualquier sistema eléctrico la pérdida de energía se genera y se disipa como calor, produciendo ineficiencia en el sistema y un consumo innecesario de energía [36].

A continuación, se presentan los métodos que se pueden utilizar para el cálculo de las pérdidas de energía en los cables asociados a los siguientes eventos que afectan cualquier sistema eléctrico: la distorsión armónica, el desequilibrio de las fases y a un bajo factor de potencia de desplazamiento.

⁸ DPF: Factor de potencia de desplazamiento

Figura 8: Proceso para estimar las pérdidas en los cables



Fuente: Autor

3.2.1 Método para estimar las pérdidas por efecto de la distorsión armónica

El uso de dispositivos electrónicos es más común cada día, la masificación del consumo de estos equipos y la gran propagación de dispositivos de baja potencia, es la principal causa de las distorsiones armónicas en la red eléctrica [37].

En los cables y líneas suele presentarse efectos similares a los transformadores, es decir, suelen presentarse efectos de calentamiento causando pérdidas que aumentan con la frecuencia debido a los efectos piel⁹ y a la proximidad¹⁰ [17].

Cuando se tienen frecuencias igual o mayor a 1 kHz puede producirse un pronunciado aumento de la temperatura local debido al efecto piel; esto se debe a que la resistencia de CA¹¹ de un cable viene determinada por su valor de resistencia de CC¹² más los efectos piel y proximidad [17].

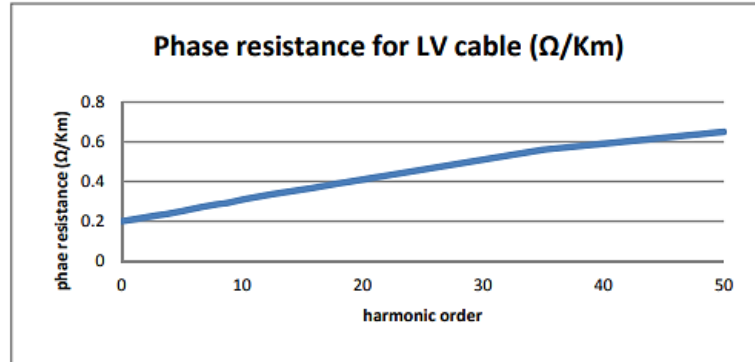
⁹ Este término describe la presencia del flujo de corriente alterna en la superficie exterior de un conductor, donde la impedancia es baja; suele verse más a menudo cuando las frecuencias son altas.

¹⁰ Esta causado por la interferencia de las inductancias mutuas de los conductores paralelos.

¹¹ Corriente alterna.

¹² Corriente continua.

Figura 9: Resistencia de fase para cable de BT $\left(\frac{\Omega}{km}\right)$



Fuente: Resistencia de fase del cable para diferentes frecuencias [17]

En la figura 8, se observa las resistencias de fase medida en un cable de baja tensión para diferentes frecuencias armónicas y se denota como el efecto piel y el efecto proximidad dependen de la frecuencia del sistema eléctrico, del tamaño del conductor, de la resistividad y la permeabilidad del material [17].

Siendo así, las pérdidas totales de un cable formado por “m” conductores puede calcularse de la siguiente manera:

$$P_{cable} = \sum_{m=1}^m \sum_{n=1}^{50} R_{m,n} I_{m,n}^2 \quad (5)$$

Donde:

P_{cable} : Pérdidas de potencia activa en un cable

m : Número de conductores del cable

n : Número armónico

$R_{m,n}$: Resistencia del conductor m_{th} por unidad de longitud para el armónico de enésimo orden.

$I_{m,n}$: Valor eficaz de la enésima corriente armónica en el conductor m_{th} .

3.2.2 Método para estimar las pérdidas por efecto del desequilibrio

Un sistema eléctrico equilibrado funciona mucho mejor, la condición de desequilibrio en la corriente que fluye a través de cada fase implica la aparición de corriente en el neutro [38] y a su vez hace que el dispositivo utilice la máxima

potencia; por otro lado, un mínimo desequilibrio de tensión, deteriora las conexiones y reduce la cantidad de tensión suministrada en el sistema [39].

Al igual que en el caso de los transformadores en los cables suele pasar el mismo fenómeno, en caso de corrientes de fases desequilibradas, una o dos de las corrientes de fase serán inferiores y una o dos serán superiores a la misma transferencia de potencia; además, la corriente circulará por el conductor neutro lo que provoca pérdidas adicionales [17].

La corriente en el neutro puede estimarse mediante la siguiente ecuación:

$$I_n = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \quad (6)$$

Donde I_a y I_r están dadas por:

$$I_a = I_{L1} \cos(\phi_1) + I_{L2} \cos(\phi_2) + I_{L3} \cos(\phi_3) \quad (7)$$

$$I_r = I_{L1} \sin(\phi_1) + I_{L2} \sin(\phi_2) + I_{L3} \sin(\phi_3) \quad (8)$$

Donde I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} , son las corrientes de fases a, b y c respectivamente y ϕ_1 , ϕ_2 y ϕ_3 son los ángulos de fase relativos.

Del mismo modo que en los transformadores, para calcular las pérdidas causadas por el desbalance, primero se debe calcular el sistema balanceado equivalente, una corriente I_{eq} , que conduce a la misma transferencia de potencia calculado. A continuación, se calculan las pérdidas de desequilibrio mediante la siguiente ecuación [17]:

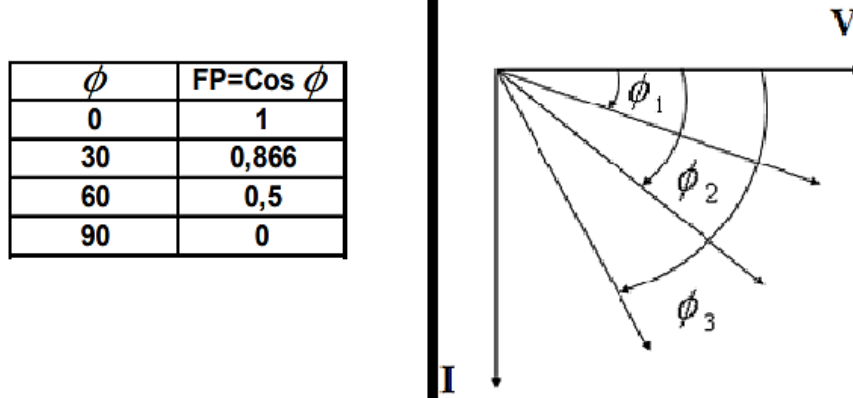
$$P_u = (I_{L1}^2 + I_{L2}^2 + I_{L3}^2 - 3I_{eq}^2) R_{ph} + I_n^2 R_n \quad (9)$$

Donde R_{ph} y R_n es la resistencia de la línea de fase y de la línea de neutro respectivamente.

3.2.3 Método para estimar las pérdidas por el DPF

La presencia de armónicos de tensión o corriente incrementan las pérdidas de potencia y a su vez tienen un impacto negativo en el factor de potencia; cuando el consumo mayor es de energía reactiva, el ángulo se incrementa y disminuye el factor de potencia [40].

Figura 10: Factor de potencia VS ángulo



Fuente: “Estudio de distorsión armónica y factor de potencia en la red de alimentación eléctrica de una máquina papelera” [40]

La cantidad de potencia pérdida de un cable debido a un menor factor de potencia de desplazamiento se calcula de forma similar a las pérdidas calculadas en el transformador. Es decir, que las pérdidas adicionales pueden calcularse de la siguiente manera [17]:

$$P_{dPF} = I_{ph}^2 R_{ph} (1 - DPF^2) \quad (10)$$

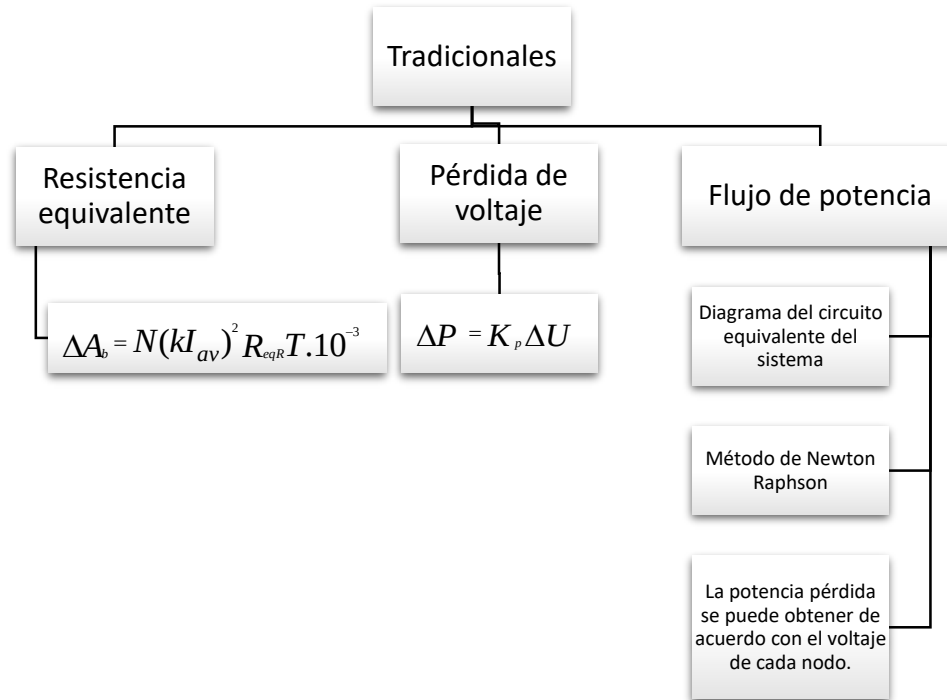
Donde I_{ph} es la corriente fase, R_{ph} es la resistencia de fase y DPF el factor de potencia de desplazamiento.

3.3 Métodos tradicionales de cálculo de pérdida de línea teórica

Normalmente se dificulta calcular con precisión el valor de pérdida de la línea de los sistemas de distribución de bajo voltaje debido a las estructuras de las redes, las características de cargas diversificadas y las grandes variaciones de cargas.

Actualmente hay métodos a elegir de acuerdo con las características de la carga y la estructura de la red, a continuación, el método de resistencia equivalente, el método de pérdida de voltaje y el método de flujo de potencia [20].

Figura 11: Diagrama de los Métodos tradicionales



Fuente: Autor

3.3.1 Método de resistencia equivalente

La ecuación para estimar las pérdidas de línea para un sistema de potencia de baja tensión trifásico de tres hilos y trifásico de cuatro hilos, es la siguiente [20]:

$$\Delta A_b = N(kI_{av})^2 R_{eqR} T \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

Donde:

ΔA_b : Pérdidas de línea teórica de la línea de baja tensión con carga trifásica balanceada.

I_{av} : Corriente promedio en la línea eléctrica

k : Factor de forma

R_{eqR} : Resistencia equivalente de la línea de alimentación de baja tensión

N : Coeficiente de estructura de la red eléctrica

T : Tiempo de operación

Con respecto al coeficiente N , cuando es una fuente de alimentación monofásica, $N = 2$; sistema trifásico de tres hilos, $N = 3$, y finalmente para un sistema trifásico de cuatro hilos, $N = 3.5$ [20].

Este método es más alto en cuanto a la precisión, sin embargo, es más grande en la cantidad de cálculo y no es muy práctico [20].

3.3.2 Método de pérdida de voltaje

Para estimar este método es necesario calcular la caída de voltaje del sistema de distribución de energía de bajo voltaje, de la siguiente manera:

$$\Delta U = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \times 100\% \quad (12)$$

Donde

ΔU : Caída de voltaje

U_2 : Voltaje final 2

U_1 : Voltaje final 1

Siendo así, las pérdidas de energía del sistema de distribución de energía se pueden estimar con la siguiente ecuación:

$$\Delta P = K_p \Delta U \quad (13)$$

Donde K_p está dado por:

$$K_p = \frac{1 + tg^2 \varphi}{1 + \frac{X}{R} tg \varphi} \quad (14)$$

Finalmente, $\frac{X}{R}$ es la relación de reactancia entre resistencia de la línea eléctrica y φ es el ángulo del factor de potencia [20].

Este método tiene la ventaja de una alta velocidad computacional, operatividad y factibilidad, pero la precisión del cálculo es baja [20]

3.3.3 Método del flujo de potencia

Este método se puede calcular de acuerdo con la cantidad eléctrica de cada nodo y así obtener las pérdidas de línea.

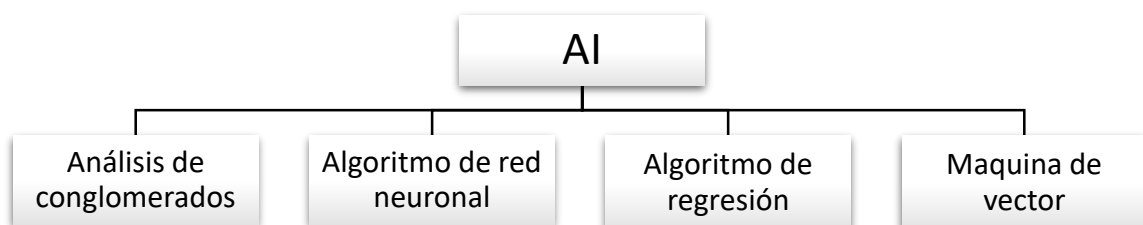
1. Se confirma el diagrama del circuito equivalente del sistema de distribución de energía que se va a calcular
2. Se aplica el método de Newton Raphson para obtener el voltaje de cada nodo.
3. La potencia pérdida se puede obtener de acuerdo con el voltaje de cada nodo.

La pérdida de línea diaria y anual pueden ser estimadas por acumulación y así proponer medidas que reduzcan las pérdidas de acuerdo con los resultados del cálculo y los índices de evaluación de pérdidas de las líneas [20].

3.4 Métodos de estimación de pérdidas de línea basado en AI

Debido a los avances de desarrollo de algoritmos inteligentes, se han desarrollado nuevos métodos de cálculo de pérdidas de línea del sistema de distribución de baja tensión; algoritmos como el de análisis de conglomerados, algoritmo de redes neuronales, de regresión y la máquina de vectores de soportes [28].

Figura 12: Tipos de Métodos basado en Inteligencia Artificial



Fuente: Autor

Tabla 5: Algoritmos y Herramientas Inteligentes usados con frecuencia.

Algoritmos	Análisis de conglomerados	k-means, XGBoost, CatBoost, KNN, DBSCAN, LigthGBM
	Algoritmo de la red neuronal	CNN, DNN, RNN, LSTM
	Algoritmo de regresión	LR, GBDT+LR, MLR, FM, FMM
	Máquina de vectores de soporte	IPM, SMO, SGD, de clase múltiple SVM, LS-SVM, SVM estructurado, SVM de varios núcleos.
Herramientas	Tensorflow, Sklearn, Pytorch, Keras, Feature Tools, Spark, Docker	

Fuente: “A Revie of Line Loss Analysis of the Low – Voltage Distribution System” [20]

Los algoritmos y herramientas inteligentes de uso frecuente se enumeran en la tabla anterior.

Estos algoritmos se describen brevemente de la siguiente manera:

3.4.1 Método de análisis de conglomerados

Es un método de clasificación de datos, según sean las características estructurales de la línea; los datos se pueden dividir en varias categorías para que las diferencias dentro de estas sean lo mínimo posible, mientras que la diferencia entre categorías sean lo más grande posible [20].

Una manera práctica para aplicar este método, es el cálculo de la pérdida de potencia en un sistema de distribución basado en la red RBF¹³. Para las muestras representativas que reflejan la relación entre las pérdidas de energía y

¹³ Redes de función de base radial

el parámetro característico de la red de distribución, se propone un algoritmo de agrupamiento dinámico para agrupar todas las muestras de entrenamiento para determinar el número de nodos de capa oculta de la red RBF. La optimización del número de nodos de capa oculta mejora la eficiencia de la red en uso. Se adopta la red RBF para mapear una relación no lineal compleja entre pérdidas de energía y el parámetro característico de la red de distribución, la tendencia de las pérdidas de energía que varían con la estructura de la red de distribución y los parámetros de operación [20].

3.4.2 Método de algoritmo de la red neuronal

El método de red neuronal artificial ha resuelto de manera excelente problemas prácticos, como el reconocimiento de patrones, el control automático, la clasificación y ajuste, la predicción y estimación, etc., en líneas de sistemas de potencia. La estructura de la red neuronal de BP¹⁴ se puede dividir en la capa de entrada¹⁵, la capa oculta¹⁶ y la capa de salida¹⁷. Las muestras de datos de entrada se envían a la capa de entrada, luego se procesan en la capa oculta y se transmiten a la capa de salida. La capa de salida compara la muestra de datos con el valor esperado. Si no se alcanza la condición de convergencia, el error se propagará hacia atrás a través de la capa oculta y, mientras tanto, se ajustará el peso de cada neurona. En el proceso de entrenamiento, el valor de peso y el valor de umbral de cada neurona se ajusta continuamente hasta que el error de la capa de salida alcanza un rango establecido o un número predeterminado de iteraciones [20]. Compuesta reciben entorno

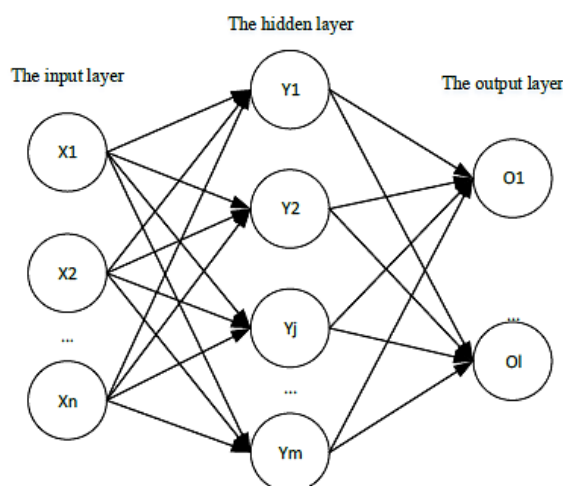
¹⁴ back-propagation.

¹⁵ Formada por neuronas que toman datos o señales procedentes del entorno.

¹⁶ Esta no tiene una conexión directa con el entorno.

¹⁷ Neuronas que proporcionan la respuesta de la ANN.

Figura 13: Estructura de la red neuronal BP



Fuente: “A Review of Line Loss Analysis of the Low – Voltage Distribution System” [20]

En ocasiones se presenta un algoritmo que combina BP¹⁸ con algoritmo GA¹⁹ para evitar la falla del atrapamiento en el óptimo óptico local de BP ordinario y la convergencia prematura de GA básico. Los datos estadísticos o muestras de las pérdidas de energía y los factores característicos (como el suministro de energía activa y el suministro de energía reactiva en un período por una línea de distribución) para algunas líneas representativas se puede estandarizar y dividir en varios grupos, luego se basa en un algoritmo avanzado en combinación de GA con BP aplicado para mapear la compleja relación entre las pérdidas de energía y los factores característicos [20].

3.4.3 Método de algoritmo de regresión

Este es un procedimiento de análisis estadístico que determina la relación cuantitativa entre dos o más variables. En el análisis de big data²⁰, el análisis de regresión es una técnica de modelado predictivo que estudia la relación entre las variables dependientes (el objetivo) y las variables independientes (el predictor).

¹⁸ Redes back-propagation

¹⁹ Genetic algorithms

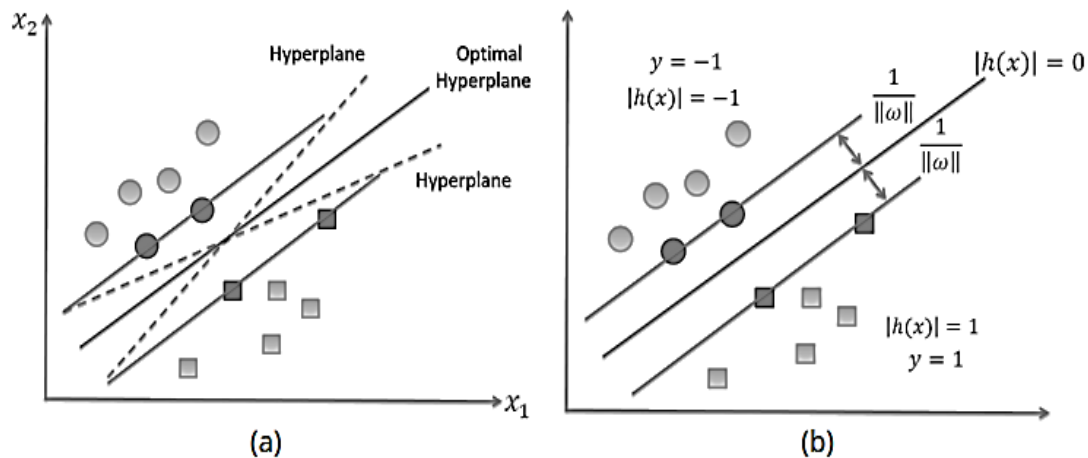
²⁰ Describe el gran volumen de datos

Esta técnica de análisis es comúnmente utilizada en el análisis predictivo, el modelo de series temporales y la relación causal entre variables [20].

3.4.4 Método de la máquina de vectores de soporte

La SVM²¹ es un grupo de algoritmos basado en la teoría del aprendizaje estadístico, normalmente esta técnica es utilizada para la clasificación de datos e inclusive para resolver problemas de regresión [29].

Figura 14: Separación de clases por (a) hiperplanos y (b) hiperplano óptimo



Fuente: "Power quality detection and classification using wavelet and support vector machine," [29]

Se asigna el vector a un espacio dimensional superior en el que se crea un hiperplano de margen máximo. Se forman dos hiperplanos mutuamente paralelos a ambos lados del hiperplano de los datos de separación. La distancia entre dos hiperplanos paralelos se maximiza estableciendo un hiperplano de separación bien dirigido para realizar el reconocimiento de patrones [20].

Con el fin de mejorar la precisión de cálculo de pérdida de línea teórica de la red de distribución, se propuso un método de cálculo inteligente, el cálculo de la pérdida de línea teórica se abstrae en un análisis de regresión, que puede llegar

²¹ Máquina de vectores de soporte

a la solución; luego, las líneas, cuyas pérdidas teóricas ya se conocen, se estructuraron en un conjunto de muestra como fuente de datos. Para obtener la función de ajuste del análisis de regresión, el conjunto de muestras fue entrenado por SVM. En este proceso de entrenamiento, QGA²² puede buscar los parámetros de entrenamiento óptimos para reducir la selección de parámetros de entrenamiento a ciegas de SVM y mejora la precisión del cálculo de pérdida de línea [20].

²² Algoritmo genético cuántico

REQUERIMIENTOS DE LAS REDES ELÉCTRICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA

5.1	Requerimientos	35
5.2	Descripción de los equipos de medida	39

Este capítulo se centra en aquellos parámetros que se deben tener en cuenta para obtener los datos del sistema de energía mediante la medición variables de las redes eléctricas, según las condiciones de cada método en específico; proporcionando a detalle las características propias de las redes para finalmente especificar o cuantificar las pérdidas de energía.

4.1 Requerimientos

En la *tabla 6* se observan las características de cada método, resaltando su precisión y complejidad en el momento de aplicarlo en un sistema de distribución.

Tabla 6: Características de los métodos de estimación de pérdidas

MÉTODO	DESCRIPCIÓN	ELEMENTOS DE MEDIDA	PRECISIÓN	COMPLEJIDAD
TRANSFORMADORES				
Distorsión armónica	En este método se propone usar el factor K, el cual calcula la reducción de potencia del transformador causado por el efecto térmico adicional de los armónicos.	Analizadores de redes Registadores de datos.	Alta	Baja

Desequilibrio de cargas	En este método se proponen 3 pasos: 1. Calcular la corriente balanceada equivalente 2. Estimar las pérdidas que provocaría esta corriente 3. Restar las pérdidas de las pérdidas a las que conduce la corriente desequilibrada.	Analizadores de redes Registradores de datos	Media	Baja
-------------------------	---	---	-------	------

Bajo factor de potencia de desplazamiento	En este método se proponen 3 pasos: 1. Calcular la corriente balanceada para un $DPF = 1$ ideal. 2. Calcular la pérdida que supondría esta corriente. 3. Restar estas pérdidas de las pérdidas que provoca la corriente con un DPF más bajo.	Analizador de red Registradores de datos Cofímetro o fasímetro	Media	Baja
---	--	--	-------	------

CABLES

Distorsión armónica	En los cables y líneas suele presentarse efectos de calentamiento causando pérdidas que aumentan con la frecuencia debido a los efectos piel y a la proximidad, de manera que se presenta un método para la estimación de las pérdidas.	Analizadores de redes Registradores de datos.	Alta	Baja
---------------------	---	--	------	------

Desequilibrio de cargas	Se presenta un método para el caso de corrientes de fases desequilibradas, lo que provoca pérdidas adicionales	Analizadores de redes Registradores de datos.	Alta	Baja
-------------------------	--	--	------	------

Bajo factor de potencia de desplazamiento	Se establece un método para estimar la cantidad de potencia pérdida de un cable debido a un menor factor de potencia de desplazamiento.	Analizador de redes Registradores de datos	Alta	Baja
---	---	---	------	------

TRADICIONALES

Resistencia equivalente	Mediante este método se pueden estimar las pérdidas de línea para un sistema de potencia de baja tensión trifásico de tres hilos y trifásico de cuatro hilos.	Analizador de redes	Alta	Media (Poco práctico)
-------------------------	---	---------------------	------	--------------------------

Pérdida de voltaje	Para estimar este método es necesario calcular la caída de voltaje del sistema de distribución de energía de bajo voltaje, reactancia, resistencia y factor de potencia del sistema.	Analizador de redes Registrador de datos	Baja	Baja
--------------------	--	---	------	------

Flujo de potencia	En este método se proponen 3 pasos: 1. Se confirma el diagrama del circuito equivalente del sistema	Analizador de redes Software MATLAB DIgSILENT	Alta	Media
-------------------	---	---	------	-------

de distribución de SPARD energía que se va a calcular 2. Se aplica el método de Newton Raphson para obtener el voltaje de cada nodo. 3. La potencia pérdida se puede obtener de acuerdo con el voltaje de cada nodo.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL			
Análisis de conglomerados o agrupamiento	Consta de un procedimiento de agrupación de acuerdo con un criterio como la distancia o la similitud. Esa técnica se usa para clasificación, por lo tanto, no se podría realizar estimación de pérdidas, pero sí clasificar las perturbaciones que afectan propiamente y de forma negativa la calidad de la energía.	Mediante la implementación de tecnología IIOT, se mide y se transmite las señales de interés, las cuales son pre-procesadas aplicando técnicas de transformación como la transf. Fourier, la transf. Wavelet, filtros de Kalma, etc., las cuales sirven como entradas a las distintas técnicas de inteligencia artificial, considerando además una señal ideal como punto de referencia, para calcular las pérdidas de energía.	Alta Media
Algoritmo de red neuronal	Conjunto de neuronas artificiales conectadas entre sí, por las cuales pasa información y genera señales de salida. Con este sistema podemos realizar la estimación de pérdidas, así como clasificar los eventos que afectan negativamente la calidad de la energía.	Alta Media	

Algoritmo de regresión	Técnica descriptiva que permite examinar la relación entre dos o más variables. Esta es la técnica menos idónea ya que permita estimar solo la covariancia entre las variables.	Media	Baja
------------------------	---	-------	------

Máquina de vectores de soporte	Estos métodos son implementados en problemas de clasificación y regresión. De esta técnica se usaría para clasificación, por lo tanto, no se podría realizar estimación de pérdidas, pero sí clasificar los eventos que afectan negativamente la calidad de la energía.
--------------------------------	---

Alta Alta

Fuente: Autor

4.2 Descripción de los elementos de medida

A continuación, se dará una descripción breve de la utilidad de cada equipo o herramienta computacional que facilite el proceso para la medición de parámetros que permitan la implementación de los métodos.

4.2.1 Analizador de redes portátiles

Estos instrumentos de medida, permiten medir los armónicos, distorsiones, caídas y picos de tensión, pruebas de calidad de energía, entre otros; además que son de fácil manejo, permite determinar el desempeño eléctrico del sistema, estudio de acometidas, entre otros. Por otro lado, al ser portable cuenta con pinzas flexibles [41].

Figura 15: Analizador de redes



Fuente: Sucomputo [42]

4.2.2 Analizadores de red fijos

Este tipo de analizadores son elementos compactos que permiten el montaje en la parte frontal de paneles de control o tableros de potencia; tanto para redes de baja tensión como de media tensión [43].

Este equipo de medida es perfecto para registrar datos, es decir; registrar parámetros propios del sistema eléctrico a través de redes de monitoreo de energía; permitiendo medir tensión, corriente, potencia, factor de potencia, distorsión de armónicos, eventos transitorios, etc. [43].

Figura 16: Analizadores fijos



Fuente: CVM Analizadores de redes eléctricas [44]

4.2.3 Registrador de datos

Es una herramienta que permite recopilar datos sobre el sistema eléctrico, mediciones claves de tensión, corriente, potencia y factor de potencia, estos valores se registran automáticamente y pueden visualizarse durante el registro; además que cuenta con software que permite generar informes de manera fácil, una de las ventajas es que permite cargar estudios y registros de energía de manera inmediata. Los resultados ofrecen la información necesaria para identificar los eventos de la calidad de la energía de manera que se prioricen las fuentes de propagación de perturbaciones y minimizar estas fuentes [45].

Figura 17: Registrador de energía trifásico Fluke 1730

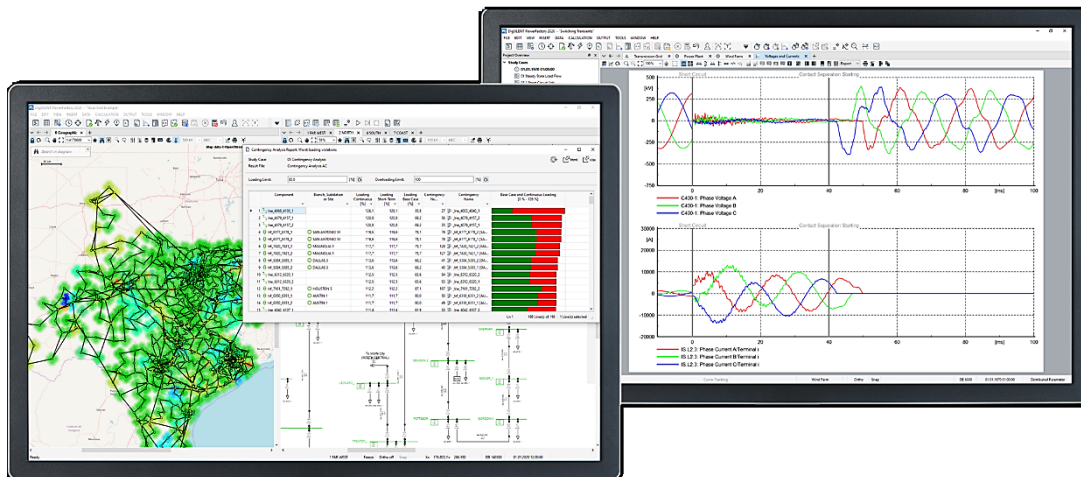


Fuente: *Instrumentaciónhoy* [45]

4.2.4 Digsilent PowerFactory

Es una de las mejores herramientas para análisis de sistemas eléctricos, la cual permite simular los requerimientos de operación, mantenimiento, planeación y estudios de cualquier empresa de electricidad en el contexto de interés de este trabajo para fines específicos de sistemas eléctricos de potencia [46].

Figura 18: Interfaz del Software DigSilent



Fuente: *DigSilent Power System Solution* [47]

4.2.5 Matlab ®

Es una plataforma que permite programar diseños ingenieriles y científicos, permitiendo analizar y diseñar sistemas; esta plataforma maneja un lenguaje basado en matrices que permite la expresión de las matemáticas computacionales, además el análisis es iterativo y los procesos de diseño con un lenguaje de programación se expresa en matrices y arrays directamente [48].

Figura 19: Utilidades de Matlab

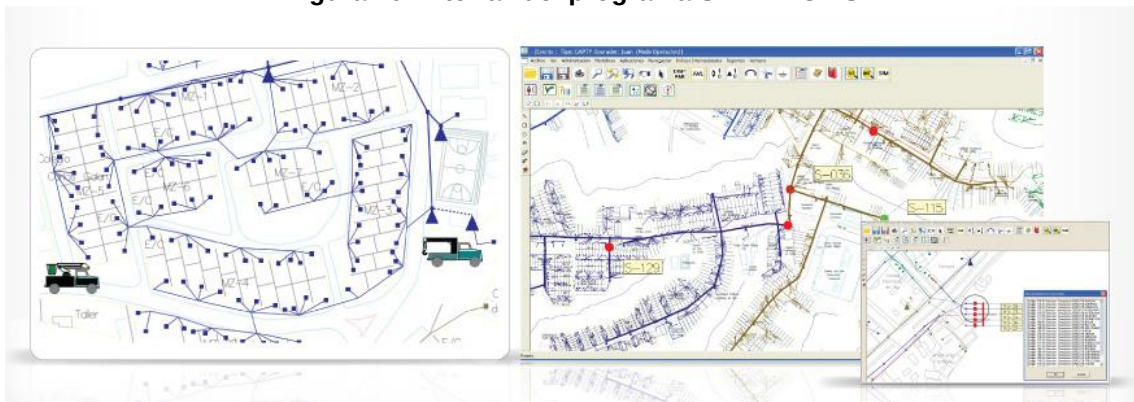
 Sistemas de control Diseño, pruebe e implemente sistemas de control	 Machine learning Entrene modelos, ajuste parámetros y despliegue en producción o en el perímetro	 Procesamiento de señales Analice señales y datos de series temporales. Modele, diseñe y simule sistemas de procesamiento de señales
 Deep Learning Preparación de datos, diseño, simulación y despliegue para redes neuronales profundas	 Mantenimiento predictivo Desarrolle e implemente software de supervisión de condiciones y mantenimiento predictivo	 Prueba y medición Adquiera, analice y explore datos y automatice pruebas
 Procesamiento de imágenes y visión artificial Adquiera, procese y analice imágenes y videos para el desarrollo de algoritmos y el diseño de sistemas	 Robótica Convierta sus ideas y conceptos de robótica en sistemas autónomos que funcionan a la perfección en entornos reales	 Comunicaciones inalámbricas Cree, diseñe, pruebe y verifique sistemas de comunicaciones inalámbricas

Fuente: *MathWorks* [48]

4.2.6 SPARD® OMS

Este sistema es utilizado para las redes eléctricas y tiene funciones de análisis y optimización de la red; permite realizar simulaciones en tiempo real siempre y cuando hay un enlace a la SCADA²³ de la red eléctrica, además, le sirve al operador del centro de control como una plataforma geográfica visual para realizar maniobras, es importante hacer énfasis en que permite calcular los indicadores de calidad del servicio para cumplir los requerimientos de las entidades de regulación [49].

Figura 20: Interfaz del programa SPARD OMS



Fuente: OMS | *Energy Computer Systems* [49]

4.2.7 Internet Industrial de las Cosas IIOT

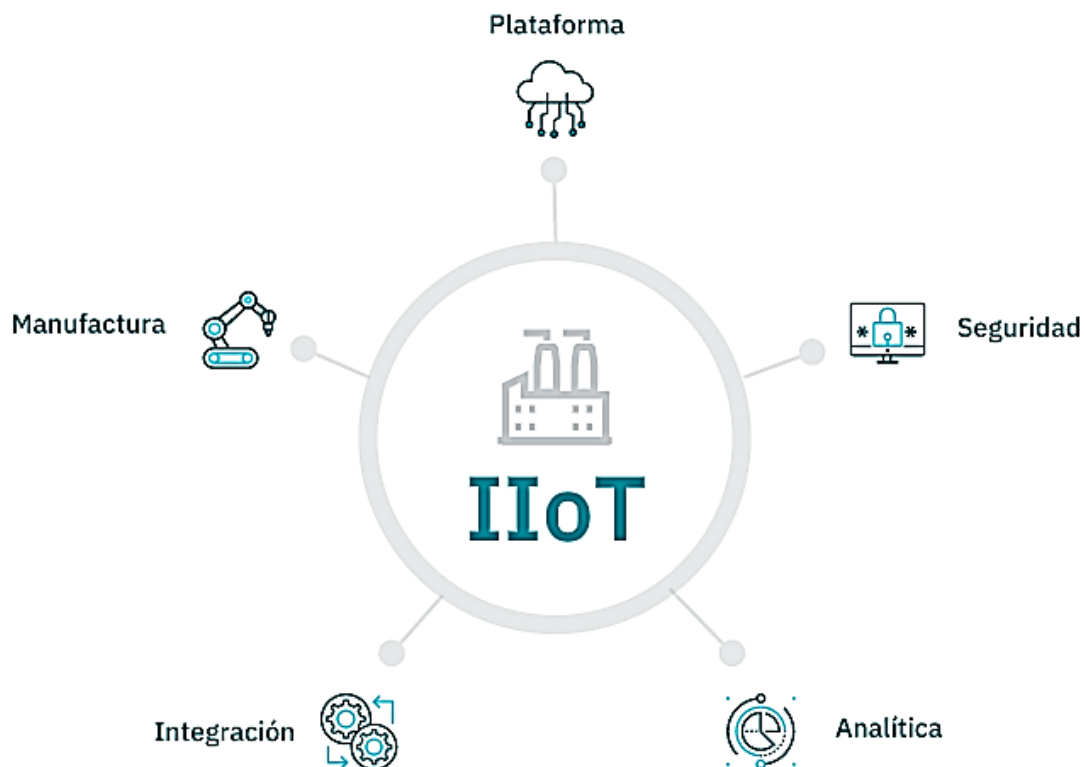
Cuando se hace referencia a la implementación de la tecnología IIOT²⁴ en los métodos de inteligencia artificial, se refiere a esa tecnología que permite llevar a un nivel más alto la comunicación entre máquinas y ofrece una compilación continua de datos detallados, las empresas industriales pueden realizar un seguimiento y control de la energía, el agua y otros recursos que utilizan, cuándo funcionan sus máquinas y cuánto producen. Además, el operador puede hacer

²³ Supervisión, Control y Adquisición de Datos

²⁴ Internet Industrial de las Cosas

ajustes manuales o el equipo puede ajustarse automáticamente para optimizar el rendimiento.

Figura 21: Internet Industrial de las Cosas IIoT



Fuente: Bismark [50]

El Internet Industrial de las Cosas IIoT, recopila diferentes tecnologías de manera que puede seleccionar y monitorear datos para poder controlar y coordinar las condiciones de los procesos. La mayoría de veces las industrias han implementado sistema SCADA para la recopilación de datos de cada proceso; además a través del HMI²⁵ los operarios tienen la facilidad de visualizar, monitorear y analizar los datos suministrados para optimizar la operación [50].

²⁵ Interfaz Hombre – Máquina

4.2.8 Clases de rendimiento

Según la norma IEC 61000-4-30, la cual define 3 clases de rendimientos

Tabla 7: Clases de rendimientos

CLASE	DESCRIPCIÓN
Clase A	Esta clase estandariza el cumplimiento de las más altas prestaciones de calidad y el nivel de precisión para la obtención de resultados.
Clase S	En cuanto a la precisión, el nivel es menos estricto que la Clase A.
Clase B (obsoleta)	Esta clase se introdujo para evitar hacer instrumentos obsoletos. Dentro de este grupo, la norma exige que el método de medición y la precisión sean especificados por el fabricante en la ficha técnica del instrumento.

Fuente: ELSPEC [51]

MÉTODOS IMPLEMENTABLES EN EL CONTEXTO NACIONAL

6.1	Método clásico	46
6.2	Método avanzado	49

En este capítulo se propondrán dos métodos que pueden ser implementables en el ámbito nacional para la estimación de pérdidas de energía en el sistema de distribución, difiere uno de otro en cuanto a su complejidad y precisión, sin embargo, ambos son viables para su aplicación.

En cuanto a los costos monetarios que conlleva la implementación de estos dos métodos, el método avanzado tiene un costo más elevado ya que dispone del cambio de las redes convencionales a redes inteligentes, además de los equipos que intervienen en cada método.

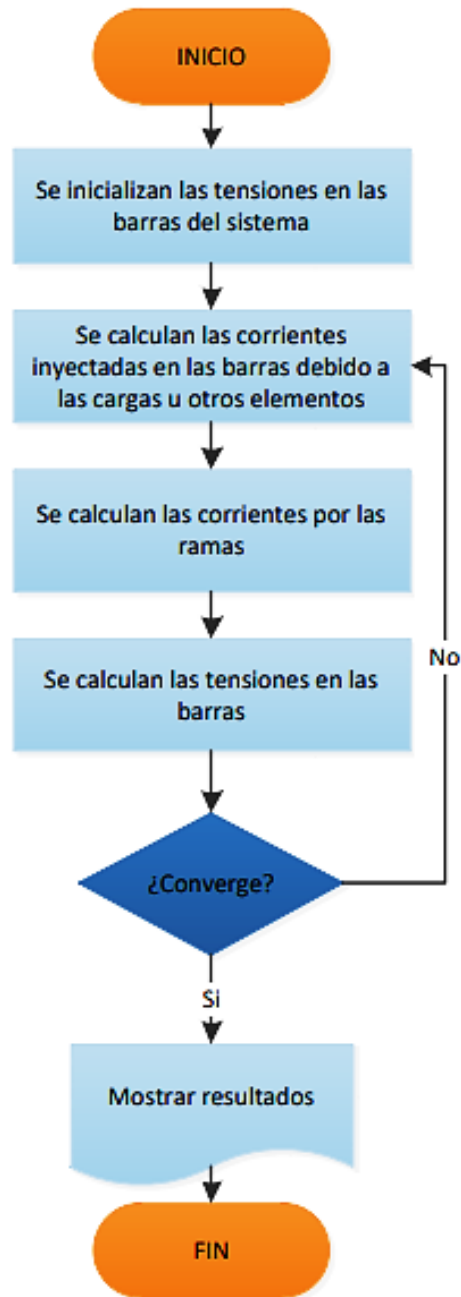
5.1 Método clásico

El método propuesto en este caso es el que permite estimar las pérdidas mediante flujo de potencia; como se menciona anteriormente este método permite calcular las pérdidas eléctricas de acuerdo con la cantidad de voltaje de cada nodo, para esto es viable utilizar un software que permitan parametrizar el sistema de manera que se conozca la topología del sistema de distribución que se va a calcular y a su vez se base en el método de Newton Raphson como lo plantea el método.

El método de Newton Raphson conlleva a una mayor seguridad de convergencia y a su vez a minimizar el tiempo de cálculo. La mayoría de veces estos programas son iterativos y tienen la ventaja de ser aplicables a sistemas de redes activas con generación distribuida [52].

A continuación, se muestra un diagrama para el procedimiento a seguir con respecto a los métodos iterativos

Figura 22: Pasos del método iterativo



Fuente: “Análisis de flujos de carga para el análisis de redes de distribución. Implementación del algoritmo FORWARD AND BACKWARD” [52]

El estudio de flujos de potencia nace a raíz de aquella necesidad de mejorar el sistema de distribución, partiendo desde el punto en cómo actúa y resuelve anomalías presentes en la red; algunos de los factores que alteran el equilibrio de potencias son: la diferencia de impedancias en los distintos componentes, líneas sin transposición o también la conexión de cargas grandes en una o dos fases [52].

Entonces, de ahí, la importancia de utilizar GIS²⁶ como una herramienta de apoyo a la gestión de la información para el modelado y la planificación de la red de distribución de energía, ya que puede analizar la topología de la red, identificar la ubicación del cliente según cada tramo de red y la información de consumo; permitiendo el cálculo de pérdidas eléctricas, un dato de relevancia para crear estrategias para la reducción de las mismas [40].

Otro dato importante de resaltar es la utilización de sistemas SCADA, ya que permiten el monitoreo del sistema eléctrico proporcionando datos en tiempo real, de manera que se pueden utilizar software (MATLAB, DigSILENT, SPARD), para la parametrización de los sistemas; además es una plataforma de análisis y visualización en tiempo real que incluye una interfaz gráfica de usuario inteligente, un diagrama unifilar, una vista geoespacial y un tablero digital. [53].

Finalmente, en cuanto a los demás métodos clásico por los que pudieran optar los operadores de red, sería la implementación de equipos de medida (analizadores de red o registradores de datos), para el registro y la toma de datos que caractericen la red y lo que compone el sistema eléctrico, ya que les permite medir, analizar y calcular las pérdidas de acuerdo con los eventos de calidad de la energía presentes durante el periodo de tiempo medido; sin embargo, sería un estudio tardío y pero efectivo.

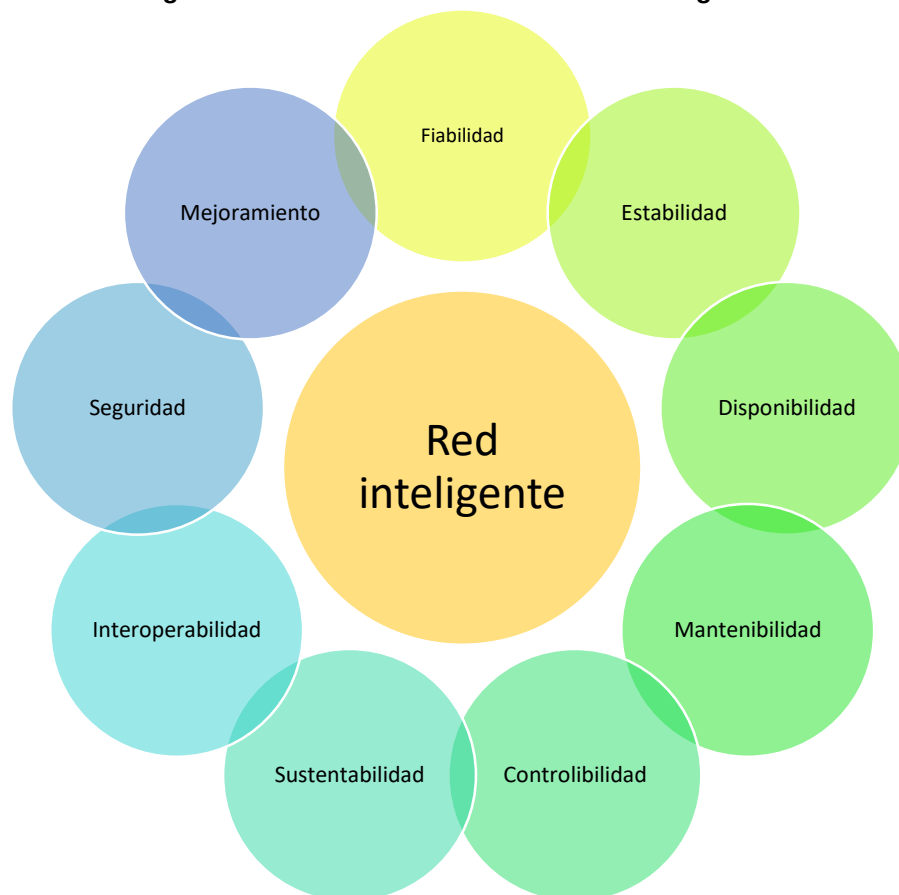
²⁶ Sistemas de Información Geográficos

5.2 Método avanzado

La infraestructura clásica de la red eléctrica del país se compone de dispositivos de energía que tienen problemas debido a las tecnologías anteriormente utilizadas, sin embargo, si este sistema clásico se integra con una tecnología de información y comunicación, entonces la red se convierte en una red inteligente y de energía bidireccional [22] .

Este sistema de red inteligente es un tipo de tecnología sofisticada que permite no solo el flujo de energía bidireccional, sino que también tiene varios aspectos diferentes, como disponibilidad, efectividad, precisión, controlabilidad, economía, flexibilidad, interoperabilidad, mantenibilidad, mensurabilidad, optimización, confiabilidad, sostenibilidad, estabilidad, seguridad y escalabilidad [22].

Figura 23: Características de las redes inteligentes

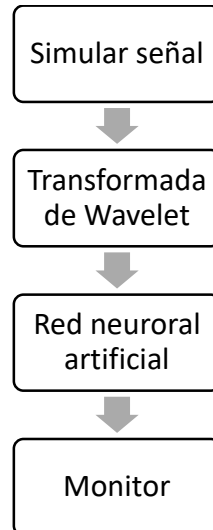


Fuente: *"The Effects of the Smart Grid System on the National Grids"* [22]

Todas estas características de la red inteligente hacen que la red eléctrica sea lo suficientemente robusta frente a fallas de energía, caídas de voltaje, pérdidas de energía, fluctuaciones de voltaje y frecuencia, sobrevoltaje y sobrecorriente [22].

Por tanto, debido a que uno de los principales problemas a los que se enfrenta actualmente el sistema son problemas que interrumpen o afectan la calidad de la energía y trae consigo consecuencias, se propone manejar la transformada Wavelet combinada con algoritmos de ANN²⁷, que son adecuadas para clasificar variables de un sistema y todo lo relacionado al procesamiento de información. El entrenamiento de una red por retropropagación implica tres etapas: la alimentación hacia adelante del patrón de entrenamiento de entrada, la retropropagación del error asociado y el ajuste de los pesos. Durante el proceso de aprendizaje, los pesos de ANN se adaptan para crear los vectores de salida deseados. El procedimiento para el análisis de la calidad de la energía se muestra en la *figura 21*. [22].

Figura 24: Procedimiento de análisis de calidad de la energía



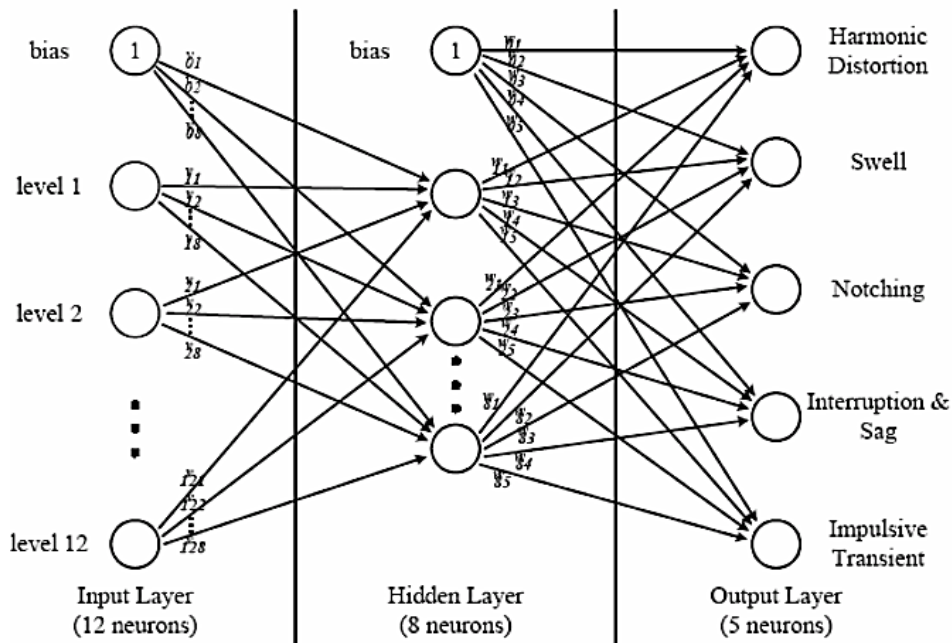
Fuente: “*The Effects of the Smart Grid System on the National Grids*” [22]

²⁷ Redes Neuronales Artificiales

Este proceso de análisis de eventos de calidad de la energía permite que los sistemas eléctricos tengan de manera remota la información necesaria para clasificar y a su vez estimar las pérdidas de manera que cuando surjan percances en las redes se realicen alertas tempranas y se pueda analizar la recolección de estos datos para identificar las fuentes de perturbaciones y al comportamiento de la red.

La estructura de las redes neuronales multicapa (*ver figura 22*) tiene una capa de entrada con 12 nodos, la capa oculta tiene 8 nodos y la capa de salida con 5 nodos, es decir, 5 tipos de perturbaciones: transitorios impulsivos, bajo voltaje, aumento de voltaje, muescas y distorsiones de voltaje [22].

Figura 25: Estructura de redes neuronales multicapa para el análisis de problemas de calidad de energía



Fuente: "The Effects of the Smart Grid System on the National Grids" [22]

Inicialmente se analiza la simulación de la transformación wavelet combinada con ANN para clasificar los problemas de calidad de la energía. La transformación wavelet combinada con ANN se ejecuta utilizando el programa MATLAB. Las entradas para entrenar ANN son 12 niveles de señales de los 6 tipos de perturbaciones. La señal de entrada para el entrenamiento se selecciona

mediante una señal aleatoria, después de entrenar ANN, el peso y el sesgo se pueden usar para detectar los problemas de calidad de la energía [22].

La transformación wavelet combinada y ANN es capaz de detectar y clasificar los 6 tipos de problemas de calidad eléctrica capaz de detectar y clasificar los problemas de calidad eléctrica correctamente con una precisión del 98,9 % y del 97,89% con ruido [22].

ANÁLISIS DE IMPACTOS

7.1	Conceptual	53
7.2	Económico.....	53
7.3	Productivo	54
7.4	Competitivo	54

Este proyecto plantea una serie de efectos que causan impacto directamente en la cadena del sector de electricidad, puesto que propone métodos para estimar las pérdidas de energía teniendo en cuenta los factores que las ocasionan perturbaciones o eventos, siendo así, el impacto es positivo, específicamente para los operadores de red, ya que les permite contar con información idónea para monitorear el rendimiento de la red y a su vez implementar alguno de estos métodos para el control y mitigación de las pérdidas eléctricas, teniendo en cuenta que en la etapa de distribución es donde se presentan alrededor del 50% de las pérdidas del sistema eléctrico.

6.1 Conceptual

El indicador de este impacto es cualitativo, puesto que lo que se hace es una recopilación de los métodos de utilizables para estimar las pérdidas de energía, sin embargo, se hace énfasis en que se pueden seguir realizando futuras investigaciones ya que este campo no se ha explotado en su totalidad, de manera que se puede seguir recopilando métodos que complementen este trabajo de forma que sea más robusto en cuanto a la información.

6.2 Económico

De acuerdo con este impacto, la economía de las empresas operadoras de red, inicialmente si se ven afectadas en cuanto a las inversiones que se deban hacer para la implementación de los instrumentos de medición o en su defecto para la remodelación de las redes según el método que pretendan implementar, sin

embargo, esta inversión se verá reflejada de manera positiva a largo plazo cuando implemente un control y mitigación de las pérdidas.

6.3 Productivo

Las empresas que le apuesten a un sistema o metodología que les permita llevar un control de las pérdidas eléctricas, tendrán un impacto positivo en cuanto al comportamiento del sistema, lo que conlleva a un sistema estable y de calidad; permitiendo así, posicionarse a largo plazo en una empresa económicamente estable y productiva, ya que un sistema con fugas de energía no solo representa pérdidas de energía propiamente, sino que conlleva a pérdidas monetarias.

6.4 Competitivo

En toda empresa se busca la mejora continua y por ende realizar los procesos mejor que las demás empresas afines al mercado en el que estamos incursionando, es importante, por ende, se busca que se implemente un método que calcule las pérdidas, de manera que permita llevar un control y análisis para su mitigación y así conseguir estrategias que permitan mejorar la eficiencia del STR²⁸ y SDL²⁹ y así obtener un mejor estatus en referencia a las demás empresas distribuidoras de energía, sin embargo, lo anteriormente dicho se verá reflejado a largo plazo o según la importancia que le dé cada empresa a las pérdidas de energía.

²⁸ Sistema de Transmisión Regional

²⁹ Sistema de Distribución Local

CONCLUSIONES

Existe una gran diversidad de métodos para realizar la estimación de pérdidas de energía sin embargo las características del sistema eléctrico son limitadas, por lo que se proponen formas para realizar un estudio adecuado de acuerdo con los elementos de medición acorde a cada método.

Aunque la implementación de redes inteligentes inicialmente tenga una inversión monetaria alta para los operadores de red, es viable y practico a largo plazo en la medida de la aplicación de métodos que permiten clasificar los eventos de calidad de la energía e identificar las fuentes de propagación para mitigarlas; por otro lado, una manera más económica y práctica, es la utilización de analizadores de red para la determinación de los parámetros de la red, ya que permite tomar los datos del sistema durante un determinado lapso de tiempo de forma que se analicen y se establezcan las pérdidas eléctricas identificando el evento que las produce.

El monitoreo de los parámetros del sistema requiere el uso de instrumentos de desempeño clase A, además los equipos/software deben utilizarse para el análisis de información lo cual representa un parámetro importante para la evaluación del rendimiento de la red. Estos equipos se utilizan para monitorear la evolución del rendimiento de una red durante largos períodos, para comparar diferentes evoluciones de redes durante el mismo período. De manera que es viable, proponer la implementación de sistemas que optimicen el modo de operación de la red eléctrica y la reducción de pérdidas técnicas de energía.

Las subestaciones cuentan con equipos de medida para la calidad de la potencia, sin embargo, se debe tener en cuenta la calidad de la energía suministrada al usuario final la cual puede ser estimada según los parámetros de medición, la combinación y el procesamiento colectivo de la información por medio de un método de procesamiento de datos.

Actualmente, se ha realizado una integración automática con los sistemas de información geográfica (GIS), de gestión de energía (PMS) y los datos operativos se derivan del sistema de información de recolección de energía, logrando la generación automática de la topología de la red eléctrica, la actualización automática de parámetros, el acceso automático a los datos operativos, obteniendo resultados más cercano y consistente con la red eléctrica real, asegurando una mayor precisión de cálculo.

Finalmente, el trabajo propone métodos acertados para la estimación de pérdidas asociados a fenómenos de la calidad de la energía (según los especificados en la norma IEEE 1159); sin embargo además de estimar las pérdidas es importante el control de las mismas, ya sea mediante un buen diseño del sistema distribución o en la planificación apropiada de expansión de redes y al monitoreo del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Modelo de incentivos para la reducción de pérdidas de energía eléctrica en Colombia | Revista de la Maestría en Derecho Económico.” Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available: <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/revmaescom/article/view/7172>
- [2] I. Alberto Tama Franco MAE, “Las pérdidas de energía eléctrica”, Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/25745>
- [3] E. D. Guayasamín Calderón, “Estudio para el control y reducción de pérdidas de energía eléctrica en un primario de la subestación Barrionuevo perteneciente a la Empresa Eléctrica Quito SA,” 2007. Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/340>
- [4] M. Á. Sánchez Cortés, *Calidad de la Energía Eléctrica*, 1st ed., vol. 1. Puebla: Instituto Tecnológico de Puebla, 2009. Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available: https://www.academia.edu/34783325/Miguel_Angel_Sánchez_Cortés_Calidad_de_la_Energía_Eléctrica
- [5] R. Jiménez, T. Serebrisky, and J. Mercado, “Electricidad perdida: Dimensionando las pérdidas de electricidad en los sistemas de transmisión y distribución en América Latina y el Caribe | Publications,” *Banco Interam. Desarro.*, p. 42, 2014, Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Electricidad-perdida-Dimensionando-las-pérdidas-de-electricidad-en-los-sistemas-de-transmisión-y-distribución-en-América-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- [6] “Como se genera la electricidad | Enel Colombia.” <https://www.enel.com.co/es/empresas/enel-generacion/como-se-genera-la-electricidad.html> (accessed May 20, 2022).
- [7] S. R. Castaño, *Redes de Distribución de Energía*, 3rd ed. Manizales, 2009. Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available:

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7095>

- [8] J. C. Arzuzar Fuentes, "Calidad de la energía eléctrica en sistemas híbridos fotovoltaico y eólico aplicado a la electrificación rural," 2014.
- [9] V. Mercado Polo, J. B. Peña, and L. Pacheco, "Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra," *Redalyc*, vol. 38, no. 2, 2017, Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507555007009>
- [10] E. S. López Bautista, "Repositorio Digital - EPN: Análisis de la calidad del transporte de potencia," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2007. Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4225>
- [11] R. G. Chancusig Espin, "Repositorio Digital - EPN: Procedimientos para el control de la calidad del servicio y la medición de la calidad de la potencia en una subestación del sistema nacional de transmisión según la regulación No. CONELEC 003/08," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2008. Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/740>
- [12] "Pérdidas en Líneas de Distribución y Transmisión | Revista Electrical India sobre energía y productos eléctricos, energía renovable, transformadores, aparatos y cables," Jan. 05, 2018. <https://www.electricalindia.in/losses-in-distribution-transmission-lines/> (accessed May 20, 2022).
- [13] I. E. Berasategui Aguirre, C. E. Bonino, and J. M. González, "Análisis de perturbaciones en redes eléctricas, causas y consecuencias en sistemas de control industrial – Rumbos tecnológicos," Sep. 04, 2019. <http://rumbostecnologicos.utnfrainvestigacionyposgrado.com/areas-tematicas/ingenieria-electrica/analisis-de-perturbaciones-en-redes-electricas-causas-y-consecuencias-en-sistemas-de-control-industrial/> (accessed May 20, 2022).
- [14] K. Bazail, "Respaldo de energía para la industria - ER-Commerce," Oct. 27, 2017. <https://energiayredes.com/respaldo/> (accessed May 20, 2022).
- [15] D. Marcelo De Yong, "Detección, clasificación y localización de eventos de

calidad de energía utilizando técnicas avanzadas de procesamiento de señales e inteligencia artificial,” Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina, 2016. Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/93760>

- [16] C. Eduardo Moreira Rodrigues *et al.*, “Technical Loss Calculation in Distribution Grids Using Equivalent Minimum Order Networks and an Iterative Power Factor Correction Procedure,” *Energies* 2021, Vol. 14, Page 646, vol. 14, no. 3, p. 646, Jan. 2021, doi: 10.3390/EN14030646.
- [17] T. Bantras, V. Cuk, J. F. G. Cobben, and W. L. Kling, “Estimation and classification of power losses DUE to reduced Power Quality,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, 2012, doi: 10.1109/PESGM.2012.6344944.
- [18] R. M. Soares, M. E. Oliveira, M. A. A. Freitas, G. P. Viajante, and E. N. Chaves, “Loss Analysis Due to Influence of Harmonics in a Distribution System,” *Renew. Energy Power Qual. J.*, 2021, doi: 10.24084/repqj19.304.
- [19] O. Kahouli, H. Alsaif, Y. Bouteraa, N. Ben Ali, and M. Chaabene, “Power System Reconfiguration in Distribution Network for Improving Reliability Using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 7, p. 3092, Mar. 2021, doi: 10.3390/app11073092.
- [20] L. Ni, L. Yao, Z. Wang, J. Zhang, J. Yuan, and Y. Zhou, “A Review of Line Loss Analysis of the Low-Voltage Distribution System,” *2019 IEEE 3rd Int. Conf. Circuits, Syst. Devices, ICCSD 2019*, pp. 111–114, Aug. 2019, doi: 10.1109/ICCSD.2019.8843146.
- [21] L. A. Alnabi, A. K. Dhaher, and M. B. Essa, “Optimal Allocation of Distributed Generation with Reconfiguration by Genetic Algorithm Using Both Newton Raphson and Gauss Seidel Methods for Power Losses Minimizing,” *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 15, no. 1, p. 2022, doi: 10.22266/ijies2022.0228.42.
- [22] I. Colak, R. Bayindir, and S. Sagiroglu, “The Effects of the Smart Grid System on the National Grids,” *8th Int. Conf. Smart Grid, icSmartGrid 2020*, pp. 122–126, Jun. 2020, doi: 10.1109/ICSMARTGRID49881.2020.9144891.
- [23] M. U. Saleem, M. R. Usman, M. A. Usman, and C. Politis, “Design, Deployment

- and Performance Evaluation of an IoT Based Smart Energy Management System for Demand Side Management in Smart Grid,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 15261–15278, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3147484.
- [24] A. Lekbich, A. Belfqih, C. Zedak, J. Boukherouaa, and F. Elmariami, “Implementation of a decentralized real-time management system for electrical distribution networks using the internet of things in smart grids,” *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 10, no. 3, pp. 1142–1153, Jun. 2021, doi: 10.11591/EEI.V10I3.2436.
- [25] A. Zaghwan and I. Gunawan, “Energy Loss Impact in Electrical Smart Grid Systems in Australia,” *Sustain. 2021, Vol. 13, Page 7221*, vol. 13, no. 13, p. 7221, Jun. 2021, doi: 10.3390/SU13137221.
- [26] M. A. Kallon, G. N. Nyakoe, and C. M. Muriithi, “Development of DSTATCOM Optimal Sizing and Location Technique Based on IA-GA for Power Loss Reduction and Voltage Profile Enhancement in an RDN,” *Int. J. Electr. Electron. Res.*, vol. 9, no. 4, pp. 96–106, Oct. 2021, doi: 10.37391/IJEER.090402.
- [27] E. H. Sadiq, R. Khalil Antar, and S. T. Ahmed, “Power losses evaluation in low voltage distribution network: a case study of 250 kVA, 11/0.416 kV substation,” *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 25, no. 1, pp. 35–41, 2022, doi: 10.11591/ijeecs.v25.i1.pp35-41.
- [28] O. Y. Her, M. S. A. Mahmud, M. S. Z. Abidin, R. Ayop, and S. Buyamin, “Artificial neural network based short term electrical load forecasting,” *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 13, no. 1, p. 586, Mar. 2022, doi: 10.11591/ijpeds.v13.i1.pp586-593.
- [29] V. M. Garrido-Arévalo, W. Gil-González, and M. Holguin, “Power quality detection and classification using wavelet and support vector machine,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1448, no. 1, p. 012002, Jan. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1448/1/012002.
- [30] S. Alshahrani, M. Abbod, and B. Alamri, “Detection and classification of power quality events based on wavelet transform and artificial neural networks for smart grids,” in *2015 Saudi Arabia Smart Grid (SASG)*, Dec. 2015, pp. 1–6. doi: 10.1109/SASG.2015.7449296.

- [31] M. EPM Empresas Públicas Esp, "GM-02 Guía Metodológica cálculo de pérdidas de energía," *Unidad Cent. Excel. Técnica Norm. y Lab.*, Aug. 2019, Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available: https://www.essa.com.co/site/Portals/clientes/Norma_Tecnica_Vigente/Normas_Complementarias_Diseño/GM-02 GUIA METODOLOGICA CALCULO DE PERDIDAS DE ENERGIA.pdf
- [32] "Perdidas de Potencia en el transformador | Omega Electric." <https://transformadoressiosac.com/perdidas-de-potencia-de-un-transformador/> (accessed May 20, 2022).
- [33] O. A. Cabanillas Rodríguez and W. E. Pérez Anacona, "Estudio de las causas y efectos de los armónicos en transformadores de distribución," Corporación Universitaria Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, 1996. Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/2733/T0001009.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [34] V. Guevara del Ángel, "Código de Red: Calidad de la Potencia (Parte 3: Desbalance) - Radthink S.A. de C.V." <https://radthink.com.mx/codigo-de-red-calidad-de-la-potencia-3/> (accessed May 20, 2022).
- [35] J. Martínez Lendech, J. Gómez Agis, D. Martínez Martínez, and C. Vargas Ayuso, "Análisis de factor de potencia en variadores de velocidad conectados a un sistema eléctrico," *Rev. Ing. Eléctrica*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, Jun. 2017, Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available: https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Ingenieria_Electrica/vol1num1/ECORFAN_Revista_de_Ingeniería_Eléctrica_VI_NI_1.pdf
- [36] E. S. Hernández Dávila, J. Cajamarca, C. Redrobán, V. Valverde, and J. Guilcapi, "Estudio de las pérdidas de energía en conductores eléctricos mediante termografía infrarroja", Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/322222106_Estudio_de_las_perdidas_de_energia_en_conductores_electricos_mediante_termografia_infrarroja
- [37] F. H. Martínez, "El fenómeno de distorsión armónica en redes eléctricas," *Tecnura*, vol. 5, no. 9, pp. 46–54, 2001.

- [38] “Desequilibrios y sus consecuencias en los Centros de Transformación – Quinto Armónico,” Aug. 02, 2009. <https://quintoarmonico.es/2009/08/02/desequilibrios-y-sus-consecuencias-en-los-centros-de-transformacion/> (accessed May 20, 2022).
- [39] “Detección de desequilibrios y sobrecargas eléctricas,” *Fluke Corporation*, 2005. <https://pt.rs-online.com/es/pdf/RSFLUKEELECTRICIDAD01.pdf> (accessed May 20, 2022).
- [40] J. W. Parra Betancur and H. R. Toro Bolívar, “Estudio de distorsión armónica y factor de potencia en la red de alimentación eléctrica de una máquina papelera,” Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, 2009. Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/6026/T04028.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [41] “Analizadores De Redes Portátiles | GAL Electric.” <https://www.galelectric.com.co/analizadores-de-redes-portatiles/> (accessed May 31, 2022).
- [42] “Analizador de redes - Sucomputo.” <https://sucomputo.com/analizador-de-redes-2/> (accessed May 31, 2022).
- [43] “Analizadores De Calidad de Energía Fijos | GAL Electric.” <https://www.galelectric.com.co/analizadores-de-calidad-de-energia-fijos/> (accessed May 31, 2022).
- [44] “CVM - Analizadores de redes eléctricas.” https://docs.circutor.com/docs/CT_AnalizadoresFijos_SP.pdf (accessed May 31, 2022).
- [45] M. Camara, “Registrador de energía eléctrica trifásico - instrumentacionhoy.com,” 2017. <https://www.instrumentacionhoy.com/registrador-de-energia-electrica-trifasico/> (accessed Jun. 01, 2022).
- [46] J. D. Arcila, “DigSilent Básico 2015,” *ieb*, Accessed: Jun. 01, 2022. [Online]. Available: <https://www.ieb.co/energia/Capacitacion/l/e/10.pdf>
- [47] “Transmisión de potencia - DigSILENT.” <https://www.digsilent.de/en/power-transmission.html> (accessed Jun. 01, 2022).

- [48] "MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico - MATLAB & Simulink." <https://la.mathworks.com/products/matlab.html> (accessed Jun. 01, 2022).
- [49] "OMS | Energy Computer Systems." <https://energyco.com/soluciones/oms/> (accessed Jun. 01, 2022).
- [50] "Automatización Industrial IIoT - Bismark Colombia." <https://bismark.net.co/automatizacion-industrial-iiot/> (accessed Jun. 01, 2022).
- [51] "Conociendo la Norma IEC 61000-4-30 Clase A | Elspec." <https://www.elspec-ltd.com/conociendo-la-norma-iec-61000-4-30-clase-a/?lang=es> (accessed Jun. 01, 2022).
- [52] L. Pravos García, "Análisis de flujos de carga para el análisis de redes de distribución. Implementación del algoritmo 'FORWARD AND BACKWARD,'" Escuela Técnica Superior de Ingeniero Industriales Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2017. Accessed: Jun. 02, 2022. [Online]. Available: https://oa.upm.es/47864/1/TFG_LETICIA_PRAVOS_GARCIA.pdf
- [53] "SCADA eléctrico| Sistema de gestión de energía | Administración de energía | ETAP." <https://etap.com/es/packages/electrical-scada> (accessed May 30, 2022).