EVALUACIÓN Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA ENERGÉTICO DEL EDIFICIO DE LA SEDE CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, BOGOTÁ, COLOMBIA

YINNETTE ADRIANA FAJARDO LÓPEZ Cód. 2070494
RAFAEL ANDRES RODRÍGUEZ PEDRAZA Cód. 2070512

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2012

EVALUACIÓN Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA ENERGÉTICO DEL EDIFICIO DE LA SEDE CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, BOGOTÁ, COLOMBIA

YINNETTE ADRIANA FAJARDO LÓPEZ Cód. 2070494
RAFAEL ANDRES RODRÍGUEZ PEDRAZA Cód. 2070512

Tesis realizada para optar por el título de Ingeniero Electrónico

Tutor:
Ing. Edwin Francisco Forero García

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRÓNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2012

RECTOR GENERAL
Padre Carlos Mario Alzate Montes, O.P.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO GENERAL
Padre Luis Francisco Sastoque Poveda, O.P.

VICERRECTOR ACADÉMICO GENERAL
Padre Eduardo González Gil, O.P

SECRETARIO GENERAL
Doctor Héctor Fabio Jaramillo Santamaría

DECANO DE DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
Padre Pedro José Díaz Camacho, O.P

SECRETARIA DE DIVISIÓN
E.C. Myriam Gómez Colmenares

DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
Ingeniera Adriana Cecilia Páez Pino

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado "EVALUACIÓN Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA ENERGÉTICO DEL EDIFICIO DE LA SEDE CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, BOGOTÁ, COLOMBIA.", elaborado por YINNETTE ADRIANA FAJARDO LÓPEZ y RAFAEL ANDRES RODRÍGUEZ PEDRAZA, ha sido aprobado para optar al título de Ingeniero Electrónico, de acuerdo con lo estipulado por la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Santo Tomás.

Ing. Edwin Francisco Forero García
Tutor Asignado

Fecha:

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado "EVALUACIÓN Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA ENERGÉTICO DEL EDIFICIO DE LA SEDE CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, BOGOTÁ, COLOMBIA", elaborado por YINNETTE ADRIANA FAJARDO LÓPEZ y RAFAEL ANDRES RODRÍGUEZ PEDRAZA, ha sido aprobado para optar al título de Ingeniero Electrónico, de acuerdo con lo estipulado por la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Santo Tomás.

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Jairo Sandoval Muñoz
Revisor Metodológico

_____

Fecha:

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado "EVALUACIÓN Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA ENERGÉTICO DEL EDIFICIO DE LA SEDE CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, BOGOTÁ, COLOMBIA", elaborado por YINNETTE ADRIANA FAJARDO LÓPEZ y RAFAEL ANDRES RODRÍGUEZ PEDRAZA, ha sido aprobado para optar al título de Ingeniero Electrónico, de acuerdo con lo estipulado por la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Santo Tomás.

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del Jurado

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del Jurado

_____

Fecha:

ADVERTENCIA

La Universidad Santo Tomás no se hace responsable de las opiniones y conceptos expresados por los autores en el trabajo de grado, solo velará por qué no se publique nada contrario al dogma ni a la moral católica y porque el trabajo no tenga ataques personales y únicamente se vea el anhelo de buscar la verdad científica.

Capítulo III –Art. 46 del Reglamento de la Universidad Santo Tomás.

A Dios quien ha sellado cada paso de nuestra carrera y de nuestras vidas, y a nuestras familias que nos han dado el apoyo y la motivación para cumplir nuestros sueños.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la vida, por los retos y victorias en el camino y por la oportunidad de alcanzar nuestras metas en esta carrera como parte de nuestro proyecto de vida. A nuestros padres Olga Lucía Pedraza y Rafael Rodríguez Castro, y Luz Stella López por su apoyo incondicional en cada paso, a nuestras familias y amigos que han sido parte de nuestro crecimiento espiritual, personal y profesional. Agradecemos al Ingeniero Edwin Forero por su acompañamiento y por cada una de sus enseñanzas, y a la Universidad Santo Tomás que han sido los gestores de nuestra formación como personas e ingenieros excelentes y comprometidos con la sociedad.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN 18

2. JUSTIFICACIÓN 19

3. OBJETIVOS 20

3.1 OBJETIVO GENERAL 20
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 20

4. FUNDAMENTOS HUMANÍSTICOS. 21

5. BREVE HISTORIA DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA. 23

6. SISTEMA ELÉCTRICO INDUSTRIAL 24

6.1 EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ESTÁ CONSTITUIDO POR CINCO ELEMENTOS: 24
6.1.1 Líneas Primarias: 24
6.1.2 Transformadores de Distribución: 25
6.1.3 Líneas Secundarias: 25
6.1.4 Acometidas y Equipos de Medición: 25

7. CONCEPTOS EN CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA (AC) 27

7.1 TENSIÓN Y CORRIENTE: 27
7.2 ENERGÍA ELÉCTRICA: 28
7.3 POTENCIA: 28
7.3.1 Potencia activa: 28
7.3.2 Potencia reactiva: 29
7.3.3 Potencia aparente: 29
7.3.4 Factor de potencia: 30

8. EFICIENCIA ENERGÉTICA 32

9. CALIDAD DE POTENCIA 33

9.1 EQUIPOS EMISORES DE ARMÓNICOS 33
9.1.1 Transformadores: 34
9.1.2 Máquinas rotatorias: 34
9.1.3 Motores de inducción: 34
9.1.4 Cables y conductores: 34
9.1.5 Dispositivos de estado sólido: 35
9.1.6 Aparatos de medición: 35
9.1.7 Otros inconvenientes dentro de una red eléctrica que presente distorsiones son: 35
9.2 FENÓMENOS ELECTROMAGNÉTICOS 35
9.2.1 Transitorios: 37
9.2.2 Variaciones de corta duración: 38
9.2.3 Variaciones de larga duración: 40
9.2.4 Desequilibrio de voltaje: 41
9.2.5 Distorsión en la forma de onda: 42
9.2.6 Fluctuaciones: 45
9.3 NORMATIVIDAD 46
9.3.1 IEEE 519 de 1992 46

9.3.2 IEEE 1159 de 1995 47
9.3.3 IEEE 1100 de 1999 48
9.3.4 RETIE 48
9.3.5 NTC 2050 48

10. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN 50

10.1 CARACTERÍSTICAS: 50
10.2 ESPECIFICACIONES 50
10.3 SOFTWARE DATAVIEW. 51

11. ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS SUBESTACIONES DE LA UNIVERSIDAD, CON EL ANALIZADOR DE CALIDAD DE ENERGÍA POWER PAD AMC 3945-B 52

11.1 SUBESTACIÓN 1 (EDIFICIO GREGORIO XIII): 52
11.2 SUBESTACIÓN 2 (EDIFICIO BIBLIOTECA): 65

12. DISEÑO DEL PLANO ELÉCTRICO DE LAS SUBESTACIONES DE LA UNIVERSIDAD Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA 76

12.1 SUBESTACIÓN 1, EDIFICIO GREGORIO XIII: 76
12.1.1 Construcción del plano (SUBESTACION 1) a mano en la parte del reconocimiento. 76
12.1.2 Construcción de plano de prueba en ETAP 7.5.0. 76
12.1.3 Reconocimiento y estudio de parámetros de cada dispositivo o elemento a simular. 78
12.1.4 Construcción y simulación de la distribución eléctrica de la subestación 1. 83
12.1.5 Otras características a simular. 86
12.2 SUBESTACIÓN 2, EDIFICIO BIBLIOTECA: 89
12.2.1 Montaje de la simulación SUBESTACION BIBLIOTECA (2): 89

13. MONITOREO DE LA CALIDAD DE POTENCIA 93

13.1 PROPUESTA DE DISEÑO: 94
13.2 DISPOSITIVOS DE MONITOREO: 97

14. ANALISIS D.O.F.A. 101

15. CONCLUSIONES 103

16. ANEXO 1 105

17. ANEXO 2 109

18. ANEXO 3 113

19. BIBLIOGRAFIA 122

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema Eléctrico Colombiano. 26
Figura 2. Triangulo de potencias. 30
Figura 3. Ángulo Φ: a) carga resistiva, b) carga inductiva, c) carga capacitiva. 30
Figura 4.Transitorio Impulsivo de corriente en un sistema de potencia. 37
Figura 5. Transitorio Oscilatorio de baja frecuencia. 38
Figura 6. Interrupción momentanea. 39
Figura 7. Caída instantánea de voltaje (sag). 39
Figura 8. Cresta instantánea de voltaje (swell). 40
Figura 9. Cresta instantánea de voltaje (swell). 42
Figura 10. Notching. 45
Figura 11. Fluctuación de voltaje. 46
Figura 12. Analizador de calidad de potencia. Power Pad 3945-B, Controles del equipo. 51
Figura 13. Software DataView del dispositivo PowerPad. 51
Figura 14. Imágenes de la primera subestación, edificio Gregorio XIII. 52
Figura 15. Limites de distorsión de corriente para sistemas de distribución General 59
Figura 16. Imágenes de la segunda subestación, edificio de Biblioteca. 66
Figura 17. Datos de simulación en ETAP 7.5.0. 77
Figura 18. Parámetros y características de un motor en ETAP. 78
Figura 19. Parámetros power grid. 79
Figura 20. Parámetros del BUS. 80
Figura 21. Parámetros del transformador. 81
Figura 22. Parámetros del Breaker 82
Figura 23. Parámetros del cable. 83
Figura 24. Parte del plano de distribución eléctrica Simulación subestación 1. 84
Figura 25. Simulación de corrientes del plano de distribución subestación 1. 86
Figura 26. Simulación de distorsión armónica total. 87
Figura 27. Análisis en corto circuito. 89
Figura 28. Sistema subestación 2. 90
Figura 29. Corriente de subestación 2. 92
Figura 30. Bosquejo de monitoreo y control. 95
Figura 31. Circutor. 98

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Frecuencia. 53
Gráfica 2. Voltajes RMS. 54
Gráfica 3. Corrientes. 56
Gráfica 4. Distorsión armónica total (THD). 57
Gráfica 5. Factor de cresta. 60
Gráfica 6. Desbalance del sistema. 61
Gráfica 7. Factor K. 62
Gráfica 8. Potencia 63
Gráfica 9. Energía 64
Gráfica 10. Factor de Potencia 65
Gráfica 11. Frecuencia subestación 2 66
Gráfica 12. Voltaje RMS 67
Gráfica 13. Corrientes 68
Gráfica 14. THD 69
Gráfica 15. Factor de cresta 71
Gráfica 16. Desbalance del sistema 72
Gráfica 17. Factor K 73
Gráfica 18. Potencia 73
Gráfica 19. Energía Subestación 2. 74
Gráfica 20. Factor de potencia. 75
Gráfica 21. Gráfico del espectro con THD en el sistema. 88
Gráfica 22. Forma de onda con THD en el sistema. 88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Categorías y características típicas de fenómenos electromagnéticos en sistemas de potencia. 37
Tabla 2. Tolerancia para las tensiones de acuerdo a la norma ANSI. 41
Tabla 3. Frecuencia aceptable NTC 1340 54
Tabla 4. Clasificación, denominación y valores de tensión nominal. 55
Tabla 5. Tabla de rangos máximos y mínimos de VRMS 56
Tabla 6. TDD de corrientes. 59
Tabla 7. Datos distorsión de potencia. 63
Tabla 8.Tabla de rangos máximos y mínimos de VRMS 68
Tabla 9. TDD de corrientes. 70
Tabla 10. Datos distorsión de potencias 74
Tabla 11. Potencias y factor de potencias de medición subestación 1. 85
Tabla 12. Reporte de simulación. 91
Tabla 13. Características del analizador de redes eléctricas, Circutor CVM-NRG96. 99

Ecuaciones.

Ecuación 1. Valor promedio de una señal AC. 27
Ecuación 2. Valor rms de una señal AC. 28
Ecuación 3. Potencia activa. 29
Ecuación 4. Potencia activa. 29
Ecuación 5. Potencia reactiva. 29
Ecuación 6. Potencia aparente. 29
Ecuación 7. Factor de potencia. 30
Ecuación 8. Distorsión de demanda total (TDD). 44
Ecuación 9. Porcentajes máximos de voltajes 55
Ecuación 10. Porcentajes mínimos de voltajes 55
Ecuación 11. Distorsión de demanda total. 58
Ecuación 12. Factor de cresta. 60
Ecuación 13. Promedio de los voltajes fase-fase del sistema trifásico. 61
Ecuación 14. Desviación estándar de los voltajes fase-fase del sistema trifásico. 61
Ecuación 15. Desbalance del sistema. 61
Ecuación 16. Factor de cresta subestación 2. 71

GLOSARIO

- ***Armónico:*** *Una componente sinusoidal de un periodo de onda. Nota: Por ejemplo, una componente, la frecuencia que es dos veces la frecuencia fundamental, se le llama segundo armónico.*
- ***Barrajes:*** *Conductor de tierra, usualmente una barra de cobre o un cable de diámetro equivalente.*
- ***Breaker:*** *Dispositivo capaz de interrumpir o abrir un circuito cuando la intensidad de corriente sobrepasa la capacidad de este.*
- ***Cableado estructurado:*** *Sistema de cableado genérico para la infraestructura de Tecnologías de la Información.*
- ***Cableado horizontal:*** *Cableado del cuarto de computo o cuarto de telecomunicaciones al puesto de trabajo.*
- ***Cableado vertical:*** *También llamado Backbone, y es cableado de telecomunicaciones que conecta varios pisos de la edificación o conexión entre edificaciones.*
- ***Calidad de energía:*** *Ausencia de interrupciones, sobre tensiones y deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje RMS suministrado por el usuario; esto referido a la estabilidad del voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico.*
- ***Carga lineal:*** *Es una carga que no modifica la señal eléctrica de una distribución eléctrica. Ej: foco incandescente.*
- ***Carga no lineal:*** *describe las cargas como por ejemplo: hornos microondas, impresoras laser, instrumentación medica, equipos de sonido, televisores, algunos tipos de iluminación, etc. Esto significa que genera cambios a la red eléctrica ya que estos dispositivos usan fuentes de switcheo para la alimentación y funcionamiento de estos dispositivos.*
- ***Carga:*** *Forma de indicar los dispositivos eléctricos que funcionan con flujo de corriente.*
- ***Comunicación RS-485:*** *Sistema de transmisión multipunto diferencial, es ideal para transmitir altas velocidades sobre largas distancias.*
- ***Corto circuito:*** *Suceso producido por la sobrecarga en una parte del circuito.*
- ***Diagrama unifilar:*** *Muestra gráficamente como se distribuye el cableado de una red Eléctrica.*
- ***Distorsión armónica total (THD):*** *Este término se ha empleado comúnmente para definir el "factor de distorsión" de la tensión o de la corriente.*
- ***Distribución eléctrica:*** *Forma organizada, eficiente y segura de encaminar la energía en un sistema o red eléctrica.*
- ***Factor de coincidencia:*** *Es la relación de la máxima demanda de un sistema y la suma de las máximas demandas individuales de varias partes del sistema.*
- ***Factor de demanda:*** *Es la relación entre la máxima demanda de un sistema y la carga total conectada al sistema.*

- ***Factor de distorsión:*** *Relación de la media cuadrática del contenido armónico al valor eficaz de la cantidad de frecuencias fundamentales, expresado como un porcentaje de las frecuencias fundamentales.*
- ***Factor de potencia (FP):*** *Es un indicador cuantitativo y cualitativo del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica.*
- ***Factor k:*** *Valor numérico que representa los posibles efectos de calentamiento de una carga no lineal sobre el transformador.*
- ***Ferro-resonancia:*** *Fenómeno que usualmente se caracteriza por presencia de sobretensiones y formas irregulares de onda, está asociado con la excitación de elementos inductores.*
- ***Flujo de carga:*** *Flujo de corriente.*
- ***Impedancia:*** *Oposición de la corriente que surge por efectos magnéticos del medio en circuitos alternos.*
- ***Parpadeos (flickers):*** *Impresión de inestabilidad de la sensación visual causada por un estímulo luminoso, cuya luminosidad o distribución espectral fluctúa en el tiempo.*
- ***Redes de bajo voltaje monofásica:*** *Red de energía sinusoidal de una fase.*
- ***Redes de bajo voltaje trifásica:*** *Red de energía sinusoidal de tres fases.*
- ***RJ-45:*** *Conector que permite la conexión del cable trenzado al equipo de red.*
- ***RMS:*** *Root Mean Square, raíz cuadrada del valor cuadrático medio.*
- ***Sensores:*** *Dispositivo o transductor que convierte algún cambio de temperatura o fenómeno en electricidad.*
- ***Servidores:*** *Computadores con mayores capacidades y especiales para uso industrial y manejo de datos de forma continua sin interrupción.*
- ***Sobretensiones:*** *Aumento de tensión capaz de poner en peligro el material o el buen servicio de una instalación eléctrica.*
- ***Subestación Eléctrica:*** *Conjunto de dispositivos usados para guiar el flujo de energía en un sistema de red eléctrica y garantiza seguridad de los equipos por medio de dispositivos automáticos de control y protección (breakers).*
- ***Transformador:*** *Dispositivo eléctrico capaz de aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la potencia.*
- ***Transientes:*** *Es un cambio en condición de estado estable del voltaje y/o corriente. Son el resultado de rápidos cambios en los circuitos de potencia.*
- ***UPS:*** *Uninterruptible Power Supply (Sistema ininterrumpido de energía)*
- ***UTP:*** *Cable de par trenzado no blindado.*

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la humanidad está siendo consciente de la importancia del uso racional de la energía con el fin de reducir el impacto ambiental, disminuir los costos que implica su uso y prolongar el límite de agotamiento de combustibles fósiles; dentro de gobiernos, empresas, industrias e instituciones (edificaciones) estos son aspectos de gran preocupación, puesto que son quienes mayor consumo de energía tienen.

En Colombia el sistema de generación, transmisión y distribución eléctrica, esta guiado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y el Ministerio de Minas y Energía, que establecen las diferentes tensiones en las que se debe implementar el sistema eléctrico. De igual manera, estas entidades han desarrollado el plan URE (Uso Racional y Eficiente de Energía), establecido bajo las normas nacionales e internacionales con el fin de apoyar el desarrollo sostenible en el país.

Los sistemas de energía eléctrica de grandes edificaciones que cuentan con subestaciones, son los principales distribuidores energéticos y por tanto el primer punto de análisis a la hora de preocuparse por reducir consumos. Por esta razón un diseño de dicho sistema acorde a las normas establecidas debe ser siempre revisado y estudiado para tener una edificación eficiente energéticamente, es decir, que cumpla con el propósito de suplir los requerimientos energéticos con eficiencia y seguridad. Para esto es necesario realizar auditorías a dicho sistema, revisar su estado y plantear acciones de mejora.

Con el fin de contribuir con aspectos sociales, económicos y ambientales, en la Universidad Santo Tomás, en Bogotá y en Colombia, este proyecto es la primera fase de un estudio que consiste en el reconocimiento y elaboración de los planos eléctricos de las subestaciones de la sede central de la institución, estableciendo la potencia instalada en la edificación y realizando un estudio de consumo energético que facilita la estimación de índices de eficiencia y auto-sostenibilidad. Además se desarrolla una evaluación de este sistema eléctrico considerando las normas bajo las cuales se rigen en el país, y de esta manera se realiza la propuesta de un plan estratégico y de mejoramiento de la red eléctrica de la Universidad Santo Tomás.

2. JUSTIFICACIÓN

Con el fin de prevenir futuros inconvenientes en el sistema eléctrico que afecten los equipos electrónicos que operan en la edificación, el estudio planteado tiene justificación técnica pertinente. Es de gran importancia que la edificación cuente con las ubicaciones exactas de la distribución del sistema de energía para su segura administración y gestión, así también para identificar puntos de falla y futuras ampliaciones.

Como aporte al medio ambiente, este proyecto que es la primera fase de un estudio energético completo de las instalaciones de la Universidad Santo Tomás, significa el primer paso para la identificación de puntos de ahorro de energía, la estimación de los consumos intrínsecos del sistema de cableado y la propuesta de alternativas de mejora. Aportando así para la reducción de emisiones de gases contaminantes a la atmósfera ya afectada en gran cantidad.

Desde luego el reconocimiento del sistema eléctrico representa un entorno más seguro para los seres humanos que intervienen en las diferentes actividades de la edificación y los equipos que constantemente son alimentados por dicho sistema.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar el reconocimiento y levantamiento de los planos de información del sistema de energía eléctrica de los edificios de la sede central de la Universidad Santo Tomás –Bogotá, según lo determinan el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) y la Norma Técnica Colombiana NTC 2050; con el fin de tener la información suficiente para realizar a futuro, modificaciones, mantenimientos en el sistema y/o estudios de eficiencia energética

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el sistema de energía eléctrica de las subestaciones de la Universidad Santo Tomás y de sus líneas eléctricas, realizando la lista de chequeo según lo establecido por la norma NTC 2050 y el RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas).

- Realizar los planos eléctricos unifilares de las subestaciones de la sede central de la Universidad Santo Tomás mediante la plataforma computacional ETAP, permitiendo la simulación de la operación del sistema.

- Analizar los resultados obtenidos en la evaluación del sistema energético y las simulaciones del mismo, según lo establecido por las normas IEEE 1159, IEEE 1100 y NTC 2050.

- Proponer un plan estratégico y de mejoramiento de la red eléctrica de la Universidad Santo Tomás, basado en las normas que rigen estos sistemas.

4. FUNDAMENTOS HUMANÍSTICOS.

En Colombia, el sector energético es uno de los más fuertes en cuanto a generación y consumo se refiere; generación, ya que da un aporte a la economía nacional del 29%, al PIB (Producto Interno Bruto) y a la exportación, y consumo debido al alto nivel de demanda energética por nuevas tecnologías y las tendencias mundiales.

Este país cuenta con una gran cantidad de recursos naturales, que para la generación de energía eléctrica son utilizados en grandes cantidades (Ej.: agua, carbón, hidrocarburos, gas). El gobierno colombiano debe contar con un sistema que supla la demanda energética nacional, con criterios de calidad, seguridad, confiabilidad, competitividad y viabilidad, con aprovechamiento pleno de los recursos naturales del país teniendo en cuenta los principios de eficiencia y sostenibilidad, y velando por el cuidado de la sociedad con bajos niveles de contaminación y otorgando un excelente servicio de energía.

En este sentido, la Universidad Santo Tomás como ente educativo, busca la formación integral de sus estudiantes, promoviendo en ellos una respuesta idónea, ética, analítica, creativa, crítica y responsable en la solución de problemas y necesidades de la sociedad y de Colombia. La Universidad en su oficio de formación profesional, fomenta una concepción humanista en mira a la construcción del progreso del país, el bienestar común y la proyección social, en el ámbito profesional, ambiental y social.

La Facultad de Ingeniería Electrónica, a través de su programa educativo, permite al estudiante adquirir capacidades que contribuyen en el desarrollo tecnológico del país, tales como: innovación, modelamiento, diseño, integración y emprendimiento; logrando así una formación integral y de excelencia.

El proyecto de “EVALUACIÓN Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA ENERGÉTICO DE LA SEDE CENTRAL, DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, BOGOTÁ, COLOMBIA” se desarrolla de tal manera que afecte el modelo convencional de los sistemas de consumo energético, y contribuyendo con el plan URE (Uso Racional y Eficiente de la Energía) del país, no solo en la Universidad Santo Tomás, sino que posteriormente, los conceptos, normas y listas de chequeo que se presentan en este documento, puedan ser utilizadas en otras edificaciones. Al tener un mayor aprovechamiento de la energía eléctrica, se brinda al país un aporte ambiental (reducción en el uso de materias primas para la generación de energía), económico (disminución de la facturación de energía eléctrica), social (menor grado de contaminación) y tecnológico (a la vanguardia del uso de tecnologías que permitan el monitoreo y control del consumo energético).

Es de gran importancia, como estudiantes de Ingeniería Electrónica de la Universidad Santo Tomás y a partir de este proyecto, ser constructores de nuevas alternativas de soluciones competitivas en el ámbito energético, a través del proceso investigativo de conceptos y normas, a cerca del análisis de calidad de potencia, con el uso de instrumentos de medición y software dado por la Universidad, que llevan al proyecto a ser un ente contribuyente, y a nosotros como profesionales a ser agentes de cambio con responsabilidad social y ambiental, en Colombia y el mundo.

5. BREVE HISTORIA DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.

La energía eléctrica es la parte fundamental de todos los procesos de una fábrica, empresa, hogar, institución, transporte, etc.

> "Es fácilmente producible por diversos medios, utilizando diversas fuentes energéticas. Ofrece una relativa facilidad de transporte y distribución, aunque las redes eléctricas presentan un fuerte grado de rigidez por su precio y por las servidumbres que comportan; pero la ventaja más importante es la gran ductilidad de su empleo que permite todo tipo de aplicaciones, desde alumbrado hasta movimiento de motores de cualquier tipo"[1].

En los inicios de la historia del hombre, este no tenía conocimiento de lo que era la electricidad, mas sin embargo fue en la antigua Grecia, cuando los pastores de ovejas se dieron cuenta que el ámbar (bastón) que rozaban con la lana de los animales sufría una atracción con algunos objetos; este fenómeno fue motivo de estudio para algunos filósofos, lo que dio inicio a la teoría eléctrica que conocemos hoy en día.

Luego, a finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX, tuvieron lugar la Revolución Industrial (1760), la Revolución Norteamericana (1775) y la Revolución Francesa (1789), que dio paso a descubrimientos tan importantes como: la electricidad y el motor (Volta, 1775), en 1813 se descubre el arco voltaico que es precursor de los sistemas de iluminación, en 1840 la creación del telégrafo, el teléfono en 1870, la lámpara de incandescencia en 1879 por Edison, en 1880 el gas para uso en alumbrado público, y en 1888 surgen los motores y generadores gracias a Nikola Tesla, padre del sistema eléctrico que se usa hoy en día.

El sistema eléctrico como agente importante en una edificación y en la industria, debe ser construida bajo normas y elementos, en los cuales se cuente con un buen direccionamiento de corriente, elementos de conducción y control y también fundamente un sistema que cree equilibrio con el medio ambiente, para que cuando esté en funcionamiento tenga un uso racional de energía y sea eficiente.

---

[1] SERRA, Florensa Rafael. Instalaciones eléctricas en los edificios. Editores técnicos asociados S.A. Barcelona, España. 1979. Pág. 116

6. SISTEMA ELÉCTRICO INDUSTRIAL

Para comprender el análisis energético que se quiere llevar a cabo en este proyecto, es de gran importancia conocer el modelo del sistema eléctrico industrial que incluye la generación, transmisión y distribución de la energía. Basado en el curso virtual presentado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) del Ministerio de Minas y Energía de Colombia, para promover el Uso Racional de Energía (URE), se presentan a continuación las principales características y componentes del sistema eléctrico.

El sistema de generación consiste en el proceso de transformar energía mecánica, química, térmica, hidráulica, eólica, entre otras, en energía eléctrica, esto se lleva a cabo en centrales eléctricas que emplean un generador que dependiendo de su fuente primaria (químicos, movimiento, calor, agua, etc.) es activado y entrega electricidad cumpliendo con la demanda de energía de una región.

Para el transporte de la energía eléctrica generada es importante tener en cuenta la cantidad de pérdida de energía que puede existir en las líneas de alta tensión, es por esta razón que en la primera etapa se aumenta el voltaje a una magnitud mayor a la de la generada en la central eléctrica, esto se realiza a través de transformadores elevadores.

Luego se implementan las redes de distribución que entregan la energía a tensiones estándares establecidas por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), desde una subestación de potencia hasta los usuarios finales. Teniendo en cuenta que el objetivo del sistema de distribución es entregar a los clientes energía continuamente, sin interrupciones, con el fin de evitar daños en los equipos conectados a la red y su eficiente rendimiento, es importante tener un diseño que entregue una forma de onda senoidal pura, idealmente sin presencia de armónicos, y realizar un control de operación de la misma.

Los sistemas de distribución pueden ser: aéreos que son aquellos que tienen sus conductores y transformadores soportados en postes, subterráneos que están bajo tierra, a nivel del suelo en locales o gabinetes, o mixtos donde la conexión de la red primaria es aérea y la secundaria subterránea. La Universidad Santo Tomás en la Sede Central de Bogotá, Colombia, cuenta con dos subestaciones (sistema subterráneo) de media a baja tensión, las cuales serán evaluadas conforme a los objetivos de este proyecto.

6.1 EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ESTÁ CONSTITUIDO POR CINCO ELEMENTOS:

6.1.1 **Líneas Primarias:**

Las líneas primarias se encargan de llevar la energía desde las subestaciones de potencia hasta las de distribución, esto lo hace a través de cables de aluminio con diferentes calibres de acuerdo a la densidad de carga. La estructura en la red primaria de distribución está conformada por troncales y ramales. Los troncales, constituido por cables de bajo calibre (gruesos) y de mayor capacidad que transmiten energía, y los ramales, que son derivados, con cables de menor calibre se conectan a los transformadores de distribución o subestaciones privada. Esta red puede tener conexión trifásica (3 ó 4 hilos) o monofásica (1 ó 2 hilos).

6.1.2 **Transformadores de Distribución:**

Este transformador realiza la conexión entre la red primaria y la red secundaria bajando los niveles de tensión de manera que pueda ser usada por los usuarios finales. Es importante determinar la capacidad de este elemento teniendo en cuenta el factor de demanda y factor de coincidencia, es decir, de la máxima demanda de un sistema y la densidad de carga del mismo. Además tener en cuenta los valores de impedancia de un transformador determinan la regulación de la tensión y las magnitudes de las corrientes en corto circuito en caso de fallas en la red.

Las conexiones de los transformadores trifásicos en el devanado primario pueden ser en delta o en estrella. Al implementar una conexión en delta se disminuye el riesgo de corrientes armónicas en la red, mientras que la conexión en estrella disminuye la posibilidad de que se presenten sobretensiones en la red por fenómenos de ferro-resonancia. En el lado secundario de la red, generalmente se realiza una conexión en estrella con cuatro hilos a la salida, neutro conectado a tierra, para permitir dos niveles de voltaje (110V ~ 220V) en el sistema.

6.1.3 **Líneas Secundarias:**

Las líneas secundarias se encargan de llevar la energía desde los transformadores de distribución hasta las acometidas de los usuarios. Se pueden clasificar como monofásico (2 ó 3 hilos) y/o trifásicos (3 ó 4 hilos). En este punto se utilizan cables de calibres 1/O, 4 AWG, 6 AWG, 8 AWG y 10 AWG, dependiendo de la acometida, ya que los niveles de tensión son bajos (110V ~ 220V).

6.1.4 **Acometidas y Equipos de Medición:**

Las acometidas son elementos que realizan la conexión del sistema de distribución a los dispositivos del usuario. Los equipos de medición se encuentran ubicados dentro de esta línea con equipos como contadores, sensores, de control, etc. Tanto la acometida como las mediciones se pueden realizar en media o alta tensión.

Finalmente, dentro de un sistema de distribución se debe tener en cuenta la carga y demanda del usuario para establecer los dispositivos a implementar en la red eléctrica, ya sea para su distribución, medición o control. La carga hace referencia al conjunto de equipos y/o dispositivos que se conectan a la red eléctrica y que demandan una potencia eléctrica determinada por sus fabricantes, el valor de esta potencia ("valor de carga") es lo que se conoce como demanda.

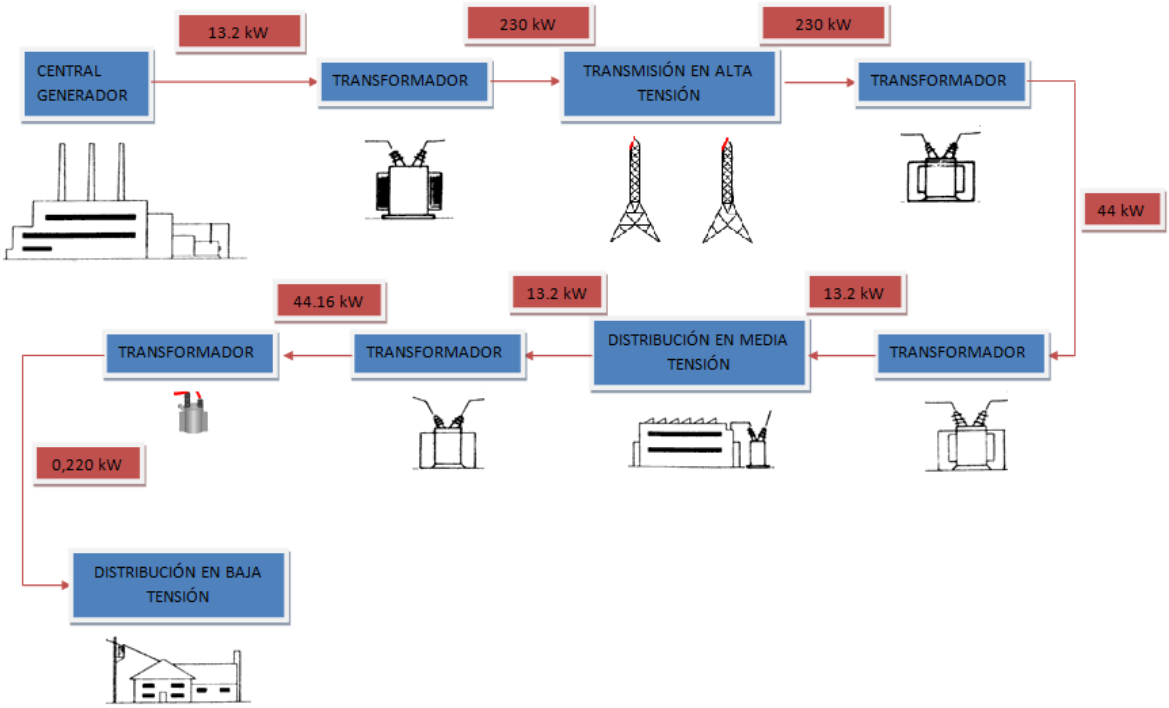


Figura 1. Sistema Eléctrico Colombiano.
Fuente del autor.

7. CONCEPTOS EN CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA (AC)

7.1 Tensión y corriente:

Los sistemas eléctricos de corriente alterna (AC) cuentan con ciertos elementos y características especiales a diferencia de los sistemas de corriente directa (DC), debido a que es una señal que varía de amplitud en el tiempo, tal como la forma de onda senoidal. La distribución de energía en un sistema con corriente alterna permite tener ventajas económicas, de rendimiento y eficacia.

Las características de las ondas de tensión y corriente en AC son:

- Número de fases, que define la posición angular de la forma de onda.
- Amplitud de la onda, define el valor máximo de la señal tanto en su polaridad negativa como en su polaridad positiva.
- Frecuencia de la onda, define el número de ciclos u oscilaciones por segundo.
- Forma de onda

Debido a la variación de las señales de corriente y voltaje en el tiempo existen distintos valores instantáneos que dificultan el análisis y comparación de las formas de onda; es por esta razón que se determinaron magnitudes específicas de estas señales que permitan realizar un mejor análisis, estas son:

- Valor pico: definido como el valor máximo de la onda, ya sea positivo o negativo.
- Valor promedio: es el promedio aritmético de todos los valores que toma la señal en medio ciclo, equivalente a 0.6366 por el valor pico.

$$A_m = \frac{2A_0}{T}\int_0^{T/2} senwt * dt = \frac{2A_0}{T}\left[-\frac{coswt}{W}\right]_0^{-T/2} = \frac{2}{\pi}A_0$$

$$A_m = 0.6366 * A_0$$

Ecuación 1. Valor promedio de una señal AC.

- Valor eficaz o de raíz cuadrática media (RMS): Es el valor que equivale al de un valor constante que en el mismo tiempo disipe la misma energía. Este valor se toma desde el ángulo de 45 grados de la señal, es decir, el 70.7% del valor pico, así que equivale a:

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}}(A_O \sin wt)^2 * dt} = \sqrt{\frac{2A_o^2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}}\left(\frac{1-\cos(2wt)}{2}\right) * dt}$$

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{2A_o^2}{T}\left[\frac{t+\sin(2wt)}{2}\right]_0^{T/2}} = \sqrt{\frac{A_o^2}{2}}$$

$$A_{rms} = 0.707 * A_{pico}$$

Ecuación 2. Valor rms de una señal AC.

El coeficiente 0.707 se toma de la raíz del valor promedio del cuadrado de todos los valores instantáneos de la onda seno.

- Valor pico a pico: Es el doble del voltaje pico, ya que los dos voltajes picos (positivo y negativo) son simétricos.

7.2 Energía eléctrica:

El concepto de energía se define como la capacidad de realizar un trabajo. La energía eléctrica es generada por el movimiento de las cargas eléctricas en el interior de materiales conductores, esto ocurre al conectarse algún dispositivo o elemento conductor a la red eléctrica donde se genera un campo electromagnético que hace que circule una corriente y es quien genera los cambios en el compuesto atómicos y por ende permite el trabajo o funcionamiento del sistema. La unidad de medida de la energía es el Joule (J).

7.3 Potencia:

La potencia se define como la capacidad de realizar un trabajo en un instante de tiempo, es decir, la rapidez con que se transforma o utiliza la energía.

Ahora bien, al conocer las formas de onda y sus características en un sistema AC, cabe destacar que el comportamiento de estas formas de onda depende de las cargas, que pueden ser lineales o no lineales.

7.3.1 Potencia activa:

Hace referencia a la potencia útil dada por la carga resistiva de un circuito o sistema, y la que tendrá que generar la fuente para el trabajo del dispositivo. La potencia activa se denota con la letra P, y su unidad de medida son los Watts (W).

La potencia promedio, como también es conocida, matemáticamente se define como:

$$P = \frac{1}{T}\int_{t_o - T/2}^{t_o + T/2} p(t)dt$$

Ecuación 3. Potencia activa.

Donde T es el periodo de la señal y p(t) es la potencia instantánea, ya que es el tiempo promedio de la potencia instantánea en un periodo. También se define como el producto entre el voltaje, la corriente (valor eficaz) y el valor del factor de potencia:

$$P = IV\cos\varphi$$

Ecuación 4. Potencia activa.

Para elementos con cargas netamente resistivas el factor de potencia es uno (1), este valor se modifica al incluir cargas inductivas y capacitivas.

7.3.2 **Potencia reactiva:**

La potencia reactiva se encuentra en presencia de elementos inductivos, capacitivos y no lineales en un sistema, la presencia de estos representa el no uso eficiente de la energía, y puede generar incrementos en las pérdidas y picos en la señal.

Se representa con la letra Q, y su unidad de medida son los volti-amperios reactivos (VAr). Se define como el producto entre el voltaje, la corriente (valor eficaz) y el seno del ángulo de fase entre ellos:

$$Q = IV\sin\varphi$$

Ecuación 5. Potencia reactiva.

7.3.3 **Potencia aparente:**

Es la potencia total suministrada por una fuente al vacío, es decir, sin carga. Se representa con la letra S y su unidad de medida es volti-amperio (VA), se define como el producto del voltaje y la corriente eficaz, pero también a la raíz de la suma de los cuadrados de la potencia activa y reactiva, como se presenta en la siguiente ecuación:

$$S = IV$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Ecuación 6. Potencia aparente.

7.3.4 **Factor de potencia:**

El factor de potencia describe la cantidad de energía eléctrica que ha sido convertida en potencia en un sistema, por tanto, se define como la relación entre la potencia activa y la potencia aparente. Según el planteamiento realizado con las potencias activa, reactiva y aparente, se puede realizar un análisis con el conocido triángulo de potencias que se muestra en la siguiente figura:

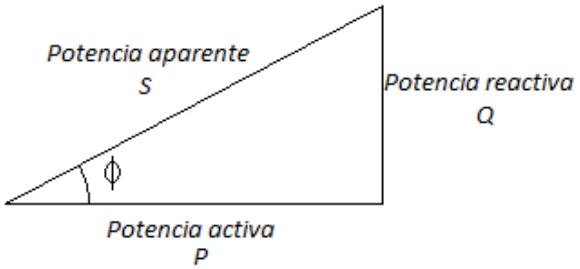


Figura 2. Triangulo de potencias.
Fuente del autor.

Donde:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

Ecuación 7. Factor de potencia.

El ángulo phi, índica el ángulo de fase entre las señales de voltaje y corriente, dependiendo del tipo de carga puede ser igual a 1, adelantado o retrasado. Cuando el ángulo es 0 el factor de potencia es 1, este se presenta cuando las cargas son netamente resistivas, y ocurre en el mejor de los casos; si el ángulo es menor a cero (0) es debido a la presencia de cargas inductivas en el sistema y quiere decir que se encuentra en retraso, mientras que si es mayor a cero (0) se debe a las cargas capacitivas presentes y el sistema se encuentra en adelanto.

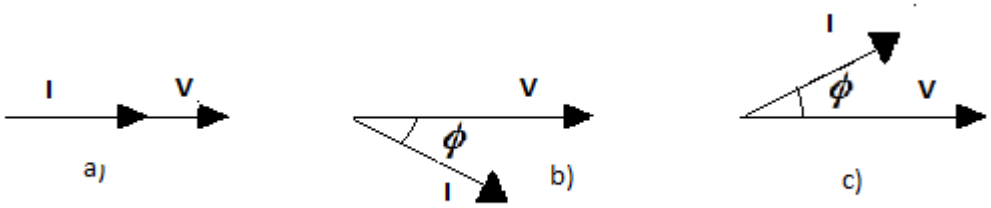


Figura 3. Ángulo Φ: a) carga resistiva, b) carga inductiva, c) carga capacitiva.
Fuente del autor.

Un bajo factor de potencia (fp < 1) puede ocasionar problemas como: mayor consumo de corriente, aumento en las pérdidas de los conductores, incremento en las caídas de voltaje, sobrecargas en transformadores, generadores y líneas de distribución, menor tiempo de vida útil de las instalaciones y mayor costo energético. Por estas razones se hace necesario corregir el factor de potencia.

Para corregir el factor de potencia se realiza un proceso de compensación: los inductores son grandes consumidores de potencia reactiva, los capacitores pueden almacenar energía y suministrarla al sistema, así que al implementar elementos capacitivos en serie con los resistivos y en paralelo con los inductivos, se puede anular total o parcialmente la potencia reactiva y la intensidad de corriente, mejorando el factor de potencia.

8. EFICIENCIA ENERGÉTICA

Hoy en día el consumo de energía eléctrica ha aumentado en grandes niveles debido a la necesidad y comodidades que esta genera, y por sus ventajas a diferencia de otras energías ya que es más efectiva, más fácil de usar, segura y fácil de transportar. Sin embargo, las materias primas que se usan actualmente para su generación se están agotando y además ocasionan daños al medio ambiente, lo que ha llevado a buscar nuevas fuentes de energía y la implementación de dispositivos y/o sistemas que disminuyan y controlen el consumo actual en las diferentes edificaciones.

La eficiencia energética consiste en crear, exponer y madurar normas, técnicas y tecnología que promueva el desarrollo sostenible a nivel social, económico y ambiental, generando menores costos energéticos y mayor rentabilidad.

Actualmente en Colombia existe una entidad que promueve el conocimiento, racionalización, protección y perfeccionamiento de tecnologías y procesos que aumentan la eficiencia energética, este es el Consejo Colombiano de Eficiencia Energética (CCEE), quien bajo la ley 697 de 2001 promueve los proyectos URE (Uso Racional y Eficiente de la Energía) en los diferentes sectores del país.

Este proyecto, demanda un aporte social al contribuir con los planes y convenios, que Colombia a partir de esta y otras leyes a ratificado luego de su participación en eventos como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático de 1992 [12] y la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible en Johannesburgo en el 2002 [11], que promueven el desarrollo sostenible en el país, en lo que tiene que ver con temas actuales como el cambio climático, fuentes renovables y no renovables de energía, seguridad, rentabilidad, entre otros.

9. CALIDAD DE POTENCIA

En los sistemas eléctricos de potencia siempre se han presentado inconvenientes por causa del calentamiento y los daños presentados en algunos equipos, esto se debe a las cargas no lineales que generan armónicos en el sistema, es por esta razón que la estabilidad del mismo es garantizada por la calidad de potencia o de energía; pero primero que todo es importante definir lo que es la calidad de potencia.

La calidad de potencia es la precisión de los atributos eléctricos para el funcionamiento óptimo del sistema de potencia, un problema de calidad de energía es cualquier fenómeno eléctrico que interrumpe o altera el buen funcionamiento de un sistema y/o equipo eléctrico. La calidad óptima de un sistema es determinado por el alto costo de consumo (kWh) y por las operaciones adecuadas o inadecuadas del mismo.

La operación de un sistema es determinado por las cargas que en él se presenten, estas pueden ser lineales o no lineales, siendo estas últimas quienes provocan una distorsión armónica en la red eléctrica; estos armónicos son una perturbación que afecta la forma de onda, generalmente son de frecuencias bajas y producen sobretensiones que calientan y generan daños en equipos que funcionan dentro de la red tales como transformadores, banco de condensadores, equipos se computo, motores, líneas de distribución, entre otros; además de generar corrientes y pérdidas elevadas en el neutro de algunas instalaciones, disparos por sobre-corriente de algunas protecciones, disparos de relés diferenciales, entre otros. Y como consecuencia de todo esto disminuye la vida útil de los componentes; además del incremento en pérdida de energía, problemas en sistemas de producción y en la economía, incremento en los costos y menor confiabilidad.

Según lo establecido por la norma IEEE 519 de 1991 “Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia”, indica como fuentes emisoras de armónicos, tres (3) grupos:

- Dispositivos electrónicos de potencia.
- Dispositivos productores de arcos eléctricos.
- Dispositivos ferromagnéticos.

9.1 EQUIPOS EMISORES DE ARMÓNICOS

- Motores de corriente directa accionados por tiristores.
- Inversores de frecuencia.
- Fuentes UPS.

- Computadoras.
- Equipo electrónico.
- Hornos de arco.
- Hornos de inducción.
- Equipos de soldadura.
- Transformadores sobreexcitados.

Las corrientes generadas por los dispositivos anteriormente nombrados tienen un desfase en la señal que genera unas pérdidas por distorsión, y que por efecto Joule transforman estas pérdidas de potencia (Potencia reactiva, Q) en calor, disminuyendo el factor de potencia. Todo esto genera problemas en: transformadores, máquinas rotatorias, motores de inducción, cables y conductores, aparatos de medición y dispositivos de estado sólido, tales como:

9.1.1 Transformadores:

- Incremento en las pérdidas del cobre.
- Incremento en las pérdidas del hierro.
- Posible resonancia entre las bobinas del transformador y la capacitancia de la línea.
- Esfuerzos de aislamiento.

9.1.2 Máquinas rotatorias:

- Incremento en el calentamiento debido a las pérdidas en el hierro y en el cobre.
- Cambios en el par electromagnético (eficiencia).

9.1.3 Motores de inducción:

- Pérdidas I^2R en el rotor.
- Pérdidas de núcleo.
- Pérdidas adicionales.
- Torque en el motor de inducción.

9.1.4 Cables y conductores:

Al circular corriente a través de un conductor se produce calentamiento como resultado de las pérdidas por efecto Joule, I^2R, donde R es la resistencia a corriente directa del cable y la corriente está dada por el producto de la densidad de corriente por el área transversal del conductor. A medida que aumenta la frecuencia de la corriente que transporta el cable disminuye el área efectiva por donde esta circula, puesto que la densidad de corriente crece en la periferia exterior, lo cual se refleja como un aumento en la resistencia efectiva del conductor.

9.1.5 Dispositivos de estado sólido:

- Inducción de errores en equipos de medición.
- Disparo en falso de relés e interruptores.
- Operación inestable de circuitos de disparo que utilizan el cruce por cero.
- Interferencia sobre controladores de motores.

9.1.6 Aparatos de medición:

- Generación de un par electromagnético adicional en el disco causando operaciones erróneas,
- Problemas en sistemas de puesta a tierra, conmutación de capacitores remotos, transitorios o distorsión armónica producida por otros usuarios.

9.1.7 Otros inconvenientes dentro de una red eléctrica que presente distorsiones son:

- Presencia de vibraciones y ruidos acústicos en circuitos electromagnéticos.
- Perturbaciones en circuitos de control y de comunicaciones.
- Fatigas mecánicas en los materiales debido a las vibraciones y al calor.

Cuando el voltaje o la corriente de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la forma de onda senoidal, se dice que la señal esta distorsionada; los problemas causados por la distorsión armónica, ocurren usualmente cuando la carga no lineal representa más del 20% de la total y por la presencia de los bancos de condensadores se presentan condiciones de resonancia. Para impedir estos efectos los fabricantes establecen los límites de funcionamiento de sus equipos por debajo de sus valores de falla para tener una operación adecuada y una vida prolongada; sin embargo, cuando existen condiciones de resonancia, dichos límites pueden ser excedidos, acelerando su envejecimiento o provocando su falla.

9.2 FENÓMENOS ELECTROMAGNÉTICOS

Según la norma IEEE 1159 de 1995, “Práctica recomendada para el monitoreo de la calidad de potencia eléctrica”, que trata del correcto monitoreo e interpretación de datos de los fenómenos electromagnéticos que generan problemas en la calidad de potencia, existen tres (3) tipos de fenómenos electromagnéticos, estos son: Variaciones en el valor RMS de tensión y/o de corriente (de corta o larga duración), perturbaciones de carácter transitorio (impulsos u oscilaciones) y distorsión en la forma de onda. A continuación se presentan las características y tipos fenómenos electromagnéticos:

Categorías	Contenido Espectral Típico	Duración Típica	Magnitud de voltaje Típico
Trasientes			
Impulsivos			
Nanosegundos	5 ns rise	< 50 ns	
Microsegundos	1 µs rise	50 ns – 1ms	
Milisegundos	0.1 ms rise	> 1 ms	
Oscilatorio			
Baja frecuencia	< 5 k Hz	0.3-50 ms	0-4 pu
Media frecuencia	5-500 kHz	20 µs	0-8 pu
Alta frecuencia	0.5-5MHz	5 µs	0-4 pu
Variaciones de corta duración			
Instantáneo			
Sag		0.5-30 ciclos	0.1-0.9 pu
Swell		0.5-30 ciclos	1.1-1.8 pu
Momentánea			
Interrupción		0.5 ciclos -3s	<0.1 pu
Sag		30 ciclos – 3s	0.1 – 0.9 pu
Swell		30 ciclos – 3s	1.1 -1.4 pu
Temporal			
Interrupción		3 s – 1 min	<0.1 pu
Sag		3 s – 1 min	0.1-0.9 pu
Swell		3 s – 1 min	1.1- 1.2 pu
Variación por duración de longitud			
Interrupción sostenida		>1min	0.0 pu
Sub-tensión		>1min	0.8-0.9 pu
Sobre-tensión		>1min	1.1-1.2 pu
Desequilibrio de voltaje		Estado estable	0.5-2%
Distorsión de la forma de onda			
DC offset		Estado estable	0-0.1%
Harmónicos	0-100 H	Estado estable	0-20%
Inter-harmónicos	0-6kHz	Estado estable	0-2%
Notching		Estado estable	
Noise	Broad-band	Estado estable	0-1%
Fluctuaciones de voltaje	<25 Hz	Estado estable	0.1-7%

Variaciones de frecuencias		<10 s	

Tabla 1. Categorías y características típicas de fenómenos electromagnéticos en sistemas de potencia.

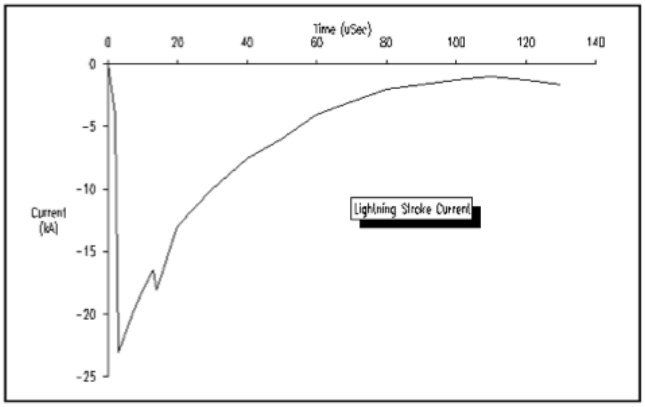
9.2.1 **Transitorios:**

Los transitorios son cambios que se generan en la condición de estado estable de la tensión y/o la corriente. Pueden ser ocasionados por cambios bruscos en el sistema de potencia o de control, tales como un rayo, una falla, por circuitos de conmutación (On/Off) o incluso por la conexión y desconexión de dispositivos de potencia (motores, transformadores, entre otros). Pero los transitorios pueden ser de dos tipos, impulsivos u ondulatorios.

9.2.1.1 Impulsivos:

Los transitorios impulsivos se presentan como un impulso unidireccional (positivo o negativo) por un cambio de frecuencia instantáneo diferente a la del sistema de potencia, se caracteriza principalmente por su rizado y tiempo de decadencia. La causa más común de un transitorio impulsivo es un rayo.

Figura 4.Transitorio Impulsivo de corriente en un sistema de potencia.



Fuente: IEEE Standard 1159-1995, “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality” Pág. 13.

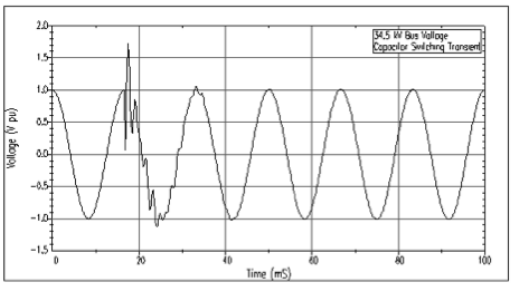
9.2.1.2 Oscilatorios:

Cuando se presentan transientes impulsivos, pueden excitar circuitos en resonancia del sistema de potencia, lo que genera oscilaciones en la señal de voltaje o corriente, con polaridad positiva o negativa. Los transitorios oscilatorios se caracterizan por su contenido espectral, duración y magnitud.

Por la frecuencia que se presenta en los transitorios oscilatorios (diferente a la fundamental del sistema de alimentación) se divide en alta, media o baja frecuencia:

- Los oscilatorios de alta frecuencia, presentan rangos mayores de 500kHz, con duración típica de varios microsegundos. Generalmente se presentan por eventos de switcheo en la red.
- Un trasiente con un rango de frecuencia primaria entre 5kHz y 500kHz, se conoce como trasiente de media frecuencia, con duración típica de décimas de microsegundo. Se presenta generalmente por la respuesta de un sistema que presentan transitorios impulsivos y switcheo.
- En los sistemas de subtransmisión, distribución e industriales es donde generalmente se presentan transitorios oscilatorios de baja frecuencia, con rangos menores de 5kHz, con duración típica entre 0.3 y 50mseg. Generalmente las transiciones oscilatorias de baja frecuencia ocurren por los efectos de ferroresonancia y energización de transformadores o bancos capacitores (presencia de armónicos de 2do y 3er orden).

Figura 5. Transitorio Oscilatorio de baja frecuencia.



Fuente: IEEE Standard 1159-1995, “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality” Pág. 15.

9.2.2 **Variaciones de corta duración:**

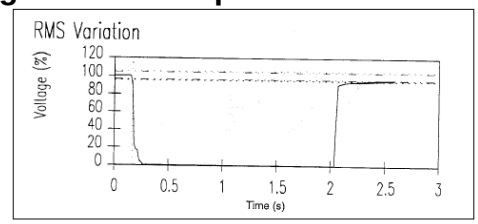
Las variaciones de voltaje de corta duración pueden ocurrir por fallas en el sistema de potencia como son la energización de grandes cargas que necesitan una corriente de arranque o de inicio alta o por conexiones realizadas incorrectamente en las líneas de energía que ocasionan intermitencia. Estas variaciones se pueden ser instantáneas, momentáneas o temporales de acuerdo a su tiempo de duración, tal como se presenta en la tabla 1 y se clasifican en:

9.2.2.1 Interrupciones:

Una interrupción es la pérdida total de voltaje en un periodo de tiempo, es decir, la pérdida de suministro de energía en una o más cargas. Las interrupciones pueden producirse por fallas en el sistema de potencia, equipos averiados o fallas en los sistemas de control.

Las principales características de las interrupciones es que su magnitud está por debajo del 10% del valor nominal, es decir, cuando la tensión o la corriente de carga disminuyen en 0.1 p.u. en un tiempo menor a un (1) minuto. La duración de esta variación depende de la causa de la falla y de la capacidad de reenganche del sistema de protección de los dispositivos, del tiempo de reenganche depende si es momentáneo o temporal.

Figura 6. Interrupción momentanea.



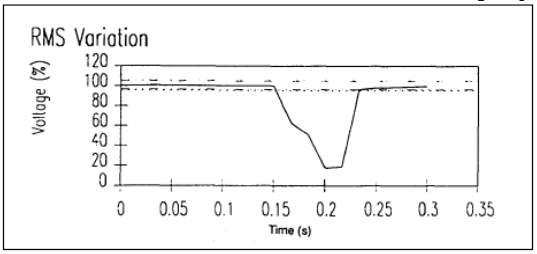
Fuente: IEEE Standard 1159-1995, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality" Pág. 16.

9.2.2.2 Sags o Dips:

Son depresiones conocidas como huecos o valles. Un sag está definido como la disminución en el valor rms de la señal de tensión o corriente en la frecuencia fundamental, bajando el valor rms entre 0.1 y 0.9 pu, con relación al valor nominal.

Normalmente los sags son causados por la demanda de consumo de energía inicial de muchos aparatos eléctricos (incluyendo motores, compresores, ascensores, maquinarias, entre otros), las caídas indican también que el sistema está manejando altos consumos de energía.
En un procedimiento conocido como bajones cíclicos, las centrales eléctricas disminuyen correctamente los niveles de voltaje en ciertas áreas durante horas o días en un momento dado.

Figura 7. Caída instantánea de voltaje (sag).



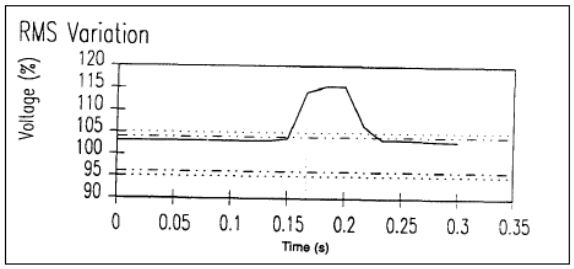
Fuente: IEEE Standard 1159-1995, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality" Pág. 17.

9.2.2.3 Swells:

Un swell (cresta) es definido como un aumento en el valor rms de la tensión o de la corriente, en la frecuencia fundamental, con duración de ½ ciclo a 1 minuto. Existen swells con magnitudes típicas entre 1.1 y 1.8 pu, con relación al valor nominal. Los swells se caracterizan por su magnitud o valor rms y duración.

Así como con los sags, los swells se asocian comúnmente con las condiciones de falla del sistema, pero estos no son tan comunes como los sags. Una forma de swell puede ocurrir como una subida de voltaje temporal durante una falla de una fase, es decir, durante una falla línea a tierra, esta variación de corta duración puede ser severa durante una condición de falla en función de la localización de la falla, la impedancia del sistema y la forma de conexión a tierra.

Figura 8. Cresta instantánea de voltaje (swell).



Fuente: IEEE Standard 1159-1995, “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality” Pág. 19.

9.2.3 **Variaciones de larga duración:**

A diferencia de los fenómenos anteriormente vistos, las variaciones de larga duración no ocurren por fallas en el sistema si no por la variación de cargas en el mismo y por la operación de sistemas de switcheo. Se clasifican en sobretensiones y subtensiones. Las características principales de estas alteraciones son el valor rms y su duración, la cual es superior a un (1) minuto.

Es de gran importancia tener en cuenta que existen unos rangos de tolerancia de voltaje en estado estable especificados por la norma ANSI C84.1 (tabla 2), si la magnitud de la tensión excede estos rangos por un tiempo mayor a un minuto, se considera una variación de larga duración. Sin embargo en Colombia según la Resolución CREG 024 de 2005, los límites están entre +10% y -10% del valor nominal.

Valor Nominal	Rango Deseable	Rango Aceptable
120	126-114	127-110
208	218-197	220-191
240	252-228	254-220

277	291-263	293-254
480	504-456	508-440
2.400	2.525-2.340	2.540-2.280
4.160	4.370-4.050	4.400-3.950
4.800	5.040-4.680	5.080-4.560
13.800	14.490-13.460	14.520-13.110
34.500	36.230-33.640	36.510-32.780

Tabla 2. Tolerancia para las tensiones de acuerdo a la norma ANSI.
Fuente del autor.

9.2.3.1 Sobretensión:

Es un incremento de la tensión de más del 110% de la señal sobre el valor nominal con una duración mayor a un minuto. Las sobretensiones son causadas por la desconexión de grandes cargas y por la conexión de elementos capacitivos (ej. Banco de capacitores). Para tener control de este fenómeno, es importante tener en cuenta contar con un sistema de regulación y de control adecuado, de acuerdo al tipo y al total de carga del sistema.

9.2.3.2 Subtensión:

Se presenta por la reducción del valor rms del voltaje, por debajo del 90% de la tensión nominal con una duración mayor a un minuto. Las bajas tensiones, al contrario de las sobretensiones, se producen por la conexión de grandes cargas y por la desconexión de bancos capacitores, además los circuitos sobrecargados pueden generar subtensiones en los terminales de carga.

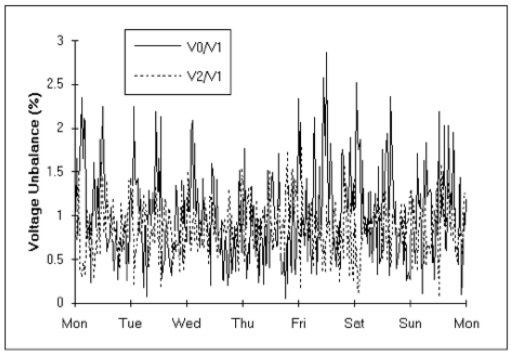
9.2.3.3 Interrupción sostenida:

Es la interrupción del servicio de energía por un periodo mayor a un minuto, y requiere de la intervención del hombre para restablecer el sistema.

9.2.4 **Desequilibrio de voltaje:**

El desbalance en el sistema de potencia trifásico se presenta cuando la carga en las tres líneas no es igual. Por tanto el valor rms de voltaje o corriente de una línea o el ángulo entre dos fases (120 grados), es diferente a las demás en un rango significativo. Según la norma IEEE 1159 de 1995, el desbalance de voltaje no debe ser mayor del 2%.

Figura 9. Cresta instantánea de voltaje (swell).



Fuente: IEEE Standard 1159-1995, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality" Pág. 20.

9.2.5 **Distorsión en la forma de onda:**

Este fenómeno ocurre cuando se presenta un cambio en la forma de onda de la señal de potencia que no es deseado, es decir, la señal de voltaje o corriente tiene originalmente una forma sinusoidal con una frecuencia fundamental, al introducir cargas no lineales en el sistema también se introducen componentes armónicas que distorsionan la forma de onda.

Existen cinco formas de distorsión que son: corriente DC, armónicos, interarmónicos, hendiduras y el ruido.

9.2.5.1 DC Offset:

La presencia de voltajes o corrientes DC en un sistema AC se denomina DC Offset. Este fenómeno puede ocurrir por efectos de rectificación de media onda o por perturbación magnética. Puede generar saturación en transformadores, aislamiento adicional y otros efectos desfavorables.

9.2.5.2 Armónicos:

Los armónicos son señales, de tensión o de corriente, con forma sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplo de la frecuencia fundamental (60Hz), las señales armónicas se suman con la fundamental y origina a forma de onda distorsionada.

Cuando el voltaje o la corriente de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la forma de onda senoidal, se dice que la señal está distorsionada, esto ocurre por la presencia de señales sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental que se suman a la fundamental.

Los problemas causados por la distorsión armónica, ocurren usualmente cuando la carga no lineal representa más del 20% de la total y por la presencia de bancos de capacitores se presentan condiciones de resonancia. Para impedir estos efectos los fabricantes establecen los límites de funcionamiento de sus equipos por debajo de sus valores de falla para tener una operación adecuada y una vida prolongada; sin embargo, cuando existen condiciones de resonancia, dichos límites pueden ser excedidos, acelerando su envejecimiento o provocando su falla. La magnitud de los costos originados por la operación de sistemas y equipos eléctricos con tensiones y corrientes distorsionadas, puede percibirse considerando lo siguiente:

- La sobre elevación de 10 ºC en la temperatura del aislamiento en conductores, reduce su vida a la mitad.
- Un incremento del 10% en la tensión nominal del dieléctrico de un capacitor, reduce su vida a la mitad.

Estudios realizados sobre los efectos de la distorsión armónica, muestran reducciones de 20% a 30% en la vida de capacitores y de 10% a 20% en la vida de transformadores. La distorsión armónica de corrientes y voltajes es medida usando analizadores de espectros indicando la amplitud de cada componente.

Es importante tener siempre la idea de contar con normas que limiten los contenidos armónicos en los sistemas eléctricos con el fin de controlar la distorsión de corriente y de tensión de un sistema eléctrico a niveles para que los componentes asociados puedan operar satisfactoriamente sin ser dañados y asegurar a los usuarios que puedan disponer de una fuente de alimentación de calidad aceptable.

Otras recomendaciones tienen que ver con:

- Prevenir que el sistema eléctrico interfiera en la operación de otros sistemas (Protección, Medición, Comunicación y/o Computación).
- Limitar el nivel de distorsión que un cliente puede introducir a la red.

La distorsión armónica de voltaje es el resultado de la interacción armónica de corriente con la impedancia del sistema. Los niveles de distorsión de armónicos pueden caracterizarse por un completo espectro con magnitudes y ángulos de fase de cada componente armónico individual. También es común usar una cantidad simple como la llamada THD o distorsión total de armónicos, como una medida de la distorsión de los armónicos. Para corrientes, los valores de distorsión pueden referirse a una base constante como es la componente fundamental. Esto provee una referencia constante mientras la fundamental puede variar sobre un amplio rango.

9.2.5.2.1 Distorsión de demanda total (TDD):

Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante que fluye es también baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el TDD que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma IEEE 519.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} * 100\%$$

Ecuación 8. Distorsión de demanda total (TDD).

Donde:
Ih = Magnitud de la armónica individual
h = orden armónico
IL = demanda máxima de la corriente fundamental de carga, que se calcula como el promedio máximo mensual de demanda de corriente de los 12 últimos meses o puede estimarse.

9.2.5.3 Interarmónicos

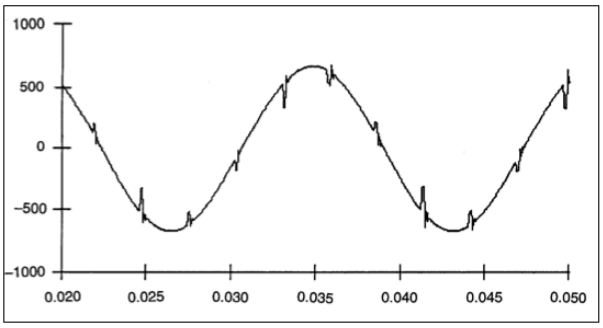
Los interarmónicos son señales, de tensión o de corriente, con forma sinusoidales cuyas frecuencias no son múltiplo de la frecuencia fundamental.

Las principales fuentes de interarmónicos son convertidores estáticos de frecuencia, ciclo convertidores, motores asíncronos y dispositivos de arco. Puede generar calentamiento y flickers.

9.2.5.4 Notching:

Conocido también como muesca de tensión. Son perturbaciones periódicas que se presentan en la onda de tensión, tienen componentes de frecuencia de altos valores, lo que hace que no sean facilites de detectar para los dispositivos de análisis de potencia. Son causadas por el funcionamiento de los dispositivos de electrónica de potencia conmutan la corriente de una fase a otra. Afecta dispositivos como CPU's, impresoras láser y otros dispositivos electrónicos.

Figura 10. Notching.



Fuente: IEEE Standard 1159-1995, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality" Pág. 23.

9.2.5.5 Ruido:

Señal eléctrica indeseable con componente espectral menor a 200kHz que se superpone en la señal de tensión o de corriente. Puede ser generado por dispositivos de electrónica de potencia, circuitos de control, equipos de arco, cargas con rectificadores de estado sólido y fuentes conmutadas. Las características de este fenómeno son su frecuencia y magnitud, las cuales dependen de la fuente que produce el ruido; los valores típicos de ruido son del 1% de la magnitud del voltaje. Estos ruidos pueden ser corregidos con el uso de filtros, transformadores de aislamiento y acondicionadores de línea.

9.2.6 **Fluctuaciones:**

Son variaciones sistemáticas o cambios aleatorios de la tensión, pero sus magnitudes nunca exceden los valores especificados en la norma ANSI C84.1 (tabla 2). Cuando estas fluctuaciones se presentan de forma rápida y continua, y visible para el ojo humano se denominan flickers o parpadeos de luz.

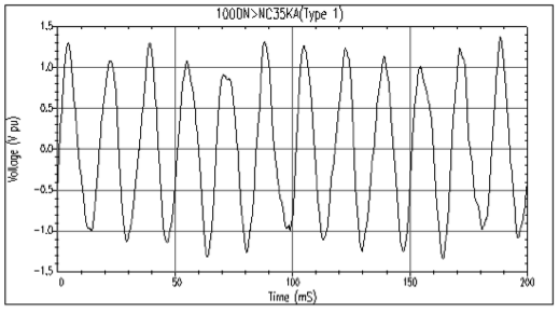
Las fuentes más comunes de origen de flickers son los equipos que producen variaciones temporales en las condiciones de carga, como por ejemplo los hornos microondas, y las impresoras láser. A nivel industrial las variaciones o fluctuaciones de voltaje son causadas por el cambio de las características de las cargas, los hornos de arco, los arranques de motores, las herramientas de corte y las soldadoras de arco son algunas fuentes típicas de fluctuaciones de voltaje.

El control de estas fuentes puede ser realmente difícil. Por ejemplo los hornos, de arco están continuamente variando a los valores de compensación requerida, por lo que necesita una rápida respuesta, esta continua variación puede complicar la compensación en especial cuando se utilizan sistemas estáticos de compensación. Otros elementos de control basados en la tecnología electrónica

que compensen en tiempo real son altamente costosos y están aún bajo desarrollo.

Las fluctuaciones de tensión son una modulación de la frecuencia fundamental, se caracterizan por su magnitud y se expresan en términos de porcentaje de la tensión nominal.

Figura 11. Fluctuación de voltaje.



Fuente: IEEE Standard 1159-1995, “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality” Pág. 24.

9.3 NORMATIVIDAD

Las normas de la calidad de potencia (Power Quality) proveen las guías, recomendaciones y límites para ayudar a asegurar una compatibilidad entre los usuarios finales de los equipos y los sistemas donde están siendo aplicados. Para ello la IEC ha establecido la Norma IEC 61000-X y le ha dado el nombre Electromagnetic Compatibility Standars adoptada en gran parte del mundo; esta varía muy poco con las adoptadas en los Estados Unidos como la IEEE 519 (IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power Systems) y la IEEE 1159 (Monitoring and Definition of Electric Power Quality). Además para el análisis de calidad de potencia que se presenta en el capítulo 12, se utilizan normas como IEEE 1100 (Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment), NTC 2050 (Norma Técnica Colombiana) y el RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas).

9.3.1 **IEEE 519 de 1992**

Práctica recomendada y requerimientos para el control de armónicos en sistemas de energía eléctrica.

Esta práctica recomendada trata de los puntos a tener en cuenta para el diseño de un sistema de potencia que cuenta con cargas no lineales, que generan distorsión en la forma de onda original de corriente, y por ende de tensión.

Para asegurar la integridad en el sistema de potencia global, es preciso establecer límites sobre los niveles de distorsión permisibles que apliquen tanto a los usuarios como a los suministradores de la energía.

Resulta especialmente delicada la relación usuario / compañía suministradora, ya que esta última tiene derecho a pedir al usuario que limite la contaminación al sistema de transmisión y distribución y el usuario tiene el derecho a pedir el suministro de una energía con la menor contaminación posible.

- *Suministrador:* Es su responsabilidad que en la acometida, la distorsión armónica total en voltaje THDv se encuentre dentro de los límites establecidos, por lo que debe asegurarse que condiciones de resonancia en el sistema de generación, transmisión o distribución no ocasionen niveles inaceptables de distorsión en voltaje, aun si los usuarios se encuentran dentro de los límites de generación armónica en corriente.

- *Usuarios:* Deben de asegurar que en la acometida, la generación de armónicas en corriente se ubique dentro de los límites establecidos, tanto para componentes armónicas individuales como para la distorsión de demanda total TDD, especificándose dichos límites como porcentaje de la demanda promedio de corriente del usuario en lugar de la corriente fundamental instantánea, con el fin de proporcionar una base común de evaluación a lo largo del tiempo.

9.3.2 **IEEE 1159 de 1995**

Práctica recomendada para el monitoreo de calidad de potencia eléctrica.

Esta práctica está dirigida a los usuarios, con el fin de otorgar conocimientos y herramientas para el correcto monitoreo e interpretación de datos en un sistema eléctrico.

Para el preciso análisis de calidad de energía, es necesario conocer los diferentes fenómenos que generan problemas de calidad y como se manifiestan estos en la forma de onda de la señal; es por esta razón que el estándar IEEE 1159 de 1995, establece una descripción detallada de los fenómenos electromagnéticos de larga y corta duración, de las transientes, ruido, desbalance y distorsión de la señal (ver Cap. 7).

En cuanto al tema de monitoreo, esta norma desarrolla los diferentes elementos a tener en cuenta para la medición, adquisición e interpretación de datos de la red, teniendo en cuenta las características técnicas de los equipos y los conocimientos en fenómenos electromagnéticos.

9.3.3 **IEEE 1100 de 1999**

Práctica recomendada para la alimentación y puesta a tierra de equipos electrónicos.

El propósito de esta práctica es dar recomendaciones para el diseño, la instalación y el mantenimiento de sistemas eléctricos y de conexiones a tierra, en equipos electrónicos usados para aplicaciones comerciales e industriales.

Actualmente existen diferentes factores que pueden alterar el rendimiento de los equipos electrónicos, como son los fenómenos electromagnéticos que modifican la forma de onda, cableado inadecuado y prácticas de puesta a tierra. Algunas entidades han elaborado normas que buscan mejorar los inconvenientes que se presentan en la red eléctrica en sectores industriales y comerciales (debido a su alta demanda), pero en varias ocasiones estas normas no han estado en total acuerdo; es por esta razón que el estándar IEEE 1100, presenta recomendaciones para el cuidado y buen trabajo de los equipos, y generando mayor calidad y seguridad en la instalación eléctrica, dando un consenso con los mejores fundamentos en lo que se refiere a alimentación y conexión a tierra de los sistemas eléctricos.

9.3.4 **RETIE**

El interés principal del Ministerio de Minas y Energía al elaborar este reglamento técnico, es bajo el Articulo No. 2 de la Constitución Política de Colombia de 1991, donde se establece que a las autoridades de Colombia deben proteger la vida, la honra y los bienes de las personas residentes en el país; esto incluye la seguridad por el uso de energía eléctrica.

El Reglamento Técnico para Instalaciones Eléctricas, tiene como objeto “establecer medidas que garanticen la seguridad de las personas, de la vida animal y vegetal y la preservación del medio ambiente; previniendo, minimizando o eliminando los riesgos de origen eléctrico”; además de promover el uso racional y eficiente de energía garantizando el abastecimiento eléctrico para el país, y cuidando del medio ambiente.

Este reglamento debe ser cumplido a cabalidad por las instalaciones eléctricas en Colombia. El RETIE ha sido estudiado con el fin de elaborar las listas de chequeo para la revisión en los tableros de las subestaciones de la Sede Central de la Universidad Santo Tomás (ANEXO 1).

9.3.5 **NTC 2050**

El Código Eléctrico Colombiano provee disposiciones necesarias para la seguridad y adecuado funcionamiento de las instalaciones eléctricas, ya que su objetivo

principal es “la salvaguardia de las personas y de los bienes contra los riesgos que pueden surgir por el uso de la electricidad”[2]; sin embargo no garantiza el funcionamiento eficiente ni su funcionamiento para ampliaciones futuras.

El trabajo realizado con la norma NTC 2050, al igual que el RETIE, en este proyecto, consiste en su revisión con el fin de elaborar las listas de chequeo, con los principales ítems de interés, pero priorizando lo especificado por el RETIE; de esta manera se observa la seguridad y el adecuado funcionamiento de las instalaciones, a través del cumplimiento de la normatividad colombiana.

[2] Código Eléctrico Colombiano (NTC 2050). ICONTEC. Colombia, 1998.Pág. 49.

10. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Para realizar el análisis del sistema eléctrico del edificio de la sede central de la Universidad Santo Tomás, se emplea el analizador de calidad de potencia trifásica POWER PAD 3945-B, de Fluke, es un dispositivo fácil de usar, compacto y resistente a golpes. Está dirigido a técnicos e ingenieros para medir y realizar trabajo de diagnóstico y calidad de potencia en redes de bajo voltaje mono y trifásico. Los usuarios pueden adquirir formas de onda instantáneas de las principales características de una red eléctrica y también monitorear sus variaciones en el tiempo. Maneja simultáneamente todas las funciones de medición y presentación de formas de onda de las diferentes magnitudes, su detección, su registro continuo y su presentación sin limitaciones [7].

10.1 Características:

- Mediciones de Voltajes RMS hasta 480V (fase-a-neutro) o 830 V (fase-a-fase) para sistemas de dos, tres o cuatro hilos, de corrientes RMS hasta 6500Arms y de frecuencia (sistemas de 41 a 70 Hz), de la potencia activa, reactiva y aparente por fase y su respectiva suma total y del factor de potencia activa, reactiva y aparente por fase y su respectiva suma total.
- Calculo de: corriente neutral en configuraciones y, factores de Cresta de corriente y voltajes, factor K en transformadores, parpadeos (flickers) de voltaje de corta duración, desbalance de fases en voltaje y corriente (sistemas de 3 fases solamente).
- Medición de ángulos y razones de armónicos (referidos a la fundamental o el valor RMS) de voltaje, corriente o potencia, hasta el 50 armónico.
- Cálculo de factores de distorsión armónica total.
- Monitoreo del valor promedio de cualquier parámetro, calculo en un periodo desde 1 seg. Hasta 2 horas.
- Registro, marcación en el tiempo y caracterización de perturbaciones (alzas, caídas e interrupciones, superación de umbrales de potencia y de armónicos).
- Detección de transientes y registro de las formas de ondas asociadas.

10.2 Especificaciones.

- Dimensiones: 240 x 180 x 55 mm
- Peso: 2.1kg.
- Memoria de 4MB.
- Frecuencia de Muestreo (256 muestras/ciclo):
    - 12.8 kHz samples/sec Ch 50H y 15.36kHz samples/sec Ch 60Hz

- Voltajes de entrada:
    - Fase-Fase 960Vrms AC/DC
    - Fase-Neutro 480Vrms AC/DC

- Rango de frecuencia de 41 Hz a 69 Hz.
- Potencia AC de 88 a 276 V (20%).
- Batería: De 8 a 35 horas.

Figura 12. Analizador de calidad de potencia. Power Pad 3945-B, Controles del equipo.
Fuente: Manual Power Pad 3945-B

10.3 Software DataView.

Al instalar este software en un ordenador que utiliza sistema operativo Windows, se puede realizar desde este la configuración del Power Pad, la obtención de datos en tiempo real y lo que se ha grabado, además de crear una completa base de datos con los parámetros eléctricos (en una hoja de cálculo en Excel), permite obtener imágenes de instantes de tiempo específicos e imprimir.

Figura 13. Software DataView del dispositivo PowerPad.
Fuente: Página web: http://www.microdaq.com/aemc/software/dataview.php

11. ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS SUBESTACIONES DE LA UNIVERSIDAD, CON EL ANALIZADOR DE CALIDAD DE ENERGÍA POWER PAD AMC 3945-B

A continuación se presenta el análisis de los datos obtenidos en las dos subestaciones de la Universidad Santo Tomas en la sede central en Bogotá (Carrera 9 No. 51-11), acorde con las normas establecidas para cada caso a nivel nacional y mundial.

Los datos medidos quedan guardados en la memoria del dispositivo, estos son transmitidos por comunicación serial al computador, donde se pueden adquirir las medidas de potencia, THD, FP, corrientes, tensiones, etc. Además se obtienen todos los datos en una hoja de cálculo.

11.1 Subestación 1 (Edificio Gregorio XIII):

En la figura 14 se observa el lugar, la forma y características de la subestación que se encuentra ubicada en el primer piso del edificio Gregorio XIII, en donde se hicieron las primeras medidas de calidad de energía.

Esta subestación cuenta con un totalizador y los breakers con conexión al Edificio de Arcos y Gregorio XIII. Sin embargo como se observa en la siguiente figura no cumple la normatividad frente a la facilidad de acceso y limpieza de la subestación.

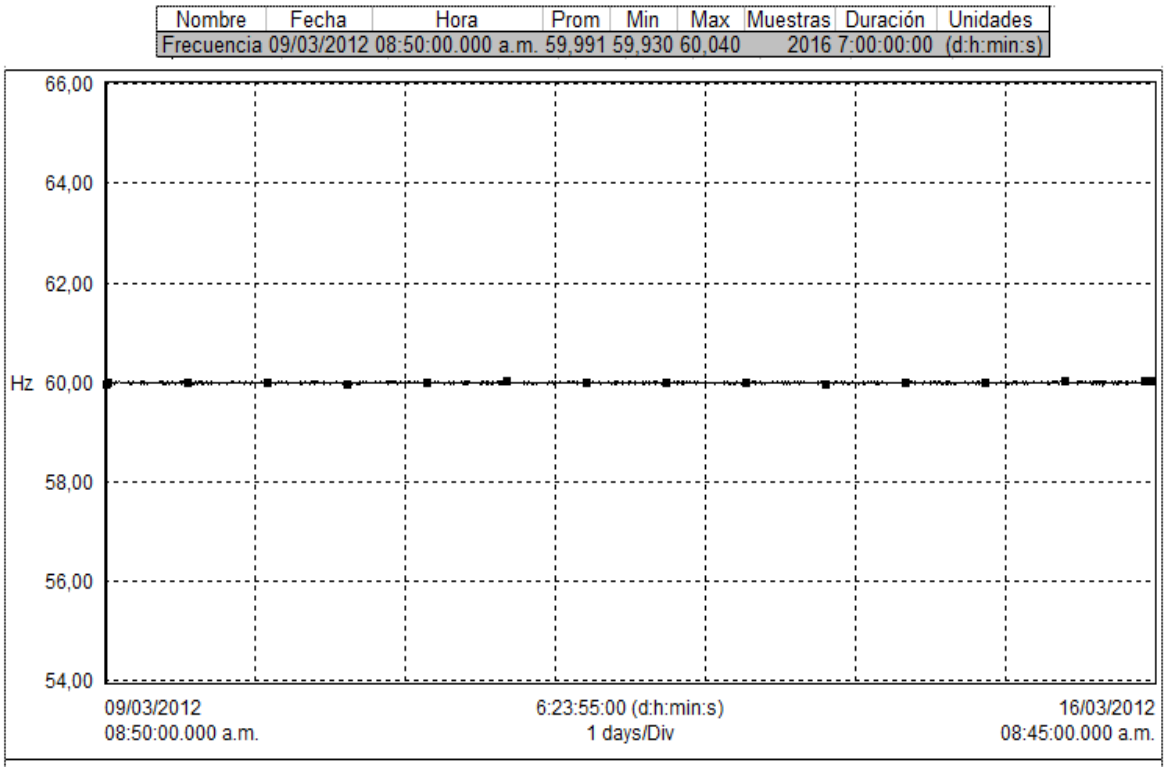
Figura 14. Imágenes de la primera subestación, edificio Gregorio XIII.
Fuente del autor.

Las medidas tomadas y el análisis de estas se hicieron con respecto a la norma NTC 1340 (tercera actualización), en las cuales incluyen las regulaciones

CREG 025/95 y la CREG 082/2002, donde se estipula que las medidas tienen que ser de una semana y los niveles de frecuencia y tensión deben tener; con respecto a esto se realizará el análisis de los resultados obtenidos por el POWERPAD 3945-B y se aplicarán las normas necesarias a cada medida

El estándar IEEE 519, se debe usar como orientación en el diseño de sistemas de potencia con cargas no lineales, los límites son para operación de estado estable y se recomienda para condiciones del “peor caso”, además con respecto a las medidas tomadas se establecerá si esta subestación está cumpliendo con este estándar internacional.

Con la recomendación IEEE 1459, se aplicará a las medidas tomadas y se analizarán los resultados obtenidos.



Gráfica 1. Frecuencia.

Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

El valor medio de la frecuencia según la Gráfica 1 es de 59.991 Hz, aproximadamente 60 Hz, esto demuestra que está cumpliendo con la norma NTC 1340; ahora hallando el percentil 0.95 y 1 de todas las medidas, se observará si cumple con la normatividad que indica la frecuencia aceptable durante el 95% y el 100% de una semana. Para la obtención de estos datos lo

que se hace es en una hoja de cálculo hacer la formula de percentil y este entrega el siguiente dato:

=PERCENTIL (C10:C2025; 0,95)= 60,01 Hz
=PERCENTIL (C10:C2025; 1)= 60,04 Hz

Según la tabla 3 de la norma NTC 1340 se observa que la frecuencia de la subestación 1 está dentro los rangos establecidos por la norma

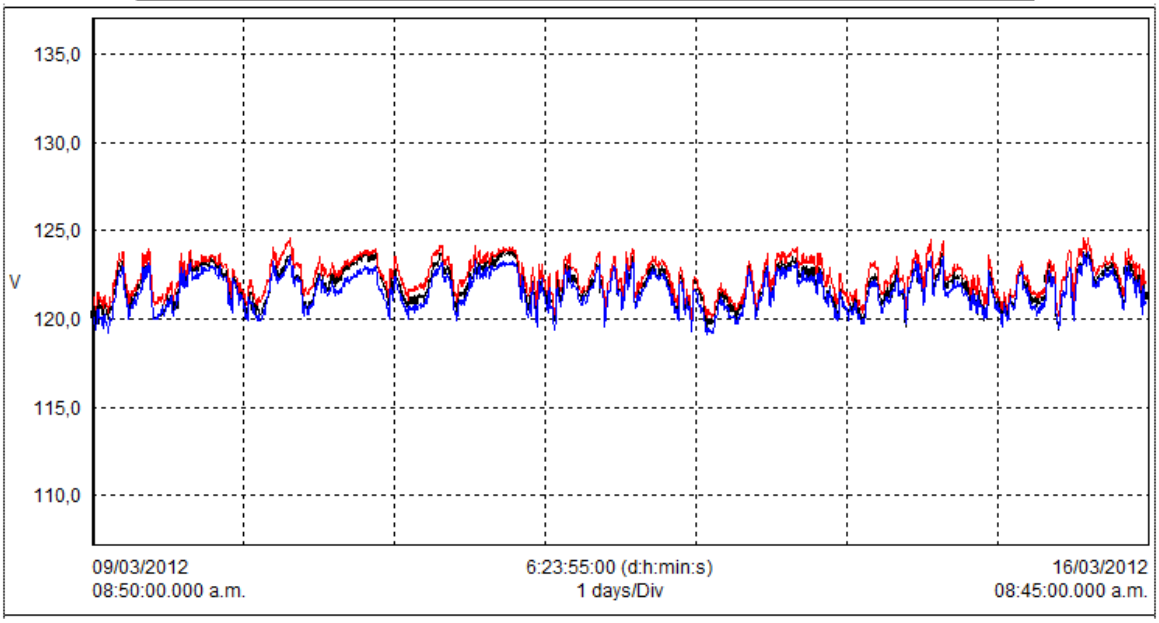
.

Tipo de red	Frecuencia aceptable durante el 95 % de una semana	Frecuencia aceptable durante el 100 % de una semana
Redes acopladas por enlaces síncronos a un sistema interconectado	Desde 59,8 Hz hasta 60,2 Hz	Desde 57,5 Hz hasta 63 Hz
Redes sin conexión síncrona a un sistema interconectado (redes de distribución en regiones no interconectada e islas)	Desde 58,8 Hz hasta 61,2 Hz	Desde 51 Hz hasta 69 Hz

Tabla 3. Frecuencia aceptable NTC 1340

Fuente: Norma Técnica Colombiana. Electrotecnia (NTC 1340). ICONTEC. Colombia, 2007. Pág. 2.

Nombre	Fecha	Hora	RMS	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
V1 RMS	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	121,936	119,400	123,900	V	7:00:00:00	(d:h:min:s)
V2 RMS	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	122,465	120,000	124,600	V	7:00:00:00	(d:h:min:s)
V3 RMS	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	121,609	119,100	123,800	V	7:00:00:00	(d:h:min:s)



Gráfica 2. Voltajes RMS.

Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

Según la Norma NTC 1340 (tercera actualización) expresa que el 100% de los valores registrados en la semana deberán estar dentro el intervalo definido en la tabla 4.

Clasificación	Nivel	Tensión Nominal (V)		Tensión máxima (% de la nominal)	Tensión mínima (% de la nominal)
		Sistemas Trifásico de 3 ó 4 conductores	Sistemas Monofásico de 3 ó 4 conductores		
Baja Tensión Vn < 1 kV	Nivel 1 Vn < 1kV	-	120	+5	-10
		120/208	-		
		-	120/240		
		127/220	-		
		220	-		
		277/480	-		
		480	-		
Media Tensión 1 kV ≤ Vn < 57,5 kV	Nivel 2 1 kV ≤ Vn < 30 kV	4 160	-		
		-	7 620		
		11 400	-		
		13 200	-		
		13 800	-		
	Nivel 3 30 kV ≤ Vn < 57,5 kV	34 500			
		44 000			
Alta Tensión 57,5 kV ≤ Vn ≤ 230 kV	Nivel 4 57,5 kV ≤ Vn < 220 kV	57 500	-		
		66 000	-	+5	-5
		115 000	-		
	-	230 000	-		
Extra Alta Tensión 230 kV < Vn		500 000	-		

Tabla 4. Clasificación, denominación y valores de tensión nominal.
Fuente: Norma Técnica Colombiana. Electrotecnia (NTC 1340). ICONTEC. Colombia, 2007. Pág. 3.

En la Gráfica 2 se puede ver que los valores máximos y mínimos de VRMS, con el siguiente proceso se obtendrán los porcentajes y se comparará con la tabla si cumple la norma.

$$x1 = \frac{Vmax}{120} = \frac{123{,}9}{120} = 1{,}0325;\ \boldsymbol{+3,25\%\ V1\ RMS}$$

Ecuación 9. Porcentajes máximos de voltajes

$$x2 = \frac{124{,}6}{120} = 1{,}03833;\ \boldsymbol{+3,83\%\ V2\ RMS}$$

$$x3 = \frac{123{,}8}{120} = 1{,}03167;\ \boldsymbol{+3,16\%\ V3\ RMS}$$

$$y1 = \frac{Vmin}{120} = \frac{119{,}4}{120} = 0{,}995;\ \boldsymbol{-0,5\%\ V1\ RMS}$$

Ecuación 10. Porcentajes mínimos de voltajes

$$y2 = \frac{120}{120} = 1;\ \mathbf{0\%}\ \boldsymbol{V2\ RMS}$$

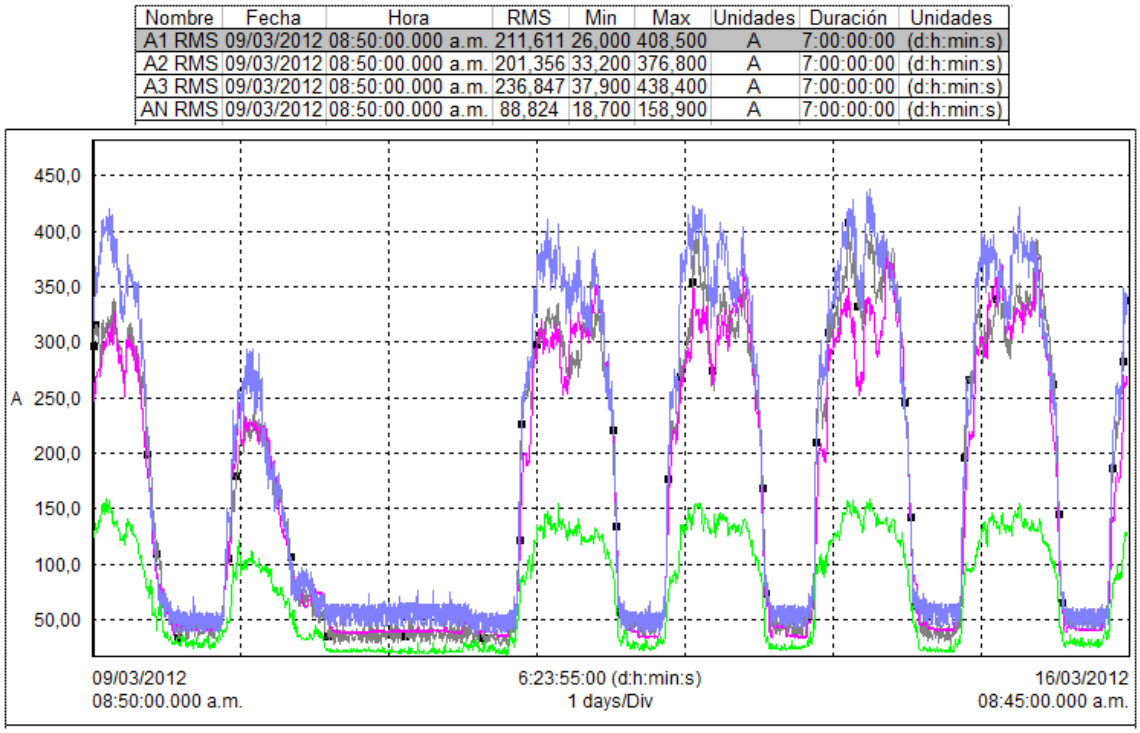
$$y3 = \frac{119{,}1}{120} = 0{,}9925;\ \mathbf{-0{,}75\%}\ \boldsymbol{V2\ RMS}$$

VRMS	MAXIMO	MINIMO
V1	3.25%	-0.5%
V2	3.83%	0%
V3	3.16%	-0.75%

Tabla 5. Tabla de rangos máximos y mínimos de VRMS

Fuente del autor.

Si se compara la Tabla 4 con la Tabla 5, se observa que la tensión nominal de la subestación 1 está dentro de los intervalos establecidos en la norma NTC 1340.



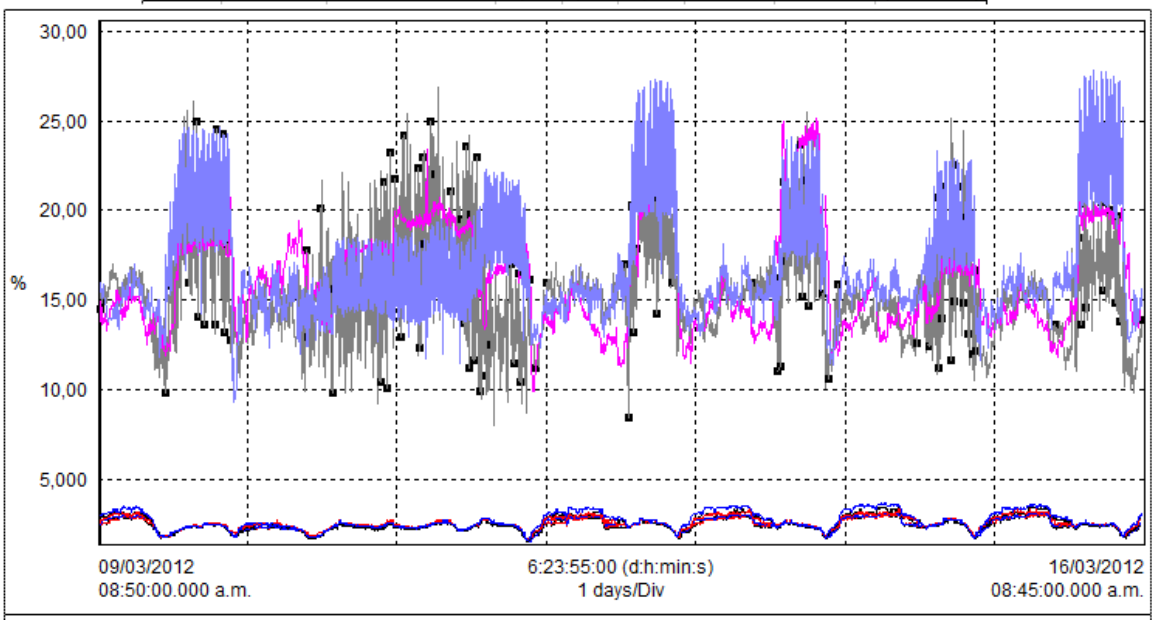
Gráfica 3. Corrientes.

Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

En la Gráfica 3, que corresponde a la corriente consumida dentro de una semana, se observa como en el transcurso del fin de semana y las noches (de

10:00 PM a 6:00 AM) no se tiene un alto consumo, un mínimo de aproximadamente 18.7 amperios.

Nombre	Fecha	Hora	Prom	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
A1 THD	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	15,408	8,000	26,900	%	7:00:00:00	(d:h:min:s)
A2 THD	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	16,183	9,900	25,100	%	7:00:00:00	(d:h:min:s)
A3 THD	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	16,647	9,300	27,800	%	7:00:00:00	(d:h:min:s)
U1 THD	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	2,446	1,600	3,100	%	7:00:00:00	(d:h:min:s)
U2 THD	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	2,494	1,600	3,100	%	7:00:00:00	(d:h:min:s)
U3 THD	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	2,490	1,500	3,200	%	7:00:00:00	(d:h:min:s)
V1 THD	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	2,555	1,500	3,400	%	7:00:00:00	(d:h:min:s)
V2 THD	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	2,592	1,600	3,300	%	7:00:00:00	(d:h:min:s)
V3 THD	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	2,692	1,600	3,700	%	7:00:00:00	(d:h:min:s)



Gráfica 4. Distorsión armónica total (THD).

Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

El dato de la distorsión armónica total da a conocer como está interfiriendo las cargas no lineales en el sistema, este dato es muy importante. Según el estándar IEEE 519 muestra que intervalos de distorsión armónica total debe tener un sistema que no presenta inconvenientes.

El capítulo 11.1 del estándar IEEE 519 indica el límite máximo que debe tener el THD en tensión (5%), de acuerdo a lo que se observa en la Gráfica 4, los THD de tensión no sobrepasan del valor indicado anteriormente, entonces la red está cumpliendo el estándar internacional.

Para los THD de corrientes se tiene que hallar la demanda total de distorsión, para ello se usa la siguiente ecuación:

$$TDD = \frac{I_1 * THD}{I_L}$$

Ecuación 11. Distorsión de demanda total.

La corriente de carga (IL) se toma el percentil del 95% de la tabla de datos que genera el POWERPAD como se muestra a continuación:

=PERCENTIL (AC10:AC2025; 0,95)=355,7 A= IL1

$$I_{1a1} = I_{L1} - (I_{L1} * THD_1) = 355{,}7 - (355{,}7 * 0{,}15408) = 300{,}89$$

Se aplica la ecuación 6.

$$\boldsymbol{TDD_1 = \frac{I_{1a1} * THD_1}{I_L} = \frac{300,89 * 0,15408}{355,7} = 0.13034 = 13,03\%}$$

La corriente de carga (IL2) se toma el percentil del 95% de la tabla de datos que genera el POWERPAD como se muestra a continuación:

=PERCENTIL (AD10:AD2025; 0, 95) =335.15 A= IL2

$$I_{1a2} = I_{L2} - (I_{L2} * THD_2) = 335{,}15 - (335{,}15 * 0{,}16183) = 280{,}91$$

Se aplica la ecuación 6.

$$\boldsymbol{TDD_2 = \frac{I_{1a2} * THD_2}{I_{L2}} = \frac{280,91 * 0.16183}{335,15} = 0.1356 = 13,56\%}$$

La corriente de carga (IL3) se toma el percentil del 95% de la tabla de datos que genera el POWERPAD como se muestra a continuación:

=PERCENTIL (AE10:AE2025; 0, 95) =397, 1 A= IL3

$$I_{1a3} = I_{L3} - (I_{L3} * THD_3) = 397{,}1 - (397{,}1 * 0{,}16647) = 330{,}99$$

Se aplica la ecuación 6.

$$\boldsymbol{TDD_3 = \frac{I_{1a3} * THD_3}{I_{L3}} = \frac{330,99 * 0,16647}{397,1} = 0,13876 = 13,87\%}$$

Corrientes	TDD
A1	$13,03\%$
A2	$13,56\%$
A3	$13,87\%$

Tabla 6. TDD de corrientes.

Fuente del autor.

Con respecto a la tabla 10.3 (figura 13) del estándar IEEE 519 y la tabla 6, se puede ver que los resultados de TDD obtenidos en las ecuaciones anteriores. Los valores están dentro del rango permitido del estándar, corroborando de nuevo que el sistema está funcionando en un estado estable.

Figura 15. Limites de distorsión de corriente para sistemas de distribución General

Table 10.3
Current Distortion Limits for General Distribution Systems
(120 V Through 69 000 V)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \le h < 17$	$17 \le h < 23$	$23 \le h < 35$	$35 \le h$	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

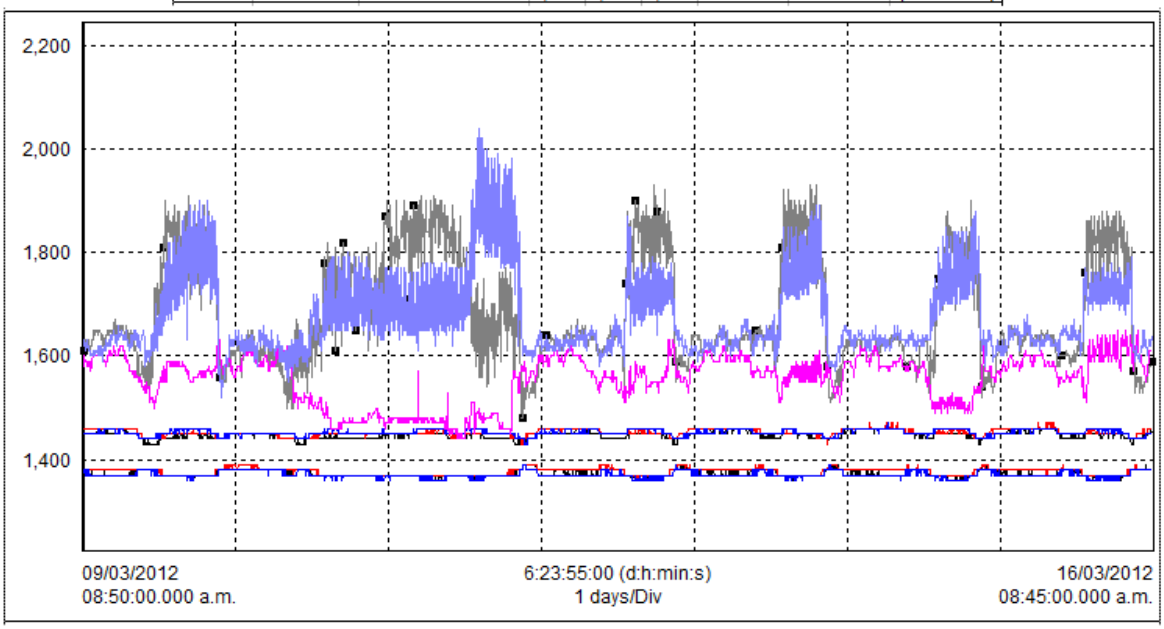
*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L.

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Fuente: IEEE Recommended Practice and Requirements of Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std.519-1992). Institute of Electrical and Electronics Engineers. ISBN 1-55937-239-7. Estados Unidos, 1993. Tabla 10.3. Pág. 78.

Nombre	Fecha	Hora	Prom	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
A1 CF	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	1,682	1,480	1,930		7:00:00:00	(d:h:min:s)
A2 CF	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	1,555	1,440	1,650		7:00:00:00	(d:h:min:s)
A3 CF	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	1,675	1,520	2,040		7:00:00:00	(d:h:min:s)
U1 CF	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	1,447	1,430	1,460		7:00:00:00	(d:h:min:s)
U2 CF	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	1,452	1,430	1,470		7:00:00:00	(d:h:min:s)
U3 CF	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	1,452	1,430	1,470		7:00:00:00	(d:h:min:s)
V1 CF	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	1,374	1,360	1,390		7:00:00:00	(d:h:min:s)
V2 CF	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	1,377	1,360	1,390		7:00:00:00	(d:h:min:s)
V3 CF	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	1,371	1,360	1,390		7:00:00:00	(d:h:min:s)



Gráfica 5. Factor de cresta.

Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

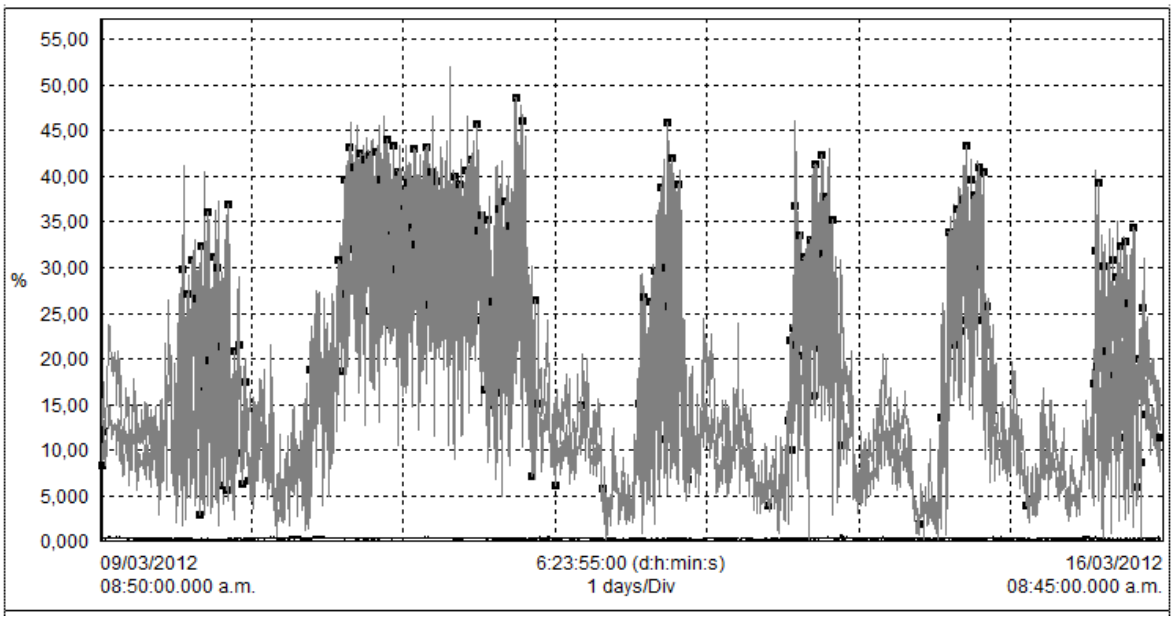
En una perfecta onda sinusoidal, el valor RMS es igual a 0.707 si su amplitud es de uno, como el factor de cresta es igual a la amplitud pico de la onda dividido por el valor RMS, entonces el factor de cresta seria igual a 1.41

$$CF = \frac{Vp}{VRMS} = \frac{1}{0.7071} = \sqrt{2} = 1.41$$

Ecuación 12. Factor de cresta.

Si la onda sinusoidal perfecta llegara a tener cambios o impactos y el factor de cresta sobrepasara el valor de 1.41, esto implicaría cambios y problemas en el sistema, se puede observar en la Gráfica 5 que el factor de cresta de la tensión no es muy bajo ni tampoco sobrepasa el 1.41, dando que el sistema está funcionando debidamente.

Nombre	Fecha	Hora	Prom	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
Aunb(IEC)	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	17,437	1,100	48,600	%	7:00:00:00	(d:h:min:s)
Aunb(IEEE)	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	15,391	0,100	52,000	%	7:00:00:00	(d:h:min:s)
Vunb(IEC)	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,338	0,100	0,600	%	7:00:00:00	(d:h:min:s)
Vunb(IEEE)	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,400	0,100	0,700	%	7:00:00:00	(d:h:min:s)



Gráfica 6. Desbalance del sistema.

Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

En la norma IEEE 1159 de 1995 se expresan las recomendaciones para el monitoreo de calidad de potencia, en cuanto al desbalance de voltaje se expresa el cálculo a partir de la relación entre la desviación estándar de los voltajes fase-fase del sistema trifásico y el promedio del mismo (sección 4.4.4), como se presenta a continuación:

$$U_m = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{3} = \frac{211{,}984 + 211{,}544 + 210{,}499}{3} = 211.34\ V$$

Ecuación 13. Promedio de los voltajes fase-fase del sistema trifásico.

$$\sigma = \frac{\sqrt{(U_m - U_1)^2 + (U_m - U_2)^2 + (U_m - U_3)^2}}{3}$$

Ecuación 14. Desviación estándar de los voltajes fase-fase del sistema trifásico.

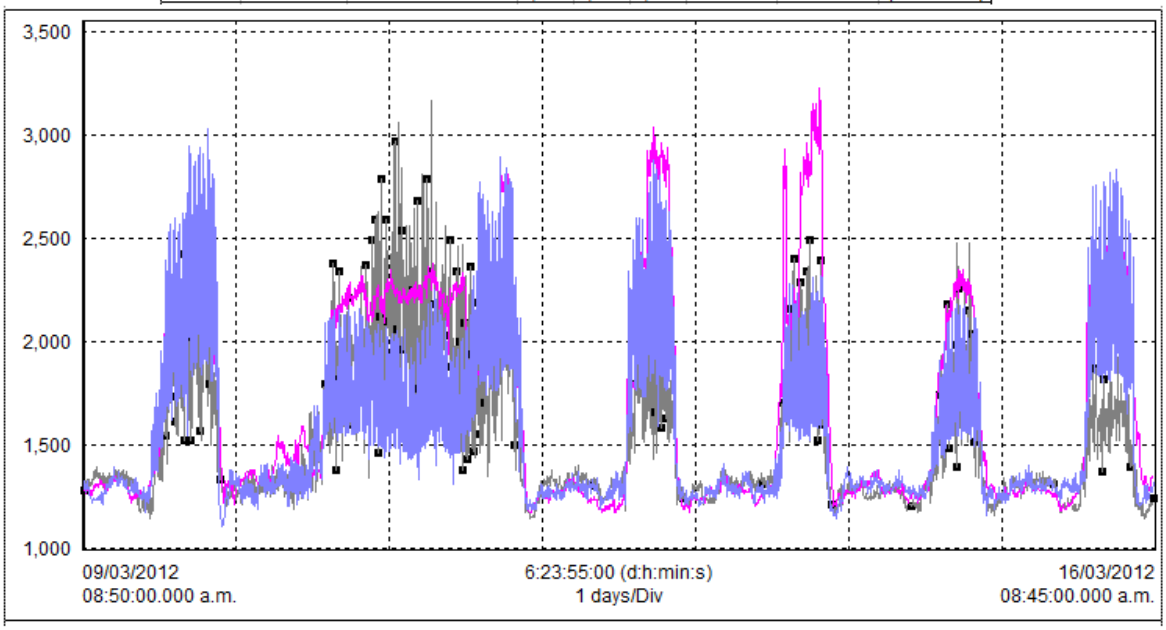
$$\sigma = \frac{\sqrt{(211.34 - 211{,}984)^2 + (211.34 - 211{,}544)^2 + (211.34 - 210{,}499)^2}}{3} = 0.5623$$

$$UNB = \frac{\sigma}{U_m} * 100\% = \frac{0{,}5623}{211.34} = 0.387$$

Ecuación 15. Desbalance del sistema.

Además en la sección 5.5.4, esta norma explica que idealmente el desbalance de voltaje debe estar por debajo del 1% ya que el sistema no presenta inconvenientes, si se encuentra por encima del 2% es necesario hacer ajustes para evitar un alto nivel de desbalance, y cuando está por encima del 5% hay problemas graves en la red. Por tanto se puede determinar que en la subestación el desbalance de voltaje no presenta inconvenientes y cumple con lo establecido en la norma IEEE 1159-1995.

Nombre	Fecha	Hora	Prom	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
KF1	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	1,517	1,140	3,170		7:00:00:00	(d:h:min:s)
KF2	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	1,699	1,170	3,230		7:00:00:00	(d:h:min:s)
KF3	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	1,553	1,100	3,030		7:00:00:00	(d:h:min:s)

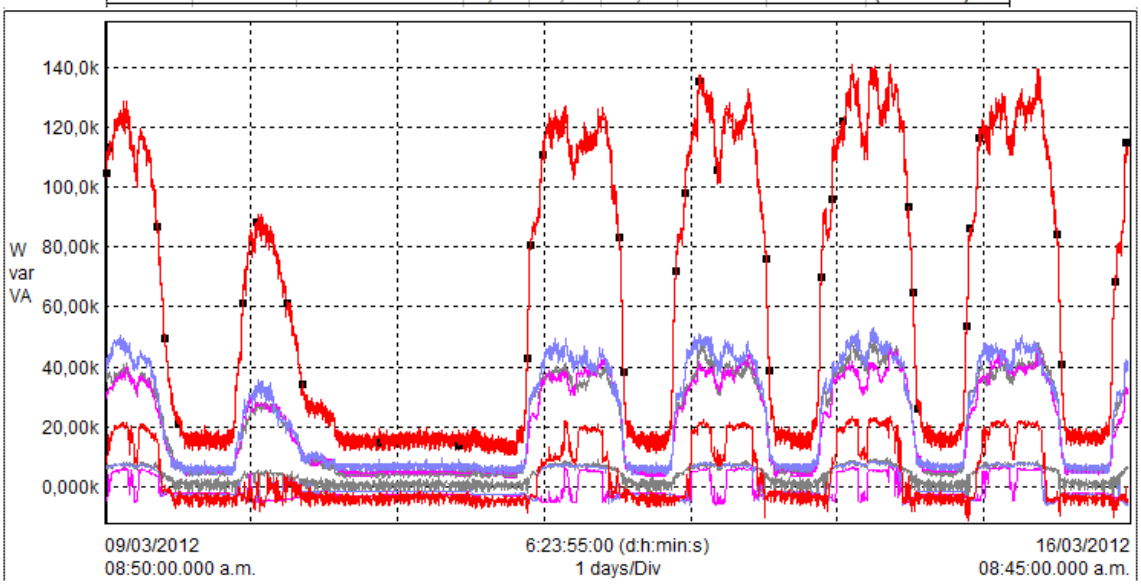


Gráfica 7. Factor K.

Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

El factor k de un transformador que permite generar 225 KVA es casi siempre según especificaciones técnicas de FK: 4, 9 ó 13. Como se observa en la Gráfica 7 el factor k medido no es mayor de 3.2 por ende el transformador no está sufriendo sobrecalentamiento por los armónicos generados en el sistema.

Nombre	Fecha	Hora	Prom	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
VA Total	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	63,282	12,468	141,110	k VA	7:00:00:00	(d:h:min:s)
VA1	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	20,504	3,226	49,086	k VA	7:00:00:00	(d:h:min:s)
VA2	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	19,671	4,111	46,122	k VA	7:00:00:00	(d:h:min:s)
VA3	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	23,107	4,661	53,095	k VA	7:00:00:00	(d:h:min:s)
var Total	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	3,071	-11,184	23,305	k var	7:00:00:00	(d:h:min:s)
var1	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	3,486	-3,802	9,447	k var	7:00:00:00	(d:h:min:s)
var2	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	-1,108	-5,960	6,864	k var	7:00:00:00	(d:h:min:s)
var3	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,693	-6,285	8,393	k var	7:00:00:00	(d:h:min:s)
W Total	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	61,900	10,478	139,183	k W	7:00:00:00	(d:h:min:s)
W1	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	20,077	2,898	48,349	k W	7:00:00:00	(d:h:min:s)
W2	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	19,148	3,189	45,704	k W	7:00:00:00	(d:h:min:s)
W3	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	22,676	3,818	52,447	k W	7:00:00:00	(d:h:min:s)



Gráfica 8. Potencia

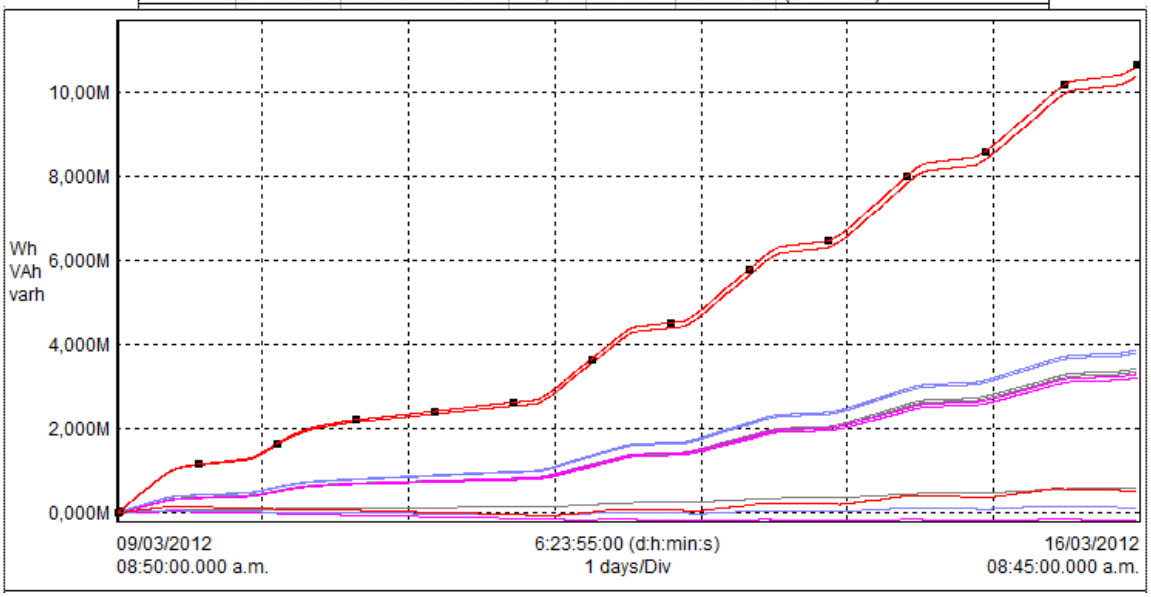
Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

	U	V	I	P	Q	S	THD u	THDv	THDi	FP
L1	211.92	121.90	166.6	20077.2	3486.14	20503.9	2.446	2.555	15.40	0.97
L2	211.48	122.43	161.0	19147.7	-1107.8	19671.2	2.494	2.592	16.18	0.93
L3	210.44	121.57	190.4	22675.6	692.588	23107.3	2.489	2.691	16.64	0.96
N			74.16							
T				61900.4	3070.93	63282.4				0.953

Tabla 7. Datos distorsión de potencia.

Fuente del autor.

Nombre	Fecha	Hora	Max	Unidades	Duración	Unidades
VAh Total	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	10,631	M VAh	7:00:00:00	(d:h:min:s)
VAh1	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	3,445	M VAh	7:00:00:00	(d:h:min:s)
VAh2	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	3,305	M VAh	7:00:00:00	(d:h:min:s)
VAh3	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	3,882	M VAh	7:00:00:00	(d:h:min:s)
varh Total	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	571,553	k varh	7:00:00:00	(d:h:min:s)
varh1	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	585,671	k varh	7:00:00:00	(d:h:min:s)
varh2	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	28,640	k varh	7:00:00:00	(d:h:min:s)
varh3	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	164,479	k varh	7:00:00:00	(d:h:min:s)
Wh Total	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	10,399	M Wh	7:00:00:00	(d:h:min:s)
Wh1	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	3,373	M Wh	7:00:00:00	(d:h:min:s)
Wh2	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	3,217	M Wh	7:00:00:00	(d:h:min:s)
Wh3	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	3,810	M Wh	7:00:00:00	(d:h:min:s)

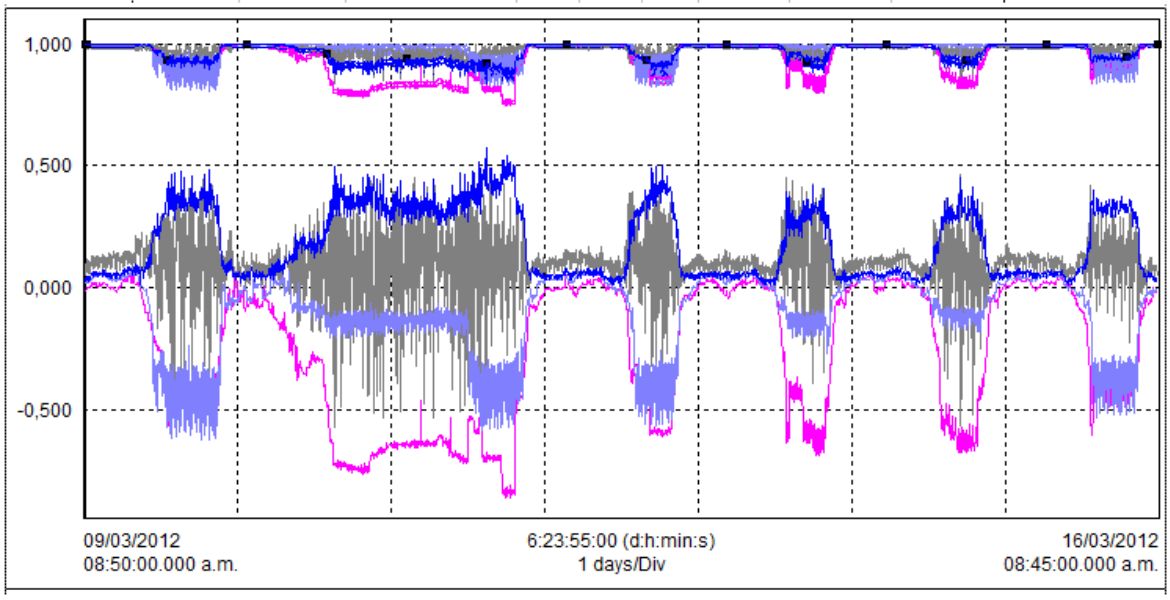


Gráfica 9. Energía

Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

En la Gráfica 9 se muestra el comportamiento del consumo del edificio de la Universidad Santo Tomás, en donde se ilustra la potencia activa (señal roja), potencia aparente (señal roja punteada), y potencia reactiva (señal roja inferior). El consumo total en una semana en la subestación 1 de la universidad es de 10,631 MVAh.

Nombre	Fecha	Hora	Prom	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
DPF Mean	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,968	0,859	1,000		7:00:00:00	(d:h:min:s)
DPF1	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,981	0,861	1,000		7:00:00:00	(d:h:min:s)
DPF2	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,942	0,758	1,000		7:00:00:00	(d:h:min:s)
DPF3	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,981	0,848	1,000		7:00:00:00	(d:h:min:s)
PF Mean	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,953	0,837	0,991		7:00:00:00	(d:h:min:s)
PF1	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,967	0,835	0,992		7:00:00:00	(d:h:min:s)
PF2	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,929	0,745	0,993		7:00:00:00	(d:h:min:s)
PF3	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,963	0,807	0,993		7:00:00:00	(d:h:min:s)
Tan Mean	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,183	0,009	0,570		7:00:00:00	(d:h:min:s)
Tan1	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,098	-0,572	0,461		7:00:00:00	(d:h:min:s)
Tan2	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	-0,262	-0,858	0,067		7:00:00:00	(d:h:min:s)
Tan3	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	-0,107	-0,624	0,068		7:00:00:00	(d:h:min:s)



Gráfica 10. Factor de Potencia

Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

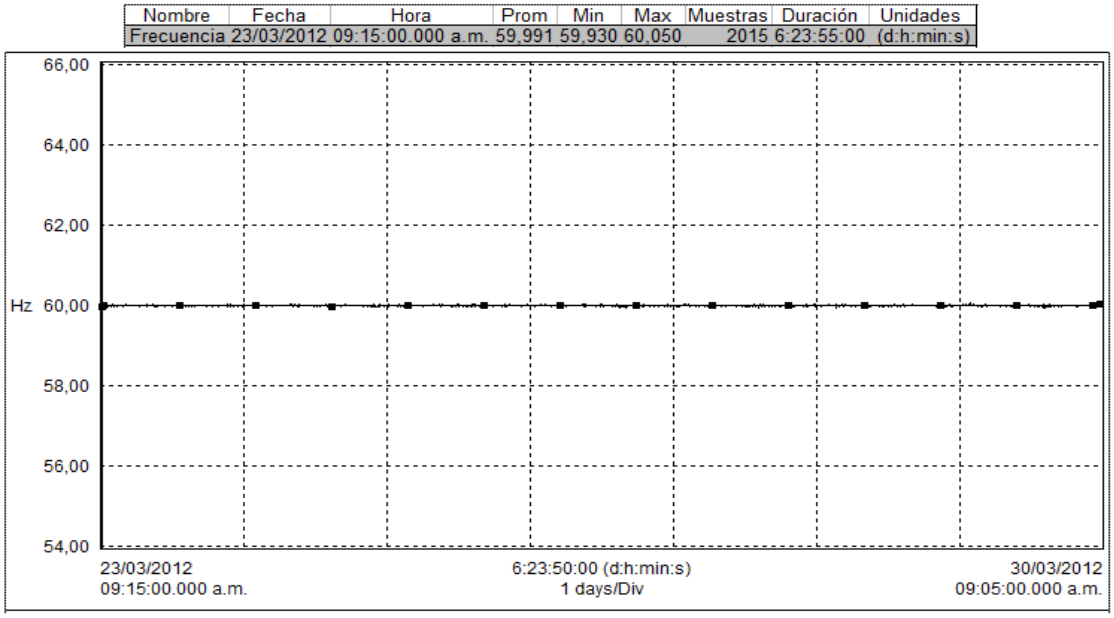
El factor de potencia idealmente debe ser 1, esto garantiza que se aproveche el total de la potencia suministrada por la red, en este caso, el consumo de energía que se tiene en la subestación 1 (Edificio Gregorio XIII) es aproximadamente el 95%, es decir, del total de potencia consumida solo se pierde (o no se utiliza) el 5% de esta. Las variaciones en el consumo de la energía, es decir en las corrientes del sistema, se observan en las variaciones del factor de potencia en la gráfica 10. En conclusión, se puede determinar que el sistema es eficiente y no representa grandes pérdidas económica y energéticamente.

11.2 Subestación 2 (Edificio Biblioteca):

En la figura 16 se aprecia el lugar, la forma y características de la subestación ubicada en el edificio de biblioteca en la zona de oficinas, en donde, usando el dispositivo POWER PAD, se realizaron las medidas de calidad de energía.

En la imagen que se presenta a continuación se presenta la segunda subestación que cuenta con un totalizador y breakers que conecta el edificio de biblioteca y el edificio de los laboratorios de física. Además, se puede observar la facilidad de acceso a esta subestación y el aseo de la misma.

Figura 16. Imágenes de la segunda subestación, edificio de Biblioteca.
Fuente del autor.



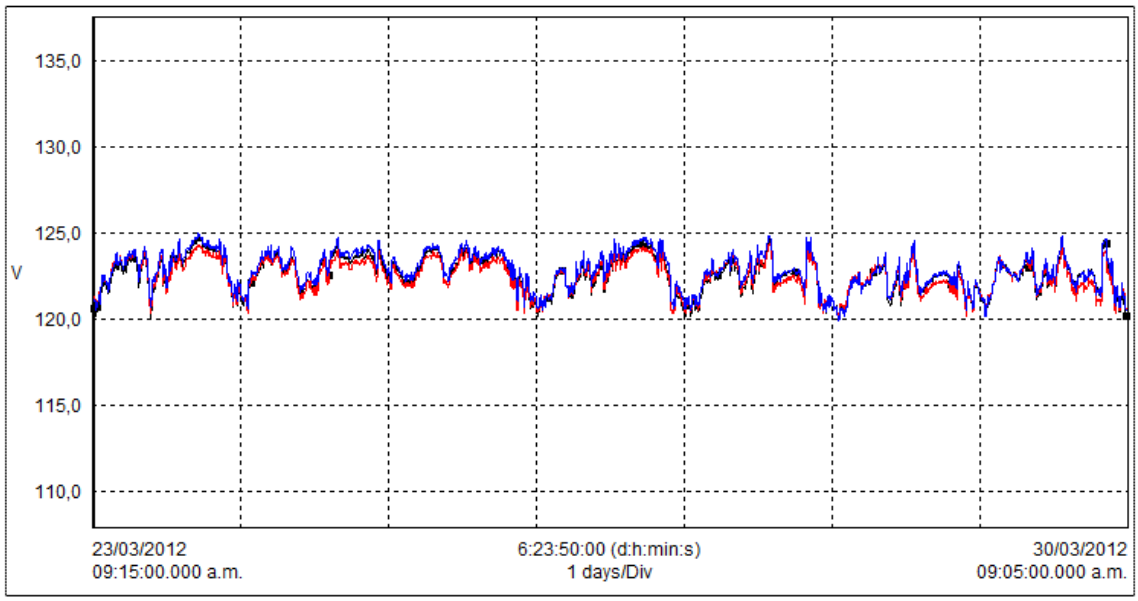
Gráfica 11. Frecuencia subestación 2
Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

El valor medio de la frecuencia según la Gráfica 11 es de 59.991 Hz, aproximadamente 60 Hz, lo que demuestra que está cumpliendo con la NTC 1340; para calcular el percentil de 95% y 100% se tiene que:

=PERCENTIL (C10:C2024; 0,95)=60,01 Hz
=PERCENTIL (C10:C2024; 1)= 60,05 Hz

Según lo establecido en la tabla 1 de la NTC 1340 se observa que la frecuencia cumple con la norma, y además esta norma especifica que el 100% de los valores registrados en la semana deberán estar dentro el intervalo definido en la tabla 2.

Nombre	Fecha	Hora	RMS	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
V1 RMS	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	122,621	120,100	124,800	V	6:23:55:00	(d:h:min:s)
V2 RMS	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	122,530	120,200	124,400	V	6:23:55:00	(d:h:min:s)
V3 RMS	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	122,856	119,900	125,000	V	6:23:55:00	(d:h:min:s)



Gráfica 12. Voltaje RMS

Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

En la Gráfica 12 se observan los valores máximos y mínimos del VRMS, usando las ecuaciones 4 y 5. A continuación se obtienen los porcentajes de cada uno y se compara con la tabla 6 si cumple la norma.

$$x1 = \frac{Vmax}{120} = \frac{124{,}8}{120} = 1{,}04;\ +\mathbf{4}\%\ \boldsymbol{V1\ RMS}$$

$$x2 = \frac{124{,}4}{120} = 1{,}03667;\ +\mathbf{3{,}66}\%\ \boldsymbol{V2\ RMS}$$

$$x3 = \frac{125}{120} = 1{,}04167;\ +\mathbf{4{,}16}\%\ \boldsymbol{V3\ RMS}$$

$$y1 = \frac{Vmin}{120} = \frac{120{,}1}{120} = 1.00083;\ \mathbf{0{,}083\%}\ \boldsymbol{V1\ RMS}$$

$$y2 = \frac{120{,}2}{120} = 1.00167;\ \mathbf{0{,}166\%}\ \boldsymbol{V2\ RMS}$$

$$y3 = \frac{119{,}9}{120} = 0{,}9925;\ \mathbf{-0{,}08\%}\ \boldsymbol{V2\ RMS}$$

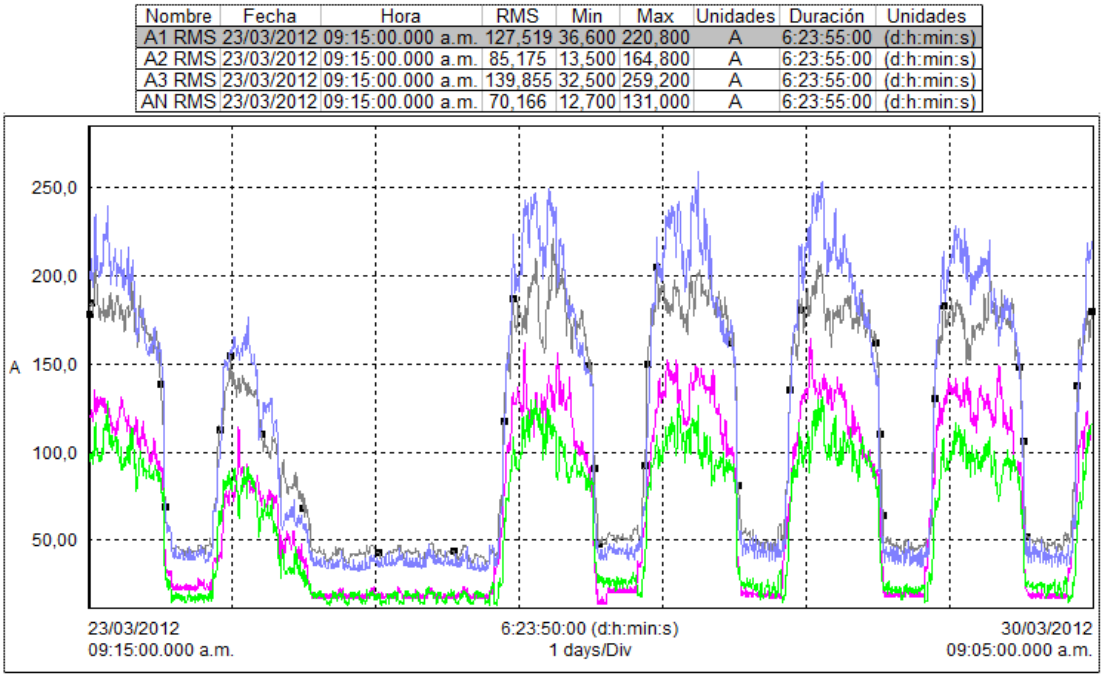
VRMS	MAXIMO	MINIMO
V1	4%	0.083%
V2	3.66%	0,166%
V3	4.16%	-0.08%

Tabla 8.Tabla de rangos máximos y mínimos de VRMS

Fuente del autor.

Si se compara la Tabla 8 con la Tabla 4, se observa que la tensión nominal de la subestación 2 está dentro de los intervalos establecidos en la norma NTC 1340.

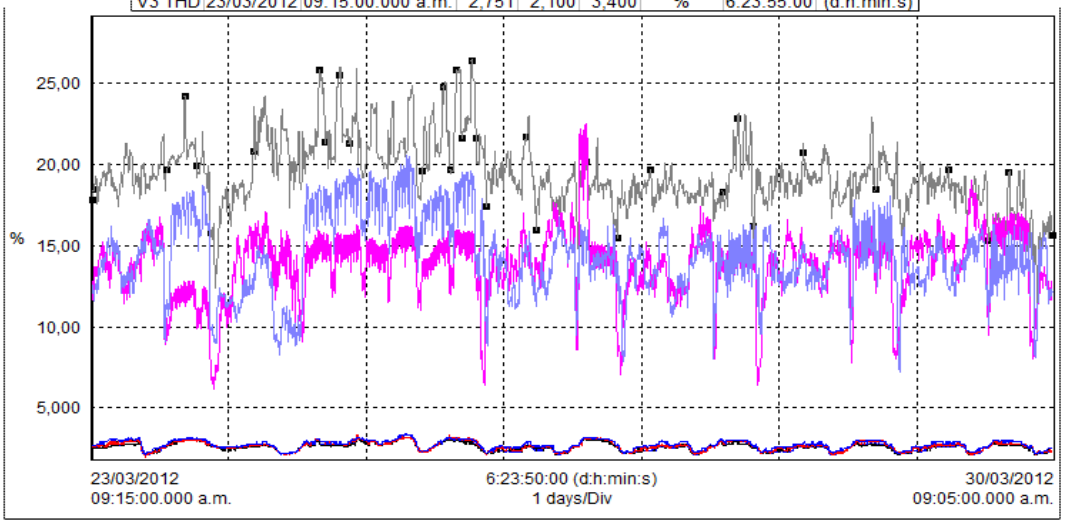
En la Gráfica 13 que corresponde a la corriente consumida durante una semana, se observa como en el transcurso del fin de semana y en las noches (de 9:34 PM a 6:45AM) no hay un alto consumo de energía, solo un mínimo de aproximadamente 12.7 amperios.



Gráfica 13. Corrientes

Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

Nombre	Fecha	Hora	Prom	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
A1 THD	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	19,382	11,000	26,500	%	6:23:55:00	(d:h:min:s)
A2 THD	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	13,897	6,200	22,500	%	6:23:55:00	(d:h:min:s)
A3 THD	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	14,430	7,200	20,600	%	6:23:55:00	(d:h:min:s)
U1 THD	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	2,591	2,000	3,200	%	6:23:55:00	(d:h:min:s)
U2 THD	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	2,705	2,100	3,300	%	6:23:55:00	(d:h:min:s)
U3 THD	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	2,629	2,000	3,300	%	6:23:55:00	(d:h:min:s)
V1 THD	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	2,619	2,100	3,200	%	6:23:55:00	(d:h:min:s)
V2 THD	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	2,647	2,000	3,200	%	6:23:55:00	(d:h:min:s)
V3 THD	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	2,751	2,100	3,400	%	6:23:55:00	(d:h:min:s)



Gráfica 14. THD

Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

La distorsión armónica total da a conocer como interfieren las cargas no lineales en el sistema y es también un dato muy importante ya que según el estándar IEEE 519 muestra que intervalos de distorsión armónica total puede y debe tener un sistema.

En el capítulo 11.1 del estándar IEEE 519 se indica el límite máximo que debe tener el THD en tensión, 5%, y según la Gráfica 14, los THD de tensión no sobrepasan este valor, entonces si está cumpliendo el estándar internacional.

Para los THD de corrientes se tiene que hallar la demanda total de distorsión, para ello se usa la ecuación 6.

La corriente de carga (IL) se toma el percentil del 95% de la tabla de datos que genera el POWERPAD, como se muestra a continuación:

=PERCENTIL (AC10:AC2024; 0, 95) =193,05 A= IL

$$I_{1a1} = I_{L1} - (I_{L1} * THD_1) = 193{,}05 - (193{,}05 * 0{,}19382) = 155{,}63$$

$$\boldsymbol{TDD_1 = \frac{I_{1a1} * THD_1}{I_L} = \frac{155,63 * 0,19382}{193,05} = 0,1562 = 15,62\%}$$

La corriente de carga (IL2) se toma el percentil del 95% de la tabla de datos que genera el POWERPAD, como se muestra a continuación:

=PERCENTIL(AD10:AD2024;0,95)=138.33 A= IL2

$$I_{1a2} = I_{L2} - (I_{L2} * THD_2) = 138{,}33 - (138{,}33 * 0{,}13897) = 119.10$$

$$\boldsymbol{TDD_2 = \frac{I_{1a2} * THD_2}{I_{L2}} = \frac{119,10 * 0,13897}{138,33} = 0,1196 = 11,96\%}$$

La corriente de carga (IL3) se toma el percentil del 95% de la tabla de datos que genera el POWERPAD, como se muestra a continuación.

=PERCENTIL(AE10:AE2024;0,95)=232.92 A= IL3

$$I_{1a3} = I_{L3} - (I_{L3} * THD_3) = 232{,}92 - (232{,}92 * 0{,}14430) = 199{,}30$$

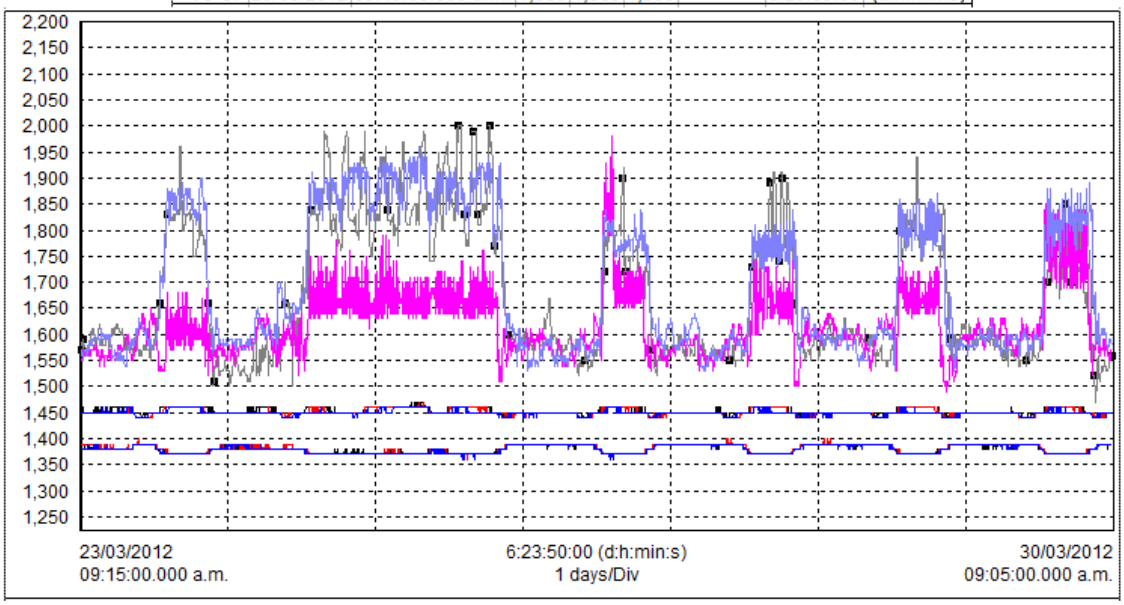
$$\boldsymbol{TDD_3 = \frac{I_{1a3} * THD_3}{I_{L3}} = \frac{199,30 * 0,14430}{232,92} = 0,1234 = 12,34\%}$$

Corrientes	TDD
A1	$\mathbf{15,62\%}$
A2	$\mathbf{11,96\%}$
A3	$\mathbf{12,34\%}$

Tabla 9. TDD de corrientes.
Fuente del autor.

Con respecto a la tabla 10.3 del estándar IEEE 519, se puede ver que los resultados de TDD tabla 9 obtenidos en las ecuaciones anteriores están dentro del rango permitido del estándar; solo la fase A1 se sobrepasa 0.6, pero no es crítico el problema por ende el sistema está funcionando en un estado estable.

Nombre	Fecha	Hora	Prom	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
A1 CF	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	1,676	1,470	2,000		6:23:55:00	(d:h:min:s)
A2 CF	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	1,620	1,490	1,980		6:23:55:00	(d:h:min:s)
A3 CF	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	1,696	1,530	1,960		6:23:55:00	(d:h:min:s)
U1 CF	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	1,453	1,440	1,470		6:23:55:00	(d:h:min:s)
U2 CF	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	1,452	1,440	1,470		6:23:55:00	(d:h:min:s)
U3 CF	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	1,450	1,440	1,460		6:23:55:00	(d:h:min:s)
V1 CF	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	1,380	1,370	1,390		6:23:55:00	(d:h:min:s)
V2 CF	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	1,381	1,360	1,400		6:23:55:00	(d:h:min:s)
V3 CF	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	1,380	1,360	1,390		6:23:55:00	(d:h:min:s)



Gráfica 15. Factor de cresta

Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

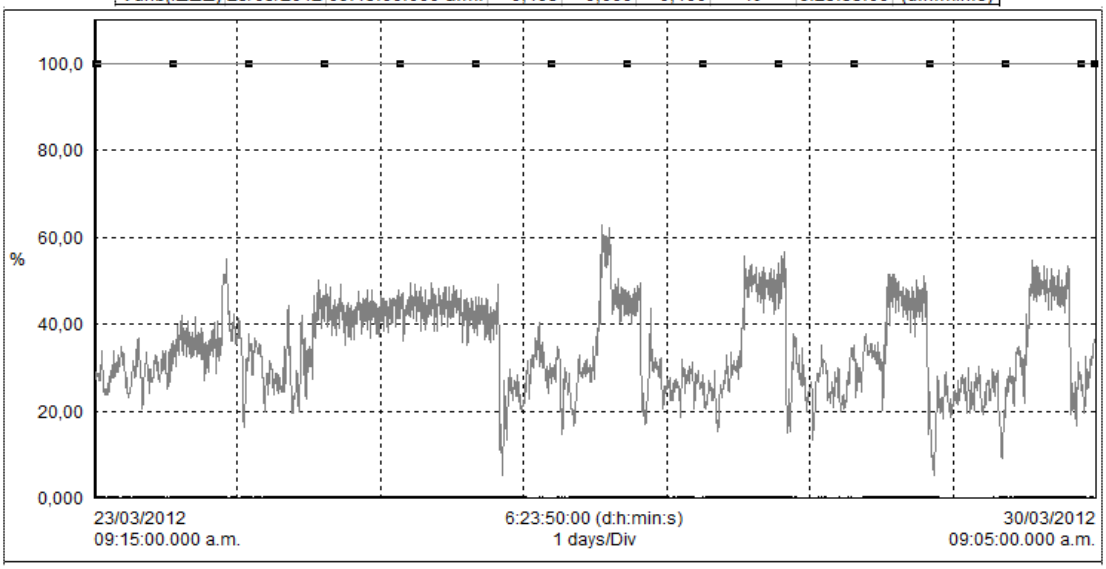
En una perfecta onda sinusoidal, el valor RMS es igual a 0.707 si su amplitud es de uno, como el factor de cresta es igual a la amplitud pico de la onda dividido por el valor rms, entonces el factor de cresta seria igual a 1.41

$$CF = \frac{Vp}{VRMS} = \frac{1}{0.7071} = \sqrt{2} = 1.41$$

Ecuación 16. Factor de cresta subestación 2.

Si la onda sinusoidal perfecta llegara a tener cambios o impactos y el factor de cresta sobrepasara el valor de 1.41, esto implicaría problemas en el sistema, se puede observar en la Gráfica 15 que el factor de cresta de la tensión no es muy bajo ni tampoco sobrepasa el 1.41, dando como resultado que el sistema está funcionando correctamente.

Nombre	Fecha	Hora	Prom	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
Aunb(IEC)	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	100,000	100,000	100,000	%	6:23:55:00	(d:h:min:s)
Aunb(IEEE)	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	34,273	5,200	62,800	%	6:23:55:00	(d:h:min:s)
Vunb(IEC)	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	100,000	100,000	100,000	%	6:23:55:00	(d:h:min:s)
Vunb(IEEE)	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	0,193	0,000	0,400	%	6:23:55:00	(d:h:min:s)



Gráfica 16. Desbalance del sistema

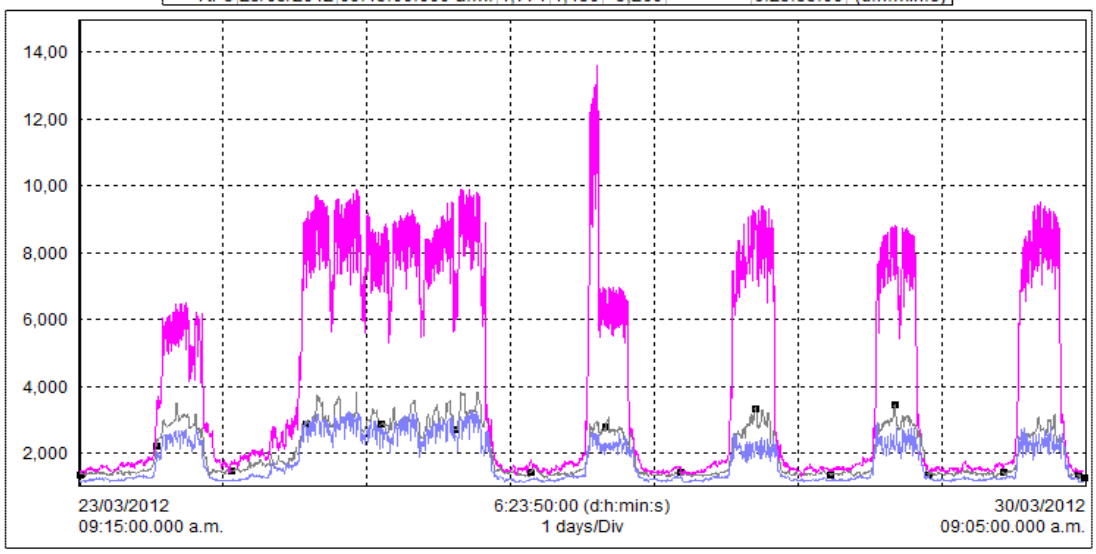
Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

En la norma IEEE 1159 de 1995 se expresan las recomendaciones para el monitoreo de calidad de potencia, en cuanto al desbalance de voltaje se expresa el cálculo a partir de la relación entre la desviación estándar de los voltajes fase-fase del sistema trifásico y el promedio del mismo (sección 4.4.4). El valor que se midió es de 0.193, por lo cual se puede asegurar que la red no presenta problemas.

Además en la sección 5.5.4, esta norma explica que idealmente el desbalance de voltaje debe estar por debajo del 1% ya que el sistema no presenta inconvenientes, si se encuentra por encima del 2% es necesario hacer ajustes para evitar un alto nivel de desbalance, y cuando está por encima del 5% hay problemas graves en la red. Por tanto se puede determinar que en la subestación el desbalance de voltaje no presenta inconvenientes y cumple con lo establecido en la norma IEEE 1159-1995.

Otro aspecto importante es el factor k, es importante tener en cuenta que el factor k de un transformador que generar 225 KVA es casi siempre en sus especificaciones técnicas de FK: 4, 9 ó 13.; como se observa en la Gráfica 17 el factor k medido no es mayor de 4 por ende el transformador no está sufriendo sobrecalentamiento por los armónicos generados en el sistema, pero se debe tener en cuenta que la fase dos, que es la que tiene este elevado factor k, parece ser que tiene demasiadas cargas no lineales y hace que se genere más armónicos y tenga el factor k muy elevado.

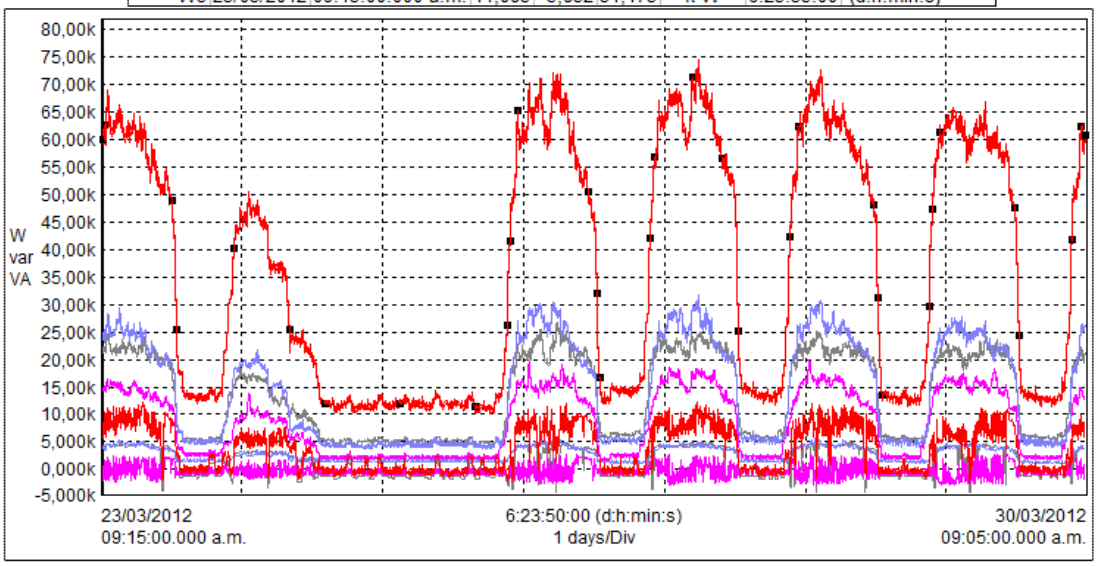
Nombre	Fecha	Hora	Prom	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
KF1	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	2,066	1,260	3,820		6:23:55:00	(d:h:min:s)
KF2	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	4,084	1,320	13,590		6:23:55:00	(d:h:min:s)
KF3	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	1,774	1,130	3,260		6:23:55:00	(d:h:min:s)



Gráfica 17. Factor K

Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

Nombre	Fecha	Hora	Prom	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
VA Total	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	36,567	10,877	74,511	k VA	6:23:55:00	(d:h:min:s)
VA1	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	13,616	4,546	26,784	k VA	6:23:55:00	(d:h:min:s)
VA2	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	8,587	1,666	19,854	k VA	6:23:55:00	(d:h:min:s)
VA3	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	14,364	4,042	31,844	k VA	6:23:55:00	(d:h:min:s)
var Total	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	3,802	-2,319	12,283	k var	6:23:55:00	(d:h:min:s)
var1	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	1,322	-4,247	5,158	k var	6:23:55:00	(d:h:min:s)
var2	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	-0,235	-2,826	2,841	k var	6:23:55:00	(d:h:min:s)
var3	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	2,714	1,145	5,663	k var	6:23:55:00	(d:h:min:s)
W Total	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	35,872	10,218	73,545	k W	6:23:55:00	(d:h:min:s)
W1	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	13,338	4,261	26,418	k W	6:23:55:00	(d:h:min:s)
W2	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	8,449	1,413	19,653	k W	6:23:55:00	(d:h:min:s)
W3	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	14,085	3,832	31,475	k W	6:23:55:00	(d:h:min:s)



Gráfica 18. Potencia

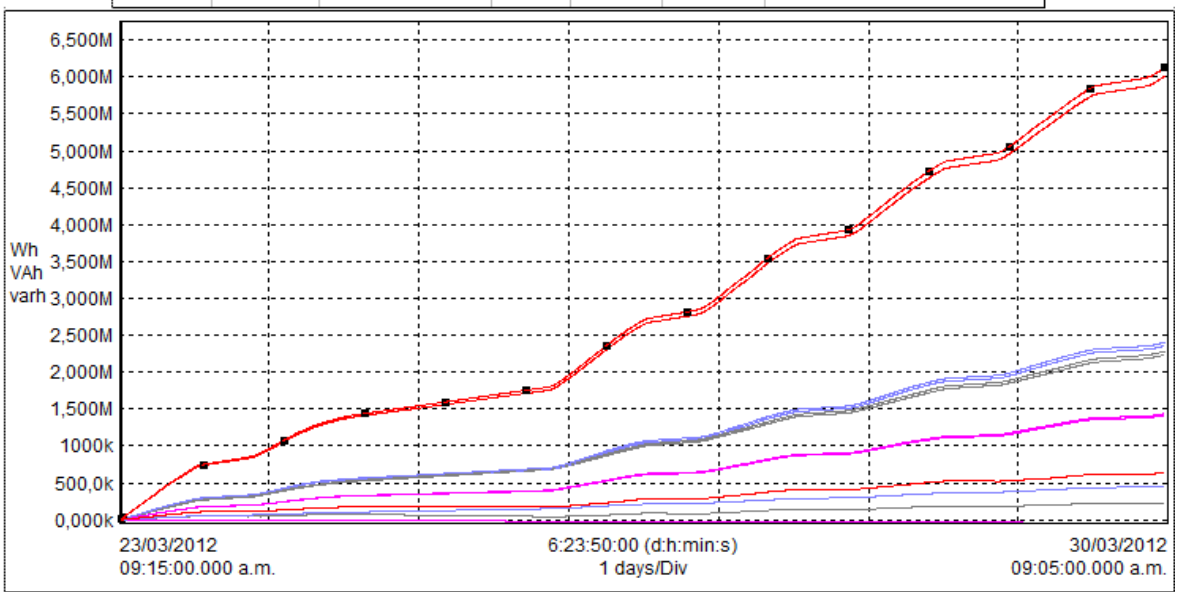
Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

	U	V	I	P	Q	S	THDu	THDv	THDi	FP
L1	212.16	122.58	111.2	13338.2	1321.94	13615.6	2.59	2.61	19.38	0.98
L2	212.35	122.49	70.16	8449.36	-234.68	8586.79	2.70	2.64	13.89	0.97
L3	212.81	122.82	117.2	14084.7	2714.3	14364.2	2.62	2.75	14.43	0.97
N			58.98							
T				35872.3	3801.54	36566.6				0.97

Tabla 10. Datos distorsión de potencias

Fuente del autor

Nombre	Fecha	Hora	Max	Unidades	Duración	Unidades
VAh Total	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	6,140	M VAh	6:23:55:00	(d:h:min:s)
VAh1	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	2,286	M VAh	6:23:55:00	(d:h:min:s)
VAh2	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	1,442	M VAh	6:23:55:00	(d:h:min:s)
VAh3	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	2,412	M VAh	6:23:55:00	(d:h:min:s)
varh Total	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	638,342	k varh	6:23:55:00	(d:h:min:s)
varh1	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	224,329	k varh	6:23:55:00	(d:h:min:s)
varh2	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	3,853	k varh	6:23:55:00	(d:h:min:s)
varh3	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	455,773	k varh	6:23:55:00	(d:h:min:s)
Wh Total	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	6,024	M Wh	6:23:55:00	(d:h:min:s)
Wh1	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	2,240	M Wh	6:23:55:00	(d:h:min:s)
Wh2	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	1,419	M Wh	6:23:55:00	(d:h:min:s)
Wh3	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	2,365	M Wh	6:23:55:00	(d:h:min:s)

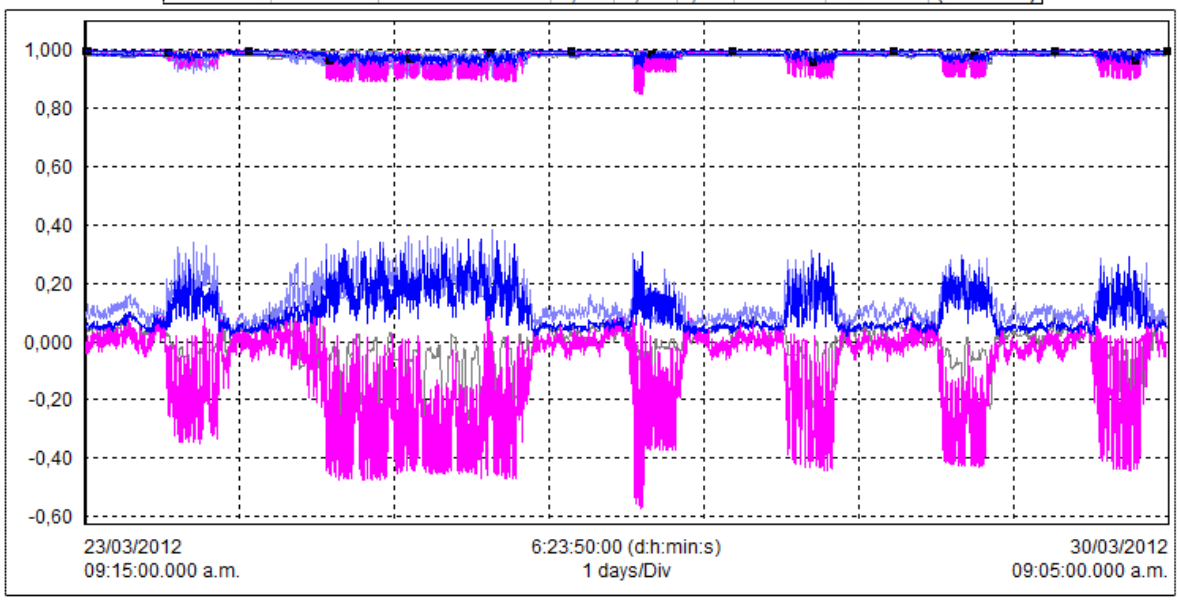


Gráfica 19. Energía Subestación 2.

Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

En la Gráfica 19 se muestra el comportamiento del consumo del edificio de la Universidad Santo Tomas, en donde se ilustra la potencia activa (señal roja), potencia aparente (señal roja punteada), y potencia reactiva (señal roja inferior). El consumo total en una semana en la subestación 2 de la universidad es de 6,140 MVAh.

Nombre	Fecha	Hora	Prom	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
DPF Mean	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	0,988	0,940	1,000		6:23:55:00	(d:h:min:s)
DPF1	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	0,996	0,964	1,000		6:23:55:00	(d:h:min:s)
DPF2	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	0,979	0,866	1,000		6:23:55:00	(d:h:min:s)
DPF3	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	0,989	0,933	0,999		6:23:55:00	(d:h:min:s)
PF Mean	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	0,972	0,918	0,991		6:23:55:00	(d:h:min:s)
PF1	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	0,977	0,934	0,993		6:23:55:00	(d:h:min:s)
PF2	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	0,970	0,848	0,996		6:23:55:00	(d:h:min:s)
PF3	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	0,971	0,912	0,992		6:23:55:00	(d:h:min:s)
Tan Mean	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	0,102	0,014	0,351		6:23:55:00	(d:h:min:s)
Tan1	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	-0,013	-0,272	0,162		6:23:55:00	(d:h:min:s)
Tan2	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	-0,101	-0,570	0,190		6:23:55:00	(d:h:min:s)
Tan3	23/03/2012	09:15:00.000 a.m.	0,130	0,021	0,384		6:23:55:00	(d:h:min:s)



Gráfica 20. Factor de potencia.

Fuente del autor, base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

El factor de potencia idealmente debe ser 1, esto garantiza que se aproveche el total de la potencia suministrada por la red, en este caso, el consumo de energía que se tiene en la subestación 2 (Edificio de Biblioteca) es aproximadamente el 97%, es decir, del total de potencia consumida solo se pierde (o no se utiliza) menos del 3% de esta. Las variaciones en el consumo de la energía, es decir en las corrientes del sistema, se observan en las variaciones del factor de potencia en la gráfica 20. En conclusión, se puede determinar que el sistema es eficiente y no representa grandes pérdidas económica y energéticamente, aún mejor que en la subestación 1.

12. DISEÑO DEL PLANO ELÉCTRICO DE LAS SUBESTACIONES DE LA UNIVERSIDAD Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA

El software ETAP es una herramienta de análisis para la simulación, diseño, control y monitoreo de sistemas de distribución, transmisión y potencia industrial. Hace cálculos de corto circuito como también estudios avanzados de estabilidad y transitorios; es un software que puede dar una solución flexible e integral.

12.1 Subestación 1, edificio Gregorio XIII:

12.1.1 Construcción del plano (SUBESTACION 1) a mano en la parte del reconocimiento.

Para la construcción del plano, fue necesario realizar el reconocimiento de los elementos que allí se encuentran y las características de cada uno de los dispositivos de la subestación, en la que se realizó el plano manualmente para tener datos más detallados en el momento de crear el diagrama.

12.1.2 Construcción de plano de prueba en ETAP 7.5.0.

Antes de implementar todo el sistema de distribución eléctrica, se desarrolló una serie de pruebas para el conocimiento de cada elemento y pestañas del software para llegar a tener un desarrollo eficiente del diagrama. Como ejemplo en la Gráfica 2 se observa los datos que se obtienen de un diagrama unifilar diseñado en ETAP. Con este tipo de ejercicio y con el diagrama ya construido se comenzó a trabajar en el software ETAP 7.5.0.

Los componentes típicamente usados en una red de distribución eléctrica en cualquier edificación son: Fuente de alimentación, líneas de trasmisión (cable), transformadores, cargas (motores, cargas variables, etc.). En el diagrama unifilar (figura 15) se pueden detallar los diferentes datos calculados por el software: corriente de carga, potencia consumida por los elementos de la red, factor de potencia y desbalance del sistema.

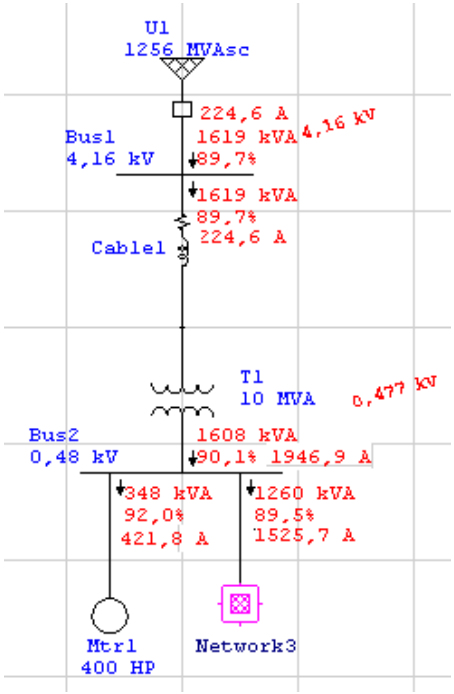


Figura 17. Datos de simulación en ETAP 7.5.0.
Fuente: Software ETAP

Este software permite modificar diferentes parámetros, por ejemplo para las características de un motor se tiene (figura 16) información general del motor, caballos de fuerza, alimentación, factor de potencia (en %), las revoluciones del motor, numero de polos, modelos, estándares, la inercia del motor con respecto a la carga, el tipo de carga a soportar, etc. Esto permite que la simulación sea muy confiable y que además se puedan plantear posibles soluciones a diferentes problemas en la distribución eléctrica.

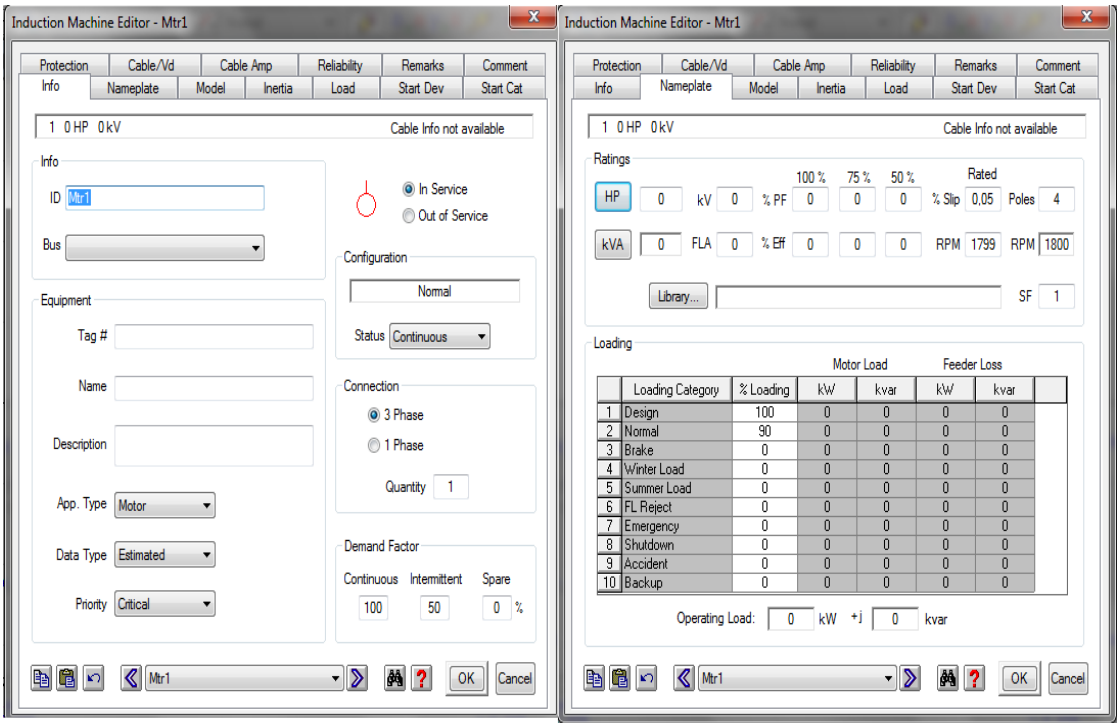


Figura 18. Parámetros y características de un motor en ETAP.
Fuente: Software ETAP

12.1.3 Reconocimiento y estudio de parámetros de cada dispositivo o elemento a simular.

Para la construcción del plano de distribución eléctrica de la subestación 1, se hizo una lista de los elementos que esta contiene, en los que encontramos, transformador, breakers (de diferentes capacidades), barraje, cables, medidores, entre otros; a partir de ellos se realizó el estudio de los elementos que permiten modificar los parámetros de estos:

- Power grid:

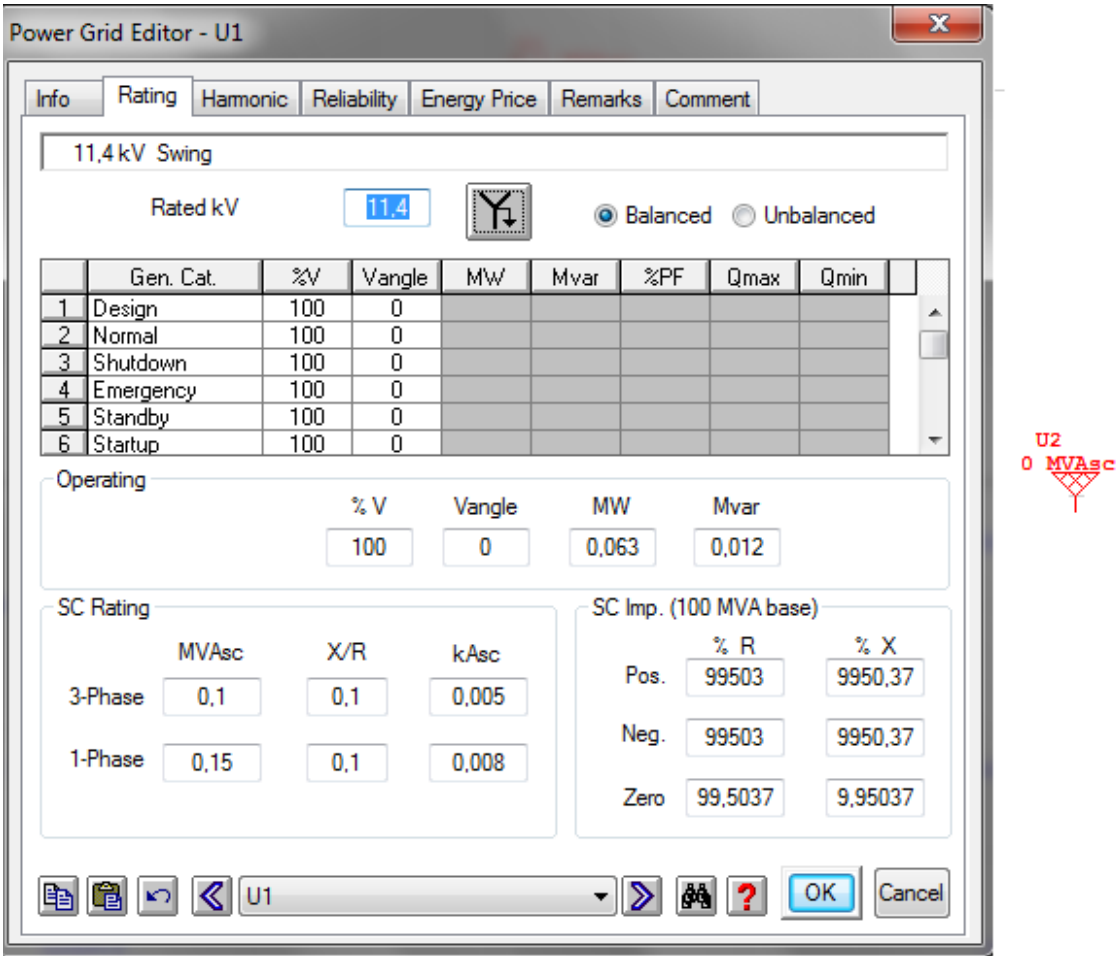


Figura 19. Parámetros power grid.

Fuente: Software ETAP

En los parámetros “power grid” se ingresa los datos de tensión que ofrece la fuente de potencia, características de operación, clasificación de corto circuito y establecimiento de impedancias. ETAP recalcula valores dependiendo de los datos que se hayan determinado en la simulación, todos estos parámetros son importantes para determinar el flujo de carga.

- **Bus:**

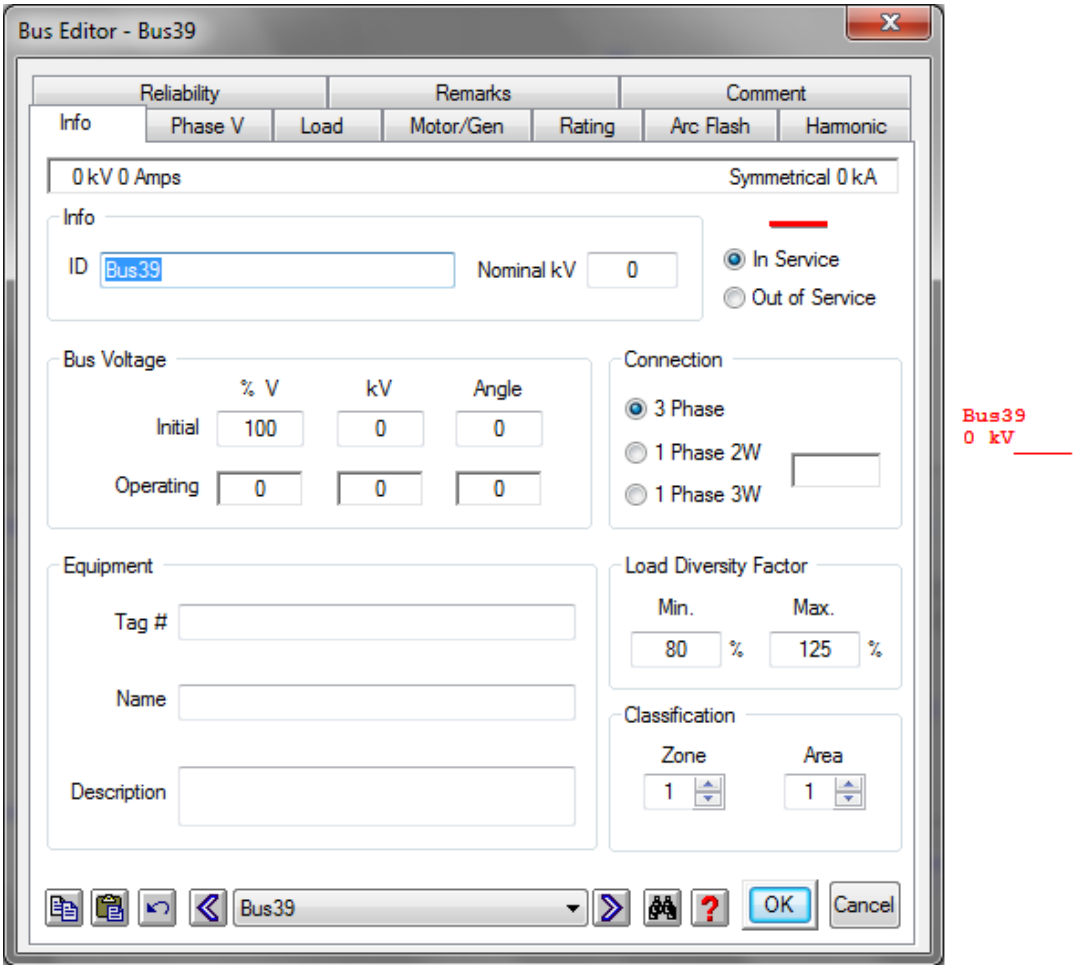


Figura 20. Parámetros del BUS.
Fuente: Software ETAP

Para mirar el consumo de una carga y hacer una ampliación de una red eléctrica siempre se debe poner este tipo de elemento ya que es aquí donde el software muestra los datos de potencia, factor de potencia, corrientes, etc. Ofreciendo una imagen del dato en el elemento (BUS), este también se puede conocer como PCC (punto de acoplamiento común), más adelante se observa la cantidad de buses que se usaron. En la figura 18 se observan los parámetros e información que ofrece este tipo de elemento en ETAP.

- **Transformador.**

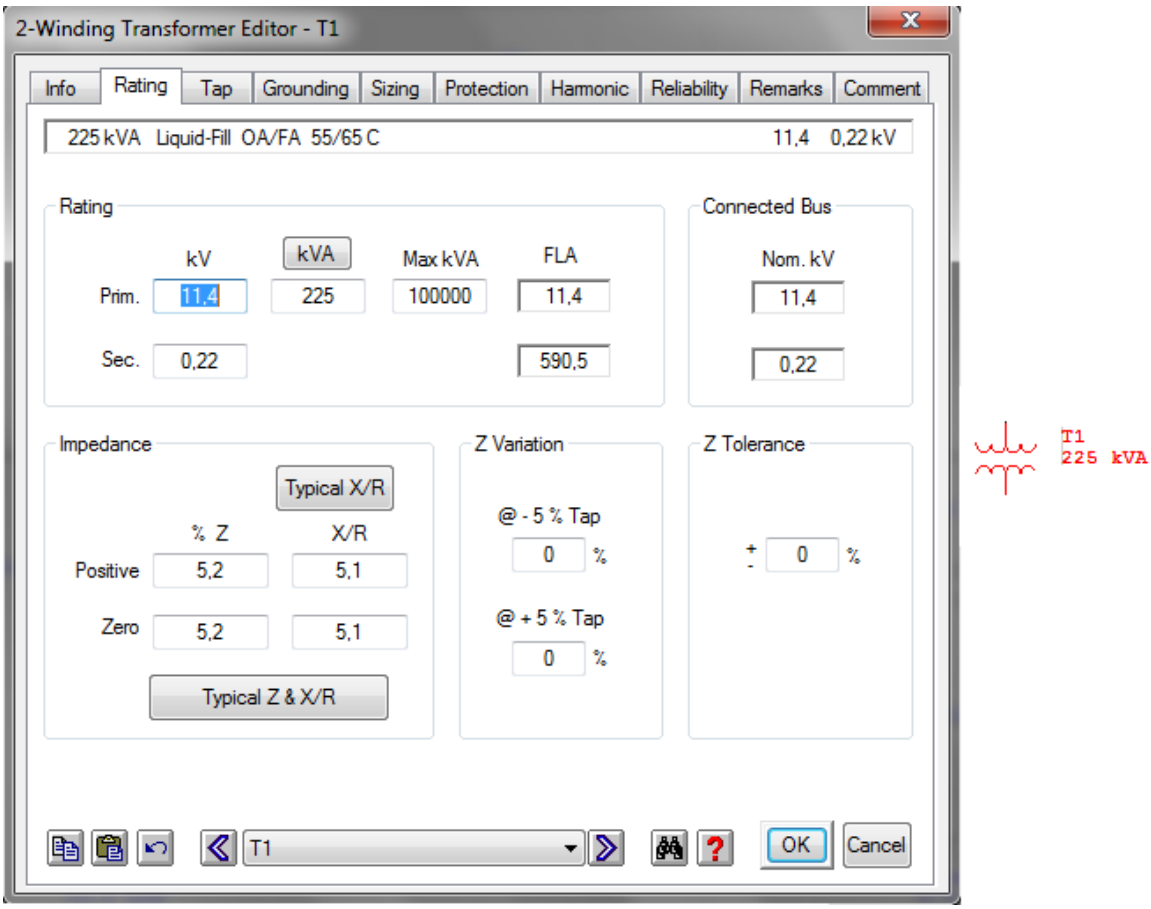


Figura 21. Parámetros del transformador.
Fuente: Software ETAP

En la figura 19, se ilustran los parámetros del transformador, en los cuales se puede configurar los rangos de transformación de tensión, la impedancia, tolerancia y otros.

- **Breakers.**

En la figura 20 se indica los parámetros para los breaker, el cual el software ETAP ofrece una librería extensa de fabricantes y creadores de este tipo de dispositivos con diferentes capacidades. Es aquí donde se busca el fabricante visto en la revisión de la subestación y es puesto en simulación.

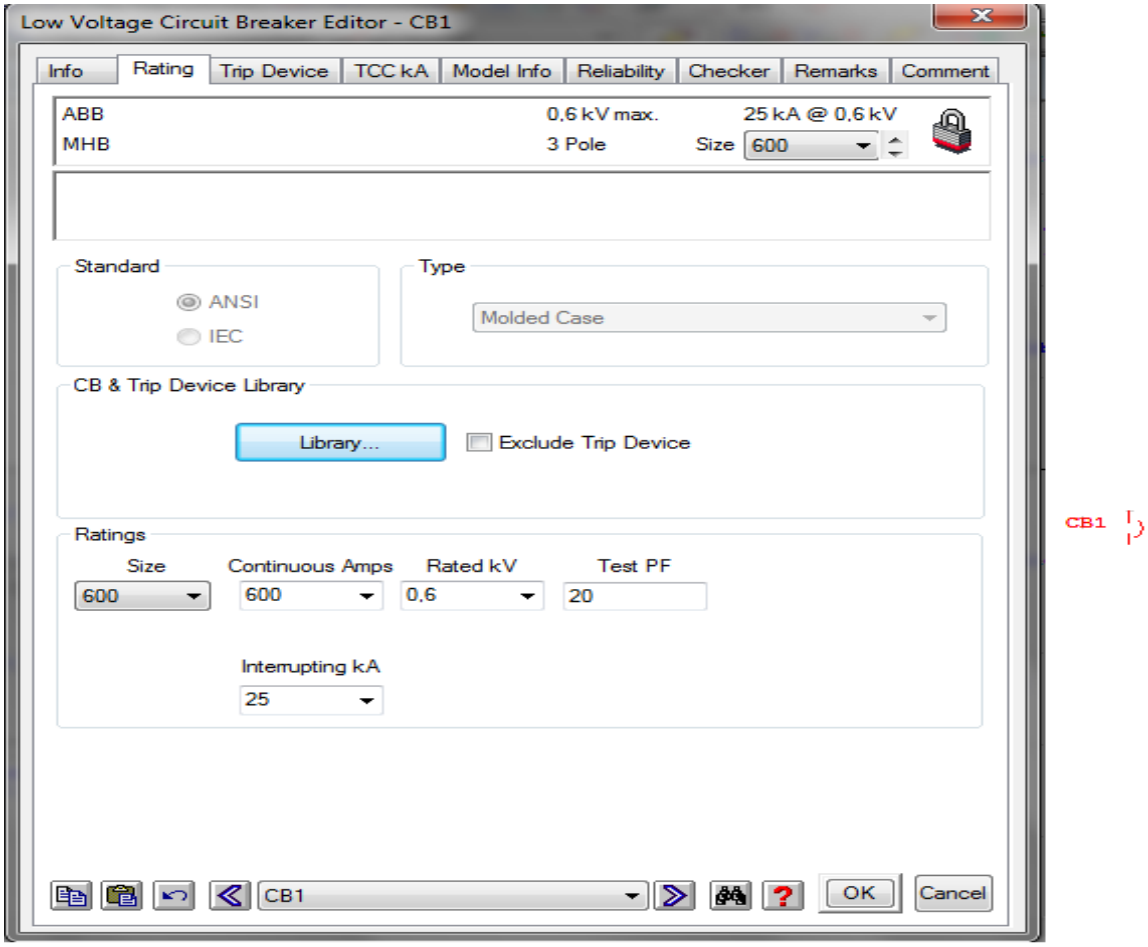


Figura 22.Parámetros del Breaker

Fuente: Software ETAP

- **Cable**

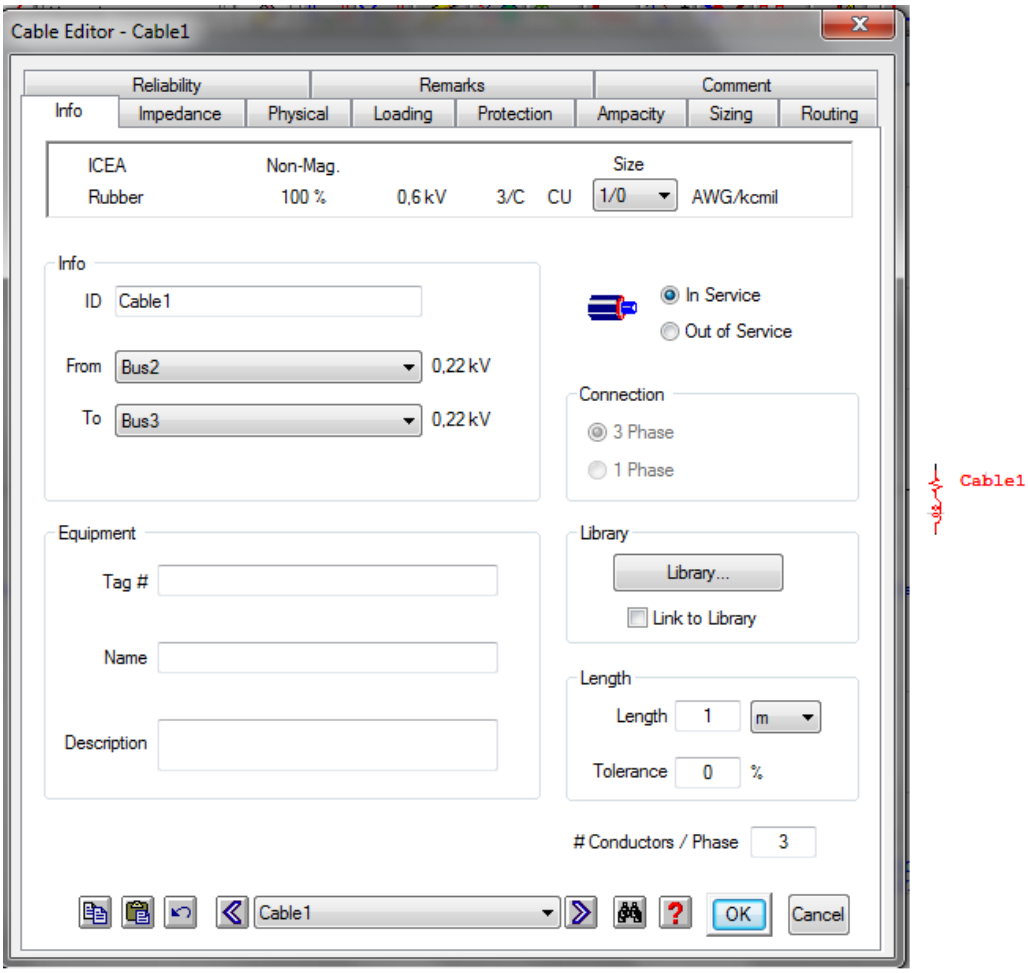


Figura 23. Parámetros del cable.
Fuente: Software ETAP

En la figura 21 se puede observar el formato donde se varían los parámetros de un cable, se puede poner la distancia en KM, metros, ft, y millas. Además cuenta con una librería para poner características del cable como el aislamiento y el calibre, lo que permite hacer una simulación muy confiable.

12.1.4 Construcción y simulación de la distribución eléctrica de la subestación 1.

El plano del sistema eléctrico de la subestación del edificio Gregorio XIII se presenta en el ANEXO 2 con su respectiva nomenclatura

En la construcción del plano de la subestación 1, se implementó cada carga con el 80 % de la capacidad soportado por los breakers, y esto genero una sobre carga sobre el barraje principal donde se encuentra el totalizador y mostró que estaba en peligro y grandes daños en el sistema de distribución, pero este tipo de caso no se da ya que las cargas no están pidiendo toda esta cantidad propuesta inicialmente, así que se decidió poner el consumo de cada carga según las medidas hechas con el dispositivo AMC 3945-B y así asemejar el consumo medido con respecto a la simulación. La distancia se aproximó y así se obtuvo el siguiente plano energético de la subestación 1 figura 22.

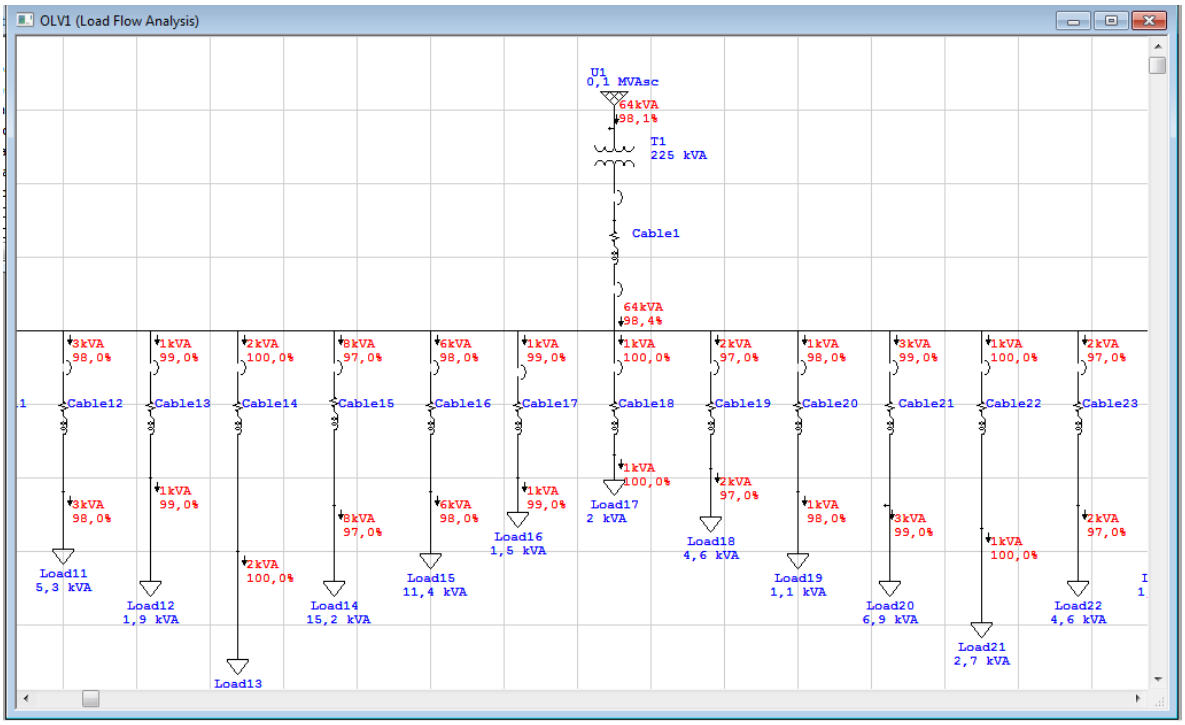


Figura 24. Parte del plano de distribución eléctrica Simulación subestación 1.
Fuente: Software ETAP

Se observa que el consumo en la fuente de potencia U1 es de 64 KVA, y el factor de potencia es de 98,1%, estos datos dependen de la eficiencia, la distancia a la que se encuentre cada carga y la capacidad que pueda soportar el breaker. Cabe resaltar que los datos determinados por ETAP son aproximados a las medidas obtenidas en el instrumento POWERPAD, en la tabla 11 se ilustran los datos medidos en la subestación 1 y se hace la comparación.

Se observa en la tabla 11 que el valor promedio de la potencia aparente (VA) es de 63.282 KVA, y el factor de potencia es de 0.981, semejante a la simulación anterior.

Nombre	Fecha	Hora	Prom	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
VA Total	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	63,282	12,468	141,110	k VA	7:00:00:00	(d:h:min:s)
VA1	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	20,504	3,226	49,086	k VA	7:00:00:00	(d:h:min:s)
VA2	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	19,671	4,111	46,122	k VA	7:00:00:00	(d:h:min:s)
VA3	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	23,107	4,661	53,095	k VA	7:00:00:00	(d:h:min:s)
var Total	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	3,071	-11,184	23,305	k var	7:00:00:00	(d:h:min:s)
var1	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	3,486	-3,802	9,447	k var	7:00:00:00	(d:h:min:s)
var2	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	-1,108	-5,960	6,864	k var	7:00:00:00	(d:h:min:s)
var3	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,693	-6,285	8,393	k var	7:00:00:00	(d:h:min:s)
W Total	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	61,900	10,478	139,183	k W	7:00:00:00	(d:h:min:s)
W1	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	20,077	2,898	48,349	k W	7:00:00:00	(d:h:min:s)
W2	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	19,148	3,189	45,704	k W	7:00:00:00	(d:h:min:s)
W3	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	22,676	3,818	52,447	k W	7:00:00:00	(d:h:min:s)

Nombre	Fecha	Hora	Prom	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
DPF Mean	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,968	0,859	1,000		7:00:00:00	(d:h:min:s)
DPF1	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,981	0,861	1,000		7:00:00:00	(d:h:min:s)
DPF2	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,942	0,758	1,000		7:00:00:00	(d:h:min:s)
DPF3	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,981	0,848	1,000		7:00:00:00	(d:h:min:s)
PF Mean	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,953	0,837	0,991		7:00:00:00	(d:h:min:s)
PF1	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,967	0,835	0,992		7:00:00:00	(d:h:min:s)
PF2	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,929	0,745	0,993		7:00:00:00	(d:h:min:s)
PF3	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,963	0,807	0,993		7:00:00:00	(d:h:min:s)
Tan Mean	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,183	0,009	0,570		7:00:00:00	(d:h:min:s)
Tan1	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	0,098	-0,572	0,461		7:00:00:00	(d:h:min:s)
Tan2	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	-0,262	-0,858	0,067		7:00:00:00	(d:h:min:s)
Tan3	09/03/2012	08:50:00.000 a.m.	-0,107	-0,624	0,068		7:00:00:00	(d:h:min:s)

Tabla 11. Potencias y factor de potencias de medición subestación 1.

Fuente: Base de datos, analizador de calidad de potencia POWER PAD Ref. 3945-B

En el figura 23 se ilustra la simulación de corriente consumida por la distribución en cada carga y el total que se observa en el punto donde se despliegan todas las cargas.

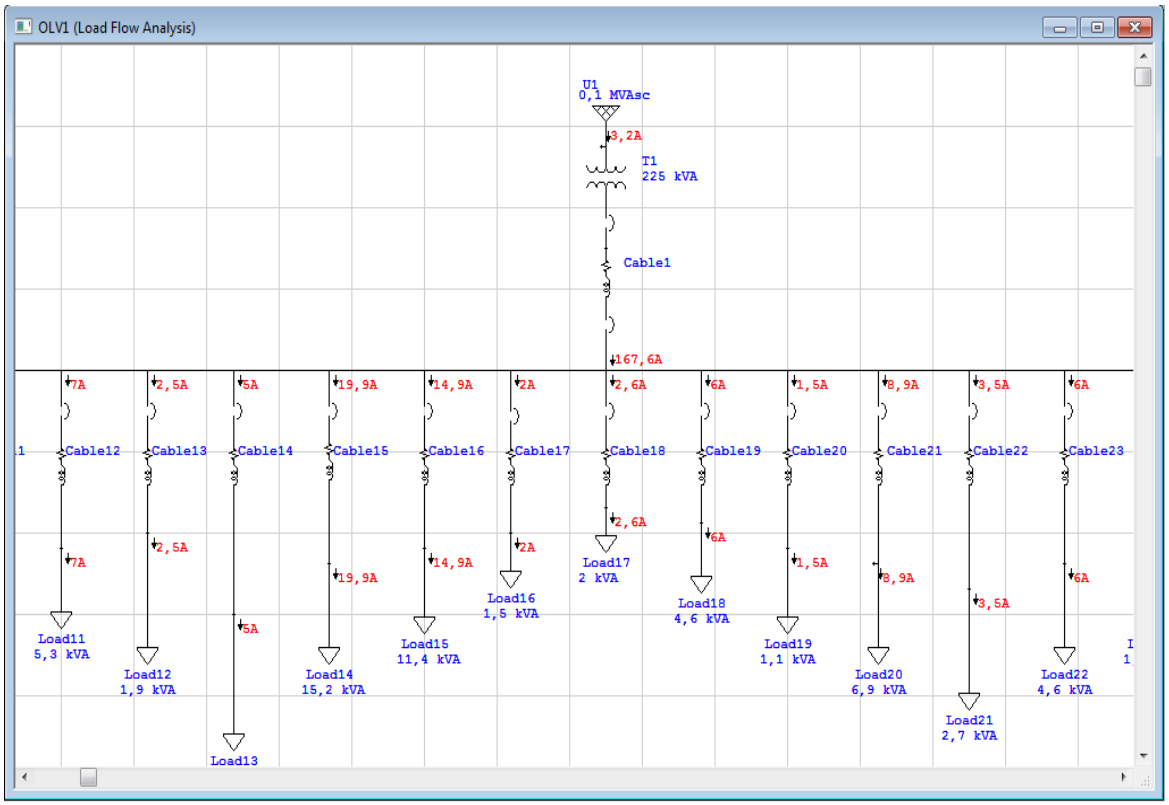


Figura 25.Simulación de corrientes del plano de distribución subestación 1.

Fuente: Software ETAP

12.1.5 **Otras características a simular.**

ETAP 7.5.0 es una herramienta muy útil para la construcción, diseño, análisis y simulación de sistemas de distribución eléctrica, ya que este software trae consigo una variedad de métodos y características que permite reportar y controlar fallos en tiempo real en un sistema de distribución eléctrica, teniendo los instrumentos de medición en varios sectores de la distribución que envíen los datos a través de servidores y ordenadores al Software y así tener un control energético desde una base y ser más eficientes en un consumo dado.

Una de las herramientas a simular son:

Armónicos:

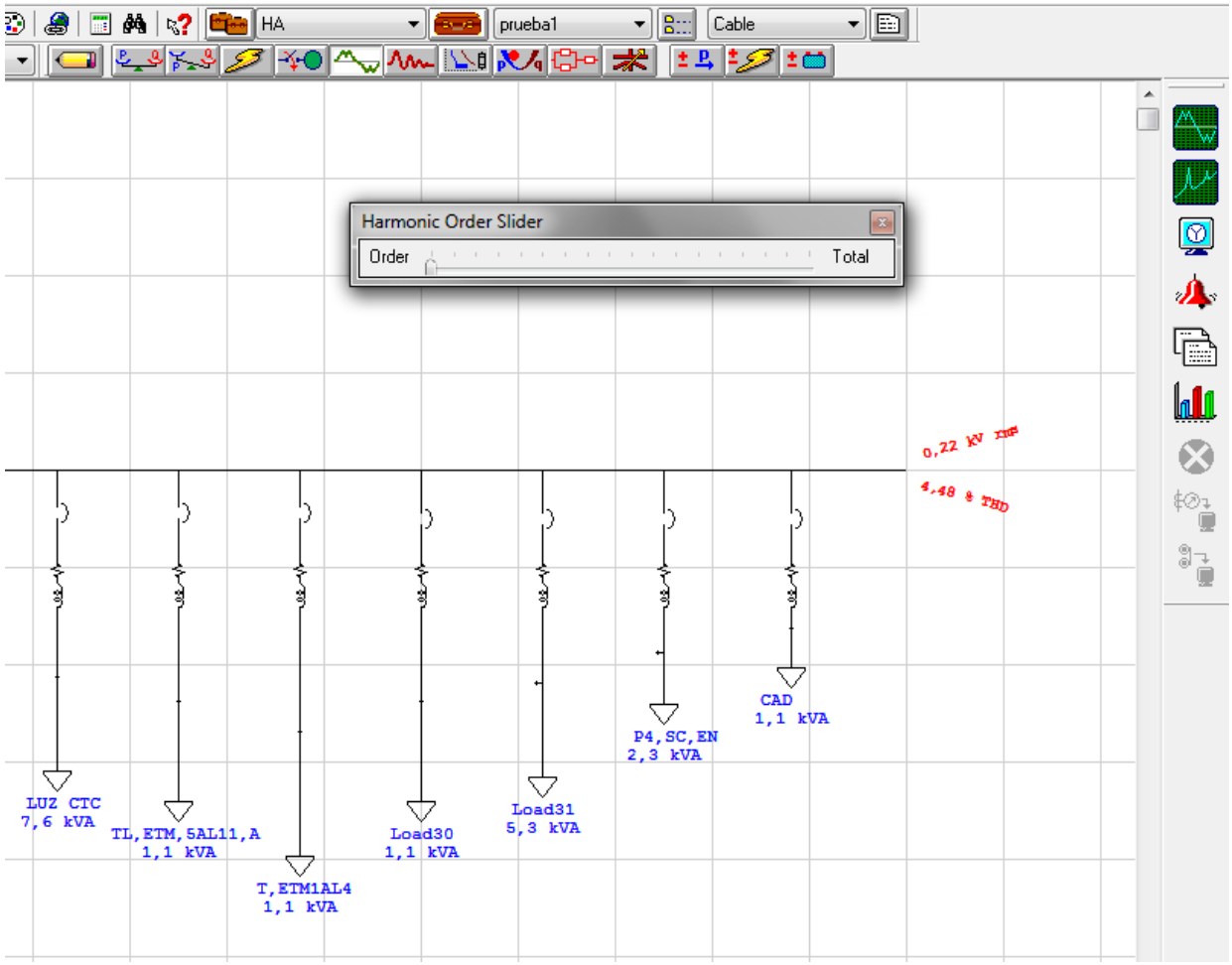
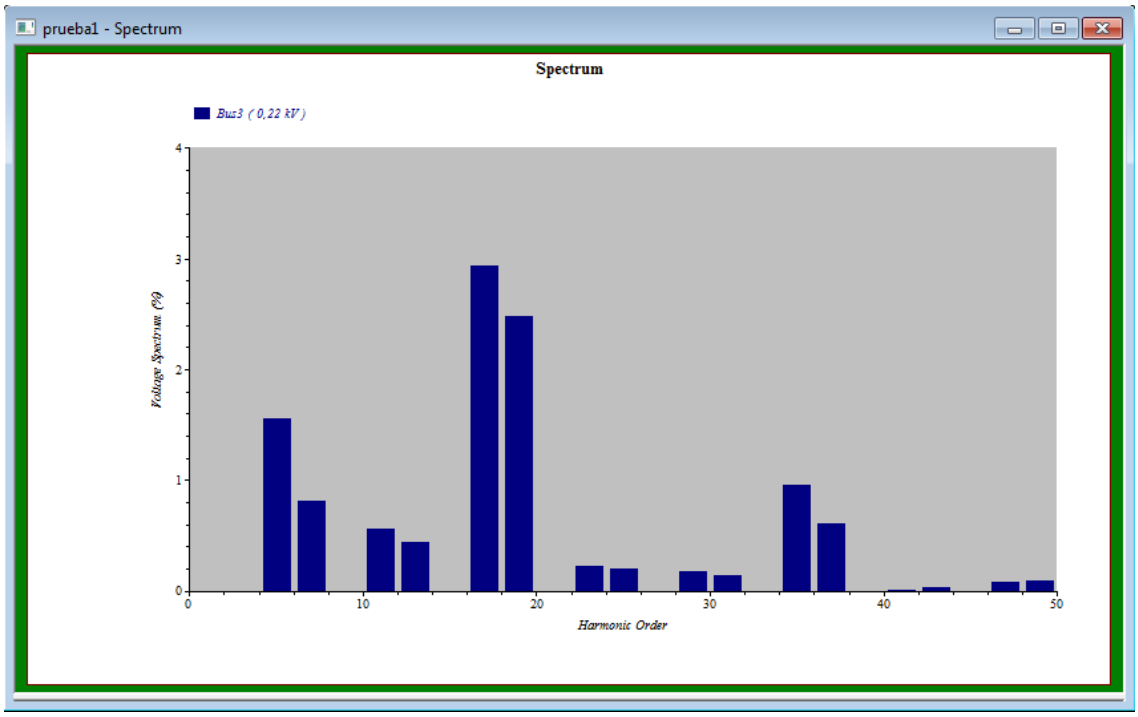


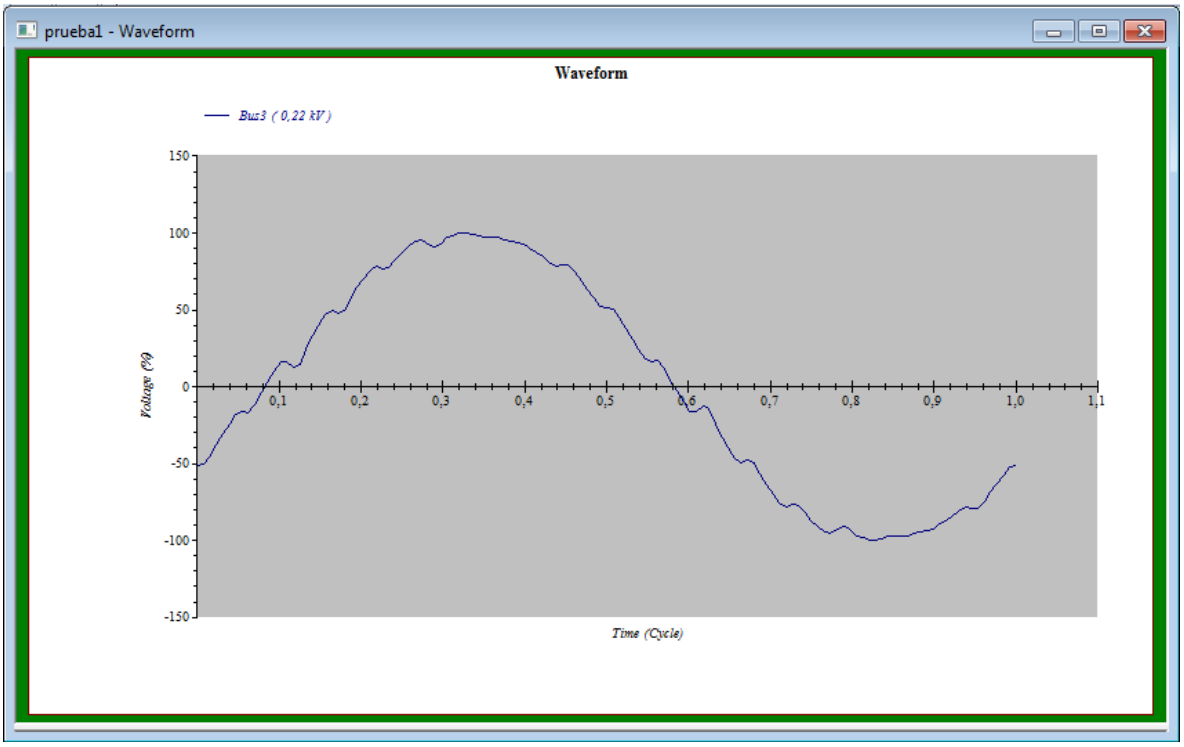
Figura 26. Simulación de distorsión armónica total.
Fuente: Software ETAP

En la Figura 24 se ilustra el valor de distorsión armónica total del diagrama unifilar de la Subestación 1; Se observa que el valor THD no excede el 5% lo cual cumple con el estándar IEEE 519 a continuación se mostrará las graficas espectral y forma de onda que arroja el software ETAP, con respecto al consumo de THD en el diagrama.



Gráfica 21. Gráfico del espectro con THD en el sistema.

Fuente: Software ETAP



Gráfica 22. Forma de onda con THD en el sistema.

Fuente: Software ETAP

Análisis en corto circuito:

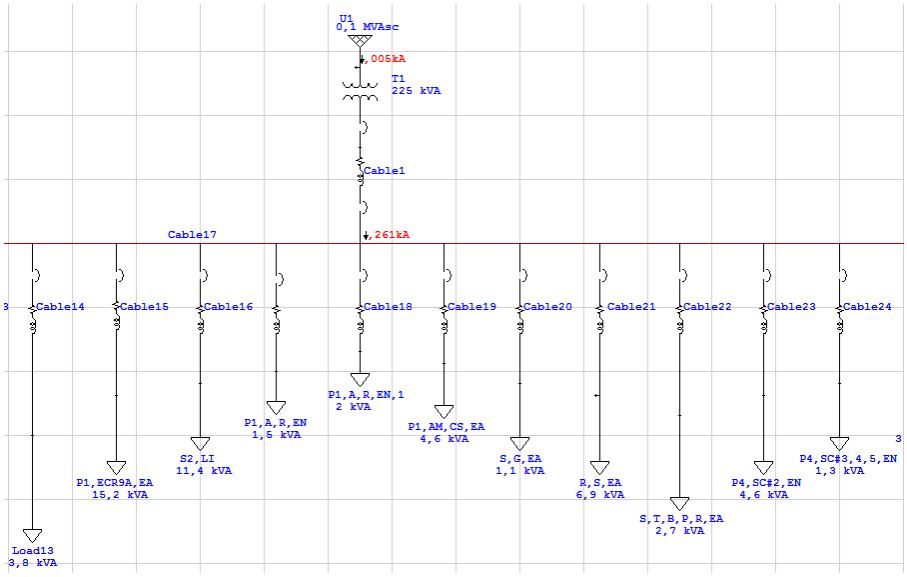


Figura 27. Análisis en corto circuito.
Fuente: Software ETAP

Se observa en la figura 25 el diagrama unifilar de la subestación 1, en el cual el software toma el bus principal de la línea y lo pone en falla, se puede ver que el software muestra con un color diferente (rojo) el bus en falla y el consumo de corriente que se está generando en el momento de que falle.

12.2 Subestación 2, edificio Biblioteca:

12.2.1 Montaje de la simulación SUBESTACION BIBLIOTECA (2):

En esta parte vamos a suponer que en la distribución eléctrica hay fallas de sobre carga y otros problemas, con el fin de mostrar los reportes que arroja ETAP cuando encuentra fallos en la red.

En la figura 26 se ilustra el sistema de distribución eléctrica de la subestación 2, y la simulación de la potencia y el factor de potencia generado. Se puede observar que el consumo de algunas cargas es muy elevado y excede la capacidad del transformador, lo que genera fallas y reportes por ETAP.

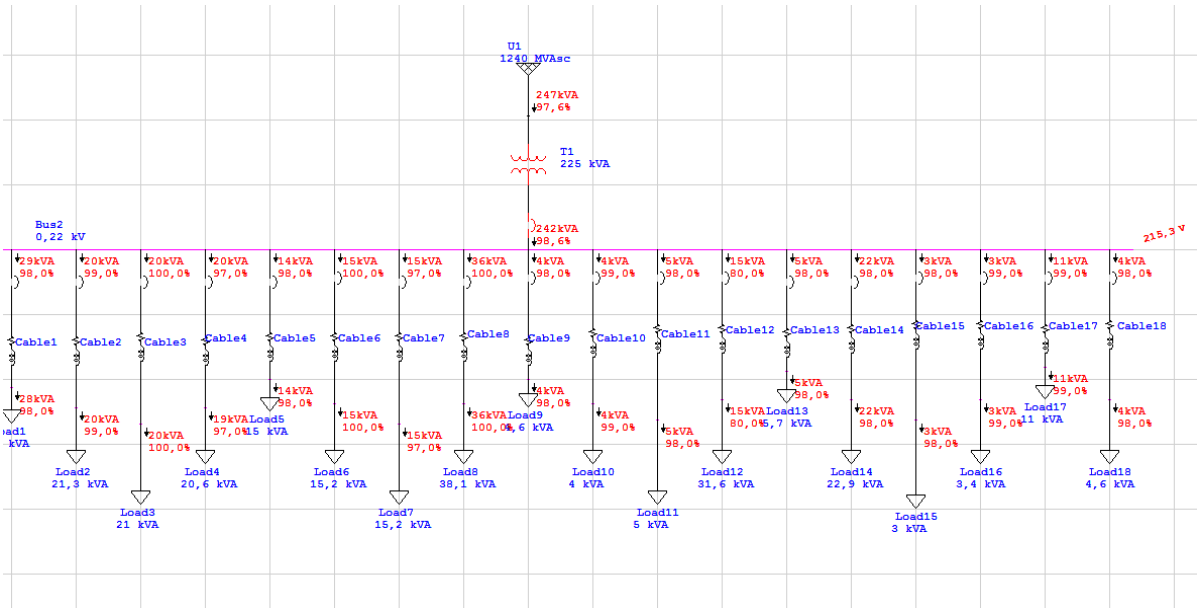


Figura 28. Sistema subestación 2.

Fuente: Software ETAP

El reporte generado por el software de simulación ilustra la condición, límite, operación, tipo y el nombre del dispositivo, el cual muestra en forma numérica y estadística lo que está sucediendo con cada elemento del sistema. En el tabla 12, se presenta la lista generada por el software y se puede observar que el transformador y el breaker general (totalizador), están en riesgos eléctricos y esto podría afectar a todo el sistema.

Load Flow Analysis Alert View - Output Report: subestacion2

Study Case: LF | Data Revision: Base
Configuration: Normal | Date: 11-30-2012

Critical

Device ID	Type	Condition	Rating/Limit	Operating	% Operating	Phase Type
CB1	LV CB	Overload	600 Amp	673,909	112,3	3-Phase
CB13	LV CB	Overload	70 Amp	70,179	100,3	3-Phase
T1	Transformer	Overload	0,225 MVA	0,251	111,4	3-Phase

Marginal

Device ID	Type	Condition	Rating/Limit	Operating	% Operating	Phase Type
Bus10	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,214	97,2	3-Phase
Bus11	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,215	97,6	3-Phase
Bus12	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,215	97,6	3-Phase
Bus13	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,215	97,6	3-Phase
Bus14	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,214	97,5	3-Phase
Bus15	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,215	97,6	3-Phase
Bus16	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,213	97	3-Phase
Bus17	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,215	97,6	3-Phase
Bus18	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,215	97,6	3-Phase
Bus19	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,215	97,6	3-Phase
Bus2	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,215	97,6	3-Phase
Bus20	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,215	97,6	3-Phase
Bus3	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,213	97	3-Phase
Bus4	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,214	97,3	3-Phase
Bus5	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,215	97,6	3-Phase
Bus6	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,214	97,1	3-Phase
Bus7	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,214	97,5	3-Phase
Bus8	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,214	97,4	3-Phase
Bus9	Bus	Under Voltage	0,22 kV	0,214	97,4	3-Phase

Tabla 12. Reporte de simulación.
Fuente: Software ETAP

En la figura 28 se observan las corrientes con valores que sobrepasan lo soportado por el totalizador general (CB1), ubicado después del transformador; este sobrepaso de capacidad hace que el sistema se apague por completo, lo que generaría grandes problemas a una empresa o edificación.

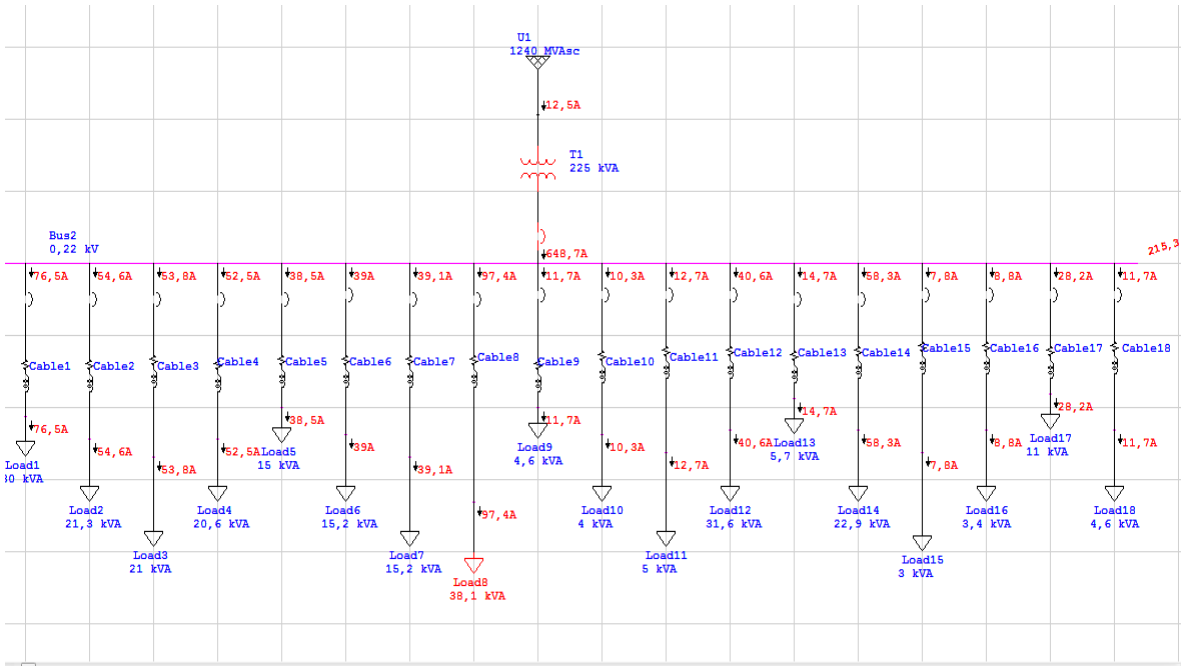


Figura 29. Corriente de subestación 2.

Fuente: Software ETAP.

Gracias a los beneficios que nos ofrece ETAP se tendría un control y monitoreo completo de la distribución eléctrica de cualquier edificación, en este caso la Universidad Santo Tomas no tiene ningún fallo según las simulaciones y mediciones de calidad que se han hecho, pero para futuros problemas o fallos que se presente en la distribución eléctrica de la edificación, se plantea un monitoreo y control en sectores específicos del edificio Gregorio XIII, para tener un sistema eficiente que beneficie a la universidad en costos y soluciones eficaces a problemas que se presente, y este generaría un impacto ambiental positivo para la ciudad como para los que están dentro de esta edificación.

13. MONITOREO DE LA CALIDAD DE POTENCIA

El detectar, controlar, supervisar y administrar anormalidades en un sistema de distribución eléctrico permite que la mayoría de edificaciones lleguen a ser eficientes y razonables en el uso de energía. Esto ha permitido que la investigación y el desarrollo sean las que promuevan y den nuevas soluciones para dichos problemas. Es aquí donde nace la iniciativa de hacer un diseño que monitoreé y controle en sitios estratégicos la distribución eléctrica en la sede central de la Universidad Santo Tomás.

Este tipo de solución permite la lectura, visualización y registro de cada centro de consumo de forma individualizada. Permitiendo un monitoreo y control de zonas o departamentos, observando los valores de consumo de cada sector. También el personal de mantenimiento y de seguridad necesita información en tiempo real para la toma de decisiones ante una emergencia o incluso en un momento de alto consumo energético. Algunos elementos para el monitoreo son: analizadores de red, pantallas con planos claros e intuitivos facilitan este tipo de gestión. La contribución que se realiza en la sociedad es evitar el mal gasto de energía, que es a su vez una obligación dentro de un consumidor industrial o de edificación; esto puede lograrse mediante la instalación de analizadores de red con alta precisión de medida para la energía, se garantiza el rendimiento, la seguridad y el comportamiento funcional de la distribución eléctrica, cumpliendo con los requerimientos de las instalaciones industriales más modernas.

Aparte de tener elementos de control y monitoreo de alta calidad también se debe tener una administración energética que permite a una empresa determinar, mejorar y analizar sistemáticamente y continuamente su consumo de energía. Dicha administración se ha de integrar en el nivel de gestión y consta de medidas organizacionales y de inversión, este tipo de administración energética se puede determinas como el desarrollo e integración de un sistema para recogida, análisis, documentación, y visualización de datos energéticos así como regulación y control del consumo energético en edificios.

Entonces se determina que el uso eficiente de la energía es un factor importante para el éxito de una empresa o industria. La fiabilidad del suministro de energía influye de modo decisivo sobre la rentabilidad de la institución. Los precios crecientes de la energía y las leyes sobre las emisiones de gases invernadero hacen que se revise el consumo de energía de la distribución eléctrica.

Los primeros pasos antes de hacer un montaje de control y monitoreo de energía, es el análisis de calidad y el reconocimiento de la distribución eléctrica de la Universidad; para este caso se toman los datos obtenidos por el POWERPAD y se observan las simulaciones hechas por ETAP; con estos datos se hace un estudio

estratégico de los puntos de la distribución y se obtiene la cantidad de sensores y dispositivos de medición serían necesarios instalar a la red eléctrica.

ETAP dentro de sus prestaciones tiene una aplicación que es llamada Real-Time, esta administra la energía de instalaciones en cuanto a procesos de generación, transmisión y distribución se refiere, además ofrece la posibilidad de monitoreo, control y optimización de sistemas de potencias. Unas de las características importantes de ETAP Real- Time es el monitoreo avanzado, dentro de sus prestaciones están: monitoreo en tiempo real, recuperación de datos en línea, Estimador de estado y distribución de carga, chequeo de consistencia, corrección de datos erróneos, manejo de alarmas y administración de costos de energía. Otra característica son: Uso de energía y análisis de costos, simulación en tiempo real, reproducción de eventos, desprendimiento inteligente de carga y optimización.

La arquitectura y configuración de ETAP ofrece una integración natural, Interfaz OPC, Base de datos ODBC/SQL, amplio acceso, Plataformas Windows y XP, certificación ISO 9001 A3147, Independiente del hardware. Con estas características se puede implementar un buen diseño y usar varios dispositivos para hacer el control y monitoreo a la Universidad.

Con este tipo de aplicación se hace el planteamiento a la Universidad Santo Tomás para poder hacer el control y monitoreo en la subestación de la sede central.

13.1 Propuesta de diseño:

Para establecer un monitoreo y control de la distribución eléctrica del edificio que contiene la subestación 1, es importante conocer cuáles son las áreas fundamentales para la instalación de dispositivos y la ubicación de sensores en las edificaciones y así tener un número aproximado de medidores de energía que se deben implementar.

Se plantea utilizar la red de comunicaciones de la Universidad en el cual solo se harán las interconexiones de los dispositivos de monitoreo y los sensores en los sectores que se vayan a implementar. Teniendo en cuenta que los dispositivos manejan un tipo de comunicación RS-485 en el cual se puede tener una comunicación hasta de 1200 mts, no se tendría que instalar repetidores ya que la infraestructura no sobrepasa esta cantidad de distancia.

Como plan estratégico se sugiere ubicar un dispositivo de medición (Unidad Terminal Remota RTU) en toda el área de sindicatura (quinto piso edificio nuevo), en los laboratorios de ingenierías, salas de computo (cuarto piso edificio nuevo), en las bombas de la plazoleta (sótano, restaurante), en el Aula Magna, y en los pisos diferentes a los que se encuentran ya nombrados. Adicionalmente se recomienda ubicar sensores de control de luz en los pasillos que no sean muy

frecuentados: cuarto piso de arcos, escaleras occidentales del cuarto y quinto piso, en los salones del tercer piso del edificio nuevo. En la siguiente figura 30 se muestra el diagrama de la ubicación de los dispositivos. Las consolas de ETAP estarán instaladas en la sala de cómputo del cuarto piso del Edificio Nuevo, ya que ahí es el puesto de control de la Universidad actualmente.

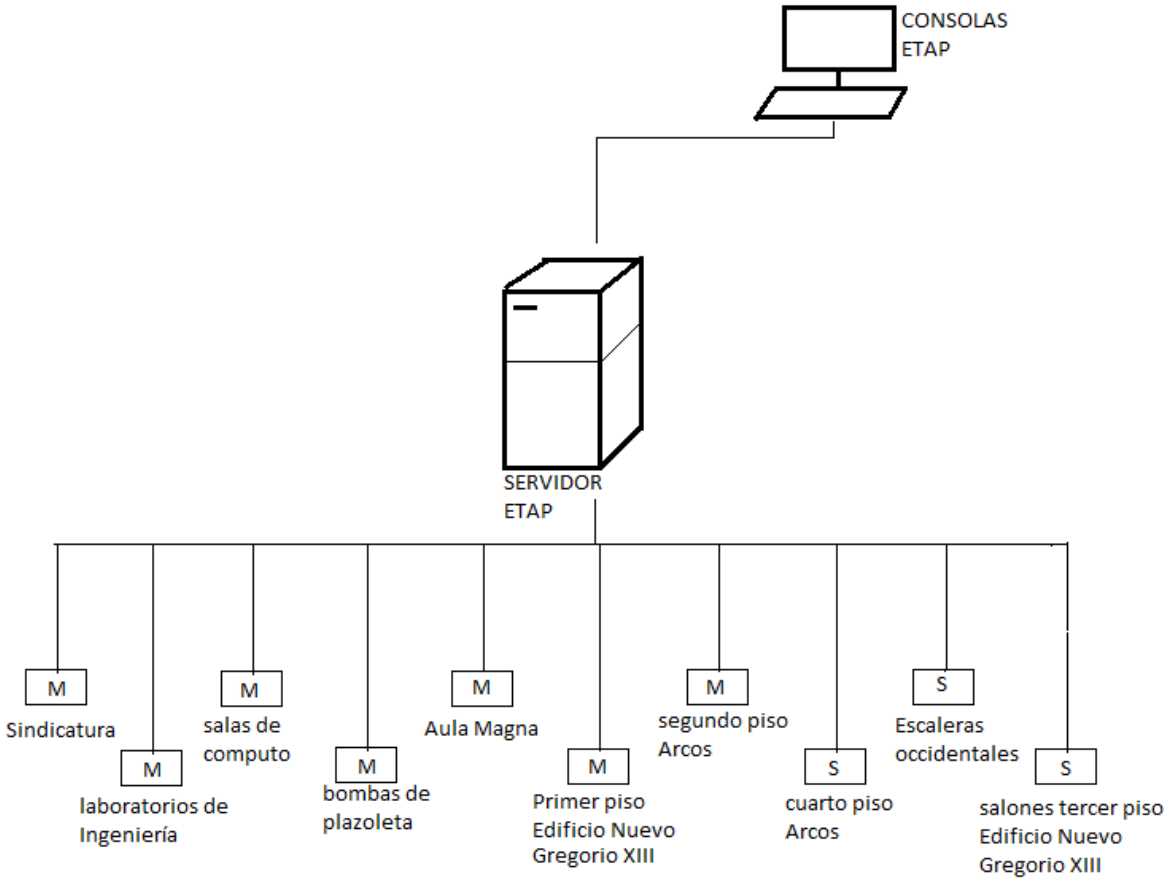


Figura 30.Bosquejo de monitoreo y control.
Fuente del autor.

M: Dispositivos de Medición
S: Sensores de control.

Con una comunicación RS-485 cumple con los requerimientos para una red de comunicaciones de diferentes y múltiples puntos, este tipo de estándar especifica que se puede usar 32 dispositivos con comunicación bidireccional, half dúplex, sobre uno o dos pares de cable trenzado. Otras de las características de este tipo de comunicación son: Se puede instalar tanto en sistemas de 2 hilos o de 4 hilos, interfaz diferencial, conexión multipunto, alimentación única de +5v, velocidad máxima de 10Mbps en 12 metros y 100Kbps en 1200 metros y rango del bus de -

7V A+12V.Tambien es compatible con la conversión a RS-232 y así unir el dispositivo con el computador. Este tipo de comunicación se puede implementar ya que con el solo hecho de usar el par trenzado de la red telefónica de la Universidad se podría dar solución al monitoreo y control de la energía. Antes de cualquier instalación se hará estudios de las líneas de transmisión escogidas para evaluar las perdidas por los diferentes factores que existan.

El servidor tendrá estas características mínimas: Intel Pentium Xeon-3.2GHz con un procesamiento múltiple simétrico (DUAL), con tecnología Hyper-threading (Dual-core), sistema de bus equivalente AMD. 2GB RAM (RDRAM o alta velocidad DDR RAM). El sistema operativo MICROSOFT SERVER 2003 (service pack 1).

Los dispositivos de medida como de control son conectados por una red de cableado en el cual solo es necesario utilizar un par trenzado, ya que en un cable UTP de categoría 5 y posteriores ofrece cuatro pares de este tipo de cable, las conexiones llegaran al cuarto de telecomunicaciones y ahí por medio de un conmutador (switch), los datos serán enviados al servidor y este a los equipos de computo de control y así se tendría un monitoreo y supervisión en tiempo real de los sectores de la Universidad Santo Tomás.

Si no se llegará tener capacidad en la red cableada ya instalada en la Universidad, para la instalación de los dispositivos de control y medida, Se tendría que hacer un diseño de cableado estructurado eficiente para la conexión de estos dispositivos y así tener cableados horizontales como verticales nuevos para la interconexión de la RED de control y monitoreo de energía.

De este modo se implementaría una solución para el control y monitoreo de la energía de la Universidad Santo Tomas.

Ventajas.

- Adquisición de diferentes valores de medición representados en un display LCD grafico de forma clara y sencilla.
- Transparencia en el flujo de energía desde la alimentación al consumidor, que se ve completada con la integración a los sistemas de automatización y gestión de energía de nivel superior de manera sencilla.
- Optimización del suministro y de las inversiones, con el apoyo al negociador del contrato energético.
- Obtención de una medida de energía fiable y en tiempo real.
- Identificación de cargas con alto consumo energético.
- Mantenimiento optimizado (diagnostico preventivo)
- Registro preciso de todos los datos de consumo en toda la distribución de energía.

- Visualización y registro de calidad de la potencia de forma estructurada y clara en el punto de medida.
- Tecnología digital de última generación.
- Trae consigo beneficios ambientales y económicos a largo plazo.

Desventajas:

- El costo de inversión es alta.
- Dificultad en la instalación por la causa de la red de comunicaciones existente en la Universidad.

13.2 Dispositivos de monitoreo:

Circutor:

Instrumento de medida programable; ofrece una serie de posibilidades de empleo, las cuales pueden seleccionarse mediante menús de configuración en el propio dispositivo. Mide, calcula y visualiza los principales parámetros eléctricos de redes industriales trifásicas equilibradas o desbalanceadas.

Analizador de redes eléctricas, Circutor CVM-NRG96:

Características:

- Instrumento de dimensiones reducidas (96x96x50).
- Medición en verdadero valor eficaz.
- Valores instantáneos, máximos y mínimos de cada parámetro.
- Función medidor de energía. 1GWh en energía consumida. 100 MWh en energía generada.
- DISPLAY LCD RETRO-ILUMINADO.
- Comunicaciones RS485 (Modbus RTU) incorporado.

Otras características:

A. Tensión de alimentación:

- Versión Estándar:
- Alimentación: 230 V c.a.
- Frecuencia: 50-60 Hz
- Tolerancia alimentación: -15% / +10%
- Regleta conexión: Bornes 1-2 (Power Supply)
- Consumo del equipo: 5 V·A
- Versión Plus:
- Alimentación: 85…265 V c.a. // 95…300 V c.c.

- Frecuencia: 50-60 Hz
- Regleta conexión: Bornes 1-2 (Power Supply)
- Consumo del equipo: 5 V·A

B. Tensión máxima en el circuito de medida:

- Tensión: 300 V _ c.a. fase-neutro
  520 V _ c.a. fase-fase
- Frecuencia: 45…65 Hz

C. Intensidad máxima admisible:

- Intensidad: Transformadores exteriores de In /5A.

D. Características transistor (salida):

- Tipo NPN: Transistor Opto-aislado/Colector Abierto
- Tensión máxima de maniobra: 24 V.d.c.
- Intensidad máxima de maniobra: 50 mA
- Frecuencia máxima: 5 pulsos / segundo
- Duración pulso: 100 ms

E. Condiciones de trabajo:
- Temperatura de trabajo: -10 ºC / +50ºC
- Humedad relativa: 5 a 95 % HR (sin condensación)
- Altitud: hasta 2.000 metros

F. Seguridad:
- Diseñado para instalaciones categoría III 300 V _ c.a. (EN 61010).
- Protección al choque eléctrico por doble aislamiento clase II.

Figura 31. Circutor.

Fuente: Manual de usuario, versión extendida. Circutor CVM-NRG96

Mediante su procesador, la central de medida permite analizar simultáneamente.

MAGNITUD	UNIDAD	L1	L2	L3	III
Tensión Simple	*V*	•	•	•	
Tensión Compuesta	*V*	•	•	•	
Corriente	*A*	•	•	•	••
Frecuencia	*Hz*	•			
Potencia Activa	*kW*	•	•	•	•
Potencia Reactiva L	*kvarL*	•	•	•	•
Potencia Reactiva C	*kvarC*	•	•	•	•
Potencia Aparente	*kVA*				•
Factor de Potencia	*PF*	•	•	•	
Cos φ	Cos φ				•
Máxima Demanda	*Pd*	•			
Corriente de Neutro	I_N	•			
THD de Tensión	*% THD – V*	•	•	•	
THD de Corriente,	*% THD – A*	•	•	•	
kWh (*consumo y generación*)	*W·h*				•
kvarh.L (*consumo y generación*)	*W·h*				•
kvarh.C (*consumo y generación*)	*W·h*				•
kVAh (*consumo y generación*)	*W·h*				•
Descomposición armónica (V y A) *	*%*	•	•	•	*15th*

✓ (•) Disponible por display y comunicaciones.
✓ (••) Disponible sólo por comunicaciones.
✓ (*) Descomposición armónica en modelo *HAR*.

Tabla 13. Características del analizador de redes eléctricas, Circutor CVM-NRG96.

Fuente: Manual de usuario, versión extendida. Circutor CVM-NRG96

Analizador de redes eléctricas, Circutor SHARK 200:

Características generales:

- Diseño compacto
- Clase 0,2 en energía, precisión típica de 0,1%
- Puerto frontal serie para programación una vez instalado
- RS-485 integrado (protocolos Modbus y DNP 3.0)
- Autorrango en tensión e intensidad

Tecnología líder en la Industria

- Prestaciones de medidor de facturación
- Bajo costo

Funciones básicas:

1. Medidor multifunción; se miden todos los parámetros de una red trifásica: V, I, cosφ, f, %THD, y potencia y energía - Measures Every Aspect of Power including Volts, Amps, Freq, %THD and All Energy Functions

2. Pulso KYZ para la certificación de la precisión; el equipo tiene típicamente una precisión del 0,1%, esto es verificable con la salida de pulso KYZ
3. Puerto RS 485; protocolo Modbus y DNP 3.0
4. Barógrafo – Escala en % para tener una idea inmediata de la medida
5. Programación simple e intuitiva
6. Puerto óptico – Puesta en marcha y configuración posible desde una PDA o un portátil
7. Minimización de opciones – Entradas con autorrango y alimentación AC/DC
8. Dos posibilidades para la entrada de corriente: sin conexión: el cable se pasa a través del equipo, con conexión: la forma típica Superior Current Inputs – Wire direct CT inputs or use Current "Gills"
9. Hueco necesario mínimo - es necesario únicamente un hueco de 92×92 mm en un panel
10. Elevada relación calidad precio - es el equipo superior de su clase
11. Tecnología V-Switch: un vez instalado y bien desde la red o el puerto óptico pueden aumentarse las funciones de medida:
    1. V2 – Capacidad de registro de 2 MB
    2. V3 – V2 + Análisis de armónicos
    3. V4 – V3 + Alarmas y funciones de control

Características técnicas:

1. Precisión - 0.1% ó superior para energía. Cumple ANSI C-12.20, IEC 687 Clase 0.2%
2. Comunicación – Protocolo Modbus 57.6 kb (RS 485 y puerto IRDA)
3. Frecuencia de muestreo – 400+ Samples per Cycle / 24 Bit A/D Resolution
4. Protección entradas de corriente – 20x límite del rango por 10 segundos
5. Tensión – 0 ~ 720 V L-L (precisión de 0,1% para 69~420 V L-N)
6. Corriente – 0 ~ 10 A (la precisión se garantiza para 0,15~5A)
7. Rango de frecuencias – 45 ~ 65 Hz

Las funcionalidades de comunicación y las entradas/salidas son ampliables incluso una vez instalado:

- Ethernet: puerto RJ 45, posibilidad de enviar alarmas por correo electrónico, aplicación "Total Web Solutions": la tarjeta aloja una página web con todos los parámetros medidos
- Puerto de fibra óptica con entrada salida (57,6 kb)
- Salidas analógicas, 4 canales 0~1 mA ó 4 ~20 mA.
- Entradas de control
- Las tarjetas hardware se detectan automáticamente

14. ANALISIS D.O.F.A.

DEBILIDADES (Internas)

Durante la ejecución del proyecto se presentaron algunas dificultades para su ejecución, tales como: falta de capacitación y experiencia del software ETAP, ya que durante el tiempo de aprendizaje en la carrera no se manipulo; la dificultad para acceder a los puntos de medición, debido a que no se contaba con los implementos de seguridad ni conocimientos necesarios para la conexión de los dispositivos de medición en las subestaciones de energía.

OPORTUNIDADES (Externas)

Como ingenieros electrónicos, dada la formación interdisciplinar recibida, se está en la facultad de incursionar en diferentes áreas tales como: potencia eléctrica, medicina, comunicaciones, control y automatización, programación, gerencia de proyectos, entre otras; con capacidades de disciplina, responsabilidad, respeto, liderazgo, excelencia y compromiso consigo mismo, con la sociedad y el medio ambiente.

La oportunidad de inversión por parte de la Universidad, para adquirir los equipos de medición necesarios para realizar el análisis energético de sus instalaciones y la capacitación para su manejo.

El acompañamiento realizado por el Ingeniero Edwin Forero, de la facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Santo Tomas, fue indispensable para el desarrollo de este proyecto, gracias a sus conocimientos, aportes y experiencia, que destaco la excelencia de sus estudiantes.

FORTALEZAS (Internas)	El conocimiento adquirido durante la formación universitaria, demanda del estudiante el trabajo en equipo, la investigación, la capacidad de solucionar problemas y la importancia de ser agentes de cambio en la sociedad. La oportunidad de adquirir conocimiento en la normatividad colombiana e internacional, en el ámbito energético, la experiencia en el manejo de dispositivos de medición y el uso del software ETAP, que permite al estudiante generar aportes a nivel social, económico y ambiental en la Universidad y en el país.
AMENAZAS (Externas)	Algunas dificultades presentes durante la ejecución del proyecto fueron la limitación para acceder a la norma NTC 2050 en la biblioteca, ya que el material no podía ser retirado para su estudio, y la dificultad para acceder a los puntos de medición debido a que algunos permisos fueron negados por parte del área de mantenimiento por falta de comunicación y/o por la disponibilidad del técnico electricista de la edificación, que generaron retrasos en el proyecto.

15. CONCLUSIONES

La importancia en el desarrollo de planes estratégicos a nivel energético en una entidad educativa que cuenta con aproximadamente 12.000 personas, entre estudiantes y personal, y que tiene una jornada de funcionamiento 16 horas diarias, es dado por el alto impacto que tiene en la sociedad. Es por esta razón que como profesionales en el área energética, realizamos aportes dentro y fuera de la Universidad Santo Tomás, contribuyendo con el desarrollo sostenible del país, a través de ideas y estrategias que aumenten el uso eficiente de la energía, a través de la evaluación del sistema eléctrico y la implementación de sistemas de control y monitoreo.

Los sistemas de energía eléctrica deben cumplir las normas establecidas en el país y en el mundo, con el fin de salvaguardar la seguridad de las personas y los bienes y por el uso eficiente de la energía. Es por esta razón, que con base en las normas NTC 2050 y RETIE, se realiza una lista de chequeo que permite evaluar los espacios, rótulos, cableado, puestas a tierra y el sistema de distribución en general, dentro de la institución. De acuerdo a esto, se concluye que el sistema energético de la Universidad Santo Tomás, está dentro de los límites y cumple a cabalidad con los espacios de seguridad en tableros que se establecen en las normas.

Para continuar con el proceso de evaluación, se realiza el levantamiento de planos eléctricos mediante la plataforma computacional ETAP, que adicionalmente permite la simulación de cargas y de cada uno de los elementos que componen el sistema de distribución. A través de acciones de falla en el sistema, la simulación, permite observar los sectores de posibles daños dentro de la institución y los lugares en que se debe tener mayor atención en la implementación de un sistema de monitoreo y control de energía, tales como: laboratorio de ingeniería, aulas de conferencia y pasillos principales.

Dentro del proceso de análisis de calidad de energía eléctrica, se cuenta con la normatividad internacional, recomendaciones que establecen los límites en carga, voltajes, corrientes, potencia, distorsión armónica, entre otros parámetros, para que los sistemas eléctricos cuenten con un excelente rendimiento y hagan uso eficiente de la energía. Utilizando el analizador de calidad de energía (POWER PAD 3945-B) se encuentra que la Universidad acata estas recomendaciones, haciendo que el sistema este dentro de los rangos convenientes de funcionamiento, aprovechando la energía en un 98% en las horas del día, sin embargo en las noches y días domingos y festivos (tiempo de no funcionamiento) el factor de potencia es muy bajo (aproximadamente del 75%), lo que se debe a una descompensación en las cargas, y que debe ser tenido en cuenta en el plan de monitoreo.

Ahora bien, basados en el análisis y al plano unifilar diseñado, se plantea una estrategia para ser implementada a futuro en la Universidad Santo Tomás, Sede Central, con el fin de monitorear y controlar el consumo energético en los diferentes sectores de la edificación, mejorando la administración del sistema, y generando mayor facilidad de mantenimiento, con respecto a la locación de fallas. El plan estratégico consiste en la ubicación de sensores de detección para regular la iluminación en los sectores menos transitados de la universidad y equipos de monitoreo de calidad de energía ubicados en sitios específicos de la edificación. Para realizar la comunicación entre los dispositivos y un ordenador, es necesario realizar un estudio del cableado estructurado con el que cuenta actualmente la institución y de esta manera plantear los caminos necesarios para la conexión.

Cabe anotar que son varios los beneficios que se adquieren al tener un sistema de monitoreo y control del consumo energético en la Universidad. Por un lado existe un uso racional y eficiente de la energía, que contribuye con la integridad social y ambiental del país, y por otro lado la reducción de costos financieros a largo plazo para el usuario, ligado al bajo consumo y reducción en los valores de las facturas de la empresa de suministro de energía. Además, la Universidad tendría la posibilidad de acceder a la certificación LEED (Líder en Eficiencia Energética y Diseño Sostenible), por contar con un sistema de abastecimiento energético que contribuye al desarrollo sostenible y al uso eficiente de la energía eléctrica (Ver ANEXO 3).

Como ingenieros electrónicos estamos en la facultad para estudiar, analizar, solucionar problemas de interés social, económico, tecnológico y ambiental, y la producción de conocimiento que aporte a nuevos proyectos ingenieriles, como la lista de chequeo elaborada a partir de las normas y los estándares, selección de equipos, el manejo del software ETAP, simulación de sistemas de potencia, y proposición de planes de mejora, son parte del resultado de un compromiso como profesionales con el ambiente y la sociedad.

16. ANEXO 1

Revisión de Tableros o Alimentadores.
Tablero No:

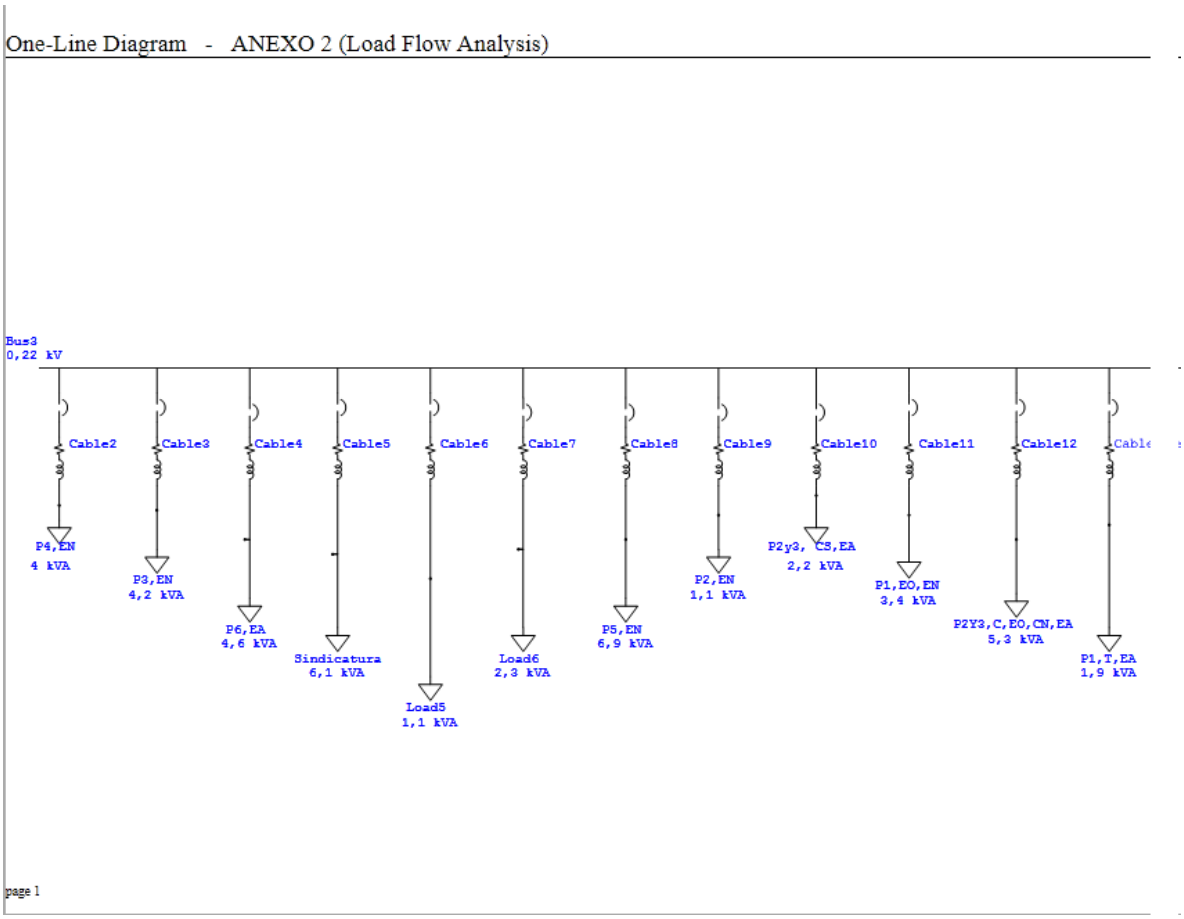
Descripción	**Cumple**			**Observaciones**
	SI	NO	N/A	
Equipo con encerramientos metálicos, **Acceso controlado por cerradura y Rotulo con símbolo de precaución.**				
Armarios instalados de modo que el borde delantero del mismo no **quede metido más de 6 mm por debajo de la superficie de la pared**; en paredes de material no combustible.				
En paredes de material combustible**, los armarios están a nivel con la superficie o sobresalir de la misma.**				
Los conductores están bien sujetos al armario, y las aberturas a través de las cuales los cables entran están cerradas adecuadamente.				
Conductores no doblados dentro de un armario a no ser que exista una canaleta con una anchura según la Tabla 373-6(a).				
El armario y tablero debe tener **espacio suficiente para que quepan holgadamente todos los conductores** instalados en ellos.				
Rotulados de forma duradera por el fabricante **con su corriente y tensión nominales, el número de fases para los que están diseñados y el nombre del fabricante o marca comercial**, de manera visible y sin que los rótulos estorben la distribución o alambrado interior.				

Todos los circuitos del tablero de distribución y sus modificaciones se deben identificar **de manera legible en cuanto a su finalidad o uso, en un directorio situado en la puerta del tablero o en su interior.**				
El tablero de distribución debe **estar dotado de medios físicos que eviten la instalación de más dispositivos de sobrecorriente para los que el tablero de distribución está diseñado**, dimensionado y aprobado.				
El tablero de distribución **se debe proteger individualmente en el lado del suministro por no más de dos interruptores automáticos o dos juegos de fusibles cuya capacidad de corriente combinada no sea superior a la del tablero de distribución.** Con excepciones que se encuentra en el articulo correspondiente (NTC2050 384-16 (a))				
El tablero de distribución **equipado con interruptor de acción rápida de 30 A nominales** o menos deben tener un dispositivo de protección contra sobrecorriente que no supere los 200 A.				
La carga continua de cualquier dispositivo de sobrecorriente situado en un tablero de distribución **no debe superar el 80 % de su capacidad de corriente nominal cuando, en condiciones normales, la carga se mantenga durante tres horas o más**. Con excepciones que se encuentra en el articulo correspondiente (NTC2050 384-16 (c))				
Tablero de distribución alimentado a través de un transformador, la				

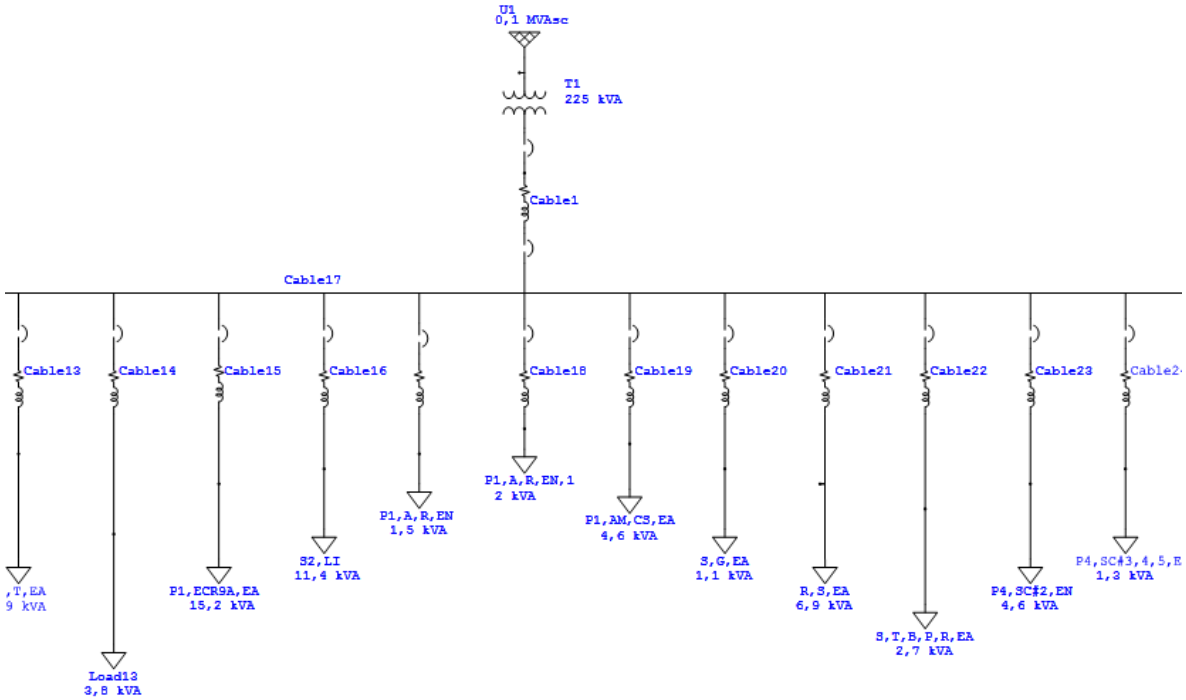
protección contra sobrecorriente **deberá estar situada en el lado del secundario del transformador**. Con excepciones que se encuentra en el articulo correspondiente (NTC2050 384-16 (d))				
Tablero de distribución con interruptores automáticos en delta. **Por normatividad no se debe tener**				
El tablero de distribución **debe ir montado de modo que quede por lo menos 6,4 mm de espacio libre entre el encerramiento y la pared** u otra superficie de soporte. Los armarios o cajas de corte instalados en lugares mojados, deben ser de tipo a prueba de intemperie.				
El tablero de distribución se debe montar en armarios, cajas de corte o encerramientos diseñados para ese uso**, y deben ser de frente muerto.** Con excepciones que se encuentra en el articulo correspondiente (NTC2050 384-18)				
Si se utiliza el tablero de distribución con canalizaciones o cables no metálicos o si existen conductores de puesta a tierra independientes, **estos tienen instalado dentro del armario una regleta terminal para esos conductores. La regleta debe estar conectada equipotencialmente con el armario y el marco del panel de distribución.** Con excepciones que se encuentra en el articulo correspondiente (NTC2050 384-20)				
El conductor puesto a tierra de un circuito ramal se debe identificar mediante un color continuo blanco o gris natural.				

La asignación de colores para las fases es Amarillo, Azul y Rojo (Tabla 13).				
La asignación de color para el neutro es Blanco (Tabla 13).				
La asignación de color para la tierra de protección es verde o el cable debe estar desnudo (Tabla 13).				
Los conductores de tierra aislada deben ser de color verde o amarillo (Tabla 13).				

17. ANEXO 2

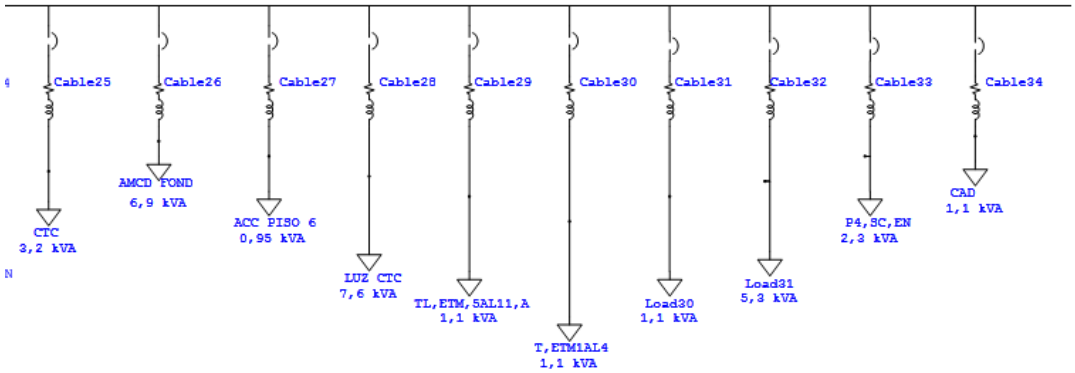

One-Line Diagram - ANEXO 2 (Load Flow Analysis)
Bus3
0,22 kV
Cable2
Cable3
Cable4
Cable5
Cable6
Cable7
Cable8
Cable9
Cable10
Cable11
Cable12
P4,EN
4 kVA
P3,EN
4,2 kVA
P6,EA
4,6 kVA
Sindicatura
6,1 kVA
Load5
1,1 kVA
Load6
2,3 kVA
P5,EN
6,9 kVA
P2,EN
1,1 kVA
P2y3, CS,EA
2,2 kVA
P1,EO,EN
3,4 kVA
P2Y3,C,EO,CN,EA
5,3 kVA
P1,T,EA
1,9 kVA
page 1

One-Line Diagram - ANEXO 2 (Load Flow Analysis)



page 2

One-Line Diagram - ANEXO 2 (Load Flow Analysis)



page 3

Nomenclatura Plano.

P4, EN: Cuarto Piso, Edificio Nuevo.
P3, EN: Tercer piso, Edificio Nuevo.
P6, EA: Sexto piso, Edificio Arcos.
Sindicatura: Sindicatura.
Load5: Sin nombre.
Load6: Sin nombre.
P5, EN: Quinto piso, Edificio Nuevo.
P2, EN: Segundo piso, Edificio Nuevo.
P2y3, CS, EA: Segundo y tercer piso costado sur edificio arcos.
P1, EO, EN: Primer piso, edificio nuevo, escalera oriente.
P2Y3, C, EO, CN, EA: segundo y tercer piso, capilla, escalera oriente, costado norte, edificio arcos.
P1, T, EA: Primer piso, Tableros, Edificio arcos.
Load13: Sin nombre.
P1, ECR9A, EA: Primer piso, escaleras Cr9A, Edificio Arcos.
S2, LI: Suelos 2, Laboratorios de ingeniería.
P1, A, R, EN: Primer piso, ascensor, recepción, Edificio nuevo.
P1, A, R, EN,1: Primer piso, ascensor, recepción, Edificio nuevo.
P1, AM, CS, EA: Primer piso, Aula Magna, comunicación social, Edificio Arcos.
S, G, EA: Sótano, gimnasio, Edificio Arcos.
R, S, EA: Restaurante, Sótano, Edificio nuevo.
S, T, B, P, R, EA: Sótano, Tableros, bombas plazoleta, restaurante, Edificio Arcos.
P4, SC#2, EN: Cuarto piso, sala de computo#2, Edificio nuevo.
CTC: Central telefónica capitel.
AMCD FOND: AMCD FOND.
ACC PISO 6: ACC PISO 6.
LUZ CTC: LUZ CTC.
TL, ETM, 5AL11, A: Totalizador tablero de distribución laboratorios, ETM 5 al 11, Almacén.
T, ETM 1Al4: Totalizador Aulas Electrónicas 1 al 4.
Load30: Sin nombre.
Load 31: Sin nombre.
P4, SC, EN: Cuarto piso, Sala computo, Edificio Nuevo.
CAD: Cajero automático davivienda.

18. ANEXO 3

Tenth LACCEI Latin American and Caribbean Conference (LACCEI'2012), Megaprojects: Building Infrastructure by fostering engineering collaboration, efficient and effective integration and innovative planning, Panama City, Panama.

Análisis de auto-abastecimiento energético de edificaciones existentes.

Yinnette Adriana Fajardo López
Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, yinerok_bm@hotmail.com

Rafael Andrés Rodríguez Pedraza
Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, randres15@computer.org

Edwin Francisco Forero García
(Consejero Facultad)
Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, edwinforero@usantotomas.edu.co

RESUMEN

Este artículo presenta el concepto de sostenibilidad en edificaciones que promueva un desarrollo equilibrado entre el medio ambiente, la sociedad y la economía, dentro del área de construcción y/o remodelación de edificios; en la búsqueda de ser más eficientes, en la reducción en explotación de materias primas, en el uso de materiales no reciclables y en el consumo de energía, se da inicio un completo análisis que tiene en cuenta los criterios e indicadores, regidos por normas, aplicados a nivel mundial para una correcta evaluación de eficiencia. El desarrollo de conocimiento en este contexto, permitirá que sea aplicado en la Universidad Santo Tomas, en la sede central en Bogotá, Colombia, con el fin de proyectarla como un edificio eficiente con aportes al desarrollo sostenible.

Palabras claves: Edificios verdes, indicadores de sostenibilidad, exergía, energía.

ABSTRACT

This paper presents the concept of sustainability in buildings, or green buildings, which promote a balanced development between environment, society and economy within the construction and remodeling of buildings; in search to be more efficient in the reduction in operation raw materials, the use of recyclable materials and energy consumed. These implies a complete analysis which takes into account the criteria and indicators, according to rules, applied globally to a proper assessment of efficiency. The development of knowledge in this context, allow it to be applied to the Santo Tomas University in Bogotá, Colombia, in order to project it as an efficient building which contributions to sustainable development.

Keywords: Green building, sustainability indicators, exergy, energy.

INTRODUCCIÓN

La sociedad cada día se sumerge más y más en un mundo lleno de confort ,que ha impulsado al mismo hombre ha desarrollar tecnologías que le permitan vivir mejor, tales como sistemas de circulación de agua, la

luz, el aire acondicionado, los autos, entre otros. Toda esta revolución tecnológica ha provocado un gran desorden ambiental debido al mal uso de los recursos naturales que deteriora la biodiversidad del planeta y la economía mundial. Es por esta razón, que hoy en día toda industria busca la implementación de sistemas eficientes en sus áreas, permitiendo así reducir el impacto ambiental y fomentar el buen uso de los recursos; un gran ejemplo de esto es lo que se ha venido desarrollando desde hace 20 años en las construcciones y remodelaciones de edificios en todo el mundo, donde a través de un estudio se establece un sistema de desarrollo sostenible, el cual debe adquirir una certificación LEED que apruebe la eficiencia de los diferentes sistemas de una edificación, promoviendo así el equilibrio entre la preservación del medio ambiente, las necesidades de la sociedad y la economía. A continuación se explica el proceso de evaluación y análisis para una edificación, buscando la aplicación en un entorno real.

CONCEPTOS DE SOSTENIBILIDAD EN EDIFICACIONES

El desarrollo urbano en la mayoría de los casos de las grandes y pequeñas ciudades en Colombia se realizó sin tener en cuenta el impacto ambiental que las edificaciones puedan generar. Hasta hace un par de décadas esto fue motivo de preocupación, sin embargo, las consideraciones ambientales que hoy en día se toman en cuenta para la construcción de un edificio son únicamente los efectos inmediatos tales como efectos visuales del entorno y algunas situaciones relacionadas con la capacidad de suministro de servicios públicos, impacto en el tráfico y otras. De esta forma se dejan de tener en cuenta los impactos que una nueva construcción puede llegar a tener sobre ecosistemas que se encuentran a kilómetros de distancia debido a los consumos energéticos; esto teniendo presente que las fuentes de energía eléctrica en nuestro país son principalmente hídricas y que las grandes centrales se encuentran a una distancia considerable de las ciudades y para su construcción fue necesario alterar la biodiversidad presente en estos sectores rurales. Además, es importante anotar que el abastecimiento de energía eléctrica genera pérdidas, entonces muchas veces se debe multiplicar por dos o por tres los costos energéticos primarios y sus correspondientes impactos ambientales para que cada usuario pueda contar con una luz encendida o del uso de un equipo de cómputo. Esta sostenibilidad energética es uno de los parámetros que actualmente se debería tener en cuenta para autorizar no solo la construcción de nuevas edificaciones sino la operación de las existentes.

Según la comisión Brundrland, la sostenibilidad se entiende como la utilización de los recursos disponibles sin afectar la existencia de generaciones futuras, es así como se deben establecer criterios de sostenibilidad energética para la operación de edificaciones. Los impactos que se estan generando actualmente al entorno, con la utilización de energías fósiles primarias que se queman emitiendo CO2 (Dióxido de Carbono) y la construcción de nuevos almacenamientos de energía potencial hídrica, están provocando el desplazamiento de comunidades, la extinción de especies animales y vegetales, el ser humano esta destruyendo poco a poco las condiciones para la supervivencia en el planeta, al garantizar el suministro energético de la región. Tomando plena conciencia de la situación es entonces cuando se plantea la forma de reducir al máximo los impactos que se generan por la disponibilidad energética con la que contamos actualmente.

En este estado siempre se habla de uso de energías alternativas, algunas ya muy mencionadas y utilizadas que por este mismo hecho pueden dejar de considerarse como nuevas y pasar a ser convencionales, tales como la energía eólica, de gran explotación en Europa, Asia y Norteamerica y la solar donde aún la ciencia y la nanotecnología están en deuda de grandes desarrollos en términos de eficiencia. Sin embargo, existen otras tecnologías que pueden estar ya disponibles y al alcance de nuestras posibilidades económicas y tecnológicas, que pueden suplir de energía a edificaciones nuevas y existentes, solamente con realizar ajustes en los hábitos humanos y cambios tecnológicos en los sistemas de suministro y uso energético.

Dentro de las tecnologías de generación se encuentran: la piezo-generación, los módulos TEG (Generador Termoeléctrico de Energía), celdas solares de alta eficiencia y las microturbinas eólicas de aprovechamiento de corrientes de aire urbanas. Estas tecnologías se documentan más adelante en este documento.

ESTADO ENERGÉTICO ACTUAL DE EDIFICACIONES EN COLOMBIA

Desde hace un par de décadas se ha hablado en Colombia del concepto de "edificios inteligentes", los cuales en una primera generación fueron dotados de algunos dispositivos y/o equipamientos para mejorar el grado de confort y seguridad de la edificación, por ejemplo: ascensores de alta velocidad, sensores de movimientos, cámaras, comunicaciones satelitales, redes de fibra óptica, escaleras de emergencia presurizadas, redes contra incendio, etc. El inconveniente que se presenta en estos sistemas se debe a que en la mayoría de los casos esto implica un mayor costo energético y este siempre se suministra por medio de la red eléctrica creando la necesidad de nuevos proyectos energéticos los cuales causan impactos en su construcción y luego en su operación. Una segunda generación de edificaciones automatizadas se ha desarrollado bajo los conceptos de edificios verdes o sostenibles, en estas construcciones se contó con un criterio de ahorro energético por lo cual se implementaron dispositivos para recolección de aguas lluvias como en el caso de COMPENSAR, donde se utilizan estas aguas para limpieza y riego de jardines. Otros puntos de ahorro que se han tenido en cuenta para esta generación de edificios son la ventilación e iluminación natural, tal como el edificio "EL CUBO" de COLSUBSIDIO, lo que descarga de responsabilidades a las redes del sistema eléctrico. Además se mejoraron los niveles de seguridad tanto para acceso como para evacuación en casos de emergencia. En este momento ya se encuentran en marcha proyectos que están abriendo camino a una tercera generación de edificios que no solamente ahorran energía sino que también la generan utilizando tecnologías limpias para tal propósito, además se trabaja en la implementación de nuevas tecnologías de uso final de energía para incrementar los índices de ahorro, es el caso de los cambios en sistemas de iluminación. Colombia, actualmente está abriendo sus puertas a la promoción de un desarrollo sostenible.

CERTIFICADO LEED:

Las certificaciones LEED (Líder en Eficiencia Energética y Diseño sostenible) de Edificios mundiales, es otorgada por el USGBC que es el departamento del U.S. Green Building Council, quien ha asumido la administración de este tipo de certificación.

Los edificios con certificación LEED son diseñados para:

- Un menor costo de operación y aumento en el valor de los activos.
- Reducir residuos llevados a los vertederos.
- Conservar la energía y el agua.
- Ser más seguros y saludables para los ocupantes.
- Minimizar las emisiones de gases nocivos para el medio ambiente.
- Demostrar un compromiso con el medio ambiente y con la responsabilidad social.

La edificación que cuentecon este tipo de certificación está demostrando un compromiso de sostenibilidad al cumplir con los estándares más altos de eficiencia [4].

En Colombia se tienen edificaciones que han logrado certificarse como las mejores en rendimiento, eficiencia y diseño sostenible, un ejemplo de certificación LEED en Colombia es la Organización Bancolombia, el banco

más grande y que atiende más de 6 millones de clientes entre individuales y corporativos, esta entidad financiera trasladó la mayoría de sus oficinas en la ciudad de Medellín, Colombia, donde se construyó un edificio con especificaciones que le permitieron obtener en enero del 2012 la certificación LEED Oro, siendo este el segundo mejor edificio de Latino América poniendo como primer lugar a el banco HSBC de Argentina. La edificación de Bancolombia fue diseñada bajo los estándares del USGBC, que adoptó cuatro principios que reflejan la cultura y personalidad de esta compañía financiera: flexibilidad, sostenibilidad, sencillez y sobriedad; y estas virtudes se reflejan en las siguientes características: Modularidad, iluminación natural, muebles sencillos, estructura expuesta, programa de arte, condiciones del sitio, eficiencia en agua, eficiencia en energía y atmosfera, materiales y recursos y calidad del medio ambiente. Todas estas son las características que cumplía esta edificación, lo que la llevó a tener una certificación LEED Oro otorgada por el USGBC (US Green Building Council).

En Colombia, ya se están realizando proyectos de construcción y remodelación con el fin de adquirir este tipo de certificaciones y así lograr un mejor manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, económicos y sociales, además de desarrollar edificaciones funcionales, estéticas y con sistemas de precaución de riesgos industriales en cualquier tipo de edificación [5].

Para la obtención de un certificado LEED se deben tener en cuentra los siguientes pasos:

- **Elegibilidad.** ¿Qué clasificación LEED se encuentra su organización? (LEED-EB, LEED-CI, LEED-RETA, LEED-SCHOOL, LEED-CS).
- **Registro**. Registro del proyecto, de acuerdo al item anterior.
- **Preparar Solicitud.** En esta parte se recomienda al equipo del proyecto que verifique cada crédito para garantizar que los detalles del edificio se han puesto de forma precisa y consistente. Con esto se podrá tener un ahorro de tiempo en el proceso de revisión.
- **Resolución de Créditos**. Quienes soliciten orientación técnica y administrativa sobre como los créditos LEED se aplican en el proyecto, pueden encontrar ayudas, buscando resoluciones de solicitudes de interpretación de créditos existentes o presentar una nueva solicitud de interpretación de créditos. El que quiera tener una interpretación de dichos créditos debe ser miembro USGBC, SpainGBC o administrador de un edificio con registro LEED.
- **Presentar solicitud.** Los componentes de una solicitud de certificación se realizan a través de LEED Online.
- **Revisar solicitud.** El GBCI garantiza que todas las revisiones de solicitud son de la más alta calidad. Pueden haber apelaciones, el cual el GBCI puede volver hacer una revisión dependiendo de unas condiciones dadas.
- **Certificación.** Se recibe el certificado y una placa para colocar en el edificio, recibirán toda la información necesaria para poder adquirir dicha certificación, las presentaciones de fotos y de marketing. Estarán dentro de la base de datos de edificios de alto rendimiento del ministerio de energía de EE.UU. [4].

METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS PROPUESTAS

Colombia, por ser un país ubicado en la zona tropical, tiene en las edificaciones el mismo tipo de cargas todo el año, es decir, que los requerimientos energéticos no difieren en un alto porcentaje, por ejemplo, en zonas

cálidas se tendrán sistemas de ventilación y aire acondicionado y en zonas frías sistemas de ventilación, aire acondicionado o calefacción, cuando estos se requieran. Esto facilita el análisis del sistema energético que de igual manera no cambia en tipos de fuentes de energía eléctrica, gas natural y suministro de agua.

Actualmente, para el desarrollo de una auditoría energética se puede establecer un modelo de análisis para una gran mayoría de edificaciones como el que se muestra en la figura 1:

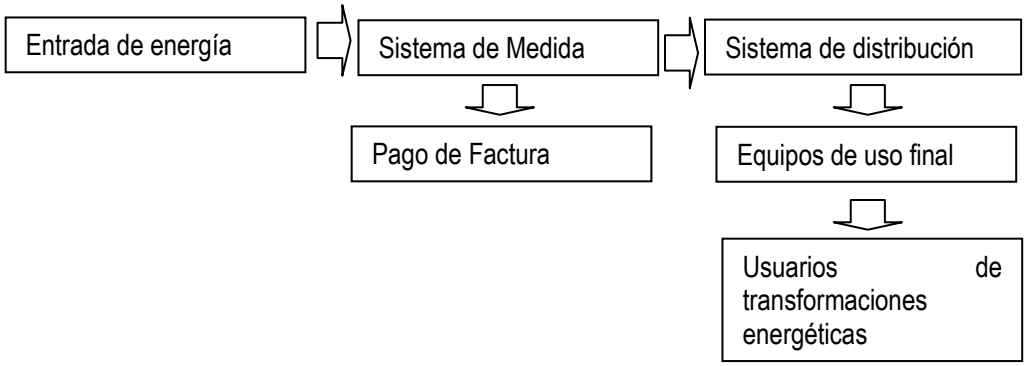


Figura 1. Modelo de análisis para una Auditoría Energética

En primera instancia se pueden ver las fuentes de energía que ingresen a la edificación, posteriormente se presenta un sistema de medida que permita determinar el consumo y la facturación, para el caso pueden ser medidores de caudal o de flujo eléctrico, este último medidor puede, dependiendo del tipo de cliente ante la empresa comercializadora de energía, discriminar entre potencias activa y reactiva, y en este caso se hace posible realizar un análisis de compensación de energía reactiva ya que físicamente se pueden utilizar dispositivos que disminuyen el consumo de energía.

Los sistemas internos de distribución de energía son susceptibles de mejora, principalmente si se incluye un programa de mantenimiento y control de fugas que permita mantenerlo en óptimas condiciones; en un sistema de distribución eléctrico es posible redimensionar en caso de tener pérdidas por regulación y desbalances de cargas. Los equipos de uso final pueden aún ser ineficientes energéticamente si se tienen sistemas de iluminación incandescentes o fluorescentes con balastros magnéticos, ya que dichos equipos deben de igual manera mantenerse en forma óptima para que las transformaciones energéticas (combustión, movimiento, fuerza e iluminación) sean eficientes.

Para promover eficazmente una conciencia ambiental y mejora en los sistemas energéticos puntuales o locales en cada una de las edificaciones existentes es necesario sensibilizar a los “gestores” energéticos, a los legisladores y gobernantes, a la academia, a empresarios e industriales y a los entes reguladores para que el trabajo conjunto termine en reducción efectiva de impactos sobre el entorno.

En la figura 2 se plantea un modelo al cual debería migrar la estructura energética de cualquier edificación, al igual que en el modelo tradicional se empieza por la fuente de suministro energético que es la red del sistema nacional, sin embargo, la diferencia se aprecia en que el sistema es bidireccional, pues en ciertos periodos y para algunas construcciones se puede evaluar la posibilidad de inyección de energía a la red. En este punto se hace la aclaración que en Colombia aún no se ha contemplado la factibilidad técnica de tener sistemas de generación distribuida y por ley no es permitido actuar como generadores sino se pertenece a un grupo específico de empresas.

Continuando con la presentación del modelo planteado se encuentra el sistema inteligente de medida, el cual toma este nombre por caracterizar de forma real las potencias consumidas por el sistema, hoy en día los sistemas de medición ignoran tipos de energías consumidas por equipos de uso final de tipo electrónico, los cuales tienen un comportamiento no lineal y generan consumos de potencias de distorsión, que se pueden cuantificar y porcentualmente pueden tener una importante participación en el total de potencias consumidas, para esto se recurre al estandar IEEE 1459.

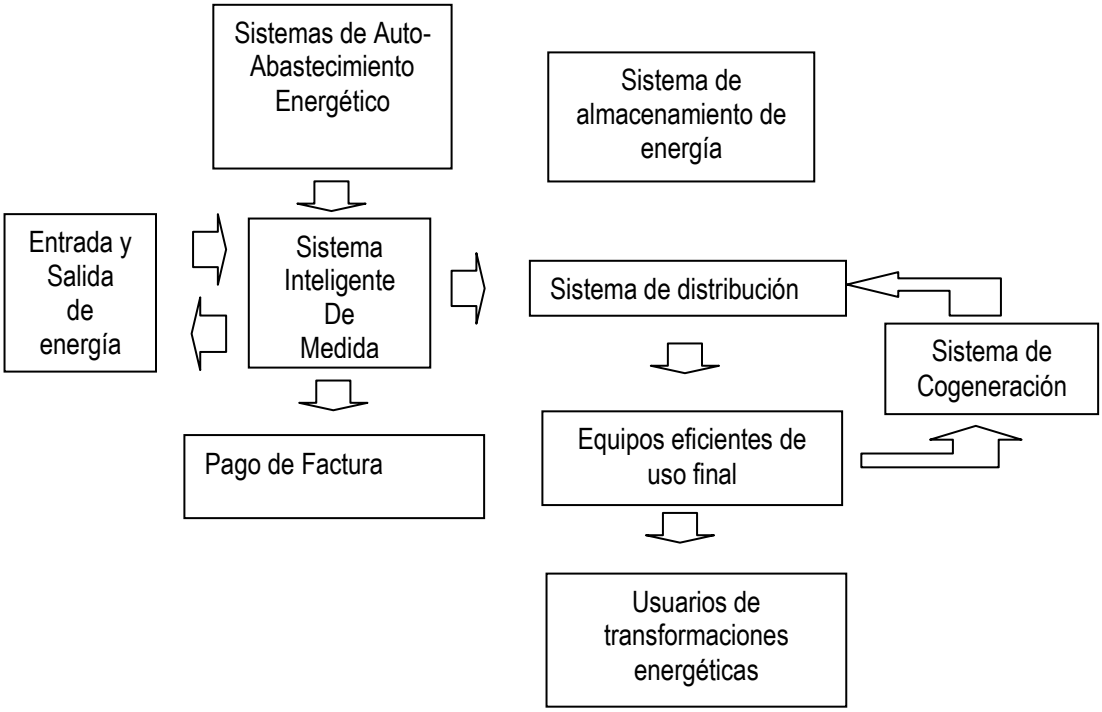


Figura 2. Estructura energética ideal para toda edificación.

Dentro del modelo propuesto se incluye un sistema de auto-abastecimiento energético, el cual estará compuesto por fuentes de energía que la misma edificación genere, como se mencionó anteriormente estas pueden ser, solar térmica, solar fotovoltaica, piezo-generación, eólica o módulos TEG, entre otros.

A la hora de realizar ahorros energéticos y reducir impactos, la tarea es buscar alternativas en fuentes de energía no convencionales y también recurrir a los avances tecnológicos para usar equipos de uso final eficientes. Por ejemplo, las tecnologías que se utilizan en iluminación deben ser LED, ya que sus consumos son mínimos comparados con bombillas ahorradoras, además los sistemas de distribución de energía deben estar adecuadamente monitoreados para desde un sistema de control establecer los estados y los consumos en tiempo real, el tratamiento de aguas lluvias y residuales también contribuyen al buen manejo del recurso hídrico, etc.

INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD ESTABLECIDOS

El desarrollo sostenible siempre busca un equilibrio entre el medio ambiente, la sociedad y la economía de un país, permitiendo la preservación de los recursos naturales, la reducción del impacto ambiental y mejorar las

condiciones de vida, salud y educación. Para lograr construcciones eficientes primeramente es necesario realizar una evaluación de sostenibilidad en las edificaciones, es necesario regirse bajo la normatividad que determina los parámetros, criterios e índices a tener en cuenta para un correcto análisis de un sistema, tales como: ASHRAE 90.1-2004 (Estados Unidos), EN 832 (Alemania), GB50189-2005 y GB/T50378-2006 (China), Code 19 (Irán), TS 825 (Turquía) y las normas ISO 14001 y 9164 [1].

Al comenzar el estudio de un nuevo proyecto o el mejoramiento de una edificación se deben tener en cuenta varios factores para que este tenga validez: la flexibilidad en el diseño de iluminación, una buena distribución de la energía, una eficiente red de datos, aire acondicionado y modificación de espacios de la edificación, además de un estilo de diseño que cumpla la finalidad para la cual sea dada, logrando dar un aspecto especial, moderno y muy ordenado a la edificación. Por otra parte, la ubicación idealmente debe depender del tipo de empresa o industria, y es ideal contar con restricciones y políticas del parqueadero, zonas verdes, reutilización de aguas lluvias para sistemas de riego y aire acondicionado y espacio abierto de oficinas.

En cuanto al uso de recursos naturales, se puede contar con dispositivos autómatas para el ahorro de agua (sensores en lavamanos y sanitarios, orinales sin agua); y en cuanto a la energía, otro factor importante, es tener un control para el buen consumo energético, sistemas de iluminación automatizado, tipo de iluminarias y lo más importante iluminación artificial en puestos de trabajo, sin olvidar el manejo de refrigerantes y el control en sistemas de aire acondicionado; adicionalmente tener en cuenta los productos utilizados para la limpieza, el manejo de enfermedades y el control de calidad del aire acondicionado. Esto es a groso modo lo que se tendría que diseñar o modificar para llegar a tener una certificación LEED, explicada anteriormente.

Al llevar a cabo una evaluación de sostenibilidad, es necesario conocer la energía consumida, es decir, la que realmente es aprovechada, esta es conocida como exergía que se define como “la cantidad de trabajo mecánico máximo que puede aprovecharse”, y que a diferencia de la energía depende del desequilibrio entre un sistema físico y su entorno, y así a partir de un análisis exergético realizar una óptima administración de recursos y un diagnóstico de consumo y uso de energía, teniendo en cuenta los criterios de sostenibilidad.

Los criterios de sostenibilidad bajo los cuales se debe regir un estudio son: el medio ambiente, económico, social, de seguridad y prevención de riesgos industriales, de funcionalidad y de estética; bajo los cuales se señalan los indicadores como directos (en función del impacto ambiental, del manejo de los residuos, de la salud y todos estos ámbitos sociales y ambientales) o indirectos (en relación con los materiales de construcción, de la ubicación, y todo lo relacionado con el diseño y construcción de la edificación). Estos indicadores de sostenibilidad son cualitativos, más a partir del manejo de variables y ecuaciones se pueden obtener valores y gráficas de la eficiencia y sostenibilidad del sistema y del edificio desde los diferentes criterios establecidos.

PROPUESTA METODOLÓGICA

En Colombia y en el mundo el tiempo promedio de vida de los edificios supera los cincuenta años y los existentes no serán reemplazados por el hecho mismo del impacto ambiental y económico que se generaría por una propuesta de renovación. Este hecho hace que se requiera una metodología que revise y gestione mejoras en la eficiencia energética de edificios ya construidos. Es importante tener en cuenta, en la mayoría de los casos, que el diseño y construcción original no permite realizar mejoras estructurales que propendan por un aprovechamiento natural de la energía como iluminación solar o de vientos como sistema de

ventilación. Los sistemas de abastecimiento tales como agua, gas y electricidad para dichas construcciones aunque posiblemente cumplan con alguna normatividad constructiva no están pensados para ser eficientes.

Este trabajo define los indicadores de eficiencia para el sistema eléctrico del edificio de la sede central de la Universidad Santo Tomas en Bogotá, Colombia, esta es una construcción típica de edad considerable, donde por su uso la principal fuente de energía utilizada es de tipo eléctrico. La propuesta es representativa para utilizarla entonces en edificios de construidos para propósitos educativos.

Las principales transformaciones energéticas que se hacen en la edificación son para suplir necesidades de iluminación y alimentación de equipos de cómputo, en este sentido lo que se pretende es el análisis del servicio prestado con relación a la energía consumida para determinar qué tan eficiente se está siendo. La idea es poder tener un estimativo de la eficiencia actual para un posterior análisis en el caso de realizar mejoras en el sistema.

En forma general se puede definir un indicador de eficiencia que relaciona la energía consumida mes sobre el área construida como se indica en la ecuación 1

$$I_{General} = \frac{Energía\left[kWh_mes\right]}{Área\left[m^2\right]} \qquad (1)$$

Sin embargo, los indicadores de consumo por transformación son igual o más importantes, pues estos definen el grado real de aprovechamiento de la energía independientemente de limitantes tecnológicas:

Indicador energético de Iluminación:

$$I_{iluminación} = \frac{Potencia - Instalada\left[kW\right] * 100}{Superficie * Iluminación - matenida\left[m^2 - Lux\right]} \qquad (2)$$

Indicador energético de equipos de cómputo:

$$I_{cómputo} = \frac{Energía\left[kWh_mes\right]}{\#PCs * Horas_de_uso} \qquad (3)$$

Se toman estos indicadores para realizar la evaluación de eficiencia del sistema eléctrico, por ser las cargas que representan un 95% del total de equipos utilizados. De igual forma se debe tener cuenta que se los índices individuales se toman por sectores, aulas, oficinas y laboratorios.

Bajo el modelo planteado en la figura 2 es posible obtener un indicador de sostenibilidad del edificio particular para este modelo de gestión, este se refiere entonces, al porcentaje de energía que la edificación es capaz de generar con referencia al total consumido.

$$I_{Sostenibilidad} = \frac{Energía_generada[kWh_mes]}{Energía_Total_Consumida[kWh_mes]} * 100 \qquad (4)$$

RESULTADOS OBTENIDOS

Se ha realizado un análisis y revisión sobre el estado actual de las edificaciones comerciales existentes en Colombia, encontrando que a lo largo de las dos últimas décadas ha existido la preocupación por automatizar los sistemas de abastecimiento, estas experiencias han servido para demostrar que es posible establecer mejoras y comodidades en edificaciones comerciales, sin embargo, inicialmente la preocupación no fue la sostenibilidad ni la eficiencia, sino generar comodidad para los usuarios.

Es posible modelar los sistemas energéticos de las edificaciones existentes para establecer el flujo coherente de energía y realizar un análisis del estado de consumo actual del edificio. De acuerdo con este modelo es posible proponer un nuevo sistema que mejore la eficiencia y la sostenibilidad de la edificación; en este sentido se puede ver la construcción como una fuente de energía para auto-abastecerse o para inyectar energía a la red. De igual manera es necesario un análisis sobre las mejoras en eficiencia de las transformaciones energéticas que se realicen en los equipos de uso final, además en los casos que sea posible realizar cogeneración contando para esto con un sistema de almacenamiento de energía.

Los indicadores de eficiencia y sostenibilidad del edificio se trabajan de acuerdo con la instalación bajo análisis. Para este trabajo se propusieron para las cargas más significativas de acuerdo con una inspección de las instalaciones.

REFERENCIAS

[1] German A. Pinto Osma y Gabriel Ordoñez P., "Desarrollo sostenible en edificaciones", Revista de la Facultad de Ingenierías Fisiomecánicas, 2010.

[2] J. T. San-Jose, R. Losada, J. Cuadrado, I. Garrucho, Approach to the quantication of the sustainable value in industrial buildings, ELSEVIER, Building and Environment, 2008

[3] Quian Ding, Quiaoling Tong, Hengqing Tong, Evaluation of Index for Green Zoology Building and Its Definite Algotithm in Path Analysis, IEEE, 2008.

[4] http://www.spaingbc.org/proceso-certificacion.php

[5] http://www.vidamasverde.com/2012/edificio-bancolombia-obtuvo-certificacion-leed-gold/

AUTORIZACIÓN Y RENUNCIA

LOS AUTORES AUTORIZAN A LACCEI PARA PUBLICAR EL ESCRITO EN LAS MEMORIAS DE LA CONFERENCIA. LACCEI O LOS EDITORES NO SON RESPONSABLES NI POR EL CONTENIDO NI POR LAS IMPLICACIONES DE LO QUE ESTA EXPRESADO EN EL ESCRITO.

19. BIBLIOGRAFIA

[1] Código Eléctrico Colombiano (NTC 2050). ICONTEC. Colombia, 1998.
[2] Congreso de Colombia. Ley 697 de 2001. Uso Racional y Eficiente de Energía URE. Diario Oficial: 44.573. Octubre 3 de 2001.
[3] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality (IEEE Std.1159-1995). Institute of Electrical and Electronics Engineers. ISBN 1-55937-549-3. Estados Unidos, 1995.
[4] IEEE Recommended Practice and Requirements of Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std.519-1992). Institute of Electrical and Electronics Engineers. ISBN 1-55937-239-7. Estados Unidos, 1993.
[5] IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment (IEEE Std.1100-1999). Institute of Electrical and Electronics Engineers. ISBN 0-7381-1661-0. Estados Unidos, 1999.
[6] IEEE The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms (IEEE 100-2000). Institute of Electrical and Electronics Engineers. ISBN 0-7381-2601-2. Estados Unidos, 2000.
[7] Manual de especificaciones Power Pad 3945-B. Fluke.
[8] Manual de usuario, versión extendida. Circutor CVM-NRG96
[9] Norma Técnica Colombiana. Electrotecnia (NTC 1340). ICONTEC. Colombia, 2007.
[10] Página WEB: http://www.solecmexico.com/electronica/TensionAlterna.pdf
[11] Página WEB: http://www.cinu.org.mx/eventos/conferencias/johannesburgo/wssd.htm CUMBRE MUNDIAL SOBRE EL DESARROLLO SOSTENIBLE. Johannesburgo, 2002.
[12] Página WEB: http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf. CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO. 1992.
[13] Página WEB: http://www.ebingel.com/index.php?option=com_content&view=article&id=107&Itemid=206 CERTIFICACIÓN LEED- COLOMBIA.
[14] Portal WEB UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA DE COLOMBIA. Calidad de la energía eléctrica: http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Docs/calidad.pdf
[15] Portal WEB UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA DE COLOMBIA. Corrección del factor de potencia y control de la demanda: http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/factor.pdf
[16] Reglamento Técnico para Instalaciones Eléctricas (RETIE). Ministerio de Minas y Energía. Bogotá, D.C., Colombia, 2008
[17] SERRA, Florensa Rafael. Instalaciones eléctricas en los edificios. Editores técnicos asociados S.A. Barcelona, España. 1979.
[18] YERBA Morón Juan Antonio. Sistemas eléctricos de distribución. Editorial Reverté. ISBN 978-84-291-3029-4. España, 2009.