



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LOS HUECOS DE
TENSIÓN EN EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA INDUSTRIA DE SAN
JUAN SACATEPÉQUEZ CONECTADA EN 69 KV**

Jorge Vinicio Marroquín Estrada

Asesorado por el Mtro. Ing. José Rafael Argueta Monterroso

Guatemala, agosto de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LOS HUECOS DE
TENSIÓN EN EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA INDUSTRIA DE SAN
JUAN SACATEPÉQUEZ CONECTADA EN 69 KV**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JORGE VINICIO MARROQUÍN ESTRADA

ASESORADO POR EL MAESTRO ING. JOSÉ RAFAEL ARGUETA MONTERROSO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. César Augusto Fernández
EXAMINADOR	Ing. William Godínez
EXAMINADOR	Ing. Ángel García
EXAMINADOR	Ing. Erwin Guzmán
SECRETARIO	Ing. Manuel de Jesús Castellanos

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LOS HUECOS DE
TENSIÓN EN EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA INDUSTRIA DE SAN
JUAN SACATEPÉQUEZ CONECTADA EN 69 KV**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 23 de noviembre de 2020.

Jorge Vinicio Marroquín Estrada

Ref. EEPFI-1554-2020
Guatemala, 23 de noviembre de 2020

Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Presente.

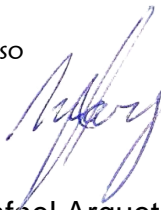
Estimado Ing. Rivera:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LOS HUECOS DE TENSION EN EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA INDUSTRIA DE SAN JUAN SACATEPÉQUEZ CONECTADA EN 69 KV**, presentado por el estudiante **Jorge Vinicio Marroquín Estrada** carné número **43077**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

José Rafael Argueta Monterroso
INGENIERO ELECTRICISTA
COLEGIADO No. 2913



Mtro. José Rafael Argueta Monterroso
Asesor

"Id y Enseñad a Todos"



Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Área
Desarrollo Socio-Ambiental y Energético



Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director


Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería




EEP-EIME-034-2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LOS HUECOS DE TENSIÓN EN EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA INDUSTRIA DE SAN JUAN SACATEPÉQUEZ CONECTADA EN 69 KV**, presentado por el estudiante universitario Jorge Vinicio Marroquín Estrada, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica



Guatemala, noviembre de 2020



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

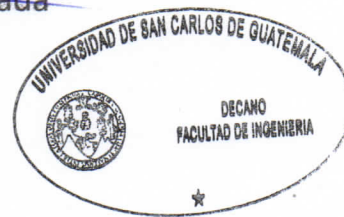
Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101 - 24189102

DTG. 348-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LOS HUECOS DE TENSIÓN EN EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA INDUSTRIA DE SAN JUAN SACATEPÉQUEZ CONECTADA EN 69 KV**, presentado por el estudiante universitario: **Jorge Vinicio Marroquín Estrada**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabeja Cordova Estrada
Decana



Guatemala, agosto de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Fuente inagotable de fortaleza, amor y sabiduría.
Mis padres	Flores sobre sus tumbas.
Mi esposa	Dora Míriam Argueta Monterroso, gracias por el amor, el apoyo y su acompañamiento.
Mis hijos	Jorge, Eduardo, Claudia, Sergio y Mónica Marroquín, que me motivaron para alcanzar los objetivos que me propuse.
Mis nietos	Especial cariño y agradecimientos por ser tan especiales

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por la salud y vida que me ha concedido y que me permitió concluir todos mis sueños profesionales
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de convivir en sus aulas y prepararme profesionalmente.
Facultad de Ingeniería	Por ser la fuente de enseñanza científica necesaria para desarrollarme como profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
3.1. Contexto general.....	9
3.2. Descripción del problema	10
3.3. Formulación del problema	13
3.4. Delimitación del problema.....	14
3.4.1. Delimitación contextual.....	14
3.4.2. Delimitación geográfica	14
3.4.3. Delimitación histórica.....	15
4. JUSTIFICACIÓN.....	17
5. OBJETIVOS	19
5.1. General	19
5.2. Específicos.....	19
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN	21

7.	MARCO TEÓRICO	25
7.1.	Sistema eléctrico.....	27
7.2.	Calidad del suministro de energía eléctrico	29
7.2.1.	Perturbaciones.....	30
7.2.1.1.	Cortes de tensión (interrupciones)	30
7.2.1.2.	Distorsión armónica	32
7.2.1.3.	Variaciones de voltaje	32
7.2.1.4.	Flicker en la tensión	32
7.2.1.5.	Huecos de tensión.....	33
7.3.	Huecos de tensión e interrupciones	35
7.4.	Dispositivos de red utilizados para eliminar la producción de armónicos por la conexión de la industria al sistema nacional interconectado	38
7.4.1.	Bancos de compensación de armónicas en las subestaciones de la Industria y Santa María Cauqué, requeridos para alimentar la Industria en 69 KV	38
7.4.2.	Banco de compensación en planta de la Industria	39
7.4.2.1.	Criterios para especificación de los bancos de capacitores	39
7.4.2.2.	Criterios para la especificación de las bobinas	39
7.4.2.3.	Frecuencia de armónicos	40
7.4.2.4.	Banco de compensación de armónicos en subestación Santa María Cauqué.....	40
7.5.	Consideraciones económicas de las perturbaciones	40
7.6.	Principios de protección contra los huecos de tensión.	41

7.7.	Normativa específica para la medición de los Huecos de Tensión	42
7.8.	Curva ITIC-CBEMA.....	43
7.9.	Frecuencia con que se presentan las variaciones de voltaje en los usuarios	45
7.10.	Estándar SEMI F47.....	47
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	49
9.	METODOLOGÍA	53
9.1.	Características del estudio.....	53
9.1.1.	Diseño.....	53
9.1.2.	Enfoque.....	53
9.1.3.	Alcance	54
9.2.	Unidad de análisis.....	54
9.3.	Variables	55
9.4.	Fases del estudio.....	58
9.4.1.	Fase 1	59
9.4.2.	Fase 2	59
9.4.3.	Fase 3	59
9.4.4.	Fase 4	60
9.4.5.	Fase 5	61
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	63
11.	CRONOGRAMA.....	67
12.	FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA	69

13. REFERENCIAS 71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Lote A.....	3
2.	Diagrama unifilar de 69 KV.....	4
3.	Representación gráfica de una variación de voltaje.....	11
4.	Árbol del problema.....	12
5.	Equilibrio entre la generación y demanda	28
6.	Esquema de un sistema eléctrico.....	29
7.	Ejemplo de una falla trifásica que genera huecos de tensión en las tres fases	35
8.	Soluciones a diferentes niveles y costos involucrados.	41
9.	Curva ITIC/CBEMA.....	45
10.	Resultados de caídas e interrupciones del estudio de DPQ.....	46
11.	Zona de Inmunidad requerida por SEMI F47	48
12.	Cronograma de actividades.....	67

TABLAS

I.	Categorías y características de las perturbaciones en el sistema de potencia eléctrico	37
II.	Inmunidad de caída de voltaje requerido por SEMI F47	47
III.	Clasificación de las variables.....	58
IV.	Recursos necesarios	70

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
C	Capacitancia
F	Faradio
H	Henrio
Hz	Hertz
Z	Impedancia
L	Inductancia
kV	Kilo voltio
MVAR	Mega volt-amperio reactivo
MV	Mega voltio
Ω	Ohm
%	Porcentaje
R	Resistencia
t	Tiempo
RMS	Valor eficaz
VAC	Voltaje de corriente alterna
VDC	Voltaje de corriente directa

GLOSARIO

Alta tensión	Nivel de tensión superior a sesenta mil voltios.
ANSI	American National Standard Institute.
Armónico	En sistemas eléctricos de corriente alterna los armónicos son frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental de trabajo y cuya amplitud va decreciendo conforme aumenta el múltiplo de la frecuencia fundamental.
Calidad de la energía	El diseño de líneas y subestaciones del servicio de transporte de EE deberá considerar los parámetros del servicio existente en la zona, con la finalidad de mejorar o de no deteriorar la calidad del mismo, de conformidad con las NTSA y NTCSTS.
Comisión	Es la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, establecida de acuerdo con la Ley General de Electricidad.

Flicker en la tensión	El control del flicker en la tensión es responsabilidad del transportista, así como también el desarrollo de las acciones necesarias para dar solución al problema. El flicker deberá ser medido por el índice de severidad de corto plazo Pst, definido por la Norma IEC 1000-3-7.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
Línea aérea	Es una adaptación de componentes destinados al transporte de energía eléctrica. Está constituida por conductores tendidos en espacios abiertos y que están soportados por estructuras con los accesorios necesarios para la fijación, separación y aislamiento de los conductores.
NEC	National Electric Code.
NESC	National Electric Safety Code.
Normas técnicas	Disposiciones emitidas por la Comisión de conformidad con las Ley General de Electricidad y su reglamento, en congruencia con prácticas internacionales, que tienen por objeto garantizar la continuidad y calidad del servicio eléctrico.
NTCSTS	Normas técnicas de calidad del servicio de transporte y sanciones.

NTDOST	Normas técnicas de diseño y operación del servicio de transporte.
Reactor de línea	Filtro para reducir el estrés en los dispositivos, causado por la degradación de la calidad de la forma de onda del sistema de alimentación de energía.
Restaurador dinámico Tensión (DVR)	Es un control basado en la transformada de fourier del vector espacial utilizado para corregir las perturbaciones provocadas por deformaciones en la forma de onda del sistema de alimentación de energía.
THD	Distorsión armónica total.

RESUMEN

El término de calidad de suministro de energía, se ha convertido en uno de los conceptos más importantes para las plantas industriales ya que el gran auge de la automatización industrial como resultado de la modernización y desarrollo de los equipos controlados por microprocesadores y electrónica de potencia, ha hecho que las cargas actualmente sean más sensibles a las caídas de tensión de corta duración conocidos como huecos de tensión. Estos trastornos de muy corta duración, pero de mediana o gran amplitud, pueden interrumpir procesos que causan enormes pérdidas, por lo que se constituyen como una de las principales causas de interrupciones de sus procesos.

En el caso de la industria de cemento ubicada en el área de San Juan Sacatepéquez, se contempló dentro del diseño, que sería alimentada por un servicio de 230 kV. Lamentablemente, debido a problemas sociales en el área, la subestación que alimentaría a esta industria sigue sin poder energizarse. Como plan alternativo, también se contrató un servicio alterno en 69 kV que se diseñó y construyó por el transportista del área y que es la que actualmente le presta el servicio.

Durante los primeros meses de la puesta en operación de la industria, se han producido interrupciones de procesos que han afectado su productividad y que han sido atribuidas a perturbaciones que se han presentado en el sistema de suministro de 69 kV y que han obligado a modificar los rangos de operación y ajustes de los equipos de la industria para que puedan operar.

En este trabajo de investigación se realizarán mediciones de la calidad del servicio eléctrico de la energía en el sector, se investigará con el transportista la causa de eventos y perturbaciones en el servicio y se analizará mejoras en la topología de la red, así como los planes de mantenimiento preventivo y correctivo que puedan reducir el número de las micro interrupciones. Por último, con la información obtenida se propondrán las acciones correctivas que se consideren necesarias.

1. INTRODUCCIÓN

Luego de la emisión de la Ley General de la Electricidad en el año 1996, se redactaron los normativos, los reglamentos y se crearon las instituciones encargadas de velar por su cumplimiento: Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) órgano técnico, y la que opera y administra el sistema eléctrico Nacional: Administrador del Mercado Mayorista (AMM)) que han permitido impulsar el desarrollo integral del sector eléctrico en Guatemala.

Dentro de las normas técnicas, que regulan la calidad del servicio en el sistema de transmisión de 69 KV, no se consideran ni son penalizadas los microcortes y las variaciones momentáneas de voltaje menores a tres minutos de duración. Estos cortes y variaciones en el voltaje provocan interrupciones de procesos de producción en la industria y, en ocasiones, daños repetitivos a equipos electrónicos sensibles. A pesar de que existen reclamos de los clientes ante la CNEE por este tipo de fallas, por no estar normalizados, continúan repitiéndose y causando inconvenientes a los consumidores, que se ven forzados a buscar soluciones particulares dentro de sus instalaciones, que incrementan las inversiones por el reemplazo de equipos o para el reforzamiento de los sistemas para reducir la sensibilidad de los equipos ante las variaciones momentáneas de voltaje.

En este trabajo de investigación se describirán los métodos para medir y registrar este tipo de perturbaciones y se analizarán los resultados de las mediciones que se obtengan para determinar las modificaciones de equipos y recomendaciones de los ajustes que se deben realizar en los sistemas de protección de los equipos del usuario para reducir las constantes paradas de la

planta que se producen. Además, se analizará el diseño del sistema de transmisión de 69 KV de la empresa transportista que suministra el servicio, se determinarán las principales causas de las variaciones momentáneas del voltaje, y se propondrán cambios que se puedan hacer en la red, para mejorar la calidad del servicio en el área de San Juan Sacatepéquez.

2. ANTECEDENTES

Desde hace un par de décadas se inició el proyecto de implementación de una industria productora de materiales para la construcción en el municipio de San Juan Sacatepéquez, en el departamento de Sacatepéquez de Guatemala, la cual se alimentaría por medio de una línea de transmisión propia de 230 KV proveniente de la subestación de transformación Las Cruces ubicada en Santa María Cauque en el departamento de Sacatepéquez. Esta subestación de transformación y sus dos líneas de alimentación de 230 KV fueron incluidas dentro de los planes de expansión del sistema de transporte de electricidad, aprobado por el Ministerio de Energía y Minas de Guatemala (Proyecto PET-1-2009, lote A, Anillo Metro Pacífico), asignado a la empresa colombiana TRECSA):

Figura 1. **Lote A**

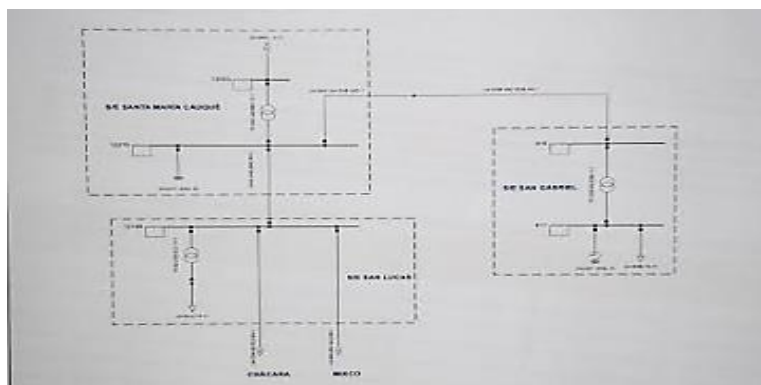


Fuente: TRECSA. (2021). *Mapa de pet*. Consultado 20 de julio de 2020. Recuperado de <https://www.trecca.com.gt/pet/pet/mapa-del-pet>

La subestación Las Cruces ya se encuentra terminada desde finales del año 2018, pero está a la espera de la llegada de cualquiera de las líneas de 230 KV para ser energizada. Debido a la oposición que existe por parte de los vecinos de las comunidades aledañas a la zona donde se ubican las líneas de transmisión, no ha sido posible obtener su aprobación y permiso para terminar la construcción de cualquiera de las dos líneas autorizadas, y al parecer, se tendrá que continuar las negociaciones por un largo período de tiempo antes de obtener por la vía legal las autorizaciones y derechos de paso que se necesitan.

Desde el inicio del proyecto, para prevenir atrasos en la puesta en operación, la empresa de materiales concibió un plan alternativo de alimentación temporal de la planta, por medio del refuerzo del sistema existente de transporte secundario de 69 KV. Para ello financió la construcción de líneas de transmisión nuevas de 69 KV y equipos de protección y compensación de armónicos en las subestaciones de transformación de TRELEC. De esta manera, se logró energizar la industria utilizando la línea de transmisión de 230 KV construida entre la subestación Las Cruces y la planta, alimentada con una línea de 69 KV proveniente de la subestación Santa María Cauque, a finales de julio de 2020, como se muestra:

Figura 2. **Diagrama unifilar de 69 KV**



Fuente: elaboración propia.

Previo a la energización con 69 KV, la planta estuvo operando con grupos de moto generadores para completar las etapas de pruebas, ajustes y puesta en operación.

Durante el primer mes de operación de la planta con el servicio de energía de 69 KV se han tenido ocho paradas originadas por disparos de los sistemas de protección de distintos procesos, atribuidas a variaciones momentáneas en el voltaje de alimentación, condición que no es admisible debido a las pérdidas y problemas que representan para la empresa de materiales.

Debido a que en Guatemala no existen estudios que brinden información sobre la calidad del servicio de distribución de energía, en cuanto a variaciones momentáneas de voltaje en esa área donde se ubica la industria, se tomarán como referencia en esta investigación los estudios realizados en EE. UU. y España.

El Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica (EPRI) en EE. UU. realiza investigaciones sobre temas relacionados con la calidad de la energía eléctrica y es una organización sin fines de lucro que se financia por la industria de empresas eléctricas. Debido a que no es condición que se pueda considerar como inusual, que una instalación industrial experimente muchas caídas de voltaje durante un año, a principios de la década de 1990, EPRI inició un estudio comparativo muy revelador sobre sistemas de distribución de empresas eléctricas denominado Proyecto de Calidad de la Distribución de Energía (DPQ).

Este estudio se inició en los Estados Unidos para observar, medir y evaluar la frecuencia y severidad de los eventos que afectan la calidad de la energía. Posteriormente, en 2001 y 2002, realizó un segundo estudio denominado DPQII que contó con la participación del Consejo Industrial de

tecnología de la Información (ITIC), formalmente conocido como Asociación de Fabricantes de Equipos de Computación y Negocios (CBEMA) y el Instituto de Equipos y Materiales Semiconductores (SEMI) y concluyó que se puede esperar un promedio de 66 caídas de voltaje entre el rango de 10 % a 90 % en las instalaciones de un usuario por año y el número promedio de interrupciones momentáneas (pérdida completa de voltaje) es de cerca de siete eventos por año.

La industria de semiconductores, en colaboración con EPRI y las empresas eléctricas, reconoció que un mejor diseño de los equipos ofrece una gran solución para los problemas de caídas de voltaje que se presentan en el sistema de alimentación. Esto llevó al desarrollo del estándar SEMI F47 que establece un requerimiento mínimo de inmunidad de un equipo ante la presencia de un hueco de tensión. Además, hay otros estándares SEMI que proporcionan los requisitos para la adquisición, métodos de prueba y los criterios de aprobación/reprobación de los equipos. Aunque este estándar fue desarrollado inicialmente para la industria manufacturera de semiconductores, también puede aplicarse a equipos en todos los entornos de fabricación industrial.

SEMI F47 requiere que los equipos eléctricos toleren las variaciones de voltaje que se encuentren dentro de ciertos límites claramente definidos dentro de la curva.

Otro estudio que se utilizará de referencia en este trabajo es el que se llevó a cabo en España por una empresa española de energía eléctrica, que hizo una clasificación de huecos de voltaje, y otras perturbaciones en función de sus principales características.

En ese estudio se contempló la medición de perturbaciones en media y alta tensión en distintos puntos con duraciones variables de entre una y cuatro semanas, en función de la importancia de cada lugar, dentro de la comunidad autónoma de Galicia durante los años de 1999 y 2002, de acuerdo con un plan anual para que pudieran ser considerados como referentes de la calidad que se tiene en toda la red. También se aprovechó para hacer mediciones a clientes industriales que presentaban reclamos por fallas de la red para determinar la calidad del servicio en sus instalaciones y también para analizar fallas internas que pudieran existir dentro de sus instalaciones.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Contexto general

Las perturbaciones clásicas que se presentan en la red de distribución provocadas por cortos circuitos y la variación de cargas dentro de las plantas industriales, la influencia de las computadoras y otro tipo de controles y protecciones utilizados por las industrias para conseguir la máxima productividad y por otra parte, la falta o limitada redundancia en líneas y subestaciones de transformación, tienen un impacto indeseable sobre la calidad de onda en las líneas de distribución de media tensión, así como dentro de las instalaciones de los clientes industriales.

Con el objetivo de mejorar la calidad de onda de los consumidores que trabajan con procesos altamente susceptibles a las variaciones momentáneas de tensión, el mercado ofrece nuevos productos basados en mejoras a la tecnología tradicional existente o en la utilización de técnicas de reconversión de la energía con semiconductores de potencia.

No se cuenta con investigaciones ni mediciones de la calidad de servicio de distribución, específicamente lo referente a variaciones momentáneas de voltaje o huecos de tensión, en el área de San Juan Sacatepéquez para usuarios conectados en 69 KV.

La conexión en 69 KV de una planta de producción de material de construcción ubicada en esa área, al Sistema Nacional Interconectado (SNI), (que originalmente fue diseñada para operar en un sistema de 230 KV), que se

completó en julio de 2020, se está viendo muy afectada por las constantes variaciones momentáneas de voltaje que presenta la red de 69 KV, ya que han causado varios paros de la producción.

Estas perturbaciones que presenta el servicio de energía eléctrica han causado molestias y preocupación al usuario porque la empresa de energía eléctrica que presta el servicio no las considera como fallas, y como, además, no están normalizadas ni penalizadas dentro de las normas de calidad de servicio de distribución, le ha dejado a la industria la responsabilidad de buscar soluciones propias que eviten los paros de los procesos de producción.

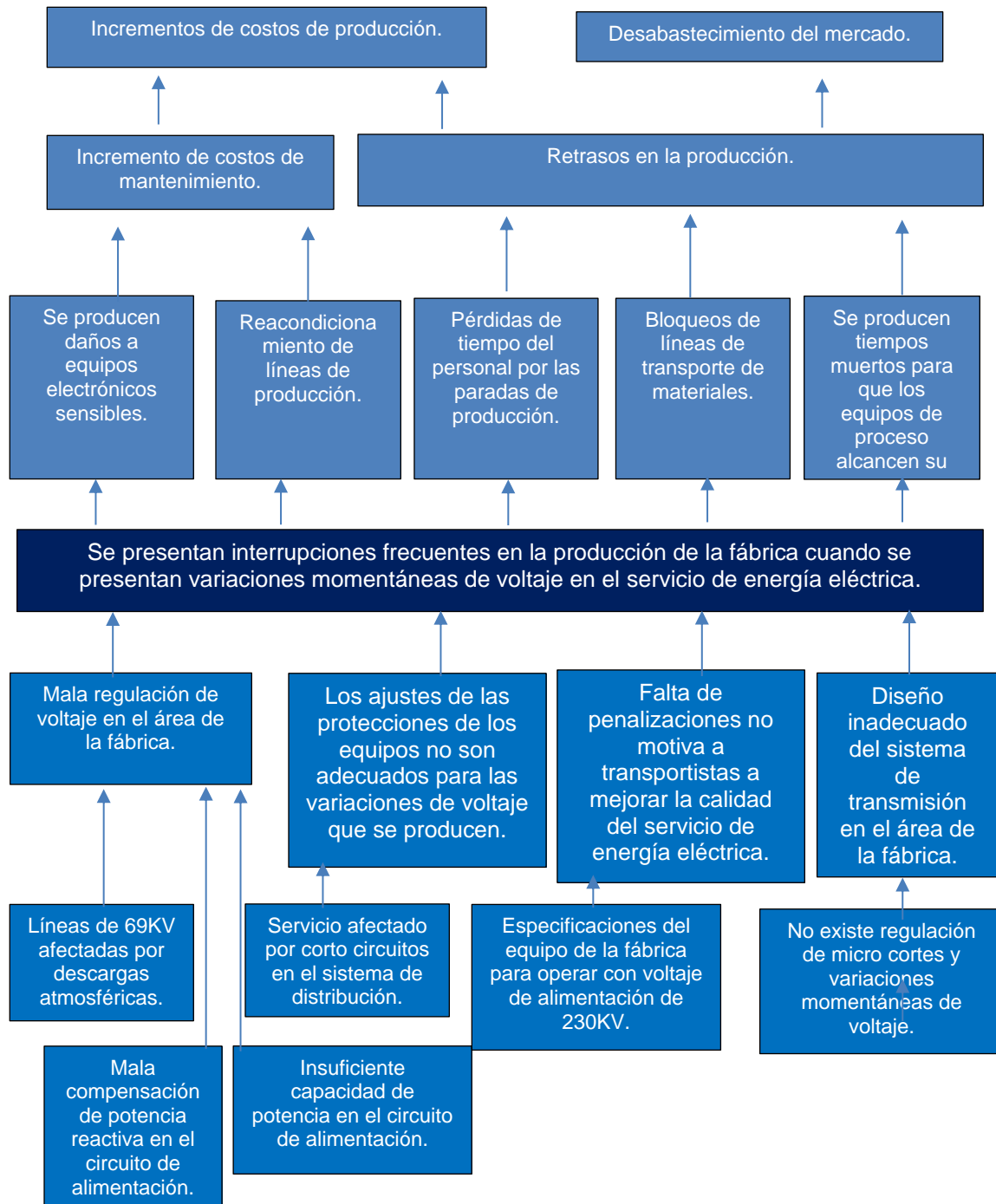
3.2. Descripción del problema

Se producen interrupciones frecuentes de producción en la fábrica, provocadas por variaciones momentáneas de voltaje o huecos de tensión en el sistema de alimentación de 69 KV, que el transportista de energía considera como normales y dentro de los parámetros de operación permitidos.

Las variaciones momentáneas de voltaje o huecos de tensión en el suministro de energía, son reducciones de voltaje de la corriente alterna, a una frecuencia determinada, y con una duración mayor a medio ciclo.

En la figura 3 se muestra una caída monofásica con una magnitud del 50 % del voltaje nominal y una duración de 4 ciclos, equivalente a 0.067 segundos, en una fuente de suministro de corriente alterna de 60 Hertz.

Figura 4. **Árbol del problema**



Fuente: elaboración propia.

3.3. Formulación del problema

Por medio de la figura 4, árbol del problema, se identificó la pregunta principal, así como las preguntas auxiliares del problema:

Del problema descrito se plantea la pregunta principal:

¿Cuáles son las estrategias, ajustes y modificaciones necesarias para reducir la cantidad de interrupciones de producción de la fábrica causadas por huecos de voltaje en el servicio de alimentación de energía eléctrica?

Para complementar con mayor detalle la pregunta principal se consideran las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Qué metodología se usará para la medición y poder generar un registro de la calidad del servicio de la energía eléctrica en una industria de San Juan Sacatepéquez conectada en 69 KV?
- ¿Cuáles son las normas internacionales y nacionales de calidad de servicio que debe de cumplir el servicio de energía eléctrica para evitar los disparos frecuentes de la operación de la fábrica?
- ¿Cuáles son las principales causas de las variaciones de voltaje en el sistema de suministro de energía que producen los disparos de los equipos de protección y los paros de producción?
- ¿Cuál sería el impacto económico de la sustitución de equipos de protección y control con especificaciones que los hagan más robustos para

volverse menos sensibles a las variaciones de voltaje del suministro eléctrico?

3.4. Delimitación del problema

A continuación, se describe la delimitación contextual, geográfica e histórica del problema objeto de investigación de este estudio.

3.4.1. Delimitación contextual

El estudio propuesto de la energía que recibe un usuario industrial en el área de San Juan Sacatepéquez se contextualiza en el ámbito de la regulación nacional de la calidad del servicio de distribución de la energía eléctrica. Desafortunadamente las perturbaciones de corta duración, especialmente las variaciones momentáneas de voltaje en el servicio no han sido estudiadas ni se tiene un registro de estas. Estos fenómenos son causados por diversidad de factores que ocurren dentro del sistema nacional interconectado.

La falta de normas y sanciones sobre este tipo de disturbios en la calidad del servicio de distribución en Guatemala obliga al usuario a buscar la forma de robustecer sus sistemas para hacerlos menos sensibles a estas variaciones y por lo tanto en este estudio se propondrán modificaciones, cambios y ajustes a los equipos, así como cambios o modificaciones que se puedan realizar juntamente con el transportista para mejorar la calidad del servicio.

3.4.2. Delimitación geográfica

Este estudio se limitará al análisis del sistema de distribución y transporte de 69 KV que alimenta a la industria, que se origina en la subestación Guate Sur

del INDE en Villa Nueva, hacia las subestaciones de San Lucas y Santa María Cauque de TRELEC en Sacatepéquez y que llega a la subestación de la industria en San Juan Sacatepéquez.

Se medirán y analizarán las perturbaciones del servicio de energía eléctrica en el punto de entrega del servicio al usuario y se categorizarán de acuerdo con estudios de calidad del servicio de distribución conforme a las curvas de tolerancia de potencia ITIC (anteriormente conocida como curva CBEMA) y bajo los estándares SEMI F47 y otros estándares.

3.4.3. Delimitación histórica

El período de tiempo del estudio estará definido por las fechas en que se realicen las mediciones dentro de las instalaciones del usuario. Además, se deberá tener en cuenta la configuración y características de la red de distribución durante ese período. Es importante considerar que, en Guatemala, la calidad del servicio de distribución de la energía eléctrica es muy distinto entre las épocas seca y lluviosa, por lo que es recomendable que las mediciones se realicen durante la época lluviosa que es cuando se presenta la mayor cantidad de fallas en la red.

4. JUSTIFICACIÓN

La línea de investigación se encuentra contenida en:

- Proyectos de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en un mercado eléctrico regulado y corresponde al área de regulación a nivel nacional de la calidad del servicio de distribución de la energía eléctrica.

Durante las primeras semanas de la puesta en operación de la fábrica de materiales de construcción en San Juan Sacatepéquez, después de haber logrado alimentarla por medio del sistema secundario de transmisión de 69 KV, los problemas de variaciones momentáneas de voltaje en el suministro de energía han sido una de las causas más recurrentes de las interrupciones de operación de la planta con el agravante de tener un alto potencial de causar daño al equipo electrónico sensible que se tiene instalado.

Dentro de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD) emitidas por la CNEE (2003), en el Artículo 54, brinda una definición de: interrupciones: “se considera como interrupción toda falta de servicio de energía eléctrica en el punto de entrega. Para efectos de estas normas no se considerarán las interrupciones menores de tres minutos: así como las que sean consideradas de fuerza mayor” (p. 31).

Como las fallas menores de tres minutos no están consideradas en la regulación, no tienen sanciones ni limitaciones en el número de eventos, las distribuidoras no tienen motivaciones ni presiones para corregirlas. Sin embargo,

la presencia de este tipo de micro interrupciones, así como las variaciones momentáneas de voltaje causan grandes pérdidas en la industria en general al paralizar los procesos por la actuación de los equipos internos de protección y otras veces dañando equipos sensibles.

En este estudio se medirán y registrarán estas perturbaciones en el servicio de energía suministrada a la planta y se analizarán los resultados usando gráficas o diagrama del Consejo Industrial de Tecnología de la Información ITIC para identificar a los equipos susceptibles a caídas de voltaje, para recomendar cambios y sustituciones en los mismos para así robustecer las instalaciones y con ello disminuir su sensibilidad para que puedan soportar los disturbios.

Basado en los resultados del estudio de calidad de servicio de distribución de energía (DPQII) realizado en los USA en 2001 y 2001 por El Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica (EPRI) se puede esperar un promedio de 66 caídas de voltaje entre el rango de 10 y 90 % y 7 interrupciones momentáneas en un sitio dado en un año.

Considerando esta cantidad de eventos que estadísticamente han determinado que se pueden presentar para un usuario industrial en un sistema de los USA que tiene mejores estándares de diseño, construcción y mantenimiento en comparación a los que se tiene en Guatemala, es de esperar que en nuestro sistema, el número de eventos se pueda duplicar y con ello explicar de alguna manera los reclamos de los consumidores industriales que resultan afectados en sus procesos de producción por estos disturbios.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Determinar el impacto provocado por las variaciones momentáneas de voltaje y micro cortes en el sistema de alimentación de energía eléctrica de 69 KV que provee a la fábrica de materiales de construcción ubicada en San Juan Sacatepéquez.

5.2. Específicos

- Definir la metodología óptima para la medición y generar registros de la calidad del servicio de energía eléctrica en una industria de San Juan Sacatepéquez conectada en 69 KV.
- Identificar las normas internacionales y nacionales que debe de cumplir el servicio de energía eléctrica para evitar los disparos frecuentes de la operación de la fábrica.
- Determinar las principales causas de las variaciones de voltaje en el sistema de suministro de energía que producen los disparos de los equipos de protección y los paros de producción.
- Estimar el impacto económico de la sustitución de equipos de protección y control por otros con especificaciones que los hagan menos sensibles a las variaciones de voltaje del suministro eléctrico.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN

Este trabajo de investigación pretende hacer un análisis de la calidad del servicio de distribución de la energía eléctrica de 69 KV en San Juan Sacatepéquez dentro del área de operación de una nueva fábrica que está iniciando pruebas y actividades de producción.

Con base en los resultados que se obtengan de las mediciones de calidad de servicio de la energía eléctrica que se realizarán, del análisis del circuito de transporte/distribución de 69 KV que alimenta la fábrica, la revisión y especificaciones del equipo instalado, se propondrán mejoras, cambios y reajustes en los equipos de la fábrica para reducir el impacto de las continuas variaciones momentáneas de voltaje del suministro de energía que durante el primer mes de operaciones han producido una cantidad inaceptable de interrupciones del proceso de producción que causan graves atrasos a la producción, así como los incrementos de re trabajos y tiempos muertos de los trabajadores, que inciden negativamente en los costos de la producción.

Debido a las características de los sistemas de transmisión de energía que están expuestos a descargas eléctricas, cortos circuitos en los sistemas de distribución, vientos que llevan ramas que impactan en las líneas, contaminación de aisladores por el ambiente, accidentes viales que dañan las estructuras y vandalismo, es normal y previsible que en cada instalación de los usuarios se presente una cantidad considerable de perturbaciones en el sistema de suministro de energía eléctrica, por lo que se hace necesario robustecer los equipos para hacerlos más resistentes y menos vulnerables y puedan continuar

funcionando durante el mayor número de estos eventos, conociendo de antemano, que algunos de ellos, debido a su magnitud no podrán ser evitados. Es importante considerar los estudios que en otros países se han realizado sobre este aspecto de la calidad del servicio de distribución y aprovechar las experiencias exitosas que han tenido para resolver este tipo de problemas.

Otro aspecto importante para estudiar es que inicialmente el servicio de alimentación de energía de esta industria se diseñó con 230 KV, a través de nuevas subestaciones y líneas de transmisión que fueron aprobadas dentro de los planes de expansión de transmisión impulsados por el Ministerio de Energía y Minas de Guatemala. Desafortunadamente por problemas sociales con las poblaciones cercanas, las líneas de transmisión siguen pendientes de construir y el proyecto pendiente de entrar en operación.

Para superar este problema, la fábrica costó una ampliación de capacidad de líneas y equipos asociados al sistema existente en la zona de 69 KV propiedad de la transportista TRELEC, para alimentar en forma provisional y de esa manera poder iniciar pruebas de equipo y de producción y quedar a la espera de resolver los problemas sociales para finalmente operar con la alimentación de 230 KV que indudablemente presenta mayor estabilidad y menores perturbaciones que los sistemas de 69 KV.

Por esta situación coyuntural, también se analizará el diseño de ese sistema de transporte que será el definitivo cuando se logren superar los problemas de construcción existentes.

Se espera que las propuestas e implementación de las recomendaciones que se obtengan como resultados del estudio, logren reducir considerablemente

las paradas de la planta producidas por las variaciones momentáneas de voltaje del suministro de energía eléctrica.

A la vez se pretende incentivar que se realicen otros estudios en otros sectores del país para obtener más información sobre estos disturbios en la calidad del servicio de energía eléctrica para que puedan ser normalizados y regulados por la CNEE para mejorar la calidad del servicio eléctrico y con ello aumentar la competitividad de la industria en Guatemala.

7. MARCO TEÓRICO

El estudio que se analiza en este trabajo está íntimamente relacionado con la calidad del servicio de distribución de energía eléctrica (NTSD) que se suministra a una fábrica de materiales de construcción que se ubica en el área de San Juan Sacatepéquez y que en el mes de agosto de 2020 se conectó al Sistema Nacional Interconectado a través de la red de distribución de 69 KV que abastece a la subestación de Santa María Cauque en el departamento de Sacatepéquez. La fábrica inició las pruebas, ajustes y calibraciones desde el año 2016 trabajando con grupos de generación a base de motores diésel.

Durante el primer mes de operaciones de la fábrica alimentada con la energía de la red de 69 KV, se presentaron más de 8 interrupciones del proceso de producción de la planta, atribuidas a variaciones momentáneas de voltaje del servicio eléctrico. Una de las causas de este elevado número de paros puede ser debido a que la alimentación de la energía de la fábrica se diseñó para que fuera a través de una red de 230 KV que por razones de permisos y desacuerdo con los vecinos no se ha podido completar.

Al revisar las especificaciones que debe de cumplir el servicio eléctrico dentro de las normas de calidad del servicio de distribución de Guatemala, no existe una especificación dedicada a los micro cortes de energía y las variaciones momentáneas de voltaje que puedan aplicarse al caso que se está presentando, por lo cual la empresa de energía no se hace responsable de resolver el problema, considerando que el servicio que entrega es normal.

Las referencias que contempla el reglamento de la CNEE (2003) la medición el *flicker*, deberá ser medido por el Índice de severidad de corto plazo, definido por la norma IEC 1000-3-7, así como la tolerancia para *flicker* en la tensión en donde se considera que la energía eléctrica es de mala calidad cuando en un lapso de tiempo mayor al cinco por ciento, del empleado en las mediciones en el Período de Medición, dichas mediciones muestran que el *flicker* ha excedido el rango de tolerancias establecidas.

Esta medida de *flicker* no permite individualizar y parametrizar cada uno de los eventos, por lo que no resulta de importancia para este estudio.

En este marco teórico se presentan diez temas fundamentales para explicar la teoría en que se basará el estudio propuesto

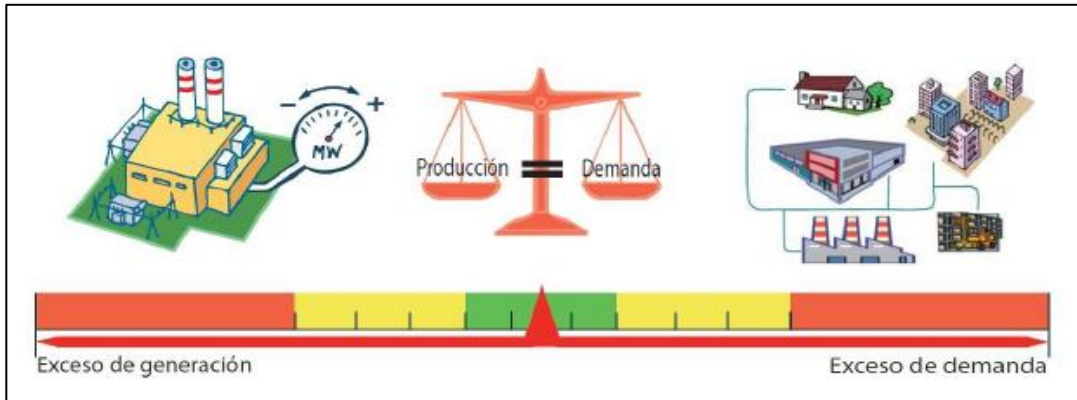
- Breve descripción de un sistema de energía con sus principales componentes.
- Definición de la Calidad del Servicio de Distribución de energía eléctrica.
- Variaciones momentáneas o huecos de voltaje e interrupciones momentáneas de voltaje.
- Dispositivos de red utilizados para eliminar la producción de armónicos por la conexión de la industria al sistema interconectado.
- Norma sobre la forma de onda.
- Que efectos tienen los huecos de voltaje en los elementos o componentes industriales básicos.

- Análisis del impacto económico que tienen los huecos de voltaje en el funcionamiento de la fábrica.
- Curva ITIC/ CBEMA.
- Frecuencia con que se presentan las variaciones de voltaje en los usuarios.
- Estándar SEMI F-47

7.1. Sistema eléctrico

Es un conjunto de infraestructuras y participantes que permiten que el suministro de energía eléctrica que se genera en las centrales llegue hasta el usuario final que lo utiliza para su consumo. La energía eléctrica al igual que cualquier otro producto tiene muchas características comunes, pero cuenta con varias particularidades que hacen que su gestión sea muy compleja debido principalmente a que es un producto que se produce y consume en forma simultánea sin poderse almacenar y que debe de mantener un equilibrio entre la oferta y la demanda. En la figura a continuación, se puede observar el balance entre la generación y el consumo.

Figura 5. **Equilibrio entre la generación y demanda**

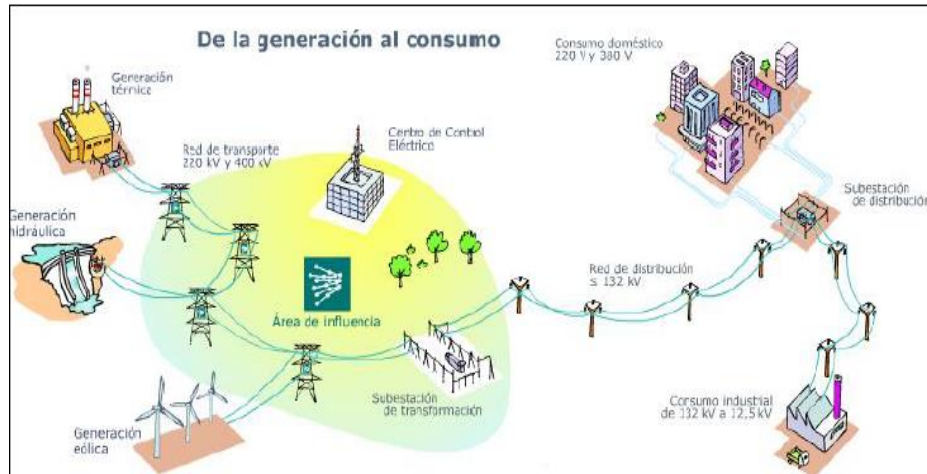


Fuente: Industriales ETSII. UPM. (2003). *Sistemas eléctricos*. Consultado el 22 de junio de 2020. Recuperado de https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/Tema1-2_16-17.pdf.

Por otra parte, la energía debe de ser suministrada en forma constante y cumpliendo las características de calidad que se tienen normalizados lo cual implica alta coordinación de todos los participantes y la disponibilidad de sistemas de respaldo de generación, transmisión, interconexiones, etc. para mantener abastecida la demanda ante cualquier contingencia que se pueda presentar.

En la figura 6 se presenta un esquema que muestra en forma simplificada los principales componentes de un sistema eléctrico compuesto por diferentes tipos de generadores, los sistemas de transmisión y de distribución, las subestaciones de transformación, el centro de control y gestión de la red y los centros de consumidores residenciales e industriales.

Figura 6. Esquema de un sistema eléctrico



Fuente: Escuela de organización industrial. (2015). *Gestión y operación de la red eléctrica*. Consultado el 27 de julio de 2020. Recuperado de <https://www.eoi.es/blogs/merme/gestion-y-operacion-de-la-red-electrica-esquema-de-la-red-electrica-de-espana-asimetria-peninsular-generacion-y-consumo-conexiones-internacionales-3/>.

7.2. Calidad del suministro de energía eléctrica

La calidad del suministro de energía está normalizada en Guatemala y debe cumplir con los parámetros que se determinan en las Normas Técnicas de Calidad del servicio de Distribución (NTSD) emitidas por la CNEE, que buscan la continuidad y la entrega de una forma de onda normalizada que cumpla los parámetros de frecuencia, voltaje, amplitud, fase, distorsión.

De acuerdo con Monzón y Soto (2013):

La continuidad del servicio se define por el número de interrupciones y la duración de estas que se presentan en la red de distribución, entendiéndose

como interrupción cuando el valor de la tensión en el punto de suministro no supera el 1 % de su valor nominal. (p. 15).

En Guatemala para efectos de control, registro y sanciones de acuerdo con el Reglamento de la Ley General de Electricidad (2008), define como interrupción, “toda falta de servicio de energía eléctrica en el punto de entrega. Para efecto de estas normas no se considerarán las interrupciones menores de tres minutos; así como las que sean calificadas como caso de fuerza mayor” (p.2).

En Guatemala se establece que un servicio de energía eléctrica debe de ser continuo, tener la frecuencia nominal de 60 Hz, un nivel de voltaje rms dentro de las tolerancias indicadas y una forma de onda sinusoidal. Cuando se producen variaciones de voltaje o frecuencia en la red se pueden presentar perturbaciones que dependiendo de su magnitud pueden originar paros, daños o malfuncionamiento de los equipos de los usuarios. Estas perturbaciones no deben de confundirse con la micro interrupción del servicio de energía.

7.2.1. Perturbaciones

Se tiene una perturbación cuando se afecta cualquiera de los parámetros normales de la energía eléctrica. Se pueden agrupar en cuatro categorías según su efecto sobre la frecuencia, amplitud, forma de onda y simetría del voltaje. Se detallarán brevemente las más importantes y sus causas principales.

7.2.1.1. Cortes de tensión (interrupciones)

De acuerdo con la Norma UNE (2011) “existe una interrupción de la alimentación cuando la tensión en los puntos de suministro es inferior al 1 % de la tensión declarada” (p.16).

Cuando se da el caso de una interrupción programada, por la empresa eléctrica e informada con el tiempo de antelación requerido a los usuarios afectados, se puede programar mantenimientos o paros en la producción, mayormente sí coinciden con feriados o fines de semana o buscar mantener operando con sistemas de generación propios los procesos más importantes.

Las interrupciones no programadas y que se pueden presentar en cualquier momento son provocadas principalmente por cortocircuitos dentro de la red y en menor grado por pérdidas de generación o sobrecargas en la red. Los interruptores o seccionadores de línea se encargan de liberar los cortocircuitos para restablecer rápidamente el servicio y aislar las secciones afectadas.

Las interrupciones no programadas y que se pueden presentar en cualquier momento son provocadas principalmente por cortocircuitos dentro de la red y en menor grado por pérdidas de generación o sobrecargas en la red. Los interruptores o seccionadores de línea se encargan de liberar los cortocircuitos para restablecer rápidamente el servicio y aislar las secciones afectadas.

Los cortocircuitos pueden ser producidos por fallas en el aislamiento en las líneas aéreas tales como la contaminación de aisladores producida por el smog de los vehículos, el humo de incendios, árboles que caen sobre las líneas o ramas que desprende el viento, choques de vehículos con estructuras, aves como zopilotes que extienden sus alas sobre las líneas y el viento que mueve las líneas y las acerca haciendo que se formen arcos. También es importante considerar las zonas costeras en donde la salinidad daña y contamina los aisladores. La otra causa importante de los cortocircuitos son las sobretensiones que provocan los rayos que caen sobre las líneas que pueden llegar a ser del orden de Mega voltios.

7.2.1.2. Distorsión armónica

Distorsión armónica de acuerdo con CNEE (2003) “es la distorsión de la onda senoidal de corriente o de tensión eléctrica de frecuencia nominal originada por la presencia de señales eléctricas senoidales de frecuencias diferentes y múltiples de dicha frecuencia nominal” (p. 5).

No existe una señal completamente pura por lo que todas tendrán un porcentaje de deformación. La distorsión armónica se mide como un índice expresado en porcentaje. La causa principal de estas distorsiones es la presencia de elementos no lineales en las diferentes cargas conectadas a la red, por lo que son producidas por los usuarios.

7.2.1.3. Variaciones de voltaje

Son provocadas principalmente por incrementos de carga en la red que aumentan la corriente que circula produciendo las caídas de voltaje. Normalmente las redes tienen impedancias muy bajas por lo que las variaciones de voltaje se producen a lo interno de las instalaciones que tienen impedancias mucho más altas. De modo que, las pequeñas caídas de voltaje en la red de suministro se suman a las caídas mayores en el interior de las instalaciones para provocar estas variaciones de voltaje.

7.2.1.4. Flicker en la tensión

De acuerdo con la CNEE (2003) “Flicker es una variación rápida y cíclica de la tensión, que causa una fluctuación correspondiente en la luminosidad de las lámparas a una frecuencia detectable por el ojo humano” (p. 5). En relación con la tolerancia indica que se considera que la energía eléctrica es de mala calidad

cuando en un lapso mayor al cinco por ciento, el empleado en las mediciones en el período de medición, muestran que el *flicker* ha excedido el rango de tolerancias establecidas y establece que las mediciones deben ser tomadas con un medidor de acuerdo con la Norma IEC 868.

7.2.1.5. Huecos de tensión

Los huecos o variaciones momentáneas de voltaje no son tratados ni considerados en forma específica por la CNEE dentro de las NTSD en la regulación de Guatemala y por lo tanto no son considerados ni sancionados. Sin embargo, si se incluyen como uno de los componentes del *flicker* de la tensión.

En otros países europeos y en Estados Unidos, aunque no existe un consenso en la definición de todas sus características, de acuerdo con la Norma utilizada en España, UNE-EN 50160 se tienen las siguientes definiciones:

Un hueco de tensión es una disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor situado entre el 1 y el 90 % de la tensión declarada, seguida de un restablecimiento de la tensión después de un corto lapso, que por convenio tiene una duración de entre 10 ms a 1 minuto

La profundidad de un hueco de tensión es definida como la diferencia entre la tensión eficaz mínima durante el hueco de tensión y la tensión declarada.

Las variaciones de tensión que no reducen la tensión de alimentación inferior a un 90 % de la tensión declarada no son consideradas como huecos de tensión. (UNE, 1994, p. 18)

Según la recomendación IEEE (2019), define al hueco de tensión como: “una disminución de la tensión o la intensidad, en valor eficaz, entre 0.1 y 0.9 pu a la frecuencia de la red, para duraciones comprendidas entre 0.5 ciclos y 1 minuto” (p. 27).

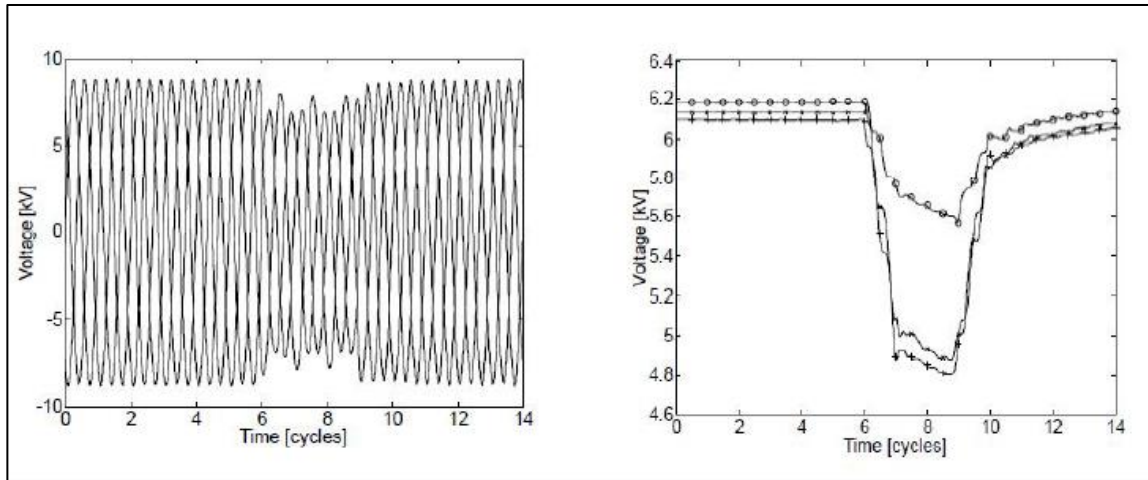
De acuerdo con Monzón y Soto (2013):

Los huecos de voltaje se originan principalmente durante los cortocircuitos que se producen en las líneas que están eléctricamente cercanas. La corriente durante un cortocircuito es muy elevada, solo limitada por la impedancia de la red hasta el punto de la falla. Durante este tiempo la tensión en el punto de la falla desciende a un valor muy bajo, mientras que en los puntos próximos se producen caídas de tensión proporcionales a la distancia eléctrica a este punto.

Cuando se producen los cortocircuitos los nodos cercanos transfieren parte de su energía al punto de la falla, retirándola de los puntos que eléctricamente se encuentran próximos, efecto que puede explicar el modo de propagación de los huecos de tensión en la red. El concepto de la proximidad es un término que tiene relación con la impedancia de la red y no tanto relacionado con la distancia física a la falla (p.19).

En la figura 7 se muestra un ejemplo de una falla trifásica que produce huecos de voltaje en las tres fases.

Figura 7. **Ejemplo de una falla trifásica que genera huecos de tensión en las tres fases**



Fuente: UNE. (1994). *Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución*. Consultado el 2 de agosto de 2020. Recuperado de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0064209>

7.3. Huecos de tensión e interrupciones

Según Monzón y Soto (2013)

Entre todas las perturbaciones que se consideraron y describieron en 7.2.1 para el tema de investigación, tienen gran importancia y relevancia destacar a los huecos de voltaje y las variaciones momentáneas de voltaje ya que constituyen las variables principales del desarrollo y análisis de este trabajo de investigación. Por ser fenómenos transitorios muy parecidos ambos términos están muy relacionados y se ha establecido su pequeña diferencia por la forma en que afectan principalmente a los equipos de alta sensibilidad.

Ambas perturbaciones comparten los rangos de tiempo, entre medio ciclo y un minuto de duración, y tanto en los huecos de tensión como en las interrupciones breves la perturbación supone una bajada de tensión, generalmente brusca, debido a eventos similares en el sistema de transporte o distribución. Por lo tanto, solo se diferencian por la profundidad en la caída de voltaje que presentan. (p. 85)

Entre las particularidades más destacadas de los huecos de voltaje se tienen:

- Magnitud: se refiere a la profundidad del hueco equivalente a la caída de tensión provocada por la perturbación.
- Duración: es el tiempo medido en milisegundos en que se presenta la perturbación hasta que se recupera el valor establecido de 0.9 por unidad.
- Huecos de voltaje monofásico, bifásico o trifásico: se presentarán de acuerdo con las fases que se vean afectadas por el cortocircuito.
- Huecos de voltaje por la incidencia de las altas corrientes de arranque de motores: como la corriente de arranque de algunos motores es muy alta pueden ser la causa de huecos de voltaje.
- Huecos de voltaje por la puesta en operación de dispositivos: durante la energización de los transformadores de subestaciones se presentan transitorios que pueden provocar huecos de tensión.

- Huecos provocados por operaciones en la red de energía de la empresa eléctrica: cuando se ejecutan transferencias de cargas dentro de la red también se producen los huecos de tensión.

En la tabla I se muestra una clasificación de las perturbaciones en función de su duración y profundidad.

Tabla I. Categorías y características de las perturbaciones en el sistema de potencia eléctrico

2.1 Instantáneo		
2.1.1 Interrupción	0,5 - 30 ciclos	<0,1 pu
2.1.2 Hueco de tensión	0,5 - 30 ciclos	0,1 - 0,9 pu
2.1.3 Sobretensión	0,5 - 30 ciclos	1,1 - 1,8 pu
2.2 Momentánea		
2.2.1 Interrupción	30 ciclos - 3 segundos	<0,1 pu
2.2.2 Hueco de tensión	30 ciclos - 3 segundos	0,1 - 0,9 pu
2.2.3 Sobretensión	30 ciclos - 3 segundos	1,1 - 1,4 pu
2.3 Temporal		
2.3.1 Interrupción	3 segundos - 1 minuto	<0,1 pu
2.3.2 Hueco de tensión	3 segundos - 1 minuto	0,1 - 0,9 pu
2.3.3 Sobretensión	3 segundos - 1 minuto	1,1 - 1,2 pu

Fuente: Dugan. (1996). *Electrical Power Systems Quality*.

Según Monzón y Soto (2013) se pueden establecer distintos grados de riesgo para cada perturbación en función del daño potencial sobre las instalaciones y los procesos industriales. Las interrupciones tienen una gravedad alta o muy alta, mientras que los huecos de tensión se consideran de gravedad media. Pero la probabilidad mucho más baja de aparición de las interrupciones frente a los huecos de tensión conlleva a que se consideren a estos últimos como

potencialmente más peligrosos. A pesar de su efecto menos grave, su mayor presencia de aparición significa un mayor número de procesos productivos o el aumento del deterioro de las instalaciones.

7.4. Dispositivos de red utilizados para eliminar la producción de armónicos por la conexión de la industria al sistema nacional interconectado

De acuerdo con los estudios realizados para la conexión de la industria a la red de transporte secundario se requirió instalar bancos de compensación de armónicos en 69 KV en la subestación de Santa María Cauque y en la subestación del usuario a nivel de 13.8 KV. A continuación, se hace una breve descripción de estos.

7.4.1. Bancos de compensación de armónicas en las subestaciones de la Industria y Santa María Cauqué, requeridos para alimentar la Industria en 69 KV

De acuerdo con las recomendaciones IEEE (1992) las prácticas y requerimientos recomendados por IEEE para el control de los armónicos en sistemas de potencia señala que el efecto de una o más fuentes de armónicos en un sistema de potencia depende primordialmente de las características en frecuencia del sistema y de los armónicos generados por las cargas.

Adicionalmente, la distorsión armónica de tensión en el sistema de potencia depende de su característica de Impedancia versus Frecuencia.

Las características de respuesta en frecuencia del sistema son afectadas por varios factores, entre ellos, la capacidad de corto circuito del sistema, la

capacidad de los bancos de compensación, las características de las líneas de transmisión y las de la carga.

7.4.2. Banco de compensación en planta de la Industria

Para la entrada en servicio de una compensación de reactivos es indispensable analizar su impacto en los armónicos del sistema, debido a que, por sus características, esta compensación puede generar amplificaciones inadmisibles de estos armónicos. Además, los armónicos generan requerimientos adicionales de corriente y tensión en la compensación, por lo cual el dimensionamiento de los equipos debe hacerse teniendo en cuenta los efectos de los armónicos.

7.4.2.1. Criterios para especificación de los bancos de capacitores

Los criterios dependerán fundamentalmente de las tensiones máximas a las cuales estarán sometidos. Estas tensiones incluyen la tensión de frecuencia fundamental y las tensiones armónicas, las cuales de acuerdo con la norma IEC 60871 se suman aritméticamente.

7.4.2.2. Criterios para la especificación de las bobinas

Los criterios dependerán fundamentalmente de las tensiones máximas a las cuales estarán sometidos. Estas tensiones incluyen la tensión de frecuencia fundamental y las tensiones armónicas, las cuales de acuerdo con la norma IEC 60871 se suman aritméticamente.

7.4.2.3. Frecuencia de armónicos

La especificación se realiza para tres filtros en paralelo, con una capacidad total de 9.9 MVAR en tres pasos cada uno de ellos de 3.3 MVAR, a 13.8 KV, en donde las bobinas y los capacitores se conectan en serie y se sintonizan al 4.5 armónico de la frecuencia fundamental

Los requerimientos de tensión para los condensadores y de corriente para las bobinas se obtienen asumiendo que los niveles de armónicos de tensión en la barra en donde se conecta la compensación se mantienen dentro de los límites recomendados en la norma IEEE.519.

7.4.2.4. Banco de compensación de armónicos en subestación Santa María Cauqué

En el estudio realizado para la compensación de armónicos en la subestación de 69 KV Santa María Cauqué, se determinó que era necesario colocar un banco capacitivo de 10 MVAR de un solo paso, de acuerdo con la Norma IEEE Std 51d9-1992.

7.5. Consideraciones económicas de las perturbaciones

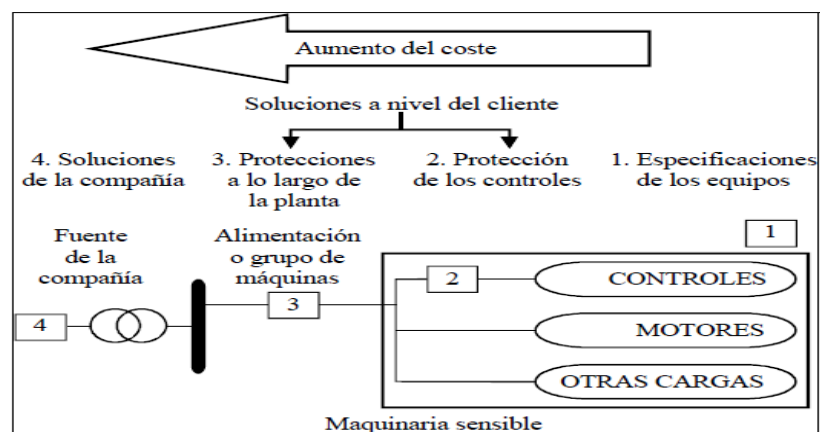
Muchos tienen la idea de que una falla en el suministro de energía para una industria se limita a la pérdida de la energía que no se entregó y que representará un descuento en su factura y posiblemente la empresa eléctrica le tendrá que pagar algún costo de reparación por algún desperfecto que pudiera haber causado la falla dentro de las instalaciones del usuario.

Desafortunadamente los costos que significan estas interrupciones inesperadas para el cliente son muy altas ya que pierde productividad, se limita la vida útil de los equipos, deja de cumplir con el abastecimiento del mercado y tenga que reparar o reponer algún equipo que se pudiera haber dañado.

7.6. Principios de protección contra los huecos de tensión.

Tanto la empresa eléctrica como los consumidores finales y los fabricantes de los equipos pueden tomar diversas medidas para disminuir el número y la severidad de los huecos de la tensión, y reducir asimismo la sensibilidad de las máquinas frente a dichas perturbaciones. En la figura 4 se ilustra diversas soluciones alternativas a los huecos y sus costos relativos. Como indica el gráfico, para Louzán y Pérez (2010), “resulta menos caro abordar el problema cuanto más cerca nos encontremos de la carga. Las soluciones en los niveles más altos de potencia disponible son, por lo general, más costosas” (p. 2).

Figura 8. Soluciones a diferentes niveles y costos involucrados.



Fuente: Louzán y Pérez. (2010). *Métodos de Corrección de Huecos de Tensión y Cortes Breves*. Consultado el día: 10 de agosto de 2020. Recuperado de <http://www.donsion.org/investigacion/trabajos/huecos-Vilamoura.pdf>

7.7. Normativa específica para la medición de los huecos de tensión

En la normativa UNE (2015) técnicas de ensayo y de medida. métodos de medida de la calidad de suministro, se explica claramente los procedimientos para la medición de los fenómenos electromagnéticos en la red.

Se tiene que iniciar con obtener el valor eficaz o rms del voltaje en el punto de entrega del servicio para evaluar los huecos de voltaje. Como se define en todas las normativas, se necesita utilizar medidores trifásicos con registro interno, que deberán conectarse a cada fase del servicio para efectuar esta medición.

Existen varios modelos de equipos de medición que se tienen normalizados en Guatemala por la CNEE para poder realizar estas mediciones (en referencia al *flicker*), y que deben de cumplir con la Norma IEC 868.

Estos medidores tienen que contar con respaldo de baterías para asegurar la continuidad de las mediciones cuando se realizan por períodos considerables de tiempo, para evitar que cualquier interrupción del servicio de energía los apague y obligue a reiniciar las mediciones, y deberán tener certificados vigentes de calibración del fabricante para poder garantizar y oficializar los resultados.

En Guatemala hay varias empresas proveedoras de equipos y servicios que están certificadas por la CNEE que se dedican a la medición y análisis de los resultados de las mediciones.

Para realizar las mediciones que se contratarán en este estudio se seleccionará a una de estas empresas.

7.8. Curva ITIC-CBEMA

La curva de tolerancia de potencia utilizada en este informe se denomina curva ITIC, que anteriormente era conocida como curva CBEMA.

La curva ITIC traza la magnitud de la perturbación en el eje Y en forma porcentual, y la duración en ms de la perturbación en el eje X, como se puede observar en la figura 5.

Las perturbaciones que caen dentro de la envolvente definida por la curva superior e inferior no deben causar problemas operativos en los equipos eléctricos que cumplen con esta norma.

Si bien la curva ITIC se ha aplicado a evaluaciones generales de calidad de energía, se desarrolló principalmente para equipo de computación que operaba con 120 VAC.

Se puede utilizar como referencia para definir la capacidad de varios dispositivos para soportar problemas de calidad de la energía y no solo en equipos de tipo informático. Esto es posible porque la curva es por lo general aplicable a otros equipos que están conformados con dispositivos de estado sólido.

La curva está dividida en tres segmentos:

Las perturbaciones que caen dentro del segmento normal de operaciones de los equipos no afectarán su funcionamiento y seguirán trabajando normalmente. Al analizar la gráfica podemos ver que en esta área se pueden presentar perturbaciones que pueden tener gran amplitud en la variación del valor

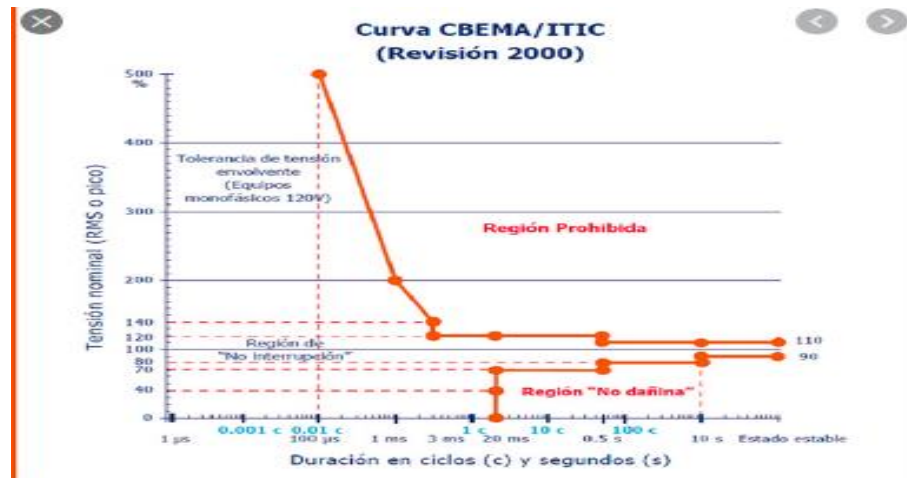
del voltaje, pero condicionados por una corta duración. De la misma manera se puede apreciar que se pueden presentar fallas, relativamente de larga duración, pero de baja amplitud. Los equipos que cumplen con el estándar SEMI F-47 deben trabajar dentro de esta área de la curva.

En el extremo inferior derecho de la curva se encuentra la región de “No Daños” en donde las perturbaciones que se clasifican en esta área hacen que el equipo deje de operar correctamente llegando incluso a apagarse, pero sin producirle daños que impliquen reemplazos de componentes ya que al recuperarse el servicio de energía los equipos volverán a funcionar normalmente.

Las perturbaciones que se clasifican en esta área, a pesar de que no dañan los equipos, pueden provocar paros en la planta y con ello pérdidas económicas muy altas por la baja de productividad.

Por último, se tiene la región prohibida de sobre tensiones, que es donde se clasifican las perturbaciones más peligrosas que pueden dañar en forma permanente los equipos, además de provocar malfuncionamiento mientras están presentes. Por las protecciones dentro de las redes de las empresas de energía eléctrica y de las instalaciones de los usuarios, este tipo de perturbaciones prácticamente no se presentan.

Figura 9. Curva ITIC/CBEMA



Fuente: Prolyt. (s.f.). *Límites de regulación*. Consultado el 13 de agosto de 2020. Recuperado de <https://www.prolyt.com/limites-de-regulacion-2/>

7.9. Frecuencia con que se presentan las variaciones de voltaje en los usuarios

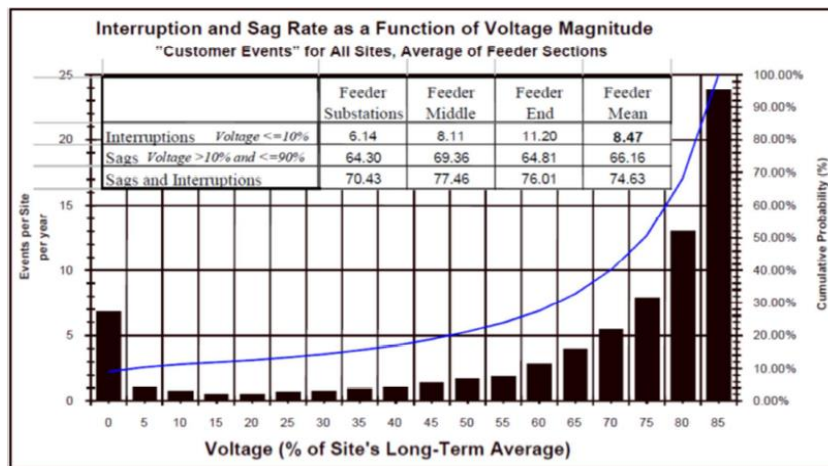
No es inusual que una instalación industrial experimente varias caídas de voltaje durante un año. El Instituto de Investigación de la energía eléctrica (EPRI) realiza investigaciones sobre temas relacionados con la industria de la energía eléctrica y es una organización sin fines de lucro que se financia por la industria de empresas eléctricas.

A principios de la década de 1990, EPRI inició un importante estudio comparativo sobre sistemas de distribución de empresas eléctricas denominado Proyecto de Calidad de la Distribución de Energía (DPQ). Este estudio se inició en los Estados Unidos para observar, medir y Estudiar la frecuencia y severidad de los eventos que afectan la calidad de la energía.

En 2001 y 2002, EPRI realizó un segundo estudio denominado DPQII. Este estudio mostró que se puede esperar un promedio de 66 caídas de voltaje entre el rango de 10 % a 90 % en un sitio dado por año y el número promedio de interrupciones momentáneas (pérdida completa de voltaje) está cerca de siete eventos por año (ver figura 6).

Cabe señalar que, en cualquier sitio dado, las tasas reales de caída de voltaje anuales varían. Algunas variables que influyen Las tasas de caída de voltaje incluyen la configuración de los sistemas de distribución y transmisión, la densidad de clientes, la ubicación geográfica, niveles de actividad de rayos, número de árboles adyacentes a líneas eléctricas y las políticas de mantenimiento preventivo de las empresas eléctricas.

Figura 10. **Resultados de caídas e interrupciones del estudio de DPQ**



Fuente: California Energy Commission. (2000). *Power Quality Solutions for Industrial Customers*. Consultado el día 2 de septiembre de 2020. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/Power-Quality-Solutions-for-Industrial-Customers/179f38049870952888e3fdaca31ee428fad644ad# citing-papers>

7.10. Estándar SEMI F47

La industria de semiconductores, en cooperación con EPRI y las empresas eléctricas, reconoció que un mejor diseño de los equipos ofrece una gran solución para los problemas de caída de voltaje. Esto llevó al desarrollo del estándar SEMI F47 que establece un requerimiento mínimo de inmunidad a la caída de voltaje para el equipo.

Además, otros estándares SEMI proporcionan requisitos de adquisición, métodos de prueba, criterios de aprobación /reprobación y requisitos de informes de pruebas. Aunque este estándar fue desarrollado para la industria manufacturera de semiconductores, también puede aplicarse a equipos en todos los entornos de fabricación industrial. SEMI F47 requiere que los equipos eléctricos toleren las variaciones de voltaje como se indica en la Tabla II y en la tabla II que se muestran a continuación.

Tabla II Inmunidad de caída de voltaje requerido por SEMI F47

	Sag Depth	Duration at 50 Hz	Duration at 60 Hz	Duration in seconds
1	50%	10 cycles	12 cycles	0.2
2	70%	25 cycles	30 cycles	0.5
3	80%	50 cycles	60 cycles	1.0

Fuente: Power Quality In Electrical Systems. (2011). *SEMI F47: Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity*. Consultado el día 10 de septiembre de 2020. Recuperado de <http://www.powerqualityworld.com/2011/04/semi-f47-semiconductor-voltage-sag.html>

Figura 11. Zona de Inmunidad requerida por SEMI F47



Fuente: Power Quality In Electrical Systems. (2011). *SEMI F47: Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity*. Consultado el día 10 de septiembre de 2020. Recuperado de <http://www.powerqualityworld.com/2011/04/semi-f47-semiconductor-voltage-sag.html>

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS

ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. FUNDAMENTOS

- 1.1. Calidad del servicio de distribución de la energía eléctrica
- 1.2. Interrupciones del servicio de energía
- 1.3. Variaciones momentáneas de voltaje
- 1.4. Bancos de compensación capacitiva de la red de energía
 - 1.4.1. Armónicos
 - 1.4.2. Coordinación de aislamiento
 - 1.4.3. Impedancia armónica
- 1.5. Variadores de velocidad de 13.8 KV

2. REGULACIÓN DE CALIDAD DE SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

- 2.1. Normativa de Guatemala sobre la Calidad del Servicio de Distribución (NTSD)

- 2.2. Regulación en otros países de Latinoamérica y USA de Calidad de servicio de distribución
 - 2.3. Recomendaciones y estándares Internacionales IEEE sobre calidad de servicio de distribución
 - 2.4. Inmunidad ante caídas de tensión, curva ITIC y estándares SEMI F47 (CBEMA)
3. MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA
- 3.1. Especificaciones y características de los equipos de medición
 - 3.2. Medición y registro de eventos
 - 3.3. Evaluación de resultados
 - 3.4. Validación de eventos con la empresa de energía
4. ANÁLISIS DEL EFECTO DE VARIACIONES DE VOLTAJE EN LA INDUSTRIA
- 4.1. Topología del sistema de alimentación de 69 KV
 - 4.2. Elementos de compensación contra fenómenos oscilatorios de la red
 - 4.2.1. Impedancia armónica y coordinación de aislamiento de los bancos de compensación capacitiva de la red.
 - 4.3. Localización de la fuente de las variaciones de voltaje
 - 4.4. Mitigación de las variaciones momentáneas de voltaje
 - 4.4.1. Soluciones desde la empresa suministradora
 - 4.4.2. Soluciones por parte del consumidor industrial
 - 4.4.2.1. Ajuste de sensibilidad de protecciones
 - 4.4.2.2. Sistemas de UPS
 - 4.4.2.3. Volantes de inercia

4.4.2.4. Restaurador dinámico de tensión (DVR)

4.4.2.5. Sustitución de equipos con mayor tolerancia a variaciones

4.1. Cuantificación económica de las soluciones

4.1. Evaluación de la calidad del servicio de energía con el sistema de alimentación final de 230 KV

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Características del estudio

A continuación, se enumeran los elementos metodológicos que se estarán considerando en este estudio sobre la Calidad de Energía del Sistema de transporte/ distribución en el área de San Juan Sacatepéquez donde se encuentra localizada la fábrica de materiales de construcción.

9.1.1. Diseño

El diseño adoptado será no experimental, ya que los fenómenos de variaciones de voltaje que se producen en la red que alimenta la fábrica únicamente se medirán, identificarán y se analizará su efecto en el comportamiento del equipo de producción. De ninguna manera se podrá manipular, interrumpir o alterar el suministro de energía para observar o probar comportamientos, ya que, por estar la fábrica en operación comercial, solo se podrá observar los resultados.

9.1.2. Enfoque

El enfoque de este estudio es de tipo cuantitativo y cualitativo (mixto), ya que se deberá hacer un análisis de la calidad del servicio de energía eléctrica en el área de San Juan Sacatepéquez, para lo cual se usarán diferentes procedimientos para realizar las mediciones de acuerdo a normas internacionales y nacionales y considerar el número de fallas (cuantitativo) y las características (cualitativo) de las mismas, así como las diferentes causas de las

perturbaciones(cualitativo) y las magnitudes de las variaciones(cuantitativas) que se producen en el suministro de energía eléctrica en la industria.

9.1.3. Alcance

El alcance del estudio será descriptivo, correlacional y explicativo dado que se tendrán que explicar la cantidad de variaciones de voltaje que se producen, describiendo las fuentes que lo causan y correlacionarlo con las fallas e interrupciones de funcionamiento de la fábrica. Se espera que la información obtenida pueda motivar otros estudios en diferentes lugares del país a fin de mejorar el servicio de electricidad a nivel nacional.

Además, se implementará un procedimiento que restrinja la categorización de las interrupciones del proceso de fabricación como relacionadas con la energía, a menos que se confirme con la compañía eléctrica la falla y que sea cuantificada y acompañada con un gráfico o diagrama ITIC, que es el que se usa para medir la gravedad del evento de calidad de energía y lo compara con la tolerancia de los equipos a las perturbaciones.

9.2. Unidad de análisis

Las perturbaciones que se producen en la red de transporte que causan las variaciones momentáneas de voltaje constituyen la unidad de análisis del estudio, y se pueden definir como aquellas que por su magnitud y duración son catalogadas dentro de la curva de tolerancia de ITIC con la capacidad de provocar mal funcionamiento de los equipos que pueden producir interrupciones de los procesos de producción.

El estudio se limitará al área de transmisión de energía de 69 KV que alimenta la fábrica, con inicio en la subestación Guate Sur. Se incluirá en el análisis los equipos internos de la fábrica que son afectados por las variaciones momentáneas de voltaje.

Hay varios tipos de perturbaciones eléctricas que pueden causar problemas operativos en las instalaciones industriales, entre los que se incluyen sobretensiones, picos, caídas, distorsiones armónicas e interrupciones, sin embargo, no serán considerados, ni analizados en el estudio, ya que como se ha indicado, se limitará a las variaciones momentáneas de voltaje.

9.3. Variables

Del problema descrito se puede plantear una pregunta central:

¿Cuáles son las estrategias, ajustes y modificaciones necesarias para reducir la cantidad de interrupciones de producción de la fábrica causadas por huecos de voltaje en el servicio de alimentación de energía eléctrica?

Para complementar con mayor detalle la pregunta principal se consideran las siguientes preguntas auxiliares y sus variables asociadas

- ¿Qué metodología se usará para medir y registrar las variaciones momentáneas de voltaje en el servicio de energía eléctrica en la industria de San Juan Sacatepéquez conectada en 69 KV?

Metodología de medición: Se refiere a las especificaciones, forma de conexión, calibraciones, tiempo de medición y estándares que deben de cumplir

los medidores de calidad de servicio de la energía eléctrica con los que se efectuarán las mediciones.

Medición y registro: es el conjunto de resultados que se obtendrá de los medidores durante el tiempo en que se estén efectuando las mediciones. Los valores obtenidos deberán ser analizados para verificar el cumplimiento de las tolerancias recomendadas en las normas

- ¿Cuáles son las normas internacionales y nacionales de calidad de servicio que debe de cumplir el servicio de energía eléctrica para evitar los disparos frecuentes de la operación de la fábrica?

Normas de calidad de servicio: establecen indicadores de referencia para calificar la calidad con que se proveen los servicios de energía eléctrica en el punto de entrega y establecen las tolerancias permisibles del servicio, métodos de control, indemnizaciones y sanciones.

Cumplimiento de las normas: conjunto de valores obtenido de las mediciones de calidad de servicio de la energía que determinan si el servicio de energía ha cumplido con las tolerancias permitidas.

- ¿Cuáles son las principales causas de las variaciones de voltaje en el sistema de suministro de energía que producen los disparos de los equipos de protección y los paros de producción?

Variaciones momentáneas de voltaje: se presentan cuando la tensión de una o más fases cae momentáneamente por debajo de un valor establecido, que generalmente se considera del 90 % del valor nominal, pudiendo llegar hasta un 1 % según la norma UNE-EN 50160 o un 10 % según el Real Decreto 1955/2000

(España), y se recupera luego de un periodo corto de tiempo que oscila entre medio ciclo y menos de 3 segundos.

Paros de producción: situación que se presenta cuando se detiene el proceso productivo de una industria. Afecta la productividad e incrementa los costos de producción.

- ¿Cuál sería el impacto económico de la sustitución de equipos de protección y control con especificaciones que los hagan más robustos para volverse menos sensibles a las variaciones de voltaje del suministro eléctrico?

Sustitución de equipos de la fábrica: luego de estudiar los efectos de las variaciones momentáneas de voltaje, los fabricantes de equipos, diseñadores de dispositivos electrónicos, industrias y compañías de electricidad han establecido nuevas especificaciones para los equipos industriales para que sean capaces de continuar operando con la mayoría de estas perturbaciones.

Impacto económico: los equipos que cumplen con especificaciones más estrictas contra las variaciones de voltaje tienen precios más elevados. La sustitución de equipos existentes por otros más resistentes tendrá un impacto económico que tendrá que evaluarse contra las pérdidas provocadas por los paros de producción.

Clasificación de las variables que se estudiarán:

Tabla III. **Clasificación de las variables**

Pregunta Aux.	Variables	Función/Relación	Criterios				
			Complejidad	Operatividad	Medición		
1	Metodología	Independiente	Observable	Simple	Cualitativa	Política	
	Medición y Registro	Dependiente	Manipulable	Compleja	Cuantitativa	Continua	Intervalo
2	Normas de Calidad de servicio	Independiente	Observable	Simple	Cualitativa	Política	
	Cumplimiento	Dependiente	Observable	Simple	Cualitativa	Dicotómica	
3	Variaciones de Voltaje	Independiente	Observable	Compleja	Cuantitativa	Continua	Intervalo
	Paros de Producción	Dependiente	Observable	Simple	Cualitativa	Dicotómica	
6	Sustitución de equipos	Independiente	Manipulable	Simple	Cualitativa	Dicotómica	
	Impacto económico	Dependiente	Observable	Simple	Cuantitativa	Continua	Intervalo

Fuente: elaboración propia.

Las variables que se estudiarán se describen a continuación:

9.4. Fases del estudio

A continuación, se describen las fases en que se realizará el estudio de las variaciones de voltaje en el suministro de energía de la industria.

9.4.1. Fase 1

En esta fase se hará la búsqueda, revisión y consulta de las fuentes bibliográficas que tienen relación con el tema que se investigará, en donde se incluyen las normas técnicas nacionales e internacionales de calidad de servicio distribución de energía, recomendaciones de Instituciones de investigación y desarrollo de la energía eléctrica, fabricantes de equipos industriales y dispositivos electrónicos, empresas de distribución de electricidad, fabricantes de equipos de medición y publicaciones de trabajos experimentales sobre la detección y propuestas de solución de los problemas que se presentan en la industria causadas por variaciones de voltaje en el suministro eléctrico.

9.4.2. Fase 2

Para poder determinar la incidencia del servicio de energía en los paros de la industria se necesita determinar por medio de mediciones la calidad del suministro de la energía. Para ello se deberán seleccionar los equipos de medición y su calibración, puntos y forma de conexión y el período en que se realizará la medición dentro de las instalaciones de la industria. Los resultados de las mediciones deberán de ordenarse, catalogar y almacenarse para ser analizados posteriormente.

9.4.3. Fase 3

La información obtenida de las mediciones de la calidad del servicio será analizada y se verificará las diferentes perturbaciones detectadas:

- Cortes de tensión o interrupciones
- Variaciones momentáneas de voltaje

- Regulación de voltaje
- Armónicos
- Sobretensiones y picos de tensión
- Variaciones de frecuencia

Todas las perturbaciones que provoquen paros o problemas en la producción de la fábrica serán cuantificadas.

9.4.4. Fase 4

Interpretación de información: en general los dispositivos electrónicos funcionan correctamente siempre que el voltaje que los alimenta se mantenga dentro del rango de funcionamiento.

El factor principal que determina si las caídas de voltaje afectarán su funcionamiento es la sensibilidad del equipo electrónico específico que interviene en su proceso. Durante una falla los voltajes y las corrientes se desequilibran. Muchos equipos electrónicos que cuentan con tiempos de respuesta rápidos son sensibles a las caídas de voltaje, en esta categoría están incluidos los controladores de velocidad ajustables (ASD), los arrancadores con voltaje reducido, los controladores lógicos programables (PLC), los inversores y los relés de control. Estos dispositivos de respuesta rápida por lo general carecen de suficiente almacenamiento interno de energía que les permita soportar caídas de voltaje severas provenientes de la fuente de suministro.

Debido a que muchos de estos equipos se usan en aplicaciones que son críticas para el proceso de fabricación, el equipo que se apaga o dispara debido a los huecos de tensión, puede provocar tiempos de inactividad muy costosos y de gran impacto en general para la industria.

Como se han instalado equipos eléctricos en la industria que se fabricaron antes de que existieran estos estándares que normalizan su funcionamiento ante caídas de voltaje, debido a que las empresas eléctricas no medían y cuantificaban estos eventos en su sistema de distribución y porque los clientes no demandaban este tipo prestaciones de los equipos a los fabricantes y además porque las regulaciones y normas nacionales no las especifican ni sancionan, en los últimos años se han desarrollado varias normas con el propósito de definir la inmunidad a la caída de voltaje de los equipos.

Estos estándares sirven para describir cómo se debe fabricar y probar el equipo para cumplir con ciertos criterios de variación de voltaje. Las variaciones que caen fuera de los límites definidos pueden causar interrupción de su funcionamiento, pero serán eventos poco frecuentes. Las variaciones que están dentro de los límites especificados no deben afectar negativamente el equipo ni causar interrupciones. Estos estándares están destinados a proporcionar un compromiso entre un mayor costo de los equipos, pero con un menor costo por inactividad de las instalaciones.

ITIC, formalmente conocido como CBEMA y SEMI, han publicado información que define que niveles de mala calidad de energía, específicamente relacionados con los huecos de tensión, los equipos deberían tener la capacidad de tolerar. En los últimos años se han publicado otros estándares de inmunidad ante caídas de voltaje del suministro. En este estudio se usará únicamente la curva ITIC, mostrada en la figura 9.

9.4.5. Fase 5

Conclusiones y emisión de recomendaciones: Las caídas momentáneas de voltaje o huecos de tensión, son uno de los problemas de calidad de energía más

importantes que afectan los procesos industriales y muchas interrupciones causadas por estas fallas se pueden prevenir. La empresa eléctrica puede mejorar el rendimiento de fallas del sistema en un grado limitado, pero en forma realista, es imposible que las eliminen en forma total. Con suficiente conocimiento de las causas de los problemas, los usuarios industriales y los fabricantes de equipos serán los que al final logren reducir la sensibilidad de los equipos a las caídas de tensión con lo cual mitigarán sus efectos.

En este trabajo se tendrá en cuenta a la empresa de energía eléctrica, se considerará el equipo de la industria, la sustitución de la fuente de suministro de energía de 69 KV por otra más estable de 230 KV que está en construcción y se presentarán todos los resultados y conclusiones para que la industria pueda operar con el menor número de interrupciones debidas a problemas inherentes al suministro de energía.

Se espera que los resultados de este trabajo puedan servir de base a la CNEE para implementar estudios que permitan actualizar las normas técnicas del servicio de distribución en Guatemala y beneficiar con ello la calidad del servicio de energía en la industria. Además, incentivar a otras industrias con problemas similares a realizar estudios que les permitan inmunizar su proceso de producción frente a la mayor cantidad de disturbios del suministro de energía, que originan los disparos y paradas de sus instalaciones.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Como se ha explicado a lo largo de este trabajo de protocolo, esta investigación se iniciará con la obtención de la medición de la calidad del servicio eléctrico que se recibe en las instalaciones de la industria durante un período de un mes, en donde se tendrá que reducir, simplificar y seleccionar todos los datos recabados. Las perturbaciones que se detecten se clasificarán y ordenarán en orden de magnitud descartándose desde el inicio las que no superen un porcentaje, ya que su efecto es despreciable.

La categorización y codificación de los huecos de tensión se hará en base a la normativa específica ITIC-CBEMA, que es una curva de tensión-tiempo.

La normativa específica para medir los huecos de tensión es la europea UNE-EN 61000-4-30 que se encuentra detallada en la sección de técnicas de ensayo y medida. Métodos de medida de la calidad el suministro, que se actualizó en 2009 y que explica la forma y los procedimientos que se usan para medir las perturbaciones que se producen en la red. De acuerdo con esta normativa se necesita hacer la medida con un equipo trifásico conectado a cada una de las fases del servicio, que cumpla con esta norma y que tenga un software que permita procesar los datos registrados para ser analizados.

Para este estudio es importante aplicar criterios espaciales, cronológicos y temáticos para correlacionar los disturbios que se registren en la medición -con la red de distribución de energía y con el comportamiento de los equipos- y su efecto en la producción de la industria. Será muy importante mantener la comunicación con el prestador del servicio eléctrico para entender como los

problemas identificados y codificados en forma selectiva que se presentan en la red provocan perturbaciones en la calidad del servicio que se recibe y luego analizar su efecto en los equipos de la fábrica y de ser posible establecer planes de mantenimiento en la red que minimicen sus efectos.

Se requiere conocer el funcionamiento de los equipos instalados en la industria que son potencialmente sensibles a los huecos de tensión. Se necesita determinar su reacción y para ello se usará la curva descriptiva ITIC-CBEMA, que ofrece la información básica de protección a partir de las especificaciones de su diseño.

Aunque los huecos de tensión afectan a todos los sistemas eléctricos de la industria, este estudio se centrará en los procesos industriales, especialmente en los que son clave para la producción ininterrumpida de la industria.

Los resultados y conclusiones que se esperan obtener de este estudio son:

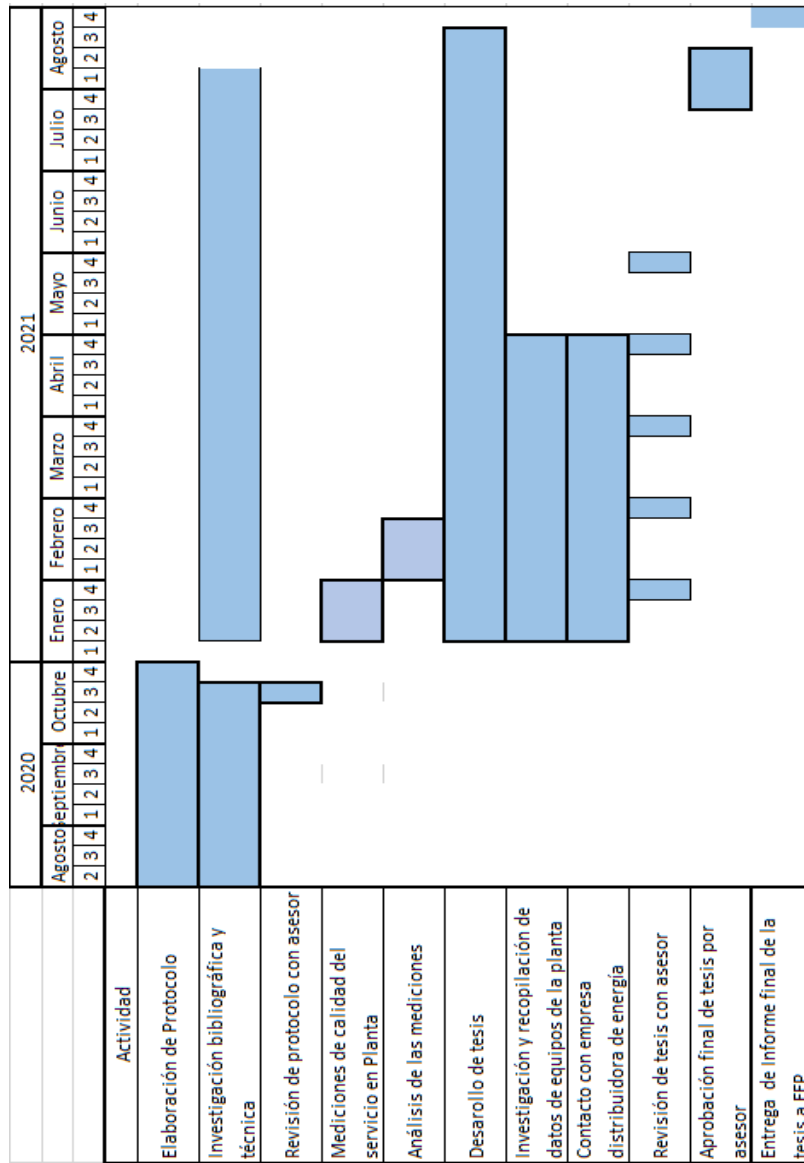
- Determinar costos económicos por paros de producción.
- Proponer soluciones en la red, a la empresa suministradora (prevenciones con mantenimiento, uso de dispositivos como bobinas Petersen, reconfiguración de la red o el desarrollo de la red).
- Proponer soluciones al usuario. (reajustar la sensibilidad de las protecciones, uso de UPS, sistemas de baterías, restauradores dinámicos de tensión, variadores de frecuencia).
- Cuantificación económica de las soluciones.

- Cambio de alimentación a un sistema de 230 KV.

Finalmente se harán las revisiones necesarias para confirmar la validez teórica y práctica de las conclusiones que se presenten en el estudio mediante un intercambio comunicativo con los encargados de la industria y del suministrador del servicio de energía eléctrica.

11. CRONOGRAMA

Figura 12. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA

De acuerdo con el trabajo realizado durante los cursos de Seminarios I y II, se ha logrado conseguir gran cantidad de información sobre el tema de este estudio, principalmente en cuanto a la identificación de las causas que producen las variaciones de voltaje en el suministro eléctrico, estadísticas de la cantidad y severidad de estas fallas que se producen en otros países (USA y España) y que se aplicarán a nuestro caso. Es interesante que además se tiene la información sobre las técnicas, métodos y aplicaciones que se han realizado dentro de las instalaciones de los usuarios para lograr la inmunidad contra estas perturbaciones de la calidad de la energía.

Se cuenta también con el apoyo del personal técnico de la fábrica y la experiencia del asesor sobre el tema y los recursos para realizar las visitas y estudios en el sitio, el equipo para hacer las mediciones y toda la información que se requiere para realizar los estudios del sistema de energía eléctrica y los recursos económicos para poder costearlos.

A continuación, se presenta la tabla VII con el resumen de los recursos más importantes que se requieren para realizar el estudio.

Es importante indicar que los costos del tiempo del asesor, así como los del investigador son solo de referencia ya que no se realizarán.

En cuanto a los costos de la medición de la calidad del servicio de energía (equipo, instalación, interpretación y presentación de resultados) serán costeados por la industria.

Tabla IV. Recursos necesarios

Recurso	Descripción	Cuantificación	Costo estimado quetzales	Fuente de financiamiento
Humano	Investigador	480 horas	10000	Investigador
	Asesor y coasesor	30 horas	3000	Asesor
Tecnológico	Computadora, celular, impresora, internet	Proporcional	2000	Investigador
Acceso a la información.	Privada y pública		N/A	
Permisos	Para ingresos a la fábrica y uso de la información		N/A	
Equipo	Equipo de medición e informe resultados	3 semanas	35000	La industria
Infraestructura	Oficina		1000	Investigador
transporte	Vehículo personal	8 viajes	1600	Investigador
Viáticos	Gastos de viaje		800	Investigador
Software	Antiplagio, antivirus, licencia Windows, otros	Proporcional	1500	Investigador
Impresiones	Varias		2000	Investigador
Imprevistos	Varios		1000	Investigador
Totales			19900	Investigador
			35000	La industria

Fuente: elaboración propia.

13. REFERENCIAS

1. Adams, R. (1996). *Power Quality: A Utility Perspective*. Estados Unidos: AEE Technical Conference Paper. Recuperado de <https://www.osti.gov/biblio/478258>.
2. Asensi, R., Carpio, J., Guirado, R. y Jurado, F. (2006). *Tecnología Eléctrica: Cap. 1 El Sector Eléctrico*. Madrid, España: McGraw-Hill.
3. California Energy Commission (2 de agosto de 2000). *Power Quality Solutions for Industrial Customers* [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/Power-Quality-Solutions-for-Industrial-Customers/179f38049870952888e3fdaca31ee428fad644ad#citing-papers>
4. CNEE-09-99 (7 de abril de 2013). *Normas técnicas del servicio de distribución –NTSD. Resolución CNEE No.- 09-99*. Guatemala: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Recuperado de https://www.cnee.gob.gt/pdf/normas/NTSD_PUBLICADA_V2.pdf
5. Comisión Nacional de Energía Eléctrica, (2016). *Compendio de Normas Técnicas: Normas Técnicas del Servicio de Distribución*. Guatemala: Serviprensa
6. Dugan, R. (1996). *Electrical Power Systems Quality*. New York, USA: McGraw–Hill.

7. EPRI (2003). *Distribution System Power Quality Assessment: Phase II— Voltage Sag and Interruption Analysis*. California: Palo Alto.
8. Escuela de organización industrial (15 de noviembre de 2015). *Gestión y operación de la red eléctrica*. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://www.eoi.es/blogs/merme/gestion-y-operacion-de-la-red-electrica-esquema-de-la-red-electrica-de-espana-asimetria-peninsular-generacion-y-consumo-conexiones-internacionales-3/>
9. Gómez, T. (2013). *Power Systems: Regulation of the Power Sector in Electricity Distribution*. Londres, Reino Unido: Springer
10. Horsley, T. y Seymour, J. (2012). *Los Siete Tipos de Problemas en el Suministro Eléctrico*. Argentina: APC de Schneider Electric. Recuperado de https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=SPD_VAVR-5WKLPK_LS
11. IEEE (13 de agosto de 2019). 1159-2019 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. *IEEE Xplore*, p. 1 – 98. doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8796486
12. IEEE (31 de diciembre de 1992). 1100-1992 - IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment. *IEEE Xplore*, p. 1 - 247. doi: 10.1109/IEEESTD.1992.114798
13. IEEE (31 de mayo de 2012). 1366-2012 - IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. *IEEE Xplore*, p. 1 – 43, doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6209381

14. Industriales ETSII. UPM. (15 de marzo de 2003). *Sistemas eléctricos*. [Presentación de Power Point]. Recuperado de ps://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/Tema1-2_16-17.pdf.
15. Louzán, N y Pérez, M. (2010). *Métodos de Corrección de Huecos de Tensión y Cortes Breves* (Tesis de grado). Universidad de Vigo, España. Recuperado de <http://www.donsion.org/investigacion/trabajos/huecos-Vilamoura.pdf>
16. Monzón, M. y Soto, F. (2013). *Calidad de Suministro Eléctrico: Huecos de Tensión. Mitigación de sus efectos en las Plantas Industriales*. (Tesis de grado). Universidad Carlos III, España. Recuperado de <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/18021>
17. Pacific Gas and Electric Company (2000). *Short Duration Voltage Sags can Cause Disruptions*. Estados Unidos: PGE&C. Recuperado de <http://www.pge.com/includes/docs/pdfs/mybusiness/customerservice/energystatus/powerquality/voltagesags.pdf>
18. Paredes, G. (2008). *Micro Cortes de Suministro: Impacto y Técnicas de Mitigación en Generación Distribuida* (Tesis de grado). Universidad de Chile, Chile. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103277>

19. Power Quality In Electrical Systems (4 de abril de 2011). ITIC curve - power acceptability curve for information technology equipment. [Mensaje de blog]. Recuperado de <http://www.powerqualityworld.com/2011/04/itic-power-acceptability-curve.html>
20. Power Quality In Electrical Systems (5 de abril de 2011). *SEMI F47: Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity*. [Mensaje de blog]. Recuperado de <http://www.powerqualityworld.com/2011/04/semi-f47-semiconductor-voltage-sag.html>
21. Prolyt. (s.f.). *Límites de regulación*. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://www.prolyt.com/limites-de-regulacion-2/>
22. Reglamento de la Ley General de Electricidad (2008). *Disposiciones generales*. Guatemala: Ministerio de Energía y Minas. Recuperado de <https://www.cnee.gob.gt/pdf/marco-legal/ReglamentodelaLGE2014.pdf>
23. Sannino, A. (6 de junio de 2000). Mitigation of voltage sags and short interruptions through distribution system design. *Electrical Engineering University of Palermo*, 123(6), p. 1-6. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/334239213_Voltage_Sags_in_the_network_and_inside_the_Industrial_Plants_Case_of_PS_A-Vigo

24. Stebbins, W. (1 de agosto de 1996). Power Distortion: A User's Perspective on the Selection and Application of Mitigation Equipment and Techniques. *Energy Engineering*, 93(1), 20. Recuperado de <https://search.proquest.com/openview/54787cd211f7e8190b7b3efd62ebace3/1?cbl=40920&pq-origsite=gscholar>
25. UNE (1994). *UNE-EN 50160:1994. Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución*. España: Normalización Española. Recuperado de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0011436>
26. UNE (2011). *UNE-EN 50160:2011. Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución*. España: Normalización Española. Recuperado de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0046945>
27. UNE (2015). *UNE-EN 61000-4-30:2015. Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-30: Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de medida de la calidad de suministro*. España: Normalización Española. Recuperado de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0055654>

28. Vargas, D. (2015). *Estudio de indicadores de calidad del suministro de energía eléctrica de una red de distribución a 13.2 kV* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/60037>