

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**DETERMINACIÓN DE LOS LINEAMIENTOS DE LA CALIDAD DEL SUMINISTRO
DE POTENCIA EN SUBESTACIONES APLICADAS A EQUIPOS DE BOMBEO**

PRESENTADO POR:

CÁNDIDA CAROLINA RAMOS CARPIO

WILLIAN ALBERTO HERRERA GARCÍA

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNVERSITARIA, JULIO DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

PHD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción de grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Titulo:

**DETERMINACIÓN DE LOS LINEAMIENTOS DE LA CALIDAD DEL SUMINISTRO
DE POTENCIA EN SUBESTACIONES APLICADAS A EQUIPOS DE BOMBEO**

Presentado por:

CÁNDIDA CAROLINA RAMOS CARPIO

WILLIAN ALBERTO HERRERA GARCÍA

Trabajo de graduación aprobado por:

Docente Asesor:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

SAN SALVADOR, JULIO DE 2022

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

NOTA Y DEFENSA FINAL

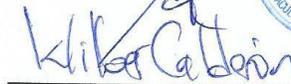
En esta fecha, viernes 8 de julio de 2022, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 4:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón
Director


Firma



2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario

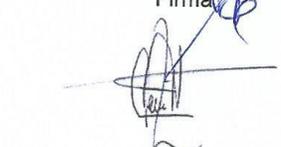

Firma

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- ING. ARMANDO MARTINEZ CALDERON
(Docente Asesor)


Firma

- MSC. JORGE ALBERTO ZETINO CHICAS


Firma

- MSC. LUIS ROBERTO CHEVEZ PAZ


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE SUMINISTRO DE POTENCIA EN SUBESTACIONES
APLICADAS A EQUIPOS DE BOMBEO

A cargo de los Bachilleres:

- HERRERA GARCÍA WILLIAN ALBERTO

- RAMOS CARPIO CÁNDIDA CAROLINA

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.0
(ocho punto cero)

AGRADECIMIENTOS

Primeramente dando gracias Dios, por permitirme llegar hasta el punto de culminar mis estudios superiores, y por fin obtener el ansiado título de ingeniero electricista, sé que detrás de mí ha habido personas que me apoyaron y participaron para que este sueño se hiciera realidad, agradezco a mis padres Salome Herrera y Marina de Herrera que fueron de vital importancia en mi vida como estudiante, gracias a todas aquellas personas que sus palabras fueron dando ánimos para culminar mis estudios, a mi compañera de proyecto de graduación Carolina Ramos quien fue una pieza importantísima en el desarrollo de la tesis, gracias a nuestro asesor Ing. Armando Calderón, que con paciencia nos instruyó y guio en el proyecto de graduación y Reina quien con su paciencia nos orientó en los procesos adjuntos para terminar nuestro proyecto de tesis.

“La vida es una bastedad de sueños sin realizar, depende de nosotros hacerlos realidad”

(Willian Herrera).

El iniciar y terminar este trabajo no hubiese sido posible sin la ayuda de muchas personas.

Primeramente, le agradezco a Dios por permitirme permanecer con vida para lograr terminar con este proceso.

Agradezco infinitamente a mis Padres María Cándida de Ramos y Antonio Ramos, por su apoyo incondicional en mis decisiones, por su paciencia y amor y por motivarme a seguir siempre adelante a pesar de los obstáculos que se han presentado. A mi hermano Erick Ramos por brindarme la inspiración y motivación para luchar y perseverar en la vida.

A mi esposo Erick Ventura y a mi hijo que está por nacer, por llegar a mi vida a llenarme de amor, alegría y nuevas ilusiones.

También a mis compañeros y amigos de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, que han sido parte de este proceso, entre ellos a Francisco Chevez, Jorge Carpio, David Calderón y en especial a Stanley Vichez a quien más que un amigo lo considero mi hermano, al Señor Posada, Juancito gracias a todos por su amistad y por su ayuda.

Agradezco también a mi compañero de tesis William Herrera con quien hemos logrado finalizar este trabajo.

A nuestro catedrático y asesor el Ing. Armando Calderón, gracias por su paciencia y por su orientación profesional que en todo momento nos ha brindado y a Reina Vides, secretaria de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, quien nos orientó en todo el proceso de tesis.

Carolina Ramos

Contenido

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| OBJETIVOS..... | 3 |
| Objetivo General..... | 3 |
| Objetivos Específicos. | 3 |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 4 |
| ALCANCES..... | 5 |
| ANTECEDENTES..... | 6 |
| JUSTIFICACIÓN..... | 13 |
| 1 CAPÍTULO 1: ¿QUÉ ES LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA? | 14 |
| 1.1 Definición de Calidad de Energía..... | 14 |
| 1.2 Importancia de la Calidad de Energía Eléctrica en el Suministro Eléctrico..... | 14 |
| 1.3 Eventos perturbadores que afectan la Calidad de Energía Eléctrica. | 15 |
| 1.3.1 | 16 |
| 1.3.1 Distorsiones de larga duración o permanentes..... | 16 |
| 1.3.1.1 Variaciones de Tensión de estado estable. | 16 |
| 1.3.1.1.1 Sobretensión..... | 16 |
| 1.3.1.1.2 Subtensión..... | 16 |
| 1.3.1.2 Desbalance de Tensión..... | 17 |
| 1.3.1.3 Parpadeos (Flickers)..... | 17 |
| 1.3.1.4 Interrupciones de larga duración (Duración $\geq 1/2$ ciclo)..... | 18 |
| 1.3.1.5 Armónicos Eléctricos..... | 18 |
| 1.3.1.6 Muecas de Tensión..... | 21 |
| 1.3.2 Perturbaciones lentas..... | 21 |
| 1.3.2.1 Interrupciones de corta duración..... | 21 |
| 1.3.2.2 Huecos de Tensión (Sags)..... | 22 |
| 1.3.2.3 Elevaciones de Tensión (Swell)..... | 22 |
| 1.3.2.4 Variaciones de frecuencia..... | 23 |
| 1.3.3 Perturbaciones rápidas..... | 24 |
| 1.3.3.1 Transitorias..... | 24 |
| 1.3.3.1.1 Sobretensiones Transitorias..... | 24 |
| 1.3.3.1.2 Sobretensiones Impulsivas | 24 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1.3.3.1.3 | Sobretensiones Oscilatorias..... | 24 |
| 1.4 | Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución | 24 |
| 1.4.1 | Calidad Comercial..... | 25 |
| 1.4.1.1 | ¿Qué se mide en la calidad Comercial?..... | 25 |
| 1.4.2 | Calidad del Servicio Técnico. | 25 |
| 1.4.2.1 | Indicadores Globales..... | 26 |
| | Indicadores Individuales..... | 26 |
| 1.4.3 | Calidad del Producto Técnico. | 26 |
| 2 | CAPÍTULO 2: EL MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN | 27 |
| 2.1 | Generalidades | 27 |
| 2.2 | Principio de funcionamiento del Motor Trifásico de Inducción..... | 27 |
| 2.3 | Aspectos energéticos. | 28 |
| 2.4 | Rendimiento en los Motores Asíncronos..... | 30 |
| 2.5 | Impacto de la Calidad de Energía en el desempeño del Motor de Inducción. | 31 |
| 2.5.1 | Variación de Tensión. | 32 |
| 2.5.1.1 | Efectos de la variación de tensión en los Motores de Inducción..... | 33 |
| 2.5.2 | Desbalance de Tensiones. | 35 |
| 2.5.2.1 | Definiciones de Desequilibrio de Tensión dadas por las normas internacionales técnicas y de diseño..... | 35 |
| 2.5.2.1.1 | Definición NEMA..... | 35 |
| 2.5.2.1.2 | Definición IEEE. | 36 |
| 2.5.2.1.3 | Definición IEC. | 36 |
| 2.5.2.2 | Efectos del Desbalance de Tensiones en los Motores de Inducción. | 37 |
| 2.5.2.3 | Análisis de un Motor Trifásico por medio del método de Componentes Simétricas. | 38 |
| 2.5.3 | Efectos del contenido armónico en los Motores de Inducción..... | 43 |
| 2.5.3.1 | Desclasificación debido a Armónicos | 43 |
| 3 | CAPÍTULO 3: PARÁMETROS QUE AFECTAN LA CALIDAD DEL PRODUCTO TÉCNICO SEGÚN NORMATIVAS..... | 45 |
| 3.1 | Generalidades. | 45 |
| 3.2 | Normas de Calidad de Energía, Técnicas y de Diseño..... | 46 |
| 3.2.1 | Norma IEE-112. | 47 |
| 3.2.1.1 | Condiciones Eléctricas del Suministro de Potencia. | 47 |

| | | |
|---------|---|----|
| 3.2.2 | IEC60034-1..... | 47 |
| 3.2.2.1 | Condiciones eléctricas para el suministro de potencia..... | 47 |
| 3.2.3 | NEMA MG 1-2004..... | 48 |
| 3.2.3.1 | Condiciones eléctricas para el suministro de potencia..... | 48 |
| 3.2.4 | Estándar IEEE 1159-1995..... | 49 |
| 3.2.5 | Norma de Calidad de Servicio en los Sistemas de Distribución SIGET..... | 50 |
| 3.3 | Normas de la región Centroamericana para la Calidad de Suministro de Potencia..... | 53 |
| 4 | CAPÍTULO 4: DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA EN MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN. | 55 |
| 4.1 | Evaluación de la Eficiencia en el sitio de operación..... | 55 |
| 4.2 | Evaluación de la Eficiencia en condiciones de campo..... | 55 |
| 4.2.1 | Método Datos de Placa..... | 56 |
| 4.2.2 | Método del Circuito Equivalente..... | 57 |
| 4.2.3 | Método de Separación de Perdidas..... | 57 |
| 4.2.4 | Métodos Estadísticos..... | 58 |
| 4.2.5 | Método del Deslizamiento..... | 59 |
| 4.2.6 | Método del Par en el Eje..... | 60 |
| 4.2.7 | Método del Par en el Entrehierro..... | 60 |
| 5 | CAPITULO 5: EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SUMINISTRO PARA PLANTAS DE BOMBEO. | 62 |
| 5.1 | Determinación de la Calidad en el Suministro de Potencia en plantas de bombeo..... | 62 |
| 5.2 | Plan para determinar la Calidad de Suministro y sus efectos en plantas de bombeo..... | 63 |
| 5.2.1 | Investigación..... | 64 |
| 5.2.2 | Recolección de datos generales..... | 64 |
| 5.2.3 | Mediciones de Campo..... | 65 |
| 5.2.4 | Análisis de la Información..... | 67 |
| 5.2.4.1 | Eficiencia de Motores..... | 68 |
| 5.2.4.2 | Análisis de la Eficiencia en Motores Trifásicos con Suministro que presenta Variaciones de Tensión..... | 69 |
| 5.2.4.3 | Análisis de la Eficiencia en Motores Trifásicos con suministro que presenta Desbalance de Tensión..... | 72 |
| 5.2.5 | Resultados..... | 76 |

| | | |
|---------|--|----|
| 5.2.5.1 | Costos de energía para Motores sometidos a condiciones de Variación de Tensión. | 78 |
| 5.2.5.2 | Costos de energía para Motores Sometidos a Condiciones de Desbalance de Tensión. . | 81 |
| 5.2.6 | Identificación de áreas de ahorro. | 82 |
| 6 | CONCLUSIONES | 85 |
| 7 | REFERENCIAS..... | 88 |
| 8 | ANEXOS..... | 90 |

CONTENIDO DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 | |
| Incendio en planta las Pavas año 2016..... | 7 |
| Figura 2 | |
| Reparaciones por Incendio planta las Pavas año 2020..... | 8 |
| Figura 3 | |
| Grafica reparaciones ANDA 2019 | 10 |
| Figura 4 | |
| Gráfico Reparaciones en plantas de ANDA 2020..... | 10 |
| Figura 5 | |
| Gráfico Consumo de energía eléctrica ANDA 2020..... | 11 |
| Figura 6 | |
| Parámetros afectados por la calidad de energía eléctrica | 15 |
| Figura 7 | |
| Campo giratorio del motor asíncrono..... | 27 |
| Figura 8 | |
| Distribución estimada de la demanda global de energía eléctrica por usuario final | 29 |
| Figura 9 | |
| Consumo de energía eléctrica en El Salvador..... | 30 |
| Figura 10 | |
| Efecto por variaciones de voltaje en las características de operación del motor | 33 |
| Figura 11 | |
| Voltaje de desbalance frente al incremento de pérdidas en el motor | 38 |
| Figura 12 | |
| Modelo de motor de inducción..... | 39 |
| Figura 13 | |
| Curva de reducción para armónicos de voltaje | 44 |
| Figura 14 | |
| Categorización de las normativas..... | 46 |
| Figura 15 | |

| | |
|---|----|
| Factor de reducción de potencia para desbalance de tensiones..... | 49 |
| Figura 16. Detalle del rendimiento del motor. Figura 17. Detalles generales del motor. | 58 |
| Figura 18. | |
| Esquema general de perdidas desde el suministro de energía eléctrica hasta la bomba | 62 |
| Figura 19 | |
| Plan de trabajo para determinar la calidad de suministro de potencia en plantas de bombeo | 63 |
| Figura 20 | |
| Esquema de conexión para toma de datos en suministro de potencia..... | 66 |
| Figura 21 | |
| Datos de placa de motor de Inducción trifásico en ANDA..... | 68 |
| Figura 22 | |
| Efecto de las variaciones de voltaje en motores asíncronos..... | 70 |
| Figura 23 Variación de tensión y cambios de eficiencia..... a)Eficiencia a una variación de tensión de 5% b) Eficiencia a una variación de tensión -5% | 71 |
| Figura 25 a)Eficiencia a una variación de tensión 10% b)Eficiencia a una variación de tensión de -10% | 71 |
| Figura 26 Máxima desviación del voltaje de línea..... | 73 |
| Figura 27 | |
| Curva de incremento de pérdidas por desbalance de tensión en motores asíncronos | 74 |
| Figura 28 | |
| Resultado del porcentaje de pérdidas encontradas en Excel VBA..... | 74 |
| Figura 29 | |
| Gráfica de factor de reducción de potencia debido a desbalance de tensión. | 75 |
| Figura 30 | |
| Factor de reducción de potencia encontrado por Excel VBA. | 75 |
| Figura 31 | |
| Eficiencia encontrada con Excel VBA..... | 76 |
| Figura 32 | |
| Muestra de tensiones de línea para el suministro de potencia de motores trifásicos. | 77 |
| Figura 33 | |

| | |
|---|----|
| Muestra de corrientes de línea para el suministro de potencia de motores trifásicos. | 77 |
| Figura 34 | |
| Resultados obtenidos de Variación de tensión en el suministro de potencia a través de Excel. | 79 |
| Figura 35 | |
| Resultados obtenidos por desbalance de tensión en el suministro de potencia a través de Excel. 81 | |
| Figura A.1 | |
| Archivo con muestras de tensión obtenidas en mediciones. | 90 |
| Figura A.2 | |
| Archivo con muestras de Corrientes de línea obtenidas en mediciones. | 91 |
| Figura A.3 | |
| Formato para ingresar mediciones a aplicación de Excel VBA. | 92 |
| Figura A.4 | |
| Entorno de la aplicación realizada en Excel VBA | 93 |
| Figura A.5 | |
| Datos de placa de motor ingresados a aplicación de Excel VBA. | 93 |
| Figura A.6 | |
| Datos capturados por la aplicación Excel VBA. | 94 |
| Figura A.7 | |
| Ventana de aplicación de Excel para calcular costos de operación del motor. | 94 |

CONTENIDO DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 | |
| Costos de operación y mantenimiento | 6 |
| Tabla 2 | |
| <i>Costo de reparaciones electromecánicas año 2019</i> | 9 |
| Tabla 3..... | 10 |
| <i>Reparaciones electromecánicas ANDA 2020</i> | 10 |
| Tabla 4..... | 11 |
| <i>Costo institucional</i> | 11 |
| Tabla 5..... | 49 |
| <i>Efectos de variación de tensión sobre las características de un motor</i> | 49 |
| Tabla 6 | |
| <i>Límites permisibles de tensión</i> | 51 |
| Tabla 7 | |
| <i>Tensiones manejadas en El Salvador</i> | 51 |
| Tabla 8 | |
| <i>Límites de distorsión armónica en redes de media y baja tensión</i> | 52 |
| Tabla 9 | |
| <i>Parámetros límites según normas para evaluar la calidad de producto técnico suministrada a motores de inducción</i> | 52 |
| Tabla 10 | |
| <i>Normas que regulan la calidad de servicio eléctrico en Países de la Región Centroamericana</i> . | 53 |
| Tabla 11 | |
| <i>Cuadro comparativo de la Norma de Calidad Salvadoreña con otros países de la región Centroamericana</i> | 54 |
| Tabla 12 | |
| <i>Características del Motor a analizar</i> | 67 |
| Tabla 13 | |
| <i>Datos de placa del motor ingresados a VBA</i> | 72 |
| Tabla 14 | |

| | |
|---|-----------|
| <i>Resultados para variación de tensión obtenidos con Excel VBA.....</i> | <i>80</i> |
| Tabla 15 | |
| <i>Resultado para Desbalance de Tensión obtenidos con VBA</i> | <i>82</i> |
| Tabla 16 | |
| <i>Acciones Recomendadas para corregir algunos factores que afectan el funcionamiento de los motores de inducción.</i> | <i>84</i> |
| Tabla A.1 | |
| <i>Pliego tarifario de Julio de 2021</i> | <i>95</i> |

INTRODUCCIÓN

En el mundo de la ingeniería eléctrica, existen diversidad de definiciones de la calidad de energía, todo depende del medio en que se aplique. Una de las más sencillas es que la calidad de energía es óptima, si y solo si, los dispositivos conectados a la red eléctrica funcionan normalmente.

De los criterios más relevantes en cuanto a calidad de energía podemos mencionar:

- Alta disponibilidad del suministro eléctrico, tolerancias de tensión dentro los límites permitidos, con una onda senoidal sin perturbación alguna.
- El funcionamiento correcto de la carga eléctrica dependerá del equipo instalado.
- Cualquier anomalía en la entrega de suministro eléctrico que cause que el equipo instalado falle o tenga un mal funcionamiento es muestra de una mala calidad de energía.

La mala calidad de energía genera que las fallas sean una estadística más predominante, esto se ve reflejado en pérdidas económicas a los propietarios de las líneas de producción.

SIGET ente regulador de El Salvador, se encarga de exigir una buena calidad de energía a las distribuidoras, esta institución monitorea a las distribuidoras existentes en el país, de manera, que estas cumplan con las normativas que rigen a los sistemas de distribución eléctrica.

Sin embargo, como se verá más adelante no existe una regulación completa dejando a un lado un parámetro importante, que es, el desbalance de tensión. No obstante, se pueden hacer uso de normas internacionales que si incluyen esta variable en cuanto a un suministro de energía eléctrica de buena calidad presenta.

Por lo que, la comparación de los parámetros que toman en cuenta las normativas internacionales y locales, son de suma importancia para el estudio de la calidad de energía en el suministro de energía eléctrica de El Salvador.

Se utilizan como caso de estudio las mediciones en los alimentadores de una subestación de Alcantarillados y Acueductos ANDA, estas son un conjunto de mediciones en intervalos de tiempo de quince minutos, y de acuerdo a estos datos, se calcula el desbalance de tensión de acuerdo a las normas, NEMA MG1, IEEE STD 112 y IEC 60034-2-1. Los parámetros obtenidos se analizarán y se hará una comparación para determinar las diferencias entre las normativas antes mencionadas, de manera que los valores obtenidos se encuentren en el rango de tolerancia establecidas por cada una de las normativas.

De igual manera, se incorpora el análisis de variación de tensión, parámetro importante en la determinar la buena calidad de energía en el suministro eléctrico.

OBJETIVOS

Objetivo General.

Realizar el estudio de una muestra estadística de subestaciones eléctricas, en plantas de bombeo de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), para determinar las posibles anomalías en la red eléctrica, suministro energético; equipo y otras; y así poder brindar soluciones fundamentales en normas técnicas, de diseño, seguridad y eficiencia, para equipos eléctricos y electrónicos.

Objetivos Específicos.

- ✚ Evaluar indicadores de la calidad de potencia que puedan ser causa de posibles daños en los equipos de bombeo como motores y equipos electrónicos sensibles.
- ✚ Analizar la calidad de energía que suministran las distribuidoras

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Muchos entes de la industria diversificada se encuentran con la necesidad de tener un estudio de calidad de energía y la exigencia de las cargas que estos sistemas de potencia alimentan, de esto, podemos formular interrogantes siguientes:

- ¿Quiénes son los más afectados en términos de variación de tensión, desbalance de tensión, variación de frecuencia y armónicos?
- ¿Cómo evaluar la calidad de energía entregada?
- ¿Cómo se encuentra la red eléctrica en cuanto a las anomalías que generan una mala calidad de energía?
- ¿Es posible formar lineamientos a partir de los parámetros de normas internacionales para contrarrestar estas anomalías?
- ¿Cuánto es la pérdida de rendimiento en los equipos conectados a la red valorado en dólares?

Las respuestas a las interrogantes planteadas no son únicas, y son más bien, el inicio de un proyecto de investigación continua, de reglamento de estándares y normativas para establecer parámetros de importancia, además determinar la sensibilidad que posee la empresa distribuidora a los sistemas de bombeo de Administración de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), de tal manera que se implementen mejores estándares de calidad de energía.

ALCANCES

Establecer parámetros que nos permitan desde un punto de vista de la ingeniería conocer los efectos que la variación de tensión y desbalance de tensión provocan en las instalaciones eléctricas, motores y equipos de bombeo, incluyendo los aspectos técnicos que aseguran la calidad de energía.

Se pretende obtener una muestra de datos que nos permitan establecer y mostrar el comportamiento de las anomalías en el suministro de energía eléctrica, tomando en consideración las normativas vigentes en El Salvador con respecto a los índices de la calidad de energía.

Con la pauta de cumplir con las normas de calidad es necesario entender la potencia requerida de los sistemas de bombeo de la Administración de Acueductos y Alcantarillados (ANDA).

Usar métodos correctivos de acuerdo al problema que se presente en los sistemas estudiados según métodos que se definan en la normativas internacionales y locales.

ANTECEDENTES

Existe un interés inherente en la calidad de energía en el suministro de potencia en las plantas de bombeo de la Administración Nacional de Alcantarillados y Acueductos (ANDA) debido a los fallos que se presentan en las plantas de bombeo que ocasionan funcionamiento ineficiente de motores, paros en la producción, daños en las máquinas electromecánicas, entre otros, y por lo tanto el desabastecimiento del vital líquido a los hogares salvadoreños, además de elevar los costos de operación de las plantas de ANDA, generando mayores gastos al Estado.

Según el documento *Estados de Rendimiento Económico de ANDA 2011 - 2015* para el periodo 2011-2015 el promedio anual de gastos relacionados a energía para el abastecimiento de agua a nivel nacional fue de alrededor de USD\$42.33MM, lo que representa el 49.233% de los costos de producción. Según este informe el mejorar la eficiencia energética del proceso de producción traería como beneficio económico directo y un ahorro de gastos operacionales. Este ahorro permitiría reorientar fondos de la operación normal a proyectos de ampliación de cobertura de servicio y la mejora de la calidad de suministro de agua. Los costos monetarios por O&M para el periodo 2011-2015 se ven reflejados en la tabla 1

De igual forma dicho documento manifiesta que, los motores eléctricos de gran capacidad se han rebobinado en más de una oportunidad a costos muy elevados; todo con la finalidad de darle continuidad al servicio que se brinda a grandes sectores poblacionales.

Tabla 1

Costos de operación y mantenimiento

| Descripción | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | promedio |
|--|---------|---------|--------|---------|---------|----------|
| Costo de Energía Eléctrica (USD\$MM) | \$38.81 | \$49.11 | 33.57 | \$36.43 | \$53.73 | \$42.33 |
| Costo de Energía porcentual respecto al costo de producción | 46.21% | 54.51% | 41.00% | 49.12% | 55.30% | 49.23% |

En febrero del año 2016 en planta las Pavas (actualmente planta Torogoz), ubicada en el municipio de San Pablo Tacachico departamento de la Libertad sufrió el incendio de dos motores provocando el desabastecimiento de 14 municipios que componen el Área Metropolitana de San Salvador, Según el entonces presidente de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), Marco Fortín, el fallo se debió porque el enfriamiento de los motores falló por fatiga, generando un incendio. De acuerdo a Marco Fortín, en ANDA a diario se realizan reparaciones como esta en la principal planta potabilizadora del país Las Pavas, debido a que la mayor parte del equipo está dañado por su antigüedad, además de estar desfasado y generar alto consumo en energía eléctrica. Y por tal razón se esperaba que la Asamblea legislativa del periodo correspondiente 2015-2018, ratificará un préstamo de \$53 millones con el gobierno de Francia para la rehabilitación y modernización de dicha planta, que en su estado óptimo sola producía el 50% de su capacidad.

Figura 1

Incendio en planta las Pavas año 2016



Posteriormente, ese mismo año en la misma semana, se quemó otro equipo en Zona Norte, el sistema complementario para abastecer al AMSS, quedando en funcionamiento sólo cuatro, afectando la producción de agua potable. (Ramos M. , 2016)

De igual manera, en el mes de agosto del año 2020 se presenta un cortocircuito en los paneles de control provocando el incendio de la misma planta Las Pavas, Según el presidente de la actual administración Frederick Benítez, manifiesta que los paneles estaban desgastados generando un cortocircuito en la planta en los paneles 5, 6 y 7, los que alimentan a 4 motores que sirven para el bombeo de agua destinada al Gran San Salvador, este fenómeno se dio debido al sobrecalentamiento de las líneas provocando el incendio. (Teleprensa, 2020)

Figura 2
Reparaciones por Incendio planta las Pavas año 2020



Las principales causas que conllevan a una insuficiente continuidad en el suministro de agua potable son:

- ✚ Reparaciones
- ✚ Paros programados por razones económicas o de capacidad
- ✚ Insuficiente capacidad de la fuente

En el año 2017 según el Resumen ejecutivo del mismo año manifiesta una insuficiente dotación de agua potable, donde un 17.7% de la población dispuso una dotación inferior al objetivo establecido, manifestando que la existencia de racionamiento en el servicio se dio fundamentalmente por tres causas:

- ✚ Costos energía eléctrica.
- ✚ Insuficiente caudal de las fuentes.

- ✚ Falta de capacidad de la infraestructura

Según el boletín memoria de labores del año 2017, en ese año se propone la etapa 1, como plan el Programa de Eficiencia Energética en los sistemas de bombeo de ANDA a nivel nacional, debido a la necesidad urgente de implementar en corto plazo un programa para corregir problemas identificados en el estado actual de motores, bombas y la parte electromecánica que ya habían cumplido su vida útil, este plan tenía un estimado en inversión de \$16.8 millones. con el que se pretendía implementar las acciones de:

- ✚ Sustitución de 336 motores.
- ✚ Sustitución de 338 bombas.
- ✚ Instalación de 68 variadores de frecuencia.

Según este boletín este programa se llevaría a cabo inicialmente el próximo periodo de gestión al cual tenían destinada una inversión inicial de \$8 millones en las obras de:

- ✚ Sustitución de motores, bombas y en los casos que aplique de variadores de frecuencia, paneles de control y árboles de descarga en 46 estaciones de bombeo de la zona Metropolitana del Gran San Salvador y 18 en la Región Oriental del país.

Para el año 2019 en el área de electromecánica se llevaron a cabo 5,079 reparaciones en plantas de bombeo y subestaciones eléctricas a un costo de \$ 1,435.6 miles.

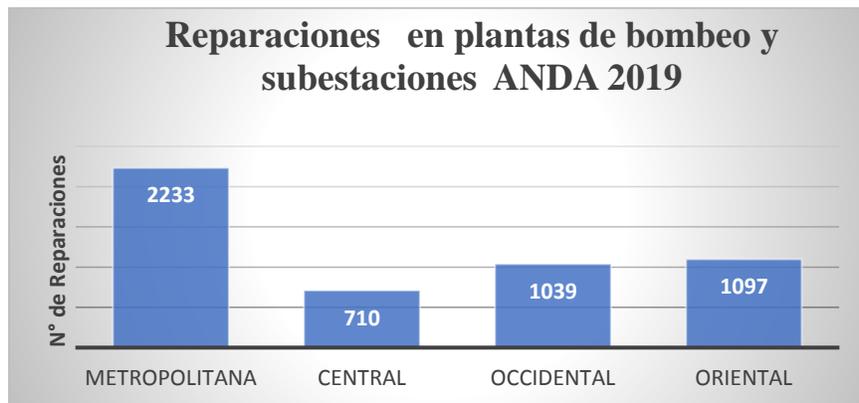
Tabla 2

Costo de reparaciones electromecánicas año 2019

| REGIÓN | REPARACIONES ELECTROMECAICAS | |
|----------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| | NÚMERO | COSTO (MILES DE DÓLARES) |
| Metropolitana | 2233 | 681.2 |
| Central | 710 | 173.6 |
| Occidental | 1039 | 317.5 |
| Oriental | 1097 | 263.4 |
| TOTAL | 5079 | 1435.7 |

Figura 3

Grafica reparaciones ANDA 2019



Para el año 2020 en el área de electromecánica se llevaron a cabo 5,127 reparaciones en plantas de bombeo y subestaciones eléctricas a un costo de \$ 1,484.7 miles (ver tabla 3).

Figura 4

Gráfico Reparaciones en plantas de ANDA 2020

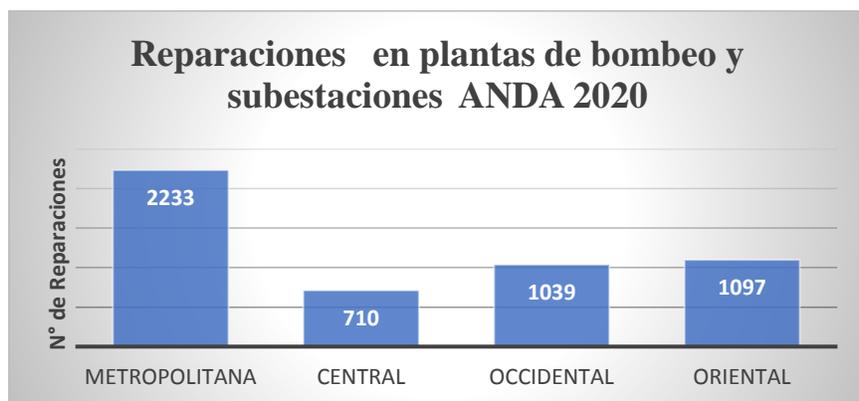


Tabla 3

Reparaciones electromecánicas ANDA 2020

| REGIÓN | REPARACIONES ELECTROMECAÑICAS | |
|----------------------|-------------------------------|--------------------------|
| | NÚMERO | COSTO (MILES DE DÓLARES) |
| Metropolitana | 2298 | 427.9 |
| Central | 757 | 428.8 |
| Occidental | 1161 | 337.6 |
| Oriental | 911 | 290.5 |
| TOTAL | 5127 | 1484.7 |

Según el boletín estadístico para el año 2020 el consumo de energía Eléctrica institucional fue 463450(Miles de kW-h) haciendo un costo de USD\$58303.53(Miles) (ANDA & Arévalo Herrera, Boletín Estadístico 2020, 2021)

Figura 5

Gráfico Consumo de energía eléctrica ANDA 2020

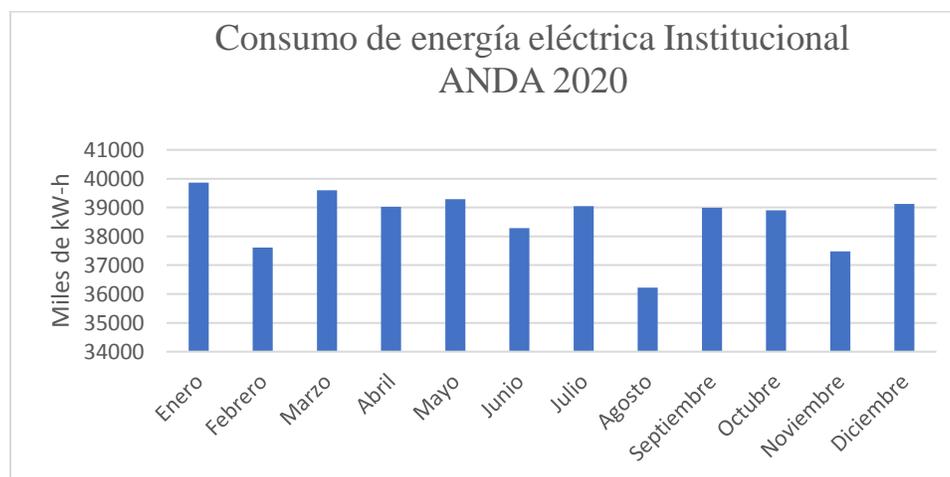


Tabla 4

Costo institucional

| MES | TOTAL, INSTITUCIONAL | |
|-------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| | Consumo (Miles kW-h) | Consumo (Miles de dólares) |
| Enero | 39,865.54 | 5,606.61 |
| Febrero | 37,611.59 | 4,930.32 |
| Marzo | 39,601.54 | 4,901.41 |
| Abril | 39,019.91 | 4,971.83 |
| Mayo | 39,289.46 | 5,057.14 |
| Junio | 38,289.81 | 5,015.80 |
| Julio | 39,042.57 | 4,998.83 |
| Agosto | 36,225.05 | 4,317.30 |
| Septiembre | 38,995.01 | 4,435.56 |
| Octubre | 38,900.56 | 4,385.95 |
| Noviembre | 37,483.34 | 4,686.73 |
| Diciembre | 39,125.98 | 4,996.05 |
| TOTAL | 463,450.36 | 58,303.53 |

Y es tal como se observa en lo presentado anteriormente, las reparaciones para los sistemas de

bombeo y las subestaciones eléctricas en las plantas de bombeo ANDA han tenido un leve aumento, para el año 2020 en comparación con el año 2019, También se nota aumentada la potencia consumida en los últimos años con respecto a la consumida en 2015, a pesar que según los boletines estadísticos de ANDA manifiestan haber realizado menos reparaciones en los últimos años y por ende los costos por consumo de energía eléctrica se han elevado. Esto se podría mejorar en gran manera haciendo estudios de Calidad Energética, para aumentar la eficiencia de las plantas de bombeo. (ANDA, Memorias Laborales, 2017) (ANDA, Resumen Ejecutivo, Septiembre 2017) (ANDA, Boletín Estadístico, 2019)

JUSTIFICACIÓN

Una de las misiones en cuanto al suministro de agua potable es que se debe garantizar su disponibilidad y para ello el suministro de energía debe ser garantizado de forma tal que sea continuo y que cumpla con la actividad en cuanto a los requerimientos para la operación de los motores, equipos de control y de transmisión de datos, puedan estar instalados dentro de la planta, por lo tanto es necesario conocer cuáles son las condiciones con las cuales los equipos de bombeo están siendo alimentados tanto por parte de las distribuidoras como de las subestaciones por parte de ANDA. La finalidad de realizar el estudio de calidad de potencia en el suministro a subestaciones en plantas de bombeo, es evaluar los parámetros de variación tensión y desbalance de tensión y su efecto en la eficiencia de los motores de inducción de las plantas industriales, a la vez realizar una comparación directa con las normas internacionales que regulan estas distorsiones versus la normativa local que es estipulada por SIGET. Estas normativas toman rangos muy estrechos de tolerancia en los valores aceptables para una óptima operación de los sistemas de bombeo en las plantas potabilizadoras de la Administración de Alcantarillados y Acueductos (ANDA); siendo los índices de desequilibrio críticos para los sistemas trifásicos, proponer unos índices que garanticen el funcionamiento estable, así como, buenas prácticas técnicas para este fin.

De esta manera todo aquel sistema que se implemente obtenga pérdidas mínimas por problemas que presente la red eléctrica traducidas en alto consumo de energía eléctrica, y por ende en costos de operación elevados para ANDA.

CAPÍTULO 1: ¿QUÉ ES LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA?

1.1 Definición de Calidad de Energía.

La calidad de energía entregada a un sistema es difícil de definir y cuantificar, ya que para definir lo que es una buena calidad de energía eléctrica dependerá de la aplicación o dispositivo al que se esté alimentando. A continuación, se definirá el término calidad de energía según algunas normas técnicas de, diseño, seguridad y eficiencia, para equipos eléctricos y electrónicos.

Según el estándar IEC 61000-4-30 “Calidad de Energía Eléctrica” se define como las características de la electricidad en un punto dado de la red eléctrica, evaluadas con relación a un conjunto de parámetros técnicos de referencia.

El estándar IEEE 1159/1995 define el término “**Calidad de Energía Eléctrica**” como la gran variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un instante dado y en un punto determinado de la red eléctrica.

Por lo tanto, de manera general la definición de calidad de energía se podría considerar como la ausencia de: interrupciones, sobre tensiones, variaciones de tensión, frecuencia, corriente, distorsión armónica, etc.

La calidad de la energía eléctrica conlleva a la interacción de la energía eléctrica con equipos eléctricos y electrónicos operando de manera adecuada. Si un equipo eléctrico en funcionamiento no opera de forma adecuada o se daña bajo uso normal, una de las causas a considerar debería ser la mala calidad de la energía eléctrica.

1.2 Importancia de la Calidad de Energía Eléctrica en el Suministro Eléctrico.

El suministro de energía eléctrica es un servicio de gran importancia y necesario para el soporte de la vida cotidiana, por lo que la calidad de suministro de energía eléctrica es fundamental para sostener la vitalidad comercial, industrial y social de un país. Realizar estudios de calidad de

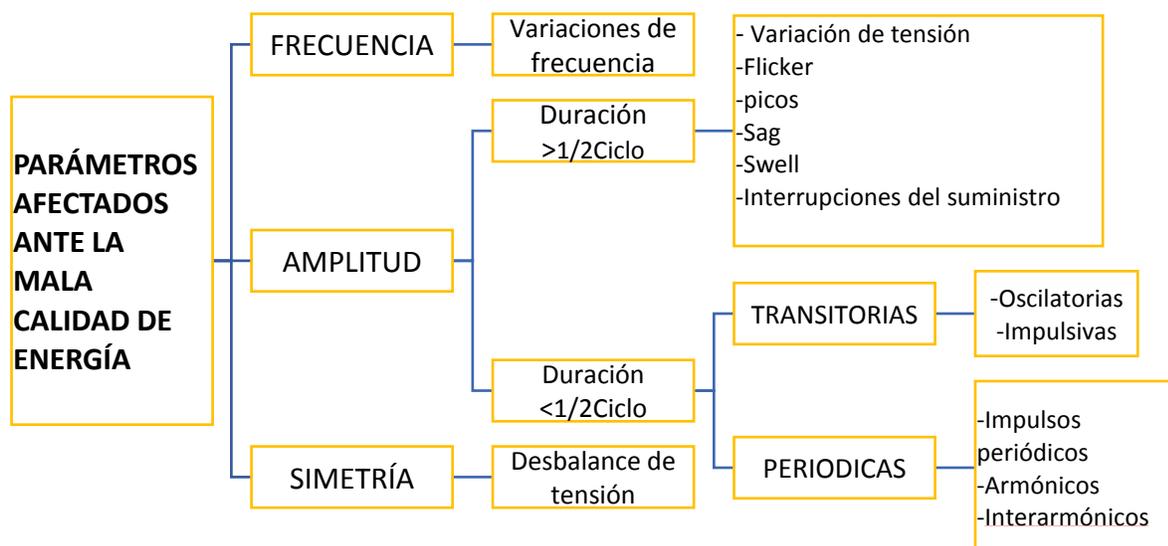
energía eléctrica ha adquirido un nivel elevado de preponderancia con el pasar de los años, debido a la búsqueda del aumento de productividad y competitividad en el comercio y la industria, ya que existe una interrelación entre la calidad de energía eléctrica con la eficiencia y la productividad. Si se tiene una buena calidad de energía en la red de suministro, todas las cargas conectadas funcionarán correctamente y de forma eficiente, además, esto reducirá los costos por operación, mantenimiento y reparación de los equipos. En cambio, si la calidad de energía en la red es mala, las cargas conectadas fallarán o tendrán una vida útil reducida, además de reducir la eficiencia de las instalaciones eléctricas, elevando así los costos por operación y mantenimiento.

1.3 Eventos perturbadores que afectan la Calidad de Energía Eléctrica.

Las ondas eléctricas de tensión y corriente pueden sufrir cambios en su amplitud, forma y frecuencia por perturbaciones electromagnéticas generadas. Estos cambios que afectan la calidad de energía eléctrica son variados, entre ellos tenemos: Desbalances de Tensión, Flicker, Distorsión Armónica, Variaciones de Tensión, Hundimientos, entre otros, tales como los expuestos en la figura 6, estos fenómenos tienen múltiples causas y consecuencias, así como soluciones.

Figura 6

Parámetros afectados por la calidad de energía eléctrica



1.3.1 Distorsiones de larga duración o permanentes.

1.3.1.1 Variaciones de Tensión de estado estable.

Las variaciones de tensión en estado estable son desviaciones del valor R.M.S de la tensión en un intervalo de tiempo superior a un minuto. Por lo que deben ser intervenidas con frecuencia ya que se convierten en interrupciones permanentes, entre las causas de estas variaciones se tienen:

- ✚ Caídas de tensión en transformadores y alimentadores.
- ✚ Cambios de generación y carga.
- ✚ Operación de los sistemas de apantallamiento.
- ✚ Operación de protecciones eléctricas.
- ✚ Algunas operaciones de conexión y desconexión

Hay dos tipos de variaciones de tensión las cuales son:

1.3.1.1.1 *Sobretensión.*

La sobretensión es el incremento de la tensión arriba del valor nominal, con una duración mayor a un minuto, estas sobretensiones pueden ser el resultado de la desconexión de grandes cargas o a la conexión de bancos de capacitores.

1.3.1.1.2 *Subtensión.*

La subtensión es el decremento debajo del valor R.M.S nominal con una duración mayor a un minuto. Al igual que en las sobretensiones las subtensiones pueden ser provocadas por la conexión de nuevas cargas como el arranque de grandes motores dentro de una planta industrial puede dar como resultado una caída significativa de la tensión. Un motor puede consumir seis veces su corriente nominal o más, al momento del arranque. La creación de una gran carga eléctrica repentina como esta seguramente cause una caída significativa de tensión en el resto del circuito en que reside.

1.3.1.2 Desbalance de Tensión.

El desbalance de tensión se define como las variaciones de voltaje y corriente de los sistemas trifásicos cuando los valores RMS de voltaje o los ángulos de fase difieren entre sí. Desbalance de tensiones puede ocurrir por:

- ✚ Cargas desequilibradas.
- ✚ Cargas monofásicas conectadas en circuitos trifásicos.
- ✚ Componentes de corriente continua en el sistema.
- ✚ Los transformadores conectados en delta abierto.
- ✚ Fallas de aislamiento en conductores no detectadas.

Los desbalances de tensión pueden provocar altas corrientes en motores, transformadores, barrajes y acometidas; las pérdidas eléctricas y fallas en la coordinación de protecciones también pueden ser afectadas.

1.3.1.3 Parpadeos (Flickers).

En términos generales el Flicker es un cambio visible y repetitivo en la intensidad de la luz causado en su mayoría por las fluctuaciones de voltaje en las redes eléctricas. La magnitud, forma y frecuencia dependerá de factores como la calidad del suministro de energía, el tipo de balastro o driver que se esté utilizando, la técnica de regulación de luz aplicada, incluso la aparición de conexiones sueltas. Este tipo de perturbaciones son variaciones bruscas y rápidas de tensión que también son comúnmente llamados fluctuaciones de tensión, caracterizados por cambios rápidos en el valor eficaz de tensión. La causa principal se debe a cargas grandes que manejan corrientes variables, esta condición hace que se presente modulación del voltaje en la barra de carga y en barras remotas. Entre las fuentes de flickers están:

- ✚ Transitorios debidos a maniobras.

- ✚ Arranque de grandes motores.
- ✚ Trenes de laminación (proceso de laminación).
- ✚ Trituradores para procesos mineros.
- ✚ Generación eólica distribuida
- ✚ Generación distribuida
- ✚ Soldadores eléctricos. (Máquinas de soldadura)
- ✚ Hornos de inducción (0.5 a 30 Hz)

1.3.1.4 Interrupciones de larga duración (Duración $\geq 1/2$ ciclo).

Una interrupción de larga duración sucede cuando hay ausencia de tensión por periodos de tiempo superiores a 1 minuto, además es una condición en la cual la tensión es inferior al 10% de la tensión nominal. Se clasifican en programadas y accidentales, estas últimas son fallas primarias es decir que no son controladas. Como por ejemplo accidentes, ambientales, fallas humanas.

1.3.1.5 Armónicos Eléctricos.

Los armónicos son señales eléctricas con frecuencias múltiplos de la fundamental en El Salvador 60 Hz, provocando distorsiones de las ondas sinodales de tensión o corriente de los sistemas eléctricos ocasionados por el uso de cargas no lineales a lo largo de la red eléctrica. Entre estos armónicos están los armónicos característicos producidos por equipos convertidores semiconductores en el curso de la operación normal. En un convertidor de seis pulsos, los armónicos característicos son los armónicos impares diferentes a los múltiplos de tres, por ejemplo, los 5th, 7th, 11th, 13th, etc.

$$h = kq \pm 1 \quad [1.1]$$

Donde: $k=u$

$k = \text{algún entero}$ $q = \text{número de pulso del convertido}$

Por otro lado, están los armónicos no característicos que no son producidos por equipos convertidores semiconductores en el curso de la operación normal. Estos pueden ser el resultado de frecuencias oscilatorias; una demodulación de armónicos característicos y la fundamental; o un desbalance en los sistemas de potencia AC.

Las formas de onda distorsionadas son descompuestas, de acuerdo con Fourier, en la suma de una componente fundamental más las componentes armónicas. La distorsión armónica se origina, fundamentalmente, por la característica no lineal de las cargas en los sistemas de potencia (Marrero, 2007)

La presencia de armónicos en la red genera problemas en el sistema eléctrico, estos efectos dañinos se señalan a continuación:

- ✚ Interferencia en el rango de audiofrecuencias con señales de control y líneas de energía. Los armónicos de tensión pueden provocar disturbios en los sistemas electrónicos. Por ejemplo, afectan el normal desempeño de los tiristores.
- ✚ Corrientes armónicas en motores de inducción, transformadores y claves que causan pérdidas adicionales de energía y calentamiento. Estos efectos son, en su mayor parte, atribuibles a armónicas de orden menor y altas magnitudes de amplitud.
- ✚ Inestabilidad dieléctrica de cables aislados como resultado de sobretensiones del sistema. - Interferencia inductiva con los sistemas de comunicación, que resulta del acoplamiento inductivo entre las frecuencias armónicas y las líneas de comunicación.
- ✚ Errores en los equipos de medición, debido a que generalmente los diseños consideran señales sinodales puras.
- ✚ Provocan la disminución del factor de potencia.

La mitigación de estos efectos armónicos puede llevarse a cabo mediante:

- ✚ El monitoreo constante de los sistemas para detectar la presencia de armónicos indeseables.
- ✚ La utilización de filtros para eliminar los armónicos indeseables.
- ✚ El dimensionamiento de los transformadores, máquinas y cables teniendo en cuenta la presencia de corrientes no sinusoidales (presencia de armónicos). Este es el menos recomendado puesto que la solución sería muy costosa por la compra de nuevos equipos y en muchos casos rediseño del sistema eléctrico.

La existencia de armónicos de tensión y corriente en el sistema pueden ser cuantificados y evaluados por medio de los siguientes indicadores:

- ✚ **Distorsión armónica individual:** Los contenidos o tasas de los diferentes armónicos de tensión que constituyen una onda deformada se expresan en forma de porcentaje respecto de la componente fundamental, de acuerdo con la siguiente relación:

$$IHD_n = \frac{V_n}{V_1} * 100\%(Tensión\ y\ corriente) \quad [1.2]$$

En esta expresión, V_n es la amplitud del armónico de tensión de orden n y V_1 la amplitud de la componente fundamental de la onda de tensión.

- ✚ **Distorsión armónica total (Tensión y corriente):** El nivel de distorsión armónica se describe por el espectro total armónico mediante las magnitudes y el ángulo de fase de cada componente individual. Es común, además, utilizar un criterio denominado distorsión total armónica (THD) como una medida de la distorsión.

$$THDV (tensión) = \frac{\sqrt{V_3^2 + V_5^2 + V_7^2 \dots}}{V_1} \quad [1.3]$$

$$THDi (corriente) = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 \dots}}{I_1} \quad [1.4]$$

✚ **Distorsión demanda total (TDD):** Es la relación entre la corriente armónica total y la demanda máxima de la corriente de carga.

$$THDi = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 \dots}}{I_{demanda\ max}} \quad [1.5]$$

1.3.1.6 Muestras de Tensión.

Las muescas son perturbaciones periódicas en la forma de onda de voltaje del sistema con duración menor a medio ciclo, son causadas por la operación normal de cargas no líneas y elementos electrónicos para alta potencia cuando la corriente es conmutada de una fase a otra, como ocurren continuamente, son caracterizadas por el espectro armónico de la tensión afectada y son tratadas como un caso poco usual en los sistemas eléctricos por su dificultad para ser detectadas. Las muescas de tensión causan fallas en sistemas de regulación y fallas en el funcionamiento de algunos equipos electrónicos. Y su mitigación implica el aislamiento, de los equipos sensibles, de la fuente que las está produciendo. Utilizar más cargas inductivas como motores también sirve como solución para eliminar este tipo de perturbación.

1.3.2 Perturbaciones lentas.

1.3.2.1 Interrupciones de corta duración.

Una interrupción de corta duración sucede cuando hay ausencia de tensión por periodos de tiempo no superiores a 1 minuto, además puede catalogar una interrupción corta cuando no disminuye por más del 10% de la tensión nominal. La duración de la falla depende de la capacidad de reacción y de re cierre de la protección, puesto que por lo general las protecciones de reclosing tienen un tiempo inferior a 1 minuto o 30 ciclos. Es por esta razón que las fallas en el

dispositivo de protección causan o determinan el tipo de perturbación de momentánea a permanente.

1.3.2.2 Huecos de Tensión (Sags)

Los sags se relacionan los problemas de calidad de energía y son generalmente el resultado de fallas en el sistema de alimentación y de conmutación acciones para aislar las secciones con fallas. Se caracterizan por las variaciones del margen de tensión fuera del rango normal de funcionamiento de las tensiones. Un hueco de tensión tiene una corta duración (típicamente de 0,5 a 30 ciclos o 1 minuto) la reducción en el voltaje RMS causada generalmente por una falla lejana en alguna parte del sistema de potencia. Las reducciones en los sags están entre el 90% y el 10% el valor eficaz de la tensión.

1.3.2.3 Elevaciones de Tensión (Swell)

Cuando el valor nominal eficaz de tensión sube por encima del 110% de la tensión declarada con una duración entre 0,5 ciclos (8,33 milisegundos) y 30 ciclos (1 minuto), a esta perturbación se le conoce con el nombre de elevaciones de tensión (swells) o también llamadas en algunas publicaciones sobretensiones momentáneas. Esta elevaciones se producen generalmente por fallas en sistema eléctrico, donde las fallas monofásicas son las más comunes provocando una subida temporal tensión en las fases no involucradas en la falla pero es poco probable que se de en la misma magnitud cerca de la subestación y en la subestación misma, además de la conexión delta-estrella del transformador de la subestación que provee el camino de baja impedancia para las corrientes de secuencia a tierra más la puesta a tierra misma de la subestación. Otras causas son desconexión o cambios de grandes cargas, conexión de grandes bancos de condensadores, resonancias y ocurrencia de fenómenos de descargas atmosféricas naturales.

El valor de la elevación de tensión es proporcional a la distancia a donde ocurre la falla, el valor de impedancia y la capacidad de la puesta a tierra del sistema de alimentación. La consecuencia

más relevante de las elevaciones de tensión es la pérdida de vida útil de los equipos conectados al sistema, así como desgaste del aislamiento eléctrico en máquinas rotativas y estáticas. También se presentan operaciones indeseadas en relés de protección e incremento en la potencia de salida en banco de condensadores. (International Standar IEC , 2013)

1.3.2.4 Variaciones de frecuencia.

Las variaciones de frecuencia en un sistema eléctrico de Corriente Alterna se producen cuando existe una alteración del equilibrio entre carga y generación y está directamente relacionada con la velocidad de giro, es decir, con las RPM de los alternadores. También se puede atribuir estas variaciones a la carga del sistema, es decir cuando la carga supera la capacidad de generación, suelen presentarse disminuciones de la frecuencia.

La variación o distorsión en el valor de la frecuencia produce problemas en las redes y más que todo en los equipos electrónicos asociados a ellas, siendo estos muy sensibles a las variaciones fuertes en la frecuencia; produciendo un inadecuado funcionamiento de estos equipos. También producen errores de sincronización en usuarios con grandes cargas de rectificadores e interrupción de servicio y variaciones de tensión por deslastre de carga. Los efectos de estas variaciones en las cargas a parte del cambio de la velocidad de giro de las máquinas rotativas son:

- ✚ Los motores transmiten más o menos potencia.
- ✚ Los relojes eléctricos sincronizados con la red, atrasan o adelantan. También tienen efecto sobre otros equipos.
- ✚ Los filtros de armónicos sufren un efecto distorsionador.
- ✚ Los equipos electrónicos que utilizan la frecuencia como referencia de tiempo se ven alterados.

1.3.3 Perturbaciones rápidas

1.3.3.1 Transitorias

Estas perturbaciones son generadas por impulsos de voltaje de alta velocidad superpuestos sobre la onda sinusoidal de energía eléctrica, los tiempos de duración son muy rápidos (microsegundos) y los cambios en la tensión y corriente son muy altos, lo que puede ocasionar daños en equipos sensibles y electrónicos. Estos cambios bruscos del sistema son ocasionados comúnmente por descargas atmosféricas y sistemas de refrigeración.

1.3.3.1.1 *Sobretensiones Transitorias*

Son cambios bruscos en el valor instantáneo de la amplitud de la tensión, es decir que pueden llevar a valores superiores al valor nominal de esta. La duración fluctúa entre los microsegundos.

1.3.3.1.2 *Sobretensiones Impulsivas*

Son perturbaciones unidireccionales donde la magnitud es mayor, pero con baja energía, y son ocasionadas por descargas eléctricas.

1.3.3.1.3 *Sobretensiones Oscilatorias*

Estas sobretensiones son ocasionadas por lo general por malas conexiones y fuertes desconexiones de cargas, entre otros. Y consisten en cambios rápidos de polaridad en el valor instantáneo de voltaje. Las sobretensiones transitorias pueden afectar a todos los elementos del sistema eléctrico. (Cajas Flores, 2008)

1.4 Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución

La Regulación de Calidad de Servicio Eléctrico de Distribución en El Salvador, se establece bajo la normativa de Calidad de la SIGET, en donde la calidad del servicio eléctrico prestado por las distribuidoras al usuario se define en base a tres parámetros:

 Calidad comercial

- ✚ Calidad del Producto Técnico

- ✚ Calidad del Servicio Técnico

1.4.1 Calidad Comercial.

La calidad comercial está relacionada con: Atención al usuario, Medios de atención al usuario, Precisión de los elementos de medición y es medida mediante Indicadores Globales e Indicadores individuales.

Los indicadores globales calculan el porcentaje de clientes que deben ser atendidos como mínimo dentro de un periodo máximo establecido o tiempo de control. Y los Indicadores Individuales establece el tiempo máximo en el cual se debe otorgar un servicio a un cliente.

1.4.1.1 ¿Qué se mide en la calidad Comercial?

La calidad Comercial mide:

- ✚ La Conexión del servicio Eléctrico del Medidor
- ✚ La Reposición del Suministro después de una Interrupción Individual
- ✚ El Restablecimiento del Servicio Suspendido por Falta de Pago
- ✚ Las Estimaciones en el Plazo de Respuesta a las consultas de los usuarios
- ✚ La información a Usuarios Finales acerca de Interrupciones Programadas
- ✚ Reclamos por Inconvenientes con el Nivel de Tensión del Suministro
- ✚ Reclamos por mal funcionamiento del Medidor

1.4.2 Calidad del Servicio Técnico.

La Calidad de Servicio técnico, regula las interrupciones de servicio eléctrico estableciendo límites para su frecuencia y duración, los indicadores de Calidad del Servicio Técnico se dividen en Indicadores Globales e Indicadores Individuales.

1.4.2.1 Indicadores Globales.

FMIK (Frecuencia Media de Interrupción por KVA): Representa la cantidad de veces que el KVA instalado promedio de la Empresa Distribuidora sufrió una interrupción de servicio en el período analizado

TTIK (Tiempo Total de Interrupción por KVA): Representa el tiempo, en valor medio, que cada KVA instalado del conjunto considerado estuvo sin suministro en el año.

1.4.2.2 Indicadores Individuales.

SAIFI_{US} Índice de Frecuencia de Interrupción por Usuario

(Interrupciones/Usuario/Año): Representa la cantidad de veces que cada usuario de la Empresa Distribuidora sufrió una interrupción de servicio en el período analizado.

SAIDI_{US} Índice de Duración de Interrupciones por Usuario (Horas/Usuario/Año):

Representa el tiempo que cada usuario del conjunto considerado estuvo sin suministro en el año.

1.4.3 Calidad del Producto Técnico.

La Calidad de Producto Técnico se determina al establecer pautas para los parámetros eléctricos con el fin de poder entregar una energía de buena calidad. La Calidad de Producto Técnico Suministrado implica la medición de los siguientes elementos:

-  Niveles de Tensión
-  Perturbaciones en la onda de voltaje (flicker y tensiones armónicas)
-  Incidencia del Usuario en la Calidad.

CAPÍTULO 2: EL MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN

2.1 Generalidades

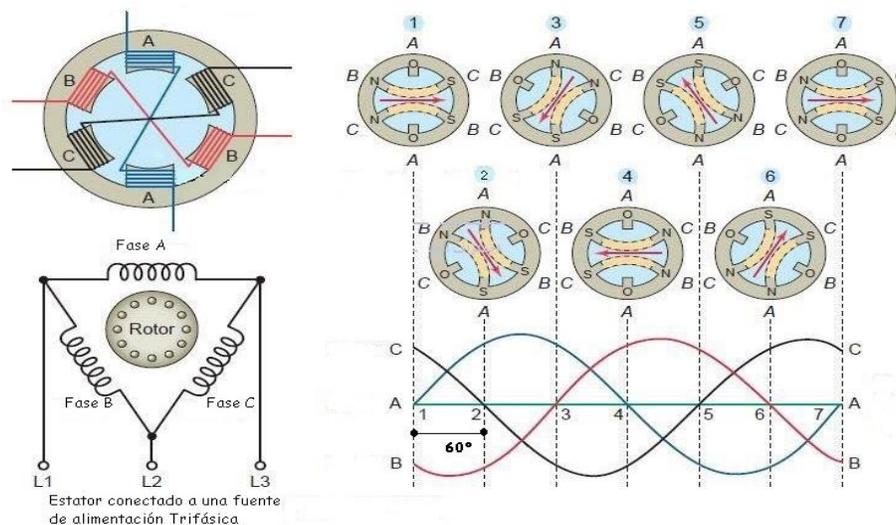
Los motores asíncronos de inducción son máquinas eléctricas de corriente alterna que están formadas por un rotor que puede ser bobinado o tipo jaula de ardilla y un estator en el que se encuentran sus bobinas inductoras. Las bobinas de este tipo de motores son trifásicas y están desfasadas 120° entre sí, obedeciendo el teorema de Ferraris

2.2 Principio de funcionamiento del Motor Trifásico de Inducción

El funcionamiento de un motor de inducción se basa en la aplicación de la Ley de Inducción Electromagnética de Faraday y la Fuerza de Laplace en un conductor. Conforme al Teorema de Ferraris, al alimentar el devanado trifásico del estator formado por tres fases idénticas desfasadas 120° entre sí, con un sistema equilibrado y con ondas de corriente perfectamente sinusoidales, se produce un campo magnético rotatorio en consecuencia de una fuerza magnetomotriz, con una velocidad de giro conocida como velocidad de sincronismo.

Figura 7

Campo giratorio del motor asíncrono



La velocidad de sincronismo o síncrona η depende del número de polos p y de la frecuencia f , la cual viene dada por la expresión:

$$\eta = \frac{120f}{p} \quad [2.1]$$

El campo magnético rotatorio que es originado en las bobinas estáticas, corta los conductores del rotor generando en ellos una fuerza electromotriz (fem). Al estar los conductores del rotor en cortocircuito, circulan corrientes que generan un nuevo campo rotatorio inducido produciendo un par electromagnético que pone en movimiento al rotor.

La diferencia de la velocidad mecánica del rotor con la velocidad del campo magnético rotatorio producido en el estator se conoce como deslizamiento S , suele encontrarse en rangos de entre el 2% y 8% para una máquina en operación. La cuál se expresa de la siguiente manera:

$$S = \frac{\eta_s - \eta_r}{\eta_s} * 100\% \quad [2.2]$$

De donde:

η_s = Velocidad síncrona (rpm);

η_r = Velocidad rotórica (rpm);

S = Deslizamiento.

2.3 Aspectos energéticos.

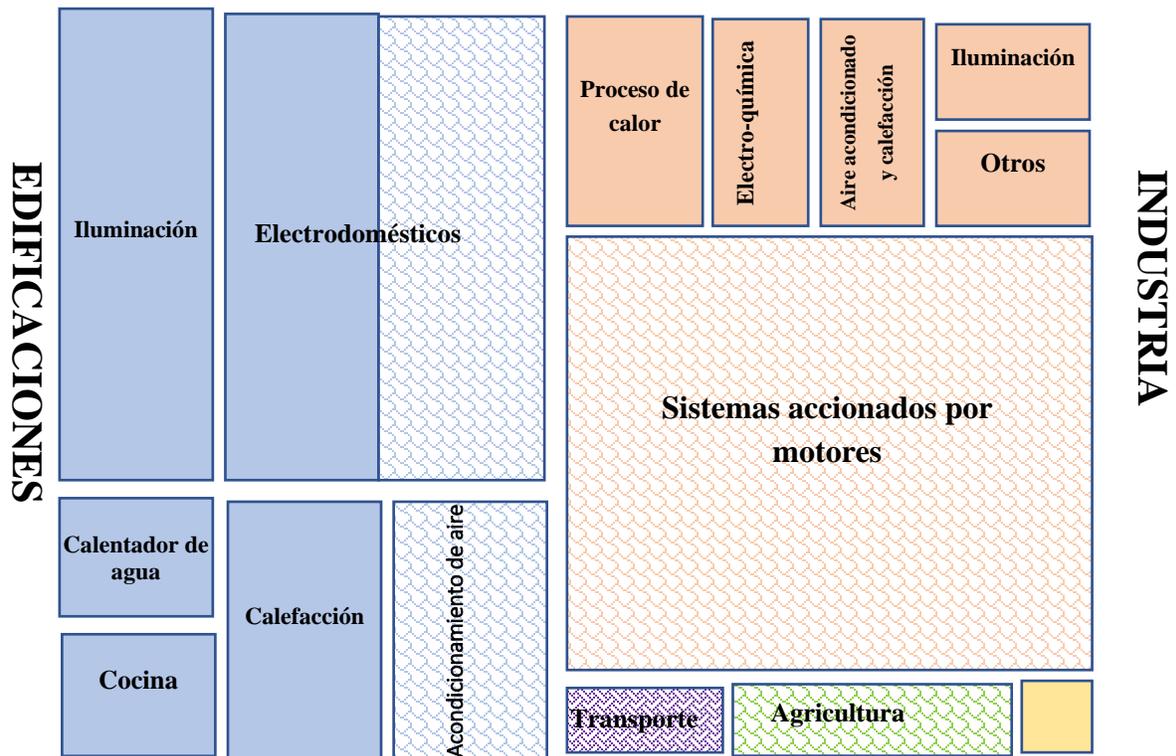
El motor trifásico de inducción o motor asíncrono es uno de los dispositivos más utilizados en la industria a nivel mundial ya que permite realizar diferentes aplicaciones mecánicas como:

bombeo, ventilación, refrigeración, bandas transportadoras, etc. El motor asíncrono es considerado como una de las máquinas más fiables que existen en la actualidad ya que se adapta a diferentes condiciones en función de las exigencias deseadas, es por ello que los sistemas con motores eléctricos son los principales consumidores de energía eléctrica a nivel mundial. Según

el informe de la International Energy Agency (IEA) (NEMA, 2016) a éstos les corresponde un 53% de la demanda de energía a nivel global es decir 10700 TWh, de los cuales más del 60% es utilizado por sistemas industriales accionados con motores eléctricos como se muestra en la figura 8. (International Electrotechnical Commission IEC, 2006)

Figura 8

Distribución estimada de la demanda global de energía eléctrica por usuario final.



(International Energy (IEA), 2016)

En El Salvador para el año 2011 la Fuerza Electromotriz se representó como uno de los más importantes consumidores de energía eléctrica con un 75.5% seguido de la Iluminación con un 21% haciendo un total del 96.6% del consumo de energía total en la industria (Multiconsult y CIA LTDA, 2011)

Figura 9

Consumo de energía eléctrica en El Salvador.



2.4 Rendimiento en los Motores Asíncronos.

El rendimiento se define como el cociente entre la potencia útil o potencia mecánica motriz en el eje, y la potencia total o potencia eléctrica activa absorbida de la red. Es decir, cuantifica la capacidad del motor de convertir la energía eléctrica en mecánica. La transmisión de energía del circuito eléctrico al mecánico no es ideal, una fracción de la potencia absorbida no es aprovechada, sino que se transforma y disipa en forma de calor provocando un calentamiento e incremento de la temperatura en el motor.

Las pérdidas generan un gasto de energía la cual es desperdiciada, por lo que los costos de operación del motor se elevan. Las pérdidas que experimenta el motor se pueden clasificar de la siguiente manera:

- ✚ **Pérdidas en el núcleo:** Las pérdidas del núcleo se deben a la histéresis y a las corrientes parásitas.

- ✚ Pérdidas en el cobre de los devanados: Las pérdidas en el cobre en un motor son las pérdidas por calentamiento debido a la resistencia de los conductores del rotor y del estator. $P=I^2R$
- ✚ Pérdidas mecánicas: Son las pérdidas ocasionadas por el rozamiento en el aire y por la fricción de las partes móviles (eje motor con los cojinetes) y por el consumo de potencia del sistema de refrigeración (pérdidas por ventilación).
- ✚ Pérdidas adicionales: Las pérdidas adicionales son todas aquellas pérdidas que no se pueden clasificar en ninguna de las categorías mencionadas anteriormente y que por lo general se originan en los devanados y núcleos del motor, los fenómenos que las producen consisten en la distribución no uniforme de la corriente en el conductor, presencia de campos armónicos, y a las pulsaciones de flujo.

2.5 Impacto de la Calidad de Energía en el desempeño del Motor de Inducción.

Como ya se vio en el capítulo 1, la calidad de energía eléctrica se ve afectada, cuando se crean diferentes tipos de perturbaciones en los sistemas, los cuales afectan la calidad de la potencia eléctrica, y son clasificados de acuerdo a su duración y tipo de distorsión, estos disturbios pueden tener origen tanto fuera como dentro de las instalaciones industriales o comerciales, los cuales pueden causar efectos no deseados en las cargas ocasionando pérdida de la vida útil en equipos, paros de producción, fallas y daño en los equipos eléctricos y electrónicos sensibles, altos costos de producción debido al uso ineficiente de la energía, entre otros. Es por ello que el tema calidad de energía eléctrica es importante en cuanto a manejo de motores eléctricos se refiere, ya que como se menciona en apartado 2.3, los motores son las cargas predominantes en la industria. En este documento se estará interesado en la calidad del Producto Técnico suministrado por las Distribuidoras a las plantas de bombeo de la Administración Nacional de Acueductos y

Alcantarillados ANDA, para evaluar el suministro de potencia de la distribuidora y de sus subestaciones eléctricas y determinar los efectos sobre los motores eléctricos.

Para el caso de la calidad de suministro de potencia en motores eléctricos de inducción nos interesan las variaciones de estado estable ocasionadas por el suministro eléctrico de potencia hacia los motores, que son:

- ✚ Regulación de Tensión (Variación de tensión)
- ✚ Distorsión Armónica
- ✚ Desbalance

2.5.1 Variación de Tensión.

La variación del voltaje, es la relación que existe entre el voltaje nominal con respecto al voltaje promedio de operación entre fases y se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\%AVV = \left[\frac{\text{Voltaje}_{\text{promedio o entre fases}}}{\text{Voltaje}_{\text{nominal}}} - 1 \right] \cdot 100 \quad [2.3]$$

Donde el voltaje promedio o voltaje promedio de fases, está dado por la siguiente expresión, (estos voltajes están expresados en valores rms)

$$V_{\text{promedio}} = \frac{[(V_{1-2}) + (V_{2-3}) + (V)_{3-1}]}{3} \quad [2.4]$$

O

$$V_{\text{promedio de fases}} = \frac{[V_{f1} + V_{f2} + V_{f3}]}{3} \quad [2.5]$$

Por lo tanto, el voltaje entre fases será:

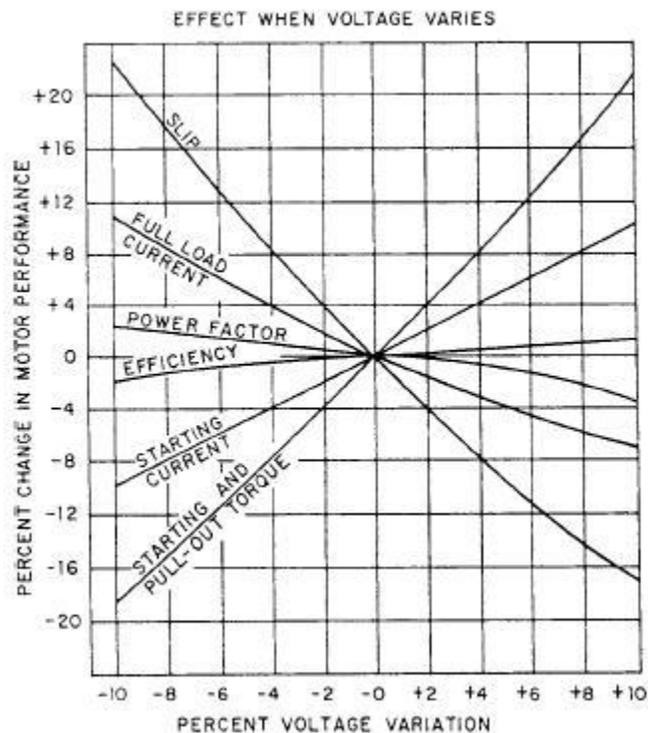
$$V_{\text{entre fases}} = \sqrt{3} \cdot V_{\text{Promedio de fases}} \quad [2.6]$$

2.5.1.1 Efectos de la variación de tensión en los Motores de Inducción.

La variación de voltaje se da cuando hay una diferencia entre el voltaje nominal y el voltaje con el que está operando el motor y ésta ocasiona que las características de operación en los motores eléctricos cambien, tal como se muestra en la figura 10 lo que ocasiona un aumento en las pérdidas y por ende un cambio en la eficiencia, factor de potencia y corriente.

Figura 10

Efecto por variaciones de voltaje en las características de operación del motor



(IEEE, 1995)

- ✚ **Sobrevoltaje:** Como el voltaje incrementa la corriente de magnetización aumenta al menos el cuadrado de la función. En algún punto ocurrirá saturación. Alrededor del 10-15% de sobrevoltaje, la eficiencia bajará. Tanto las pérdidas del estator como las

del núcleo aumentarán, también se tendrá un decremento significativo para el factor de potencia.

✚ **Reducción de voltaje:** Cuando un motor completamente cargado se opera a un voltaje reducido (incluso dentro del límite permitido del 10%), el motor consumirá más corriente para producir el par requerido. Esto causa un incremento de pérdidas I^2R en el estator y rotor. El deslizamiento del motor también aumenta con el cuadrado de la caída del voltaje debido a esto el motor gira más lentamente con una potencia de salida menor ya que el par del motor es proporcional al cuadrado del voltaje y el deslizamiento es inversamente proporcional al par, todo esto se puede apreciar en las siguientes ecuaciones 2.7 y 2.8. Un decremento en el voltaje también incrementa la temperatura lo que reduce enormemente el aislamiento y la vida del motor.

$$T_n = T_o \cdot \left(\frac{V_n}{V_o}\right)^2 \quad [2.7]$$

donde:

T_n = El nuevo par por la variación de voltaje.

T_o = El par original a voltaje nominal.

V_n = Voltaje de la variación.

V_o = Voltaje nominal.

El deslizamiento se comporta de la forma:

$$S_n = S_o \cdot \left(\frac{T_o}{T_n}\right) \cdot \left(\frac{R_{rn}}{R_r}\right) \quad [2.8]$$

donde:

$T_n =$ El nuevo Par por la variación de voltaje.

$T_o =$ El Par original a voltaje nominal.

$S_n =$ El nuevo deslizamiento por la variación de voltaje.

$S_o =$ El deslizamiento original a voltaje nominal.

$R_{rn} =$ La nueva resistencia del motor.

$R_r =$ La restistencia original del rotor.

2.5.2 Desbalance de Tensiones.

2.5.2.1 Definiciones de Desequilibrio de Tensión dadas por las normas internacionales técnicas y de diseño.

2.5.2.1.1 Definición NEMA.

La Norma NEMA define el desbalance de tensión mediante un índice conocido como la máxima desviación del voltaje de línea con respecto al valor de línea LVRU promedio, dividido entre el voltaje de línea promedio y está dado por:

$$\%LVRU = \frac{|Desviación \max (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca})|}{Promedio \ de(V_{ab}, V_{bc}, V_{ca})} * 100 \quad [2.9]$$

$$Promedio \ de(V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}) = \frac{V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}}{3} \quad [2.10]$$

Donde V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} son las tensiones de línea del sistema eléctrico que alimenta a el motor.

La definición NEMA asume que la tensión promedio es igual a la tensión nominal y además solo trabaja con magnitudes pues los ángulos de la tensión no son incluidos en la ecuación.

2.5.2.1.2 **Definición IEEE.**

También conocida como “Phase Voltage Unbalance Rate (PVUR)”, La norma IEEE 1159- 1995 establece que el desbalance de voltaje es la razón entre la componente de secuencia negativa o cero con la componente de secuencia positiva. El desbalance puede ser estimado como la máxima desviación entre las tres fases del promedio de voltaje o corrientes trifásicas, dividido por el promedio del voltaje o corriente trifásico, expresado en porcentaje. Este cálculo será definido por la ecuación:

$$\%LVRU = \frac{\text{Desviación max } (V_a, V_b, V_c)}{\text{Promedio de } (V_a, V_b, V_c)} * 100 \quad [2.11]$$

$$\text{Promedio de } (V_a, V_b, V_c) = \frac{V_a, V_b, V_c}{3} \quad [2.12]$$

Donde:

V_a, V_b, V_c son las tensiones fase-neutro del sistema que alimenta el motor.

La Definición de la IEEE usa el mismo concepto de desbalance de tensión que la definición NEMA, la única diferencia es que la IEEE usa la tensión fase-neutro en lugar de la tensión línea-línea. En esta definición también se pierde la información del ángulo de la tensión pues solo se consideran las magnitudes de la tensión.

2.5.2.1.3 **Definición IEC.**

La Definición de desbalance de tensión dada por la IEC o definición de componentes simétricas, es también conocida como “Voltage Unbalance Factor (VUF)” está dada por:

$$\%VUF = \frac{V_2(\text{Componente de tensión de secuencia negativa})}{V_1(\text{Componente de tensión de secuencia positiva})} * 100 \quad [2.13]$$

Para un conjunto desbalanceado de tensiones de línea V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} , la componente de tensión de secuencia positiva V_1 y la componente de tensión de secuencia negativa V_2 están dados por los siguientes fasores:

$$V_1 = \frac{V_{ab} + (a * V_{bc}) + a^2 * V_{ca}}{3} \quad [2.14]$$

$$V_2 = \frac{V_{ab} + (a^2 * V_{bc}) + a * V_{ca}}{3} \quad [2.15]$$

Donde: $a = -0.5 + j0.866$ y $a^2 = -0.5 - j0.866$.

Es de tener en cuenta que en este método se utiliza fasores pues se toma en cuenta el ángulo de desfase de las tensiones

2.5.2.2 Efectos del Desbalance de Tensiones en los Motores de Inducción.

El desbalance de tensiones en el suministro de potencia se da cuando los fasores de voltaje son desiguales en relación a su magnitud, así como su separación angular entre ellos es diferente a 120° entre sí. El desbalance de voltaje provoca un mal funcionamiento en los motores, los efectos que causa el desbalance de tensiones en el funcionamiento del motor de inducción se ven reflejados en el aumento de los costos del proceso productivo, es por esto que el cuantificar estos efectos es de gran importancia.

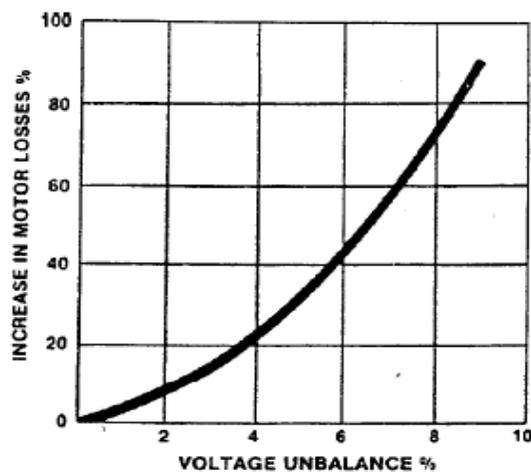
Algunos de los efectos que produce el desbalance de voltaje en el motor son la elevación de temperatura en los bobinados del motor, reducción de la potencia entregada, vibraciones, reducción de la vida útil del motor, aumento de pérdidas, disminución de la eficiencia, desequilibrio de corrientes, entre otros.

Las tensiones desbalanceadas, producen corrientes de secuencia negativa provocando sobrecalentamiento del bobinado del estator y en las barras del motor sin producir potencia útil de salida. Tal como con las variaciones de tensión, la eficiencia disminuirá conforme las pérdidas

aumentan, como se muestra en la figura 11 la potencia de entrada por ende aumentará y el factor de carga cambiará provocando una disminución de la eficiencia a un valor inferior al de la eficiencia nominal. En términos generales el desbalance de tensiones no es relevante cuando no supera el 1.0% de su magnitud, sin embargo, cuando se detectan problemas en las instalaciones eléctricas por un desbalance mayor al dicho anteriormente, se debería corregir de inmediato (IEEE, 1995)

Figura 11

Voltaje de desbalance frente al incremento de pérdidas en el motor



(IEEE, 1995)

2.5.2.3 Análisis de un Motor Trifásico por medio del método de Componentes Simétricas.

El método de las componentes simétricas indica que un sistema trifásico de tensiones o de intensidades desequilibrado es equivalente a la suma de tres sistemas:

- ✓ Un sistema equilibrado de secuencia directa o positiva que tiene la misma secuencia de fases que el sistema trifásico desequilibrado de partida.
- ✓ Un sistema equilibrado de secuencia inversa o negativa cuya secuencia de fases es opuesta a la del sistema desequilibrado de partida.
- ✓ Un sistema desequilibrado homopolar o de secuencia cero.

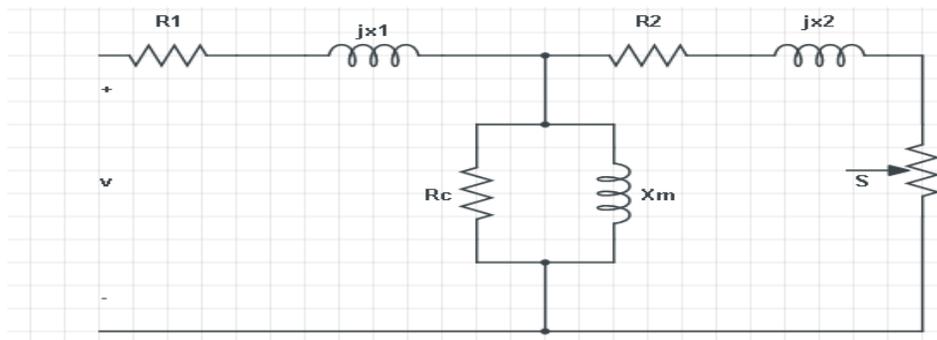
Dado que un motor se comporta como un conjunto equilibrado de impedancias, sólo pueden aparecer desequilibrios entre las corrientes de las fases del estor si existen desequilibrios en las tensiones. Por lo tanto, la componente de secuencia directa de las corrientes es debida sólo a la componente de secuencia directa de las tensiones. Análogamente, la componente de secuencia inversa de las corrientes sólo es debida a la componente de secuencia inversa de las tensiones y la componente homopolar de las corrientes sólo sería debida a la componente homopolar de las tensiones.

Ensayos a realizar en motor:

- ✓ Prueba DC en estator por fase
- ✓ Prueba de rotor bloqueado a frecuencia nominal
- ✓ Prueba de rotor bloqueado a baja frecuencia
- ✓ Prueba de vacío

Figura 12

Modelo de motor de inducción



Análisis con prueba de rotor bloqueado a frecuencia nominal (60Hz)

$$R_{C(60Hz)} = r_{1(60Hz)} + r'_{2(60Hz)} \quad [2.16]$$

$$Z_{e(60Hz)} = R_{C(60Hz)} + jX_{C(60Hz)} \quad [2.17]$$

$$X_{C(60Hz)} = X_{1(60Hz)} + X'_{1(60Hz)} \quad [2.18]$$

Prueba DC estator

$$r_{1DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \quad [2.19]$$

Prueba de Rotor bloqueado a baja frecuencia (15Hz)

$$R_{C(15Hz)} = r_{1(15Hz)} + r'_{2(15Hz)} \quad [2.20]$$

$$r_{1(60Hz)} = \frac{R_{C(60Hz)}}{R_{C(15Hz)}} * r_{1DC} \quad [2.21]$$

Prueba de vacío

$$P_C = P_{0C3\phi} - P_{Cu} - P_{rot} \quad [2.22]$$

$$P_C = P_{0C3\phi} - 3(I_{0C})^2(r_{1(60Hz)}) - P_{rot} \quad [2.23]$$

$$\cos \theta_{0C} = \frac{P_{0C3\phi}}{3(V_{0cu})(I_{0C})} \quad [2.24]$$

$$r_C = \frac{3 \left(\frac{V_{0cu}}{\sqrt{3}} \right)^2}{P_C} \quad [2.25]$$

$$I_m = I_{0C} \times \sin \theta_{0C} \quad [2.26]$$

$$X_m = \frac{|V_{0cu}| / \sqrt{3}}{I_m} \quad [2.27]$$

Parámetros del rotor en condiciones de desbalance de tensiones

$$R'_2 = R_2 \sqrt{2} \quad [2.28]$$

$$X'_2 = \frac{X_2}{\sqrt{2}} \quad [2.29]$$

Velocidad de operación del motor:

$$S = \frac{\eta_{sinc} - \eta_{mec}}{\eta_{sinc}} = 1 - \frac{\eta_{mec}}{\eta_{sinc}} \quad [2.30]$$

$$\eta_{sinc} = \frac{120f}{p} \quad [2.31]$$

Aplicando análisis de componentes simétricas encontrar impedancias de secuencia positiva y negativa:

$$Z_{e1} = \frac{R_c * X_m}{R_c + X_m} \quad [2.32]$$

$$Z_{rotor} = \frac{R_2}{s} + X_2 \quad [2.33]$$

$$Z_{estator} = R_1 + X_1 \quad [2.34]$$

Impedancia de secuencia positiva:

$$Z_1 = \frac{Z_{e1} * Z_{rotor}}{Z_{e1} + Z_{rotor}} + Z_{estator} \quad [2.35]$$

Impedancia de secuencia negativa:

$$Z_{rotor} = \frac{R'_2}{s} + X'_2 \quad [2.36]$$

$$Z_2 = \frac{Z_{e1} * Z_{rotor}}{Z_{e1} + Z_{rotor}} + Z_{estator} \quad [2.37]$$

Método de componentes simétricas:

$$a = 1 \angle 120^\circ \quad [2.38]$$

$$V_1 = \frac{V_{ab} + a * V_{bc} + a^2 * V_{ca}}{3} \quad [2.39]$$

$$V_2 = \frac{V_{ab} + a^2 * V_{bc} + a * V_{ca}}{3} \quad [2.40]$$

$$U_{nb} = \frac{V_2}{V_1} * 100\% \quad [2.41]$$

Corrientes de secuencia positiva y negativa:

$$I_1 = \frac{V}{Z_1} \quad [2.42]$$

$$I_2 = \frac{V}{Z_2} \quad [2.43]$$

Potencia de entrada de secuencia positiva y negativa:

$$P_1 = \sqrt{3}U_1I_1 \cos \varphi_1 \quad [2.44]$$

$$P_2 = \sqrt{3}U_2I_2 \cos \varphi_2 \quad [2.45]$$

$$\varepsilon_1 = U_1 - Z_{estator} * I_1 \quad [2.46]$$

$$\varepsilon_2 = U_2 - Z_{estator} * I_2 \quad [2.47]$$

Cálculo de pérdidas en el entrehierro de secuencia positiva y negativa:

$$P_{fe1} = \frac{3 * \varepsilon_1^2}{R_C} \quad [2.48]$$

$$P_{fe2} = \frac{3 * \varepsilon_2^2}{R_C} \quad [2.49]$$

Cálculo de las pérdidas de Joule en estator y rotor.

$$P_{js1} = 3 * R_s * I_1^2 \quad [2.50]$$

$$P_{js2} = 3 * R_s * I_2^2 \quad [2.51]$$

$$P_{a1} = P_1 - P_{js1} - P_{fe1} \quad [2.52]$$

$$P_{a2} = P_2 - P_{js2} - P_{fe2} \quad [2.53]$$

$$P_{jr1} = s \cdot P_{a1} \quad [2.54]$$

$$P_{jr2} = (2 - s) \cdot P_{a2} \quad [2.55]$$

Pérdidas totales de secuencia positiva y negativa:

$$P_{tot1} = P_{js1} + P_{jr1} + P_{fe1} + P_{rot1} \quad [2.56]$$

$$P_{tot2} = P_{js2} + P_{jr2} + P_{fe2} + P_{rot2} \quad [2.57]$$

Pérdidas totales en el motor de inducción:

$$P_T = P_{tot1} + P_{tot2} \quad [2.58]$$

Rendimiento del motor al trabajar en desbalance de tensión.

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_1 - P_T}{P_1 + P_2} \quad [2.59]$$

2.5.3 Efectos del contenido armónico en los Motores de Inducción.

La norma NEMA MG 1-2004 reporta que la eficiencia será reducida cuando un motor opera en un medio expuesto a contenido armónico. Los armónicos presentes incrementarán las pérdidas eléctricas por lo que la eficiencia se reducirá, el incremento de pérdidas debido a este efecto provocará un incremento en la temperatura lo que reducirá aún más la eficiencia.

En la interacción de las corrientes armónicas del rotor con el flujo de entrehierro de otra armónica se producen pares (T) pulsantes en los motores, lo que puede afectar a la calidad del producto donde las cargas de los motores son sensibles a este tipo de variaciones (Tejada & Llamas , 1999)

2.5.3.1 Desclasificación debido a Armónicos

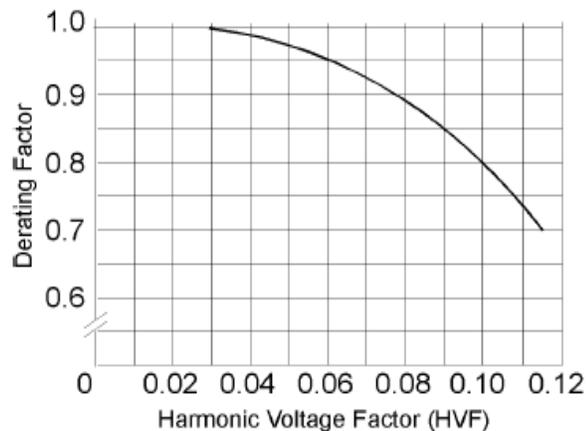
Los motores asíncronos operan con corriente alterna y son diseñados para que trabajen bajo una única frecuencia que es la frecuencia fundamental, cuando los motores trabajan bajo condiciones normales de frecuencia, con una carga nominal y dentro de los límites especificados por el fabricante y normas de operación, el motor debe ser capaz de disipar el aumento de temperatura generado por la sumatoria de sus pérdidas sin disminuir su vida útil. Cuando un motor se alimenta de un sistema que contiene componentes armónicas, las pérdidas en el motor de inducción aumentan a altas frecuencias, partiendo de esta definición se introduce el concepto de desclasificación en los motores.

Con la desclasificación se busca cuantificar el efecto que tiene el aumento de las pérdidas y por ende el aumento de temperatura debido a corrientes armónicas, las que son introducidas al motor al ser alimentado por tensiones que contienen componentes diferentes a la fundamental, con estas condiciones el motor no debe funcionar a su potencia nominal, por lo que se debe disminuir la carga o reemplazarlo por otro. Por lo que al motor se le asigna una potencia equivalente.

De manera analítica se tiene que la potencia equivalente del motor es igual a la potencia nominal multiplicada por el factor de reducción de potencia (Derating Factor) y así se reduce un posible daño al motor. Este factor se obtiene de la curva de la figura 13

Figura 13

Curva de reducción para armónicos de voltaje



La curva anterior que se encuentra en norma NEMA MG 1-2004, como se observa solo toma en cuenta las componentes armónicas impares exceptuando las que son divisibles por tres. Para este caso primero se calcula el Factor de Tensión Armónica (HVF) que se calcula mediante la ecuación 2.60, para poder posteriormente usar la curva de la figura 13 y obtener el factor de reducción de potencia.

$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{V_n^2}{n}} \quad [2.60]$$

Donde:

n = Es el orden de la armónica impar, no incluyendo las divisibles por tres

V_n = La magnitud [p.u] de el voltaje a la frecuencia de la n^{th} armónica.

CAPÍTULO 3: PARÁMETROS QUE AFECTAN LA CALIDAD DEL PRODUCTO TÉCNICO SEGÚN NORMATIVAS

3.1 Generalidades.

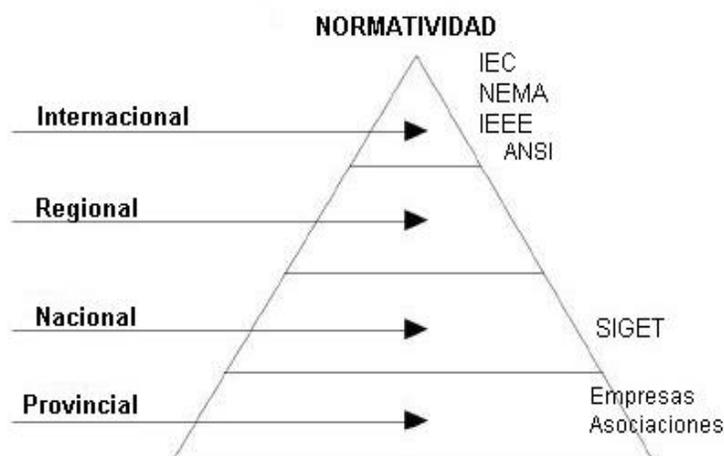
Según el OSN (Organismo Salvadoreño de Normalización, una norma es un documento establecido por consenso y aprobado por un organismo de reconocida autoridad, que proporciona reglas, directrices o características para actividades o sus resultados, estas normas por lo general están basadas en logros consolidados de la ciencia, la técnica y la experiencia. Las normas están dirigidas a la obtención del grado óptimo de orden en un contexto dado.

La normalización se puede categorizar por niveles de acuerdo a su extensión geográfica, política y económica de la siguiente manera: Normalización Internacional: donde participan abiertamente organismos pertinentes de todos los países, Normalización Regional: Está abierta a la participación de organismos pertinentes a países de un área geográfica específica, Normalización Nacional: Tiene lugar dentro de un país específico, también puede tener lugar a nivel de sectores o departamentos, a niveles locales o de asociaciones de empresas, industrias, talleres, oficinas y la Normalización provincial o territorial que tiene lugar a una división territorial dentro de un país, al igual que la normalización nacional ésta puede tener lugar a niveles locales, asociaciones, empresas o industrias.

Entre los objetivos del emitir normas técnicas están el proteger los intereses de la sociedad, basándose en razones éticas, de eficiencia, calidad y seguridad, a la vez tiene como finalidad la estandarización de los procesos para su correcta supervisión y desarrollo ético.

Figura 14

Categorización de las normativas



3.2 Normas de Calidad de Energía, Técnicas y de Diseño.

Para asegurar el buen funcionamiento de las máquinas en la industria es necesario aplicar normativas nacionales e Internacionales que establecen límites de parámetros eléctricos recomendables para el funcionamiento óptimo de los equipos, conociendo esto permitirá analizar las condiciones a las que un sistema eléctrico está operando y de tal manera hacer uso de la Ingeniería para poder llegar a establecer un punto de equilibrio entre lo que las normas internacionales establecen con lo que una norma nacional regula, costos y necesidades etc.

Entre las normas que se utilizaran para establecer este punto óptimo se encuentran:

- IEEE-112
- IEC60034-1
- NEMA MG 1-2004
- IEEE STD 1159-1995
- Norma de Calidad de Servicio SIGET

3.2.1 Norma IEE-112.

Norma de Pruebas Estándar para Motores Polifásicos de Inducción y Generadores. Establece instrucciones para la realización de pruebas y ensayos en motores de inducción para determinar el rendimiento y las características de los Motores Polifásicos y Generadores, entre estas instrucciones se establecen rangos de los parámetros eléctricos recomendables para el suministro de potencia al cual los motores o generadores deberían estar conectados.

3.2.1.1 Condiciones Eléctricas del Suministro de Potencia.

- ✚ **Desbalance de Tensiones:** El voltaje de desbalance no debería exceder el 0.5%, El porcentaje de desbalances es igual a 100 veces la desviación máxima del voltaje promedio dividido entre el voltaje promedio.
- ✚ **Distorsión Armónica:** El suministro de potencia debería proveer tensiones balanceadas que se asemejen bastante a la forma de onda senoidal. El coeficiente de distorsión armónica, THD, no debería de exceder de 0.05.
- ✚ **Frecuencia:** Para pruebas generales, la frecuencia debería estar dentro del rango de $\pm 0.5\%$ del valor requerido por la prueba que se está realizando. Con los métodos A, B y B1 la frecuencia debe estar dentro de $\pm 0.1\%$ del valor de la prueba específica

3.2.2 IEC60034-1.

Norma para Maquinas Eléctricas Rotativas, Características nominales y de funcionamiento: En esta norma se definen requisitos a tomar en cuenta en la selección, ensayo o mantenimiento de máquinas eléctricas rotativas.

3.2.2.1 Condiciones eléctricas para el suministro de potencia.

Según esta norma las maquinas rotativas de corriente alterna comprendidas en esta norma deben de manejar variaciones máximas de frecuencia de $\pm 2\%$ de la frecuencia nominal, además los motores diseñados bajo esta norma soportan variaciones máximas de tensión de $\pm 5\%$ de la

tensión nominal, las tensiones desbalanceadas no deben exceder del 0.5%, y el Factor de Armónicos de Tensión HVF debe ser inferior a 0.02 para motores monofásicos o trifásicos de inducción.

3.2.3 NEMA MG 1-2004

Define información práctica referente al rendimiento, seguridad, pruebas, construcción y fabricación de motores y generadores AC y DC.

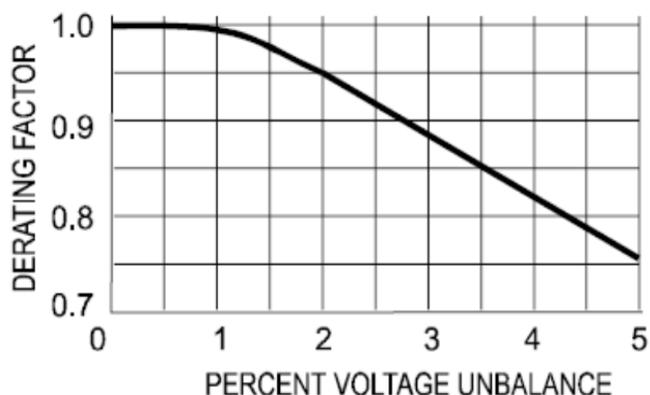
3.2.3.1 Condiciones eléctricas para el suministro de potencia.

- ✚ **Variaciones de Tensión:** De acuerdo a NEMA MG1-2004 los motores AC deberían tener una variación de tensión máxima de $\pm 10\%$ de la tensión nominal del motor.

- ✚ **Desbalance de Tensiones:** NEMA no recomienda que el suministro de potencia que alimenta un motor trifásico de inducción tenga un desbalance por encima del 1%, si este se encuentra en un rango entre 1% y 5% este debe ser aplicado un factor de reducción a través de la curva de desclasificación mostrada en la figura 15. La curva de desclasificación NEMA establece que cuando un motor de inducción es conectado a un sistema de tensiones trifásico desbalanceado que tiene una tensión de secuencia negativa que excede el 1% de la tensión de secuencia positiva, en un periodo largo, la potencia permisible del motor debe ser menor que la potencia nominal para reducir la posibilidad de daño del motor.

Figura 15

Factor de reducción de potencia para desbalance de tensiones



Fuente: (IEEE, 1995)

3.2.4 Estándar IEEE 1159-1995.

El estándar IEE 1159-1995 “Prácticas recomendadas para el monitoreo de Calidad de Potencia”: Norma que abarca las prácticas recomendadas para el monitoreo de las características de sistemas de potencia eléctrica.

- Fluctuaciones de voltaje: en la tabla 5 se muestra la cuantificación de las variaciones sobre las características afectadas por variaciones de tensión dentro de los límites permitidos de acuerdo a la norma que establece fluctuaciones máximas de $\pm 10\%$. (IEEE, 1993)

Tabla 5

Efectos de variación de tensión sobre las características de un motor

| <i>Característica</i> | <i>Proporcionalidad</i> | <i>Variaciones de Voltaje</i> | |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------|
| | | <i>90% placa</i> | <i>110% placa</i> |
| Torque de arranque | Voltaje al cuadrado | -19% | -21% |
| Porcentaje de deslizamiento | $(1/\text{voltaje})^2$ | -23% | -19% |
| Velocidad a Plena Carga | Deslizamiento | -0.2% a -1% | +0.2% a 1.0% |
| Corriente de arranque | Voltaje | -10% | +10% |
| Corriente a plena carga | Varia con el diseño | +5% a +10% | -5% a +10% |
| Corrientes sin carga | Varia con el diseño | -10% a -30% | +10% a +30% |
| Aumento de la Temperatura | Varia con el diseño | +10% a +15% | -10% a -15% |
| Eficiencia a plena carga | Varia con el diseño | -1% a -3% | -1% a +3% |
| FP o Potencia a Plena Carga | Varia con el diseño | +3% a +7% | -2% a -7% |
| Ruido Magnético | Varia con el diseño | Ligera Disminución | Ligero Aumento |

Desbalance de tensiones:

Por su duración esta norma lo define como un fenómeno de carácter estable, cuyos límites deben encontrarse normalmente entre un 0,5 y un 2 %.

Contenido armónico:

Según esta norma el límite máximo recomendado de distorsión armónica en corriente para niveles de tensión nominal que son menores a 69 kV debe ser del 5%, al 20%, dependiendo de la relación de corriente de corto circuito por corriente de carga.

3.2.5 Norma de Calidad de Servicio en los Sistemas de Distribución SIGET.

La norma de Calidad de Servicio en los Sistemas de Distribución SIGET, es la norma nacional que establece las condiciones que los sistemas de Distribución en el país que se deben brindar a los usuarios, en ella se comprenden las condiciones de la calidad de producto técnico, calidad de servicio técnico y calidad comercial, en el caso del estudio que se realiza en el presente documento, se estará interesado en la calidad de producto técnico para establecer por medio de pruebas, la calidad de suministro con los que se están alimentando las subestaciones de las plantas potabilizadoras de ANDA, la norma establece parámetros de calidad del producto técnico de los cuales como ya se mencionó anteriormente se estará interesado en variables de estado estable, como balance de tensiones, fluctuaciones de tensiones, frecuencia y contenido Armónico, los cuales se definen a continuación:

Variaciones de tensión:

Según la norma de Calidad de Servicio SIGET, los límites máximos y mínimos de tensión serán establecidos de acuerdo a la zona de servicio, el punto de suministro o entrega al usuario según indica la tabla 6

Tabla 6
Límites permisibles de tensión

| Nivel de tensión | ΔV_k | | |
|--|--------------------------------------|-----------|-------------|
| | Régimen periodo año 2005 en adelante | | |
| | Urbano | Rural | Aislado |
| Baja tensión (≤ 600) | $\pm 7\%$ | $\pm 8\%$ | $\pm 8.5\%$ |
| Media Tensión ($600V < V < 115kV$) | $\pm 6\%$ | $\pm 7\%$ | $\pm 8.5\%$ |

Fuente: (SIGET, 2021)

Los niveles de tensión manejados en El Salvador tanto en Baja y Media Tensión, son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 7
Tensiones manejadas en El Salvador

| Nivel de tensiones | Tensiones manejadas. |
|----------------------|--|
| Baja tensión | 240/120, 208/120, 480/270, 440, y 600 [V] |
| Media tensión | 4.16v/2.3, 13.2/7.6, 23/13.2, 35 y 46 [KV] |

Distorsión Armónica:

Según SIGET la empresa distribuidora deberá limitar la distorsión armónica de tensión en los niveles de media y baja tensión a fin de no sobrepasar los valores que se encuentra en la tabla 8, cumplimiento que debe realizarse para cada una de las fases existentes en el punto de medición.

El TDI (Tasa de Distorsión Individual) y VDAT (Distorsión Armónica Total) se determinarán porcentualmente con respecto a la componente de voltaje de la frecuencia fundamental (60Hz) de la siguiente forma:

$$TDI = \frac{U_n}{U_1} \times 100 \quad [3.1]$$

$$VDAT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{25} U_n^2} * 100}{U_1} \quad [3.2]$$

En donde:

TDI: Tasa de distorsión individual

VDAT: Tasa de distorsión armónica total

U_n : Amplitud del voltaje de la armónica n

U_1 : Amplitud del voltaje a la frecuencia fundamental(60Hz)

Tabla 8

Límites de distorsión armónica en redes de media y baja tensión.

| Ordenes impares múltiplos de 3(n) | Tasa de distorsión individual (%) | Ordenes impares múltiplos de 3 (n) | Tasa de distorsión individual (%) | Ordenes pare(n) | Tasa de distorsión individual (%) |
|--|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| 5 | 6.0 | 3 | 5.0 | 2 | 2.0 |
| 7 | 5.0 | 9 | 1.5 | 4 | 1.0 |
| 11 | 3.5 | 15 | 0.3 | 6 | 0.5 |
| 13 | 3.0 | 21 | 0.2 | 8 | 0.5 |
| 17 | 2.0 | >21 | 0.2 | 10 | 0.5 |
| 19 | 1.5 | | | 12 | 0.2 |
| 23 | 1.5 | | | >12 | 0.2 |
| 25 | 1.5 | | | | |
| >25 | 0.2+1.3*25/n | | | | |

LIMITE DE LA TASA DE DISTORSION ARMONICA TOTAL, 8%

Fuente: (SIGET, 2021)

En el siguiente cuadro se muestra los valores límites de los parámetros eléctricos a considerar para la evaluación de la calidad del suministro de potencia en las plantas de bombeo de ANDA:

Tabla 9

Parámetros límites según normas para evaluar la calidad de producto técnico suministrada a motores de inducción

| Parámetro | Norma SIGET | IEEE STD 112 | IEEE 1159-1995 | Nema MG I 2004 | IEC 60034-1 |
|-------------------------------|---|------------------------------|---|--|---|
| <i>Variaciones de Tensión</i> | <i>BT</i> <i>Urbano. ±7%</i> <i>Rural. ±8%</i> <i>Aislado. ±8.5%</i> <i>MT</i> <i>Urb. ±6%</i> <i>Rural. ±7%</i> <i>Aislado. ±8.5%</i> | <i>No se considera</i> | <i>±10%, del valor nominal de tensión.</i> | <i>±10%, del valor nominal de tensión.</i> | <i>Zona A. ±5%</i> <i>Zona B. ±10%</i> |
| <i>Frecuencia</i> | - | <i>±0.1% de la f nominal</i> | - | <i>±5%</i> | <i>±2% de la F. nominal</i> |
| <i>Desbalance de Tensión.</i> | <i>No se considera</i> | <i>Para 3Φ, 0.5%</i> | <i>Entre el 0.5% y 2%</i> | <i>Menor al 1%</i> | <i>0.05%</i> |
| <i>Contenido Armónico.</i> | <i>THD No debe exceder %5.</i> | <i>No debe exceder 5%.</i> | <i>Para Vn <69kV el THD debe ser del 5% al 20%</i> | <i>No debe exceder 5%.</i> | <i>El factor de Armónicos de tensión HVF <0.02</i> |

3.3 Normas de la región Centroamericana para la Calidad de Suministro de Potencia.

En cada país existen normas que regulan servicios y productos, al igual que en El Salvador los países de la región Centroamericana tienen sus normas de calidad del servicio eléctrico y cada uno establece parámetros y directrices establecidos para regular el servicio de calidad del suministro de distribución, en la tabla 10 se mencionan algunas de ellas.

Tabla 10

Normas que regulan la calidad de servicio eléctrico en Países de la Región Centroamericana.

| PAÍS | NORMA NACIONAL |
|-------------|---|
| NICARAGUA | Normativa de calidad del servicio emitida por el consejo de Dirección del Instituto Nicaragüense de Energía |
| GUATEMALA | Norma Técnica de Servicio de Distribución NTSD CNEE |
| HONDURAS | Norma técnica de Calidad de Distribución TTCD |
| COSTA RICA | <ol style="list-style-type: none">1. Calidad en el Servicio de Generación y Transmisión de Energía Eléctrica (AR NTGT)2. Calidad de Voltaje de Suministro (AR NCVS)3. Calidad de la Continuidad del Suministro Eléctrico (ARNTCSE)4. Prestación del Servicio de Distribución y Comercialización (AR-NTSDC) |

Además, en la tabla 11 se cuenta con un cuadro resumen de dos de los parámetros evaluados en este documento para la determinación de la calidad del producto técnico, donde se muestran los límites permisibles para variaciones de Tensión y Desbalance que cada país establece, en comparación con los parámetros permisibles en el suministro que la Norma de Calidad de Servicio Eléctrico SIGET regula a las Distribuidoras de El Salvador.

Tabla 11

Cuadro comparativo de la Norma de Calidad Salvadoreña con otros países de la región Centroamericana.

| PAÍS | VARIACIÓN DE TENSION | DESBALANCE |
|--------------------|---|--|
| <i>EL SALVADOR</i> | AREA URBANA | No lo considera |
| | <ul style="list-style-type: none"> ✚ BAJA TENSION: ± 7% ✚ MEDIA TENSIÓN: ±6% | |
| | AREA RURAL | |
| | <ul style="list-style-type: none"> ✚ BAJA TENSION: ±8% ✚ MEDIA TENSIÓN: ±7% | |
| <i>NICARAGUA</i> | ETAPA 1: | No lo considera |
| | <ul style="list-style-type: none"> ✚ Red primaria de distribución: ±6% ✚ Red secundaria de distribución: ±8% ✚ Rural: ±10% | |
| | ETAPA 2 | |
| | <ul style="list-style-type: none"> ✚ Red primaria de distribución: ±5% ✚ Red secundaria de distribución: ±5% ✚ Rural: ±8% | |
| <i>GUATEMALA</i> | MENSUAL | 3% |
| | <ul style="list-style-type: none"> ✚ Baja Tensión: 8% y 10% ✚ Media Tensión: 6% y 7% | |
| | SEMESTRAL: | |
| | <ul style="list-style-type: none"> ✚ 5% de los registros | |
| <i>COSTA RICA</i> | BAJA TENSION | No debe exceder el 3% |
| | <ul style="list-style-type: none"> ✚ Normal: ±5% ✚ Tolerable: -8.33% a 5.83% | |
| | ALTA TENSION | |
| | <ul style="list-style-type: none"> ✚ Normal: -2.5% a 5% ✚ Tolerable: -8.33% a 5.83% | |
| <i>HONDURAS</i> | normales±5% | <ul style="list-style-type: none"> ✚ Baja Y Media Tensión: 3% ✚ Alta Tensión: 1% |

CAPÍTULO 4: DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA EN MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN.

4.1 Evaluación de la Eficiencia en el sitio de operación.

Evaluar la eficiencia de los motores eléctricos en condiciones de desbalance de tensiones en el sitio de operación es un paso fundamental y un problema importante a resolver cuando se realizan estudios de calidad y eficiencia energética. El realizar mediciones y ensayos en el sitio de operación de motores no siempre es posible ya que se deben llevar a cabo métodos que interfieren en el proceso productivo de las plantas industriales o comerciales.

Algunos de los métodos utilizados para evaluar la eficiencia de los motores asíncronos han sido normalizados, aplicando pruebas de laboratorio, donde las normas utilizadas establecen condiciones en cuanto al sistema de alimentación, instrumentos requeridos, pérdidas, etc. Entre estas normas se encuentran la STD IEEE-112 y la IEC 60034-2. La norma IEEE 112 es una norma de mayor exigencia donde se establecen 5 métodos para la determinación de la eficiencia. Pero como ya se mencionó anteriormente el evaluar en el laboratorio la eficiencia de un motor de inducción que se encuentra instalado en una planta industrial es demasiado complicado y no aplicable en dicho ambiente debido a que esto conlleva el paro de producción. Estas limitantes invalidan la ejecución de los métodos normativos de ensayo para este tipo escenario.

4.2 Evaluación de la Eficiencia en condiciones de campo.

Para la evaluación de la eficiencia en condiciones de campo pueden combinarse diversos métodos básicos los cuales se pueden clasificar en:

1. Método de datos de placa
2. Método del circuito equivalente.
3. Método de separación de pérdidas.

4. Métodos estadísticos.
5. Método del deslizamiento.
6. Método del par en el eje.
7. Método del par en el entrehierro
8. Método de la corriente

4.2.1 Método Datos de Placa.

En este método como su nombre lo indica se basa en tomar la Eficiencia Nominal de los datos de placa, donde ésta se considerará igual para cualquier estado de carga. Es conocido que, a cargas bajas, esto no se cumple y en esa zona de trabajo la eficiencia depende mucho de la carga. El método se puede variar utilizando la potencia de entrada para estimar un factor de carga.

$$P_{ent,nom} = \frac{P_n}{\eta_{nom}} \quad [4.1]$$

Donde:

$P_{ent,nom}$: Potencia de entrada nominal en kW

η_{nom} : Eficiencia nominal (p.u)

P_n : potencia nominal en kW

Además, se mide o calcula la potencia de entrada, entonces el factor de carga de la máquina se calcula como:

$$F_c = \frac{P_{ent}}{P_{ent,nom}} * 100\% \quad [4.2]$$

Donde:

F_c : Factor de carga

P_{ent} : Potencia de entrada medida en kW.

Teniendo el factor de carga y las características operacionales del fabricante, se podría interpolar y precisar la eficiencia al estado de carga especificado. Con este método se ve afectada la precisión. Es importante además señalar que la calidad de energía en campo, con relación a las

condiciones en las cuales se determinaron los datos de placa también constituyen una fuente de incertidumbre.

4.2.2 Método del Circuito Equivalente.

Para este método se ocupa el circuito equivalente del motor, y es basado en la norma IEEE-112, en donde se modela la máquina bajo el comportamiento de estado estable, este método tiene la ventaja de evaluar la eficiencia cuando el motor opera para cualquier estado de carga, pero se complica cuando se requiere determinar los parámetros del circuito ya que tiene como inconveniente el requerir realizar pruebas de rotor bloqueado, ensayos de vacío y pruebas de impedancia a tensión reducida, tal como lo establece la IEE-112, y con ello determinar los parámetros del circuito equivalente, en algunas variantes de este método se necesita además desacoplar el motor.

Por dichas razones se han desarrollado métodos en los que los parámetros del motor se obtienen por procedimientos entre los que se combina herramientas de optimización para ajustar el modelo con la información de catálogos del motor dada por el fabricante, esto conlleva a otra serie de inconvenientes debido a que los datos de catálogo en los motores la mayoría de veces no se encuentran disponibles, sobre todo en motores viejos y reparados.

4.2.3 Método de Separación de Perdidas.

Este método fue diseñado para medir perdidas directamente en el motor, recurriendo al método IEEE-112-E, sin embargo, este método no resulta útil en la industria, pues al igual que los métodos anteriores requiere realizar pruebas especiales, retirando el rotor, el método E propuesto por esta norma asume un valor en las pérdidas adicionales del motor, pero utiliza un ensayo de vacío con tensión variable, así como ensayos en seis estados de operación.

4.2.4 Métodos Estadísticos.

En los métodos estadísticos se utilizan bases de datos de resultados obtenidos mediante ensayos realizados en laboratorio por los fabricantes de motores, los que pueden ser una buena opción cuando no se cuenta con equipo necesario para realizar ensayos. Estos métodos implican determinar un factor de carga del motor, ya sea por corriente, deslizamiento o potencia de entrada y la búsqueda mediante la base de datos de las características de eficiencia del motor según su modelo, capacidad y fabricante, existen algunos softwares que emplean métodos estadísticos como lo es MOTOR MASTER. MOTOR MASTER es conocido por su flexibilidad y fácil uso, la estimación del factor de carga y eficiencia se basa en los datos de placa y datos de operación del motor y utiliza cuatro técnicas para la estimación de carga, que son: El método de la potencia de entrada, Método de deslizamiento compensado con tensión, Método ORMEL y método de la corriente compensada con tensión. Ya con el factor de carga éste accede a la base de datos interna y por interpolación lineal se estima la eficiencia para el factor de carga dado.

Figura 16. Detalle del rendimiento del motor.

Figura 17. Detalles generales del motor.

The image displays two screenshots of the MOTOR MASTER software interface, both titled "Motor Details #1506".

Figura 16: Detalle del rendimiento del motor. This screenshot shows performance data for motor #1506. It is divided into three main sections: Efficiency (%), Torque (ft-lbs), and Amperage (Amps). Each section has sub-sections for IEC and IEEE standards.

| Efficiency (%) | Torque (ft-lbs) | Amperage (Amps) |
|----------------|--------------------|------------------------------|
| Full load: N/A | Full load: 29.9 | Full load: 12.5 |
| 75% load: N/A | Breakdown: 86.2 | Unloaded: 5.2 |
| 50% load: N/A | Pull up: 0.0 | Locked rotor: 93.8 |
| 25% load: N/A | Locked rotor: 58.1 | Star Delta Locked rotor: 0.0 |

Figura 17: Detalles generales del motor. This screenshot shows general motor details for motor #1506. The data is as follows:

| Parameter | Value |
|-----------------------|---------------------------|
| Manufacturer | Baldor-Reliance |
| Model | SUPER-E, NEMA Premium |
| Catalog | EM3714T |
| Motor type | NEMA Design B |
| Size (HP) | 10.0 |
| Speed (RPM) | 1800 |
| Full-load speed (RPM) | 1770 |
| Enclosure type | TEFC |
| Frame no. | 215T |
| Voltage rating | 230/460 |
| Definite purpose | <General - purpose motor> |

Sin embargo, los métodos estadísticos y el uso de programas como MOTORMASTER, no garantizan resultados del todo satisfactorios, esto debido a que los datos con los que se trabajan son datos obtenidos en laboratorio por los fabricantes, pero que fueron extraídos en condiciones diferentes a las que los motores se podrían encontrar operando en la realidad, por lo que en condiciones de desbalance de tensiones estos métodos no son los más adecuados, al igual cuando se tienen motores que han sido reparados.

4.2.5 Método del Deslizamiento

Se basa en suponer que la carga del motor es proporcional al deslizamiento, por lo que el factor de carga será la relación entre el deslizamiento medido y el deslizamiento en condiciones nominales, y debido a que el deslizamiento varía con la tensión efectiva real se tiene:

$$P_{out} = \frac{s}{s_n \left(\frac{V_n}{V}\right)^2} * P_n \quad [4.3]$$

Donde:

P_{out} : Potencia de salida en kW

S : Deslizamiento medido (p.u)

S_n : Deslizamiento a velocidad nominal (p.u.)

V_n : Tensión nominal en V

V : Tensión medida en V

P_n : Potencia nominal en kW

Este método solo es recomendable solo cuando se dispone de un tacómetro óptico. Con la potencia de salida, si se tiene la potencia de entrada medida, se calcula la eficiencia; en caso contrario se calcula el factor de carga con la potencia de salida y con datos de placa se determina la eficiencia operacional del motor.

4.2.6 Método del Par en el Eje.

Este método se basa en la medición del par en eje, es el método más directo para determinar la eficiencia más sin embargo no es un método práctico en el campo, ya que es un método que requiere de sensores especiales de alta complejidad e invasivos.

4.2.7 Método del Par en el Entrehierro.

Método que necesita las mediciones de tensión y corriente de fase instantáneos para determinar el momento y deducir la potencia de salida en el eje, este método requiere una prueba en vacío con la que se calcula las pérdidas de fricción, batimiento y núcleo. En algunos casos se necesita también la forma de onda cuando este método considera distorsión armónica y desequilibrio; debido a que se toman los valores instantáneos de corriente y tensiones, al aplicar este método se debe considerar la medición de la resistencia en el estator, lo que implica costos adicionales, mayor intrusión y problemas de seguridad. La exactitud del método es afectada cuando se asumen constantes los valores de las pérdidas rotacionales, pérdidas del núcleo y las pérdidas adicionales.

La eficiencia viene dada por las siguientes fórmulas:

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} \quad [4.4]$$

$$P_{sal} = P_{ent} - \text{pérdidas} \quad [4.5]$$

$$\eta = \frac{P_{ent} - \text{pérdidas}}{P_{ent}} \quad [4.6]$$

Donde:

η = Eficiencia del motor

P_{ent} = La potencia de Entrada

P_{sal} = La potencia de salida

Para determinar las pérdidas es necesario realizar algunas mediciones para los métodos descritos anteriormente entre ellas:

- ✓ Lectura de placa
- ✓ Medición óptica de la velocidad o deslizamiento
- ✓ Medición de la corrientes y tensiones de fase o línea
- ✓ Medición de la potencia de entrada
- ✓ Determinar la resistencia del estator
- ✓ Temperatura del devanado
- ✓ Medición del momento en el eje
- ✓ Formas de onda
- ✓ Análisis armónico.

La adquisición de estos datos debe realizarse con instrumentos con errores individuales menores al 0.5% a plena escala, y se tendrá que incluir los efectos de la amplitud y la fase según la IEEE-112, en condiciones de campo la velocidad se debe medir con tacómetros ópticos. Con los métodos simples como el método de datos de placa, método de la corriente y deslizamiento, al ser de fácil aplicación pueden originar errores apreciables si se considera que la eficiencia de la placa del motor no se mantiene constante en todo momento de operación. Por ser resultado del tratamiento estadístico de un lote de motores, la corriente posee un comportamiento no lineal y el deslizamiento correspondiente a valores nominales puede presentar un 20% de desviación.

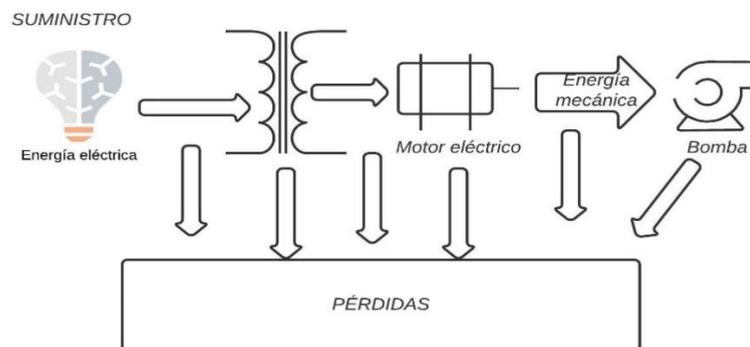
CAPITULO 5: EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SUMINISTRO PARA PLANTAS DE BOMBEO.

5.1 Determinación de la Calidad en el Suministro de Potencia en plantas de bombeo.

Las plantas de bombeo y saneamiento poseen diferentes elementos que son necesarios para la producción y tratamiento de aguas, en la figura 18 se muestra un esquema que abarca desde el suministro de energía eléctrica por parte de la distribuidora, el transformador, motores hasta que llega a las bombas que serán encargadas de llevar a cabo el proceso de suministro de agua potable, en este proceso los elementos tales como conductores, transformadores y motores eléctricos, etc. generan pérdidas de energía las cuales se traducen en reducción de la eficiencia e incremento de los costos de producción y mantenimiento.

Figura 18.

Esquema general de pérdidas desde el suministro de energía eléctrica hasta la bomba



Es por ello que la Calidad en el suministro es importante ya que esto permitirá controlar la reducción de pérdidas y eficiencia en los motores, evitando con ello fallas y daños en los equipos de bombeo. La determinación de posibles fallas en plantas, es importante para evaluar todos los posibles factores que estén afectando los sistemas, por tal razón es imprescindible monitorear el suministro de potencia tanto de la distribuidora, como de las subestaciones para detectar posibles anomalías que se estén dando en los sistemas de bombeo, por lo que es necesario crear

un plan para detectar fallas en equipos, y así reducir costos de operación, paros en la producción y daños en las máquinas y equipos.

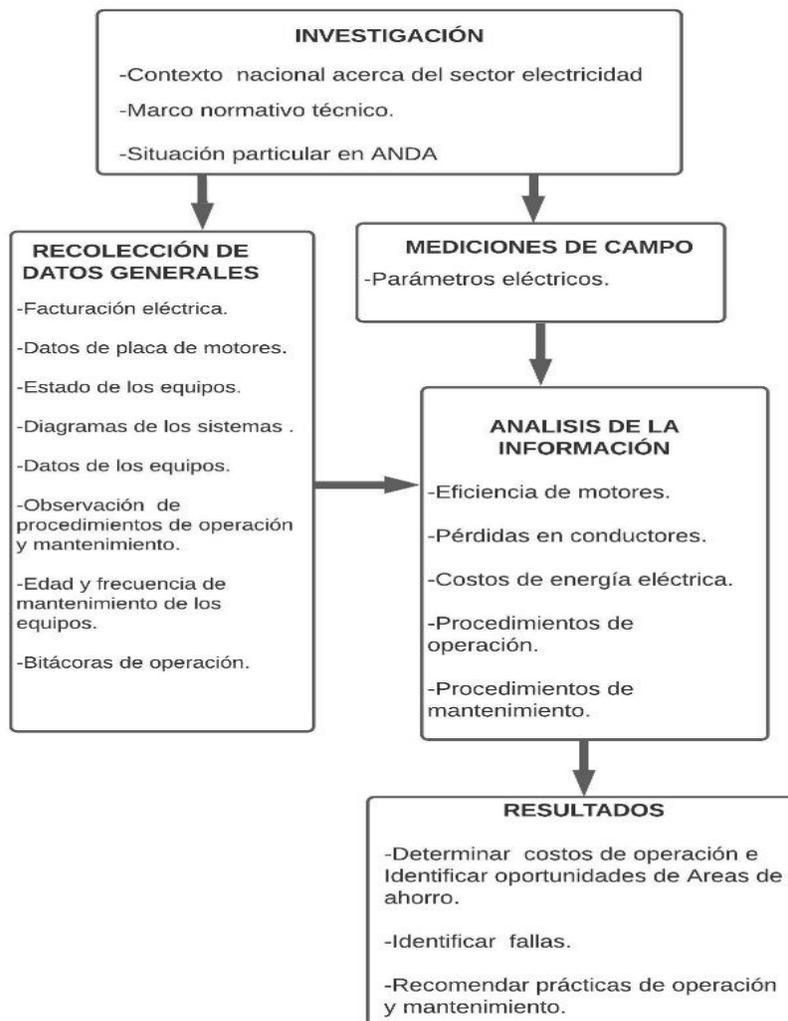
5.2 Plan para determinar la Calidad de Suministro y sus efectos en plantas de bombeo.

Para determinar y corregir fallas en los sistemas de bombeo es necesario llevar a cabo un plan de control de operación y mantenimiento que permita a personal técnico localizar, determinar y prevenir fallas y daños en los equipos de bombeo.

El plan propuesto a ejecutar sería el mostrado a continuación:

Figura 19

Plan de trabajo para determinar la calidad de suministro de potencia en plantas de bombeo



5.2.1 Investigación.

En este paso se hace una investigación acerca de los antecedentes de mantenimiento y operación en las plantas potabilizadoras de ANDA, con los cuales se identificarán algunos de los problemas más recurrentes a los que se enfrenta la institución, instalaciones que sufren mayor número de fallas y daños, identificar plantas que tienen mayor consumo de energía eléctrica, la forma de operación de la planta, etc. En el contexto nacional se investigará el contexto del marco normativo a nivel nacional e internacional acerca de calidad de energía, directrices y parámetros técnicos. Estos han sido definidos anteriormente en este documento.

5.2.2 Recolección de datos generales.

Después de una investigación y análisis de la misma se hace una recolección de datos generales, que comprende el recopilar la suficiente información en las plantas de bombeo acerca de costos de operación datos de placa de motores, estados en los que se encuentran las máquinas y equipos, etc.

Se debe realizar una inspección y recopilación de datos del sitio, haciendo un estudio visual y utilizando datos de instalación como conexiones a tierra, inspecciones de cableados, etc.

A continuación, se puede resume en un listado, la información más relevante a la hora de registrar los datos iniciales del sistema:

1. Lista de problemas que se presentan en las plantas de bombeo, como por ejemplo interrupciones de energía frecuentes, paros de bombas, cortos circuitos, perdidas de producción.
2. Características de los equipos que presentan los problemas. Los tiempos entre fallas y duración de las mismas.
3. Posibles fuentes generadoras de fallas y perturbaciones.

4. Datos eléctricos del sistema eléctrico tales como: Datos de placa de motores, datos transformadores, Niveles nominales de tensión del sistema y suministro, diagramas unifilares.

5.2.3 Mediciones de Campo.

Cuando se realiza cualquier medición lo primero que hay que tomar en cuenta son los objetivos del monitoreo de la red ya que teniendo en claro esto se puede determinar aspectos como la selección de equipos de medición, el tipo y causa de distorsión, los parámetros y límites de los umbrales, etc.

Los objetivos de las mediciones de campo pueden ser

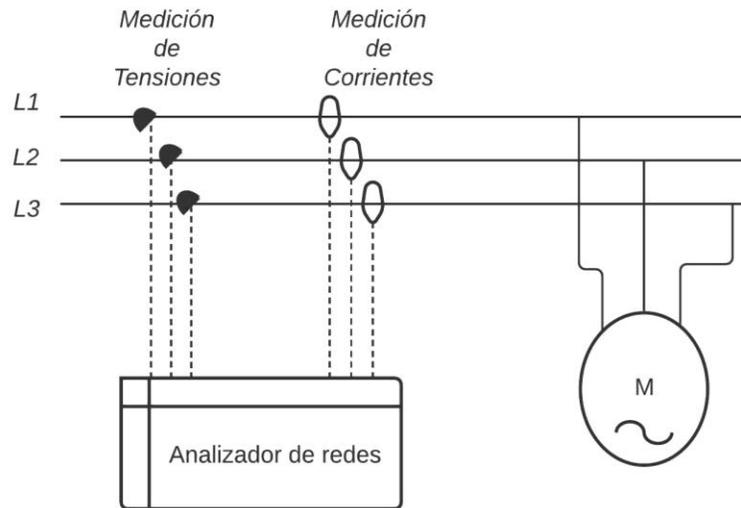
- ✚ **Monitoreo el rendimiento del sistema:** Su objetivo es realizar un chequeo del estado de la red, con el fin de verificar el rendimiento del sistema, puede identificar problemas y ofrecer información para ayudar a adaptar las características de los equipos a las perturbaciones presentes en el sistema.
- ✚ **Monitoreo de problemas específicos:** Permite resolver problemas de calidad de energía eléctrica mediante la realización de monitoreo a corto plazo en lugares específicos o con cargas difíciles, este es un método correctivo de monitoreo de calidad de potencia.
- ✚ **Monitoreo como parte de mantenimiento predictivo:** El objetivo de este es evitar fallas en equipos y evitar paros en el proceso de producción de las plantas industriales, los datos que se obtienen a partir de este monitoreo pueden evitar fallas en los equipos eléctricos y electrónicos, transformadores, protecciones eléctricas.

Se realizarán mediciones de parámetros tales como corrientes y tensiones para el suministro de potencia donde se conectará un analizador de redes de la forma en que se muestra en la figura 20,

y se monitoreará la red de suministro de potencia del motor trifásico tanto para regulación de tensión como desbalance de tensión de forma que se cumpla con la norma SIGET.

Figura 20

Esquema de conexión para toma de datos en suministro de potencia.



Según la (SIGET, 2021), **Calidad del Producto Técnico en su Capítulo I Generalidades, Art 18 y 19** dice que: “el lapso mínimo para la medición de los parámetros de la Calidad del Producto será de siete días calendario, denominado Periodo de Medición y la medición de los parámetros de Regulación de Tensión y Desbalance de Tensión será en intervalos de quince minutos”.

Para determinar la cantidad de datos que se tomaran en cuenta en las variaciones de tensión y desbalance suministradas por la distribuidora se hará de la siguiente manera.

Se realizarán toma de datos cada 15 minutos, por lo que en una hora se tendrán 4 datos medidos.

A estos datos se aplicará la norma SIGET para una toma de valores de tensión en siete días hábiles (una semana).

$$N^{\circ} \text{ de mediciones por semana} = \left(\frac{4 \text{ mediciones}}{\text{hora}} \right) \left(\frac{24 \text{ horas}}{\text{día}} \right) (7 \text{ días}) = \mathbf{672 \text{ mediciones}} \text{ [5.1]}$$

Por lo que el número mínimo requerido para realizar el análisis de calidad de suministro será de 672 mediciones.

5.2.4 Análisis de la Información.

El siguiente paso es realizar un análisis de la información y datos obtenidos en las mediciones de campo realizadas, y tiene como objetivo principal determinar las pérdidas energéticas y por ende la eficiencia en los motores trifásicos dentro de las plantas de bombeo.

Para analizar el efecto que tiene la regulación de tensión y desbalance de tensión, en el motor de inducción se selecciona un motor con las características que se encuentran en la tabla 12.

Tabla 12.

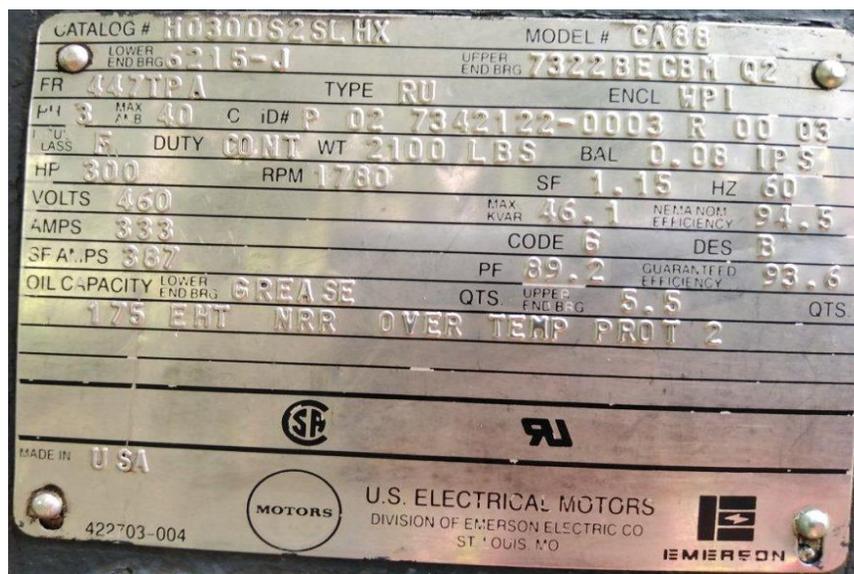
Características del Motor a analizar

| Características del Motor | |
|----------------------------------|-------|
| Potencia Nominal | 300HP |
| Tensión Nominal | 460V |
| Corriente Nominal | 333A |
| Eficiencia Nominal | 94.5% |
| Factor de Potencia | 0.892 |
| R.P.M | 1780 |
| Número de Polos | 4 |
| Tipo de Diseño | B |
| Fabricante | NEMA |

Los datos de la tabla anterior han sido obtenidos de los datos de placa de un motor de inducción que opera en las plantas de bombeo ANDA, como se muestra en la figura 21.

Figura 21

Datos de placa de motor de Inducción trifásico en ANDA



5.2.4.1 Eficiencia de Motores.

Para determinar la eficiencia de un motor trifásico de inducción existen diferentes métodos los cuales se han mencionado anteriormente, algunos son únicamente aplicables para condiciones normales de operación, ya que en éstos no se consideran los efectos de variaciones de tensión, desbalance y otros, en el caso de métodos como los descritos en la norma IEEE-112, requieren someter a los motores a ensayos los cuales no son factibles en la industria. Otros métodos de fácil aplicación además de no considerar los efectos en el suministro de potencia de los motores ocasionan considerables porcentajes de error en su resultado. Por todo lo anterior la determinación de la eficiencia para un motor sometido a condiciones de campo en un ambiente industrial es un reto, el cual se puede complicar cuando en el suministro de potencia del motor existen condiciones diferentes a las nominales como Variaciones de Tensión, Desbalance de Tensiones, Perturbaciones por Armónicos etc.

5.2.4.2 Análisis de la Eficiencia en Motores Trifásicos con Suministro que presenta Variaciones de Tensión.

Tanto las normas internacionales como nacionales que se han abordado establecen parámetros para variación de tensión entre $\pm 10\%$ para norma NEMA e IEEE y variaciones entre $\pm 6\%$ y $\pm 8.5\%$ de acuerdo a la norma SIGET (Ver tabla 9), estos valores en situaciones reales pueden ser mayores y no estar dentro de los valores sugeridos por las normas, o pueden estar ocasionando problemas en las máquinas dependiendo la aplicación que están desempeñando. Estas variaciones afectan significativamente tanto al sistema mecánico que recibe la energía mecánica convertida a partir de la energía eléctrica, como al sistema o red eléctrica encargada de suministrar la energía. La variación de voltaje se obtendrá a partir de la ecuación 5.2 donde se tiene que la variación de voltaje es la relación que existe entre el voltaje nominal con respecto al voltaje promedio entre fases.

$$\%AVV = \left[\frac{\text{Voltaje}_{\text{promedio o entre fases}}}{\text{Voltaje}_{\text{nominal}}} - 1 \right] \cdot 100 \quad [5.2]$$

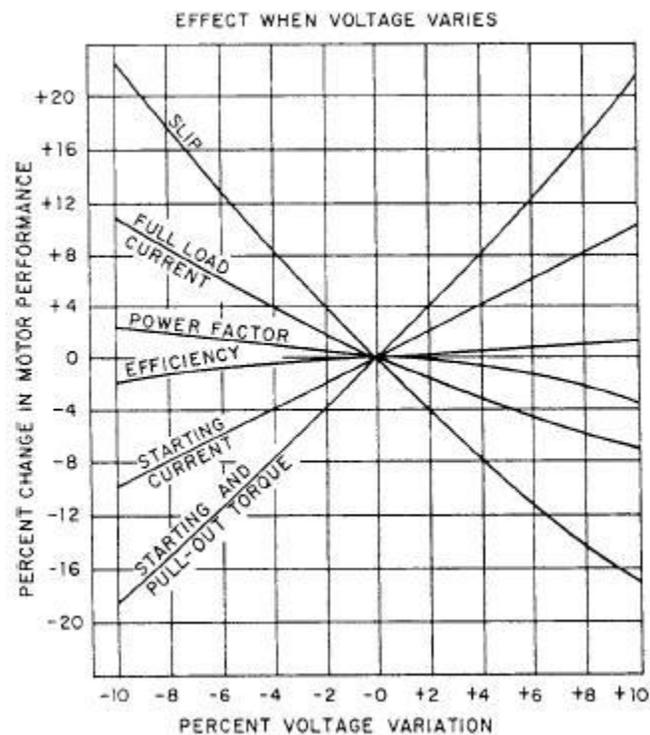
Cuando un motor de inducción es sometido a Variaciones de Tensión este tendrá el comportamiento detallado en las gráficas de la figura 10. De donde se puede observar que, si el motor opera en un sistema con tensiones de operación menores a las nominales, el motor presentará un aumento en la corriente, por lo que las pérdidas en el motor se verán aumentadas y con ello la eficiencia disminuirá. En el caso contrario, donde la tensión de operación es mayor a la tensión nominal, la corriente se verá disminuida y la eficiencia será un tanto mayor, esto puede ser algo beneficioso para el motor hasta cierto punto, pero este aumento de tensión no puede sobrepasar el 10% según norma y esto es debido a que cuando el motor opera con un voltaje mayor al nominal también se ve afectada la corriente de magnetización la cual tiende a aumentar por lo que el punto de operación entra en saturación, generando así calentamiento por saturación,

produciendo así en la mayoría de los casos la destrucción del aislante en los devanados, disminución del factor de potencia y falla del motor.

Para determinar la eficiencia alimentado con un sistema que presenta variaciones de tensión, se ocupará la ecuación 5.2, y la figura 22 (IEEE, 1995)

Figura 22

Efecto de las variaciones de voltaje en motores asíncronos.



A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la hoja de Excel VBA donde se han ocupado mediciones de tensión figura 32, las cuales han sido obtenidas en la escuela de Ingeniería eléctrica y posteriormente modificadas acorde a los requerimientos del motor que se está trabajando, ya que solo la base de datos con que se cuenta solo se ha sido tomado como base para poderlo llevar a un escenario real en las plantas de bombeo.

Figura 23

Variación de tensión y cambios de eficiencia.



En la imagen 23 tenemos un sistema con una variación de tensión de -1.805% para lo cual la hoja de Excel VBA calcula por medio del gráfico de la figura 22 el porcentaje de cambio de la eficiencia, para posteriormente ver su efecto en la eficiencia la cual es levemente modificada.

Las figuras 24 y 25 muestra los resultados de tener en un sistema variaciones de tensión en los límites recomendables establecidos por la norma IEEE 1159 y Nema MGI de $\pm 10\%$ de donde se observa que al tener una variación de tensión del -10% la eficiencia se ve notablemente afectada.

Figura 24

a) *Eficiencia a una variación de tensión de 5%* b) *Eficiencia a una variación de tensión de -5%*

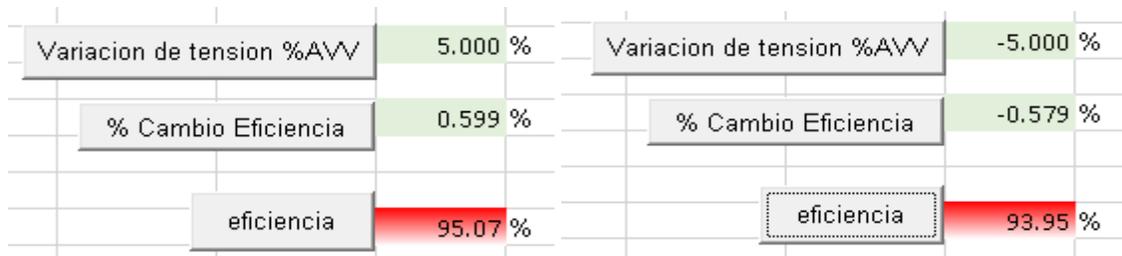
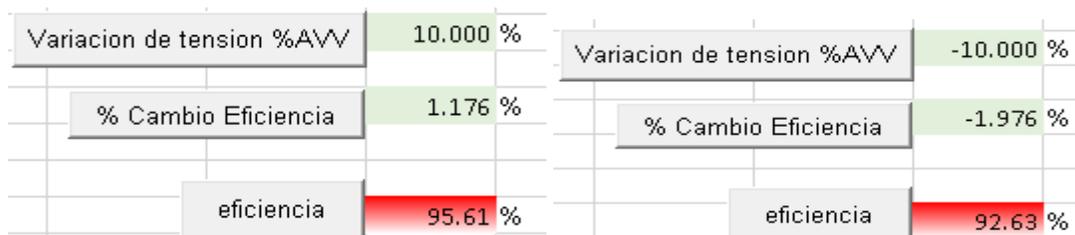


Figura 25

a) *Eficiencia a una variación de tensión de 10%* b) *Eficiencia a una variación de tensión de -10%*



5.2.4.3 Análisis de la Eficiencia en Motores Trifásicos con suministro que presenta Desbalance de Tensión.

Cuando un sistema de voltajes trifásicos desbalanceados alimenta un motor eléctrico de inducción, las corrientes de fase en el motor serán diferentes y producirán campos magnéticos de diferente magnitud en cada fase. Por lo que en el entrehierro el motor tendrá como resultante dos campos giratorios, uno de secuencia positiva y otro en sentido opuesto al giro del motor (secuencia negativa). Las causas de desequilibrio de tensiones pueden ocurrir en etapa de transmisión, distribución e inclusive en dentro las instalaciones eléctricas de la planta.

Para determinar la eficiencia de los motores en las plantas de bombeo sometidos a condiciones de desbalance de tensión, en este trabajo se realizará el método gráfico aplicado en el estándar IEEE 739 (Bronze book), de la siguiente manera:

Se tiene un motor con los datos de placa mostrados a continuación:

Tabla 13
Datos de placa del motor ingresados a VBA

| DATOS DE PLACA DEL MOTOR | |
|--------------------------|----------|
| Potencia Nominal | 300 HP |
| Eficiencia | 94.5 % |
| Tensión Nominal | 460 V |
| Corriente Nominal | 333 A |
| Factor de Potencia | 0.89 |
| R.P.M | 1780 rpm |
| Número de Polos | 4 |
| Tipo de Diseño | B |
| Fabricante | NEMA |

Estos datos de placa son ingresados a la hoja de cálculo Excel VBA por el usuario, posteriormente, se realizará el ingreso de las mediciones de tensión y corrientes obtenidas del suministro de potencia en las subestaciones de las plantas de bombeo, en el presente documento los datos se muestran en la figura A.1 y A.2 de los Anexos, Dicha base de datos está adaptada a valores de tensión y corriente similares a los necesarios para el funcionamiento de los motores en

la planta de bombeos, ya que esta base de datos fue obtenida con mediciones hechas en la escuela de Ingeniería Eléctrica, debido a la falta de acceso a las plantas de bombeo por razones de la pandemia por COVID19.

Desde la hoja de cálculo de Excel VBA, puede ser exportada una hoja .xlsx con datos estadísticos o mediciones tomadas por el analizador de señales siguiendo el formato mostrado en la figura A.3 de los Anexos. Con estos datos se procede a obtener el %LVUR, obtenido mediante la ecuación 5.3.

$$\%LVUR = \frac{|Desviación\ max\ (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca})|}{Promedio\ de\ (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca})} * 100 \quad [5.3]$$

Para determinar la potencia de salida nominal se aplica la siguiente ecuación:

$$P_{s1} = P_n \cdot \eta_n \quad [5.4]$$

Donde:

P_n : Potencia nominal del motor de inducción

η_n : Eficiencia nominal del motor de inducción

Para la base de datos ingresada se obtiene el siguiente resultado:

Figura 26

Máxima desviación del voltaje de línea



Al encontrar el porcentaje de desbalance en el suministro de potencia %LVUR=0.958%, se hace uso de la gráfica de la figura 27, donde se determina el porcentaje de pérdidas generadas en los motores de inducción bajo la condición dada de desbalance.

Figura 27

Curva de incremento de pérdidas por desbalance de tensión en motores asíncronos

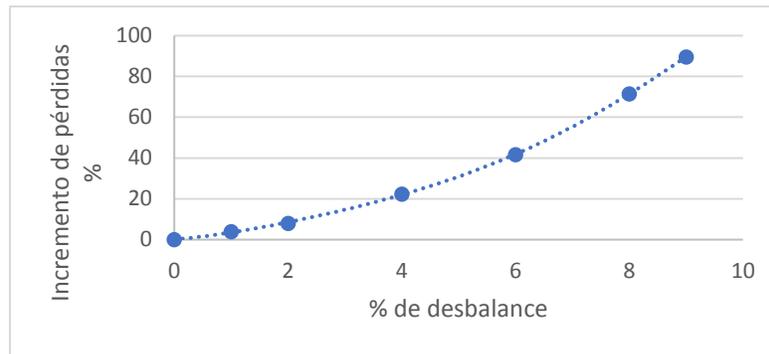


Figura 28

Resultado del porcentaje de pérdidas encontradas en Excel VBA



Al obtener el porcentaje de pérdidas se pueden calcular las pérdidas de potencia mediante las siguientes ecuaciones.

$$P_1 = P_n - P_{s1} \quad [5.5]$$

$$P_2 = P_{s1} \cdot \%Perdidas \quad [5.6]$$

$$Pérdidas = P_1 + P_2 \quad [5.7]$$

De la gráfica 27 se obtiene que para un desbalance de 0.958% el % de pérdidas generado es de 3.297%.

Además, el programa calcula por medio de la curva de desclasificación de la potencia, el factor de redimensionamiento de potencia, para él %de desbalance obtenido el cual corresponde a un factor de reducción de redimensionamiento del 0.989. lo que indica que la potencia de salida del motor tendrá que reducirse un 1.1%, es decir que para que el motor trabaje de manera óptima y evitar su deterioro el motor tendrá que trabajar al 98.9% de su potencia de salida nominal.

Figura 29

Gráfica de factor de reducción de potencia debido a desbalance de tensión.

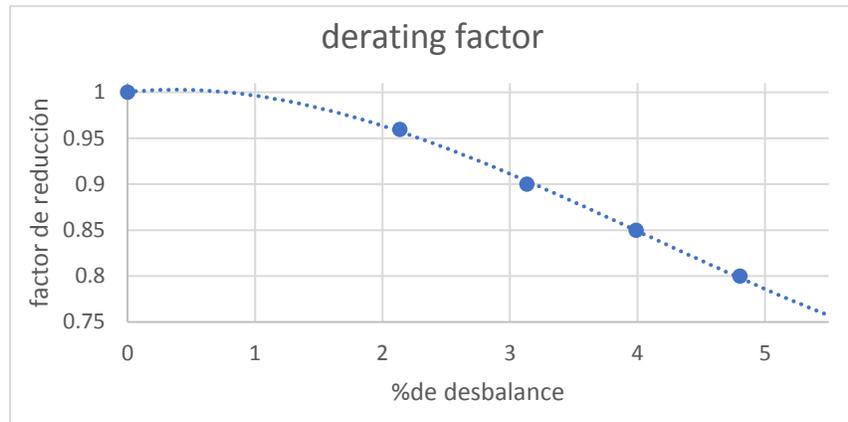


Figura 30

Factor de reducción de potencia encontrado por Excel VBA.



Por lo tanto, la Potencia de Salida estará dada por:

$$P_{sal} = P_{s1} * f_d \quad [5.8]$$

Dado lo anterior la eficiencia del motor en presencia de desbalance está dada por la ecuación:

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{sal} + Perdidas} \quad [5.9]$$

Donde:

P_{sal} : Potencia de salida del motor

f_d : Factor de desclasificación

Por lo que la eficiencia del motor en presencia de desbalance bajo los criterios y datos de placa del motor y mediciones del suministro de potencia, tomados anteriormente la eficiencia disminuye al 91.56%

Figura 31

Eficiencia encontrada con Excel VBA



El caso de ejemplo propuesto anteriormente es para una serie de datos estadísticos los cuales han sido adaptados para llevar a cabo la aplicación del método y que personal técnico pueda contar con una herramienta de cálculo que le permita evaluar de manera rápida la calidad de suministro de potencia con la que cuenta la planta.

5.2.5 Resultados.

Los resultados se harán en base a las mediciones realizadas al sistema de donde se obtendrán los costos relacionados por condiciones de desbalance y problemas de regulación de tensión. Por medio de las mediciones que se realizaron con el analizador de señales, se podrán procesar por medio de una hoja de Excel con la que se podrá obtener de una forma simple el comportamiento que el suministro eléctrico de la planta de bombeo está presentando y con esto se determinarán los costos que incurren al operar un sistema con desviaciones de tensión y regulación de tensión, y así elaborar un proceso que permita detectar y descartar fallas además corregir problemas asociados a la calidad de energía, establecer parámetros que se adecuen a los requerimientos de los sistemas de la planta. La figura 32 y 33 representan la muestra de mediciones de tensiones de línea y corrientes de línea respectivamente, obtenidas para el sistema de bombeo, para alimentar motores trifásicos de 300HP, 460Vac a 60Hz.

Figura 32

Muestra de tensiones de línea para el suministro de potencia de motores trifásicos.

| | A | B | C | D | E | I |
|----|---------------------|----|---------|---------|---------|---|
| 10 | Time | N | L1 | L2 | L3 | |
| 11 | 14.09.2006 18:40:00 | 1 | 457.943 | 463.100 | 452.657 | |
| 12 | 14.09.2006 18:50:00 | 2 | 458.990 | 437.257 | 450.759 | |
| 13 | 14.09.2006 19:00:00 | 3 | 451.973 | 440.652 | 452.094 | |
| 14 | 14.09.2006 19:10:00 | 4 | 456.522 | 430.691 | 453.935 | |
| 15 | 14.09.2006 19:20:00 | 5 | 456.030 | 431.116 | 454.947 | |
| 16 | 14.09.2006 19:30:00 | 6 | 457.287 | 432.371 | 451.295 | |
| 17 | 14.09.2006 19:40:00 | 7 | 453.332 | 464.088 | 453.926 | |
| 18 | 14.09.2006 19:50:00 | 8 | 451.616 | 461.859 | 453.694 | |
| 19 | 14.09.2006 20:00:00 | 9 | 452.800 | 457.743 | 453.239 | |
| 20 | 14.09.2006 20:10:00 | 10 | 458.270 | 464.673 | 454.768 | |
| 21 | 14.09.2006 20:20:00 | 11 | 450.704 | 459.735 | 454.365 | |
| 22 | 14.09.2006 20:30:00 | 12 | 453.738 | 435.423 | 453.782 | |
| 23 | 14.09.2006 20:40:00 | 13 | 454.373 | 449.340 | 454.522 | |
| 24 | 14.09.2006 20:50:00 | 14 | 450.543 | 450.448 | 453.134 | |
| 25 | 14.09.2006 21:00:00 | 15 | 457.615 | 457.420 | 454.023 | |
| 26 | 14.09.2006 21:10:00 | 16 | 456.890 | 447.870 | 451.609 | |
| 27 | 14.09.2006 21:20:00 | 17 | 453.542 | 449.781 | 453.967 | |
| 28 | 14.09.2006 21:30:00 | 18 | 453.530 | 437.804 | 452.439 | |
| 29 | 14.09.2006 21:40:00 | 19 | 453.925 | 455.204 | 454.702 | |
| 30 | 14.09.2006 21:50:00 | 20 | 451.213 | 453.037 | 453.002 | |
| 31 | 14.09.2006 22:00:00 | 21 | 458.819 | 442.639 | 451.012 | |
| 32 | 14.09.2006 22:10:00 | 22 | 459.628 | 460.357 | 454.907 | |
| 33 | 14.09.2006 22:20:00 | 23 | 453.858 | 459.694 | 450.809 | |
| 34 | 14.09.2006 22:30:00 | 24 | 458.282 | 452.201 | 452.292 | |
| 35 | 14.09.2006 22:40:00 | 25 | 452.314 | 444.521 | 454.142 | |
| 36 | 14.09.2006 22:50:00 | 26 | 452.184 | 443.428 | 450.203 | |
| 37 | 14.09.2006 23:00:00 | 27 | 456.747 | 449.580 | 450.396 | |
| 38 | 14.09.2006 23:10:00 | 28 | 452.748 | 459.844 | 453.930 | |
| 39 | 14.09.2006 23:20:00 | 29 | 452.880 | 445.486 | 450.017 | |
| 40 | 14.09.2006 23:30:00 | 30 | 452.728 | 461.608 | 451.114 | |
| 41 | 14.09.2006 23:40:00 | 31 | 457.533 | 452.913 | 450.444 | |
| 42 | 14.09.2006 23:50:00 | 32 | 455.816 | 453.141 | 454.569 | |
| 43 | 15.09.2006 00:00:00 | 33 | 458.710 | 461.899 | 452.207 | |
| 44 | 15.09.2006 00:10:00 | 34 | 458.949 | 446.393 | 451.092 | |
| 45 | 15.09.2006 00:20:00 | 35 | 452.921 | 434.907 | 450.632 | |
| 46 | 15.09.2006 00:30:00 | 36 | 458.439 | 434.454 | 451.143 | |
| 47 | 15.09.2006 00:40:00 | 37 | 450.095 | 452.260 | 453.413 | |
| 48 | 15.09.2006 00:50:00 | 38 | 456.609 | 463.680 | 453.541 | |
| 49 | 15.09.2006 01:00:00 | 39 | 459.509 | 438.092 | 450.723 | |
| 50 | 15.09.2006 01:10:00 | 40 | 456.218 | 455.472 | 452.044 | |
| 51 | 15.09.2006 01:20:00 | 41 | 456.785 | 453.861 | 450.131 | |
| 52 | 15.09.2006 01:30:00 | 42 | 457.185 | 462.250 | 452.303 | |

Figura 33

Muestra de corrientes de línea para el suministro de potencia de motores trifásicos.

| | Time | N | L1 | L2 | L3 |
|---|---------------------|----|---------|---------|---------|
| 0 | 14.09.2006 18:40:00 | 1 | 328.310 | 333.840 | 326.510 |
| 1 | 14.09.2006 18:50:00 | 2 | 324.990 | 320.280 | 320.030 |
| 2 | 14.09.2006 19:00:00 | 3 | 326.530 | 329.720 | 332.940 |
| 3 | 14.09.2006 19:10:00 | 4 | 326.630 | 326.210 | 334.930 |
| 4 | 14.09.2006 19:20:00 | 5 | 332.520 | 321.270 | 326.770 |
| 5 | 14.09.2006 19:30:00 | 6 | 322.180 | 327.160 | 325.860 |
| 6 | 14.09.2006 19:40:00 | 7 | 328.240 | 329.810 | 326.780 |
| 7 | 14.09.2006 19:50:00 | 8 | 320.780 | 321.230 | 321.830 |
| 8 | 14.09.2006 20:00:00 | 9 | 320.990 | 332.620 | 333.970 |
| 9 | 14.09.2006 20:10:00 | 10 | 321.710 | 325.710 | 322.450 |
| 0 | 14.09.2006 20:20:00 | 11 | 330.920 | 323.620 | 327.130 |
| 1 | 14.09.2006 20:30:00 | 12 | 335.610 | 332.670 | 334.100 |
| 2 | 14.09.2006 20:40:00 | 13 | 321.510 | 332.150 | 323.370 |
| 3 | 14.09.2006 20:50:00 | 14 | 324.470 | 324.580 | 331.880 |
| 4 | 14.09.2006 21:00:00 | 15 | 320.530 | 325.580 | 333.900 |
| 5 | 14.09.2006 21:10:00 | 16 | 327.860 | 330.810 | 327.320 |
| 6 | 14.09.2006 21:20:00 | 17 | 328.970 | 332.670 | 331.120 |
| 7 | 14.09.2006 21:30:00 | 18 | 320.760 | 320.990 | 326.970 |
| 8 | 14.09.2006 21:40:00 | 19 | 331.720 | 330.280 | 322.090 |
| 9 | 14.09.2006 21:50:00 | 20 | 328.670 | 323.750 | 322.720 |
| 0 | 14.09.2006 22:00:00 | 21 | 329.270 | 331.600 | 328.970 |
| 1 | 14.09.2006 22:10:00 | 22 | 327.340 | 320.980 | 333.650 |
| 2 | 14.09.2006 22:20:00 | 23 | 323.340 | 334.030 | 335.970 |
| 3 | 14.09.2006 22:30:00 | 24 | 327.820 | 331.230 | 325.330 |
| 4 | 14.09.2006 22:40:00 | 25 | 333.410 | 328.300 | 328.910 |
| 5 | 14.09.2006 22:50:00 | 26 | 326.550 | 330.170 | 326.060 |
| 6 | 14.09.2006 23:00:00 | 27 | 321.500 | 324.460 | 324.370 |
| 7 | 14.09.2006 23:10:00 | 28 | 331.160 | 330.630 | 328.780 |

5.2.5.1 Costos de energía para Motores sometidos a condiciones de Variación de Tensión.

A continuación, se mostrarán algunos de los resultados obtenidos con la hoja de Excel elaborada con código VBA, para el procesamiento de mediciones del suministro eléctrico para una estación de bombeo. En ésta se ingresaran una muestra de datos obtenidos por medio de un analizador de señales, como el presentado en la figura 32 y 33 este hará mediciones de tensión y corriente de línea en el suministro de potencia de los motores de inducción, el equipo realizará mediciones simultaneas cada 15 minutos, por una semana, la hoja de Excel podrá importar dichas mediciones y hará el procesamiento de dichos datos basándose en la Norma de Calidad de Servicio, de la SIGET, con lo que podrá determinar el porcentaje de variación al que el motor de inducción está siendo sometido y calculará las pérdidas aplicando el estándar Std. 739 de la IEEE, para posteriormente calcular los costos en los cuales está incurriendo el motor operando bajo estas condiciones.

En la tabla 14 se tienen los resultados para un motor de inducción con datos de placa mostrados en la figura 21, se varió los valores de regulación de tensión desde -10V hasta +10V, obteniendo para cada uno la eficiencia correspondiente y el costo que se tiene para cada situación.

Los costos de operación se determinan con la siguiente expresión:

$$\Delta\$ = 0.746 * HP * L * N * C * \frac{1}{E} \quad [5.10]$$

Donde:

HP = potencia de salida del motor.

L = % de carga del motor.

N = número de horas de operación.

C = Costo de la energía.

E = eficiencia del motor al % de carga.

Al ingresar los datos de placa del motor trifásico tal como se muestra en la figura A.5 del Anexo ; y los datos de las mediciones realizadas en la hoja de Excel VBA, fácilmente se puede calcular el porcentaje de variación de tensión, pérdidas y eficiencia del motor trifásico, además de los costos de energía que se requieren bajo esas condiciones de variación de tensión, las cuales se muestran en la figura 34.

Figura 34

Resultados obtenidos de Variación de tensión en el suministro de potencia a través de Excel.

| | | | |
|---------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------|
| Obtener VL | 451.698 V | Calcular Costos de OP | \$ 23,776.20 |
| OBTENER IL | 327.978 A | | |
| Pin | 228.373 kW 306.252 HP | | |
| Variacion de tension %AVV | -1.805 % | | |
| % Cambio Eficiencia | -0.201 % | | |
| eficiencia | 94.31 % | | |
| load | 96.47 % | | |

Tabla 14*Resultados para variación de tensión obtenidos con Excel VBA*

| Variación de Tensión | Eficiencia | Costo de operación |
|-----------------------------|-------------------|---------------------------|
| -10% | 92.63% | \$24,207.50 |
| -9% | 93.05% | \$24,098.50 |
| -8% | 93.37% | \$24,015.41 |
| -7% | 93.62% | \$23,952.95 |
| -6% | 93.80% | \$23,905.12 |
| -5% | 93.95% | \$23,867.37 |
| -4% | 94.08% | \$23,836.03 |
| -3% | 94.19% | \$23,808.27 |
| -2% | 94.29% | \$23,782.02 |
| -1% | 94.39% | \$23,755.91 |
| 0% | 94.50% | \$23,729.16 |
| 1% | 94.61% | \$23,701.50 |
| 2% | 94.72% | \$23,673.08 |
| 3% | 94.82% | \$23,644.30 |
| 4% | 94.95% | \$23,615.69 |
| 5% | 95.07% | \$23,587.77 |
| 6% | 95.17% | \$23,560.87 |
| 7% | 95.28% | \$23,534.96 |
| 8% | 95.38% | \$23,509.46 |
| 9% | 95.49% | \$23,483.02 |
| 10% | 95.61% | \$23,453.34 |

El número de horas de operación para este caso se tomaron 720h y el costo de la energía se extrajo del pliego tarifario SIGET para julio de 2021 (tabla A.1, Anexos), para grandes demandas en media tensión con medición horaria, con la distribuidora Del SUR. Lo que se puede apreciar en los resultados es que para tensiones menores a las nominales, los motores disminuyen su eficiencia y por ende los costos aumentan, en cambio al operar en sobretensión la eficiencia del motor aumenta y los costos de operación disminuyen, se puede tener en cuenta que este tipo de regulación no afecta negativamente la operación del motor siempre y cuando no se sobrepase del límite establecido por la norma que es de 10%, arriba de este, el motor podría tener pérdidas en su aislamiento por calentamiento y destruir el motor.

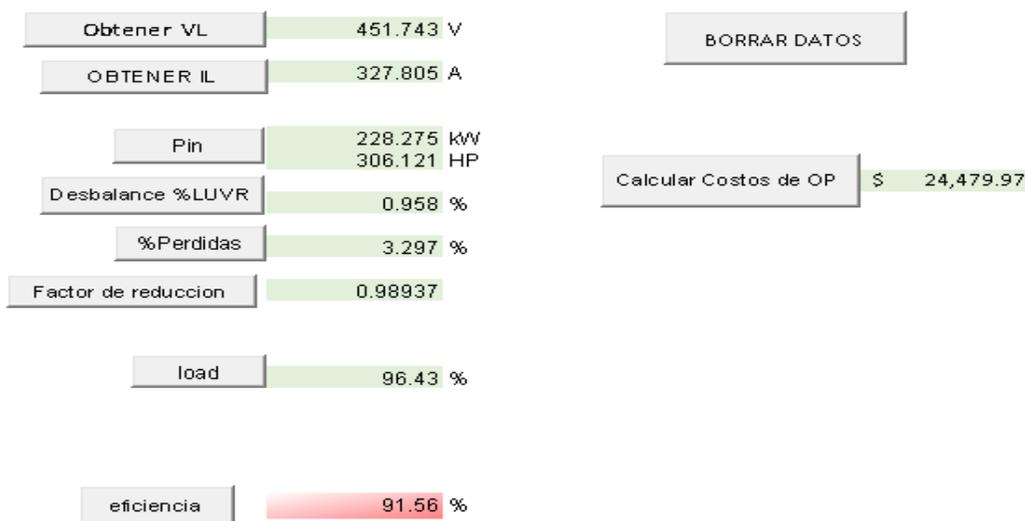
5.2.5.2 Costos de energía para Motores Sometidos a Condiciones de Desbalance de Tensión.

Para el análisis de desbalance, también se realizó por medio de Excel VBA de donde se aplicó el estándar STD 739 IEEE para determinar la eficiencia a través de las curvas de desclasificación del motor de la norma NEMA MG-1 y la curva de pérdidas en motores de inducción por desbalance. Como se mencionó en capítulos anteriores el desbalance de tensión en las normas técnicas internacionales como la NEMA, recomienda operar un motor con porcentajes de desbalance menor al 1%, pero como sabemos en los casos reales se pueden dar condiciones en las que el desbalance esté por encima de los valores recomendados, por lo que es necesario evaluar los sistemas.

La figura 35 representa los resultados obtenidos para las mediciones ingresadas de tensión y corriente, calculando el desbalance de tensión a la cual está sometida el suministro de potencia de los motores trifásicos de inducción para lo que se obtienen resultados de eficiencia y costos de operación bajo esas condiciones.

Figura 35

Resultados obtenidos por desbalance de tensión en el suministro de potencia a través de Excel.



En la Tabla 15 se tienen los resultados para un sistema con diferentes valores de desbalance que van desde el 0% al 5%, para los que se obtienen eficiencia y costos de operación, como se observa la eficiencia disminuye en gran porcentaje a medida aumenta el desbalance, y por consiguiente los costos de operación se ven aumentados.

Tabla 15

Resultado para Desbalance de Tensión obtenidos con VBA

| Desbalance de tensión | Eficiencia | Costo de operación |
|-----------------------|------------|--------------------|
| 0% | 94.50% | \$23,718.99 |
| 1% | 91.40% | \$24,523.94 |
| 2% | 86.84% | \$25,812.62 |
| 3% | 81.18% | \$27,609.46 |
| 4% | 74.50% | \$30,085.23 |
| 5% | 66.87% | \$33,518.60 |

Al igual que para la Regulación de tensión el costo de la energía fue tomado del pliego tarifario de SIGET para Julio de 2021 y las horas de operación serán 720h. Los datos fueron procesados en ambos casos con Excel y VBA, con la que personal técnico podrá realizar un análisis rápido de su suministro de potencia y así descartar problemas en el mismo.

5.2.6 Identificación de áreas de ahorro.

Sobre la base del análisis de información y los resultados obtenidos acerca de los costos de operación y eficiencia para el motor en cuestión, se debe incluir las condiciones operativas y de mantenimiento encontradas, con lo que se podrá desarrollar medidas que abarquen todas las oportunidades posibles para el ahorro tanto energético como económico, se realizarán medidas que requieran poca o ninguna inversión, y algunas que se necesiten inversiones mayores podrán realizarse si se elabora un análisis de costo-beneficio, el que puede ser un análisis de retorno

simple de la inversión o un análisis más profundo , considerando el tiempo de vida del bien a adquirir. Algunas medidas que se pueden tomar para el ahorro son:

- **Reducción de pérdidas identificadas en las instalaciones eléctricas:** esta medida puede lograrse al identificar sobrecalentamiento ya sea en transformadores, motores o conductores, y llevando acciones de identificación de las causas, mejorando las condiciones en las que operan los equipos.
- **Incrementar la eficiencia de los motores:** en esta medida se pueden tomar acciones como corregir desbalances de tensión si los hubiere, corregir problemas de regulación de tensión, sustituir motores por uno de alta eficiencia este último solo en el caso que se han agotado las acciones que no requieren inversiones grandes,
- **Mejorar el mantenimiento:** En esta medida se debe implementar un programa de mantenimiento predictivo y preventivo de manera regular, para evitar daños en los equipos y máquinas.

Por lo que se pueden aplicar las acciones tomadas en la tabla 16 puede ayudar a mejorar sustancialmente la eficiencia de un motor eléctrico, y con ello reducir las pérdidas energéticas.

Tabla 16

Acciones Recomendadas para corregir algunos factores que afectan el funcionamiento de los motores de inducción.

| Condición observada | Diagnóstico | Posible acción correctiva |
|--|--|---|
| Voltaje da alimentación por debajo del nominal | La tensión en el punto de acometida está por debajo del nominal | Corregir taps del transformador: graduar la relación de transformación del voltaje y ajustar el voltaje de salida al motor para absorber las variaciones del suministro. Solicitar a la distribuidora en el caso de detectar una variación mayor a la estipulada en la Norma de Calidad de Servicio SIGET, la medición y corrección de esta. |
| | El voltaje en el punto de la acometida presenta variaciones mayores a las establecidas en la norma de Calidad de servicio SIGET | Solicitar a distribuidora corregir el problema. |
| | La tensión en el punto de acometida es el nominal y no presenta variaciones significativas | Corregir los taps del transformador -Realizar un diagnóstico y mantenimiento del transformador. |
| Desbalance de tensiones de alimentación al motor | Voltaje en el punto de acometida está desequilibrado | -El desequilibrio de tensiones no está regulado en la norma nacional SIGET |
| | El voltaje en la acometida está balanceado y el secundario del transformador está desequilibrado | -Practicar diagnóstico y mantenimiento al transformador |
| | El voltaje en los bornes del secundario del transformador está balanceado y en la alimentación al motor se encuentra desequilibrado. | -Revisar la conexión de puesta a tierra del transformador y el motor, y en caso de detectar problemas, corregirlos -Revisar conexiones del CCM (Centro de control de motores), arrancador y motor, en el caso de encontrar problemas, corregirlos |
| La velocidad de operación del motor está por debajo de la velocidad a plena carga Alta temperatura y/o vibración en cojinetes y/o rodamientos | Problemas con rodamientos y/o altacojinetes. | -Lubricar y en caso de persistir el problema sustituir elementos dañados |
| El motor ha sido reparado (rebobinado) más de dos veces | La eficiencia del motor se encuentra despreciada | |
| El Motor es de eficiencia estándar y tiene más de 10 años de operación | La eficiencia de operación es baja. | |
| El motor se encuentra trabajando con un factor de carga menor al 45% | El motor se encuentra trabajando en una zona donde su eficiencia de operación es baja | -Sustituir el motor por un motor nuevo de alta eficiencia. |
| El motor se encuentra trabajando con un factor de carga mayor al 100% | El motor está trabajando en una zona donde su eficiencia de operación es baja | |

CONCLUSIONES

- ✚ El determinar la Calidad del suministro de potencia para plantas industriales de bombeo es considerablemente necesaria para el buen funcionamiento de los motores eléctricos y equipos electrónicos dentro de éstas, y es posible determinarla mediante una metodología que tome como base algunos procesos tales como inspección, recolección y análisis de datos, esto con el objeto de determinar la causa de los problemas asociados a la mala calidad en el servicio del suministro prestado por la compañía distribuidora.
- ✚ Es necesario que las partes implicadas en el mantenimiento y manejo de equipos en plantas industriales y de bombeo, tomen en cuenta las Normas de Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución emitidas por SIGET cuya importancia radica en el conocimiento de aspectos no técnicos (administrativos, económicos y legales), así como las Normas técnicas y de diseño de Motores de Inducción, debido a que estas darán las pautas necesarias para la corrección de problemas asociados a la mala calidad del suministro, y así evitar que los equipos se estropeen o funcionen de manera ineficiente causando paros de producción y por ende considerables pérdidas económicas.
- ✚ La Norma de Calidad del suministro de SIGET, no considera parámetros importantes como lo son el Desbalance de Tensiones, en este trabajo se considera un valor $<1\%$ como el valor más óptimo, en base a las Normas de diseño NEMA MG-1.
- ✚ Para la evaluación del desempeño de motores trifásicos de inducción en las plantas de bombeo el mejor método encontrado fue el propuesto por la Norma STD739 (Bronze Book) el cual considera las curvas mostradas en la figura 10 y 19, debido a que otros

métodos como el planteado en la Norma IEEE-112, necesitan realizar pruebas de laboratorio invasivas o en las cuales se tendría que parar la producción y desmontar equipos para realizar dichas pruebas.

- ✚ Considerando datos estadísticos como mediciones de campo de tensiones y corrientes en los sistemas de distribución, así como los datos de operación del motor obtenidos de la placa de éste, es posible determinar por medio del método descrito en este documento, la eficiencia del motor en condiciones de campo, y sin tener que recurrir a métodos invasivos o que requieran equipos especiales, los cuales representan costos económicos para las plantas de bombeo.

- ✚ El mantenimiento preventivo es uno de los mejores métodos para evitar daños en los equipos, por lo que realizar mediciones y analizar el sistema eléctrico de manera regular ayudará a corregir parámetros que podrían en un futuro causar daños a los equipos, es por eso que en este trabajo se realizó una aplicación Excel donde personal de mantenimiento técnico de las plantas de bombeo pueden realizar y determinar valores de parámetros importantes tales como Variaciones de Tensión y Desbalance de tensiones y así poder evaluar el buen funcionamiento de los Motores, a la vez se puede determinar el costo económico que estos requieren al funcionar bajo esas condiciones.

- ✚ Los resultados obtenidos en la tabla 14 para Motores Trifásicos de Inducción sometidos a variaciones de tensión operando con un motor Trifásico NEMA con una potencia nominal de 300HP y una eficiencia del 94.5%, operando con un costo de energía dado por el Pliego Tarifario de SIGET para Julio de 2021 y con un total de 720 horas de operación. Se muestra que para un sistema que opera con tensiones menores de hasta un -10% el

motor presenta una disminución de su eficiencia del 1.87%, lo que implica un aumento en su costo de operación de \$478.34 aproximadamente. Por el contrario, cuando el motor opera en sobretensión de +10% el valor de la eficiencia aumenta en un 1% y su costo de Operación disminuye \$248.16.

- ✚ Cabe destacar que, aunque la operación de motores con valores mayores a la tensión nominal aumenta la eficiencia y además es cierto que es bueno para el motor tener una eficiencia mayor, hay que tener en cuenta que no se puede sobrepasar del 10% según la norma. El operar con un voltaje nominal mayor la corriente de magnetización se verá afectada llevando a que el punto de operación entre en saturación, ocasionando la destrucción del aislante en los devanados, disminución del factor de potencia y falla del motor.
- ✚ Uno de las perturbaciones más importantes a considerar en el análisis de la Calidad de Suministro de Potencia en los Motores de Inducción es el Desbalance de Tensión, en la tabla 15 se observa que para un aumento en el desbalance del 5% la eficiencia del Motor se ve seriamente afectada, obteniendo una disminución considerable de la misma en un 66.87% y por ende un incremento considerable en los costos de operación, teniendo así un aumento monetario de \$9799.61 aproximadamente, esto para un motor NEMA de 300HP nominales con una eficiencia del 94.5% y un costo de energía determinado por el Pliego Tarifario de la SIGET para Julio de 2021.

REFERENCIAS

- ANDA. (2017). *Memorias Laborales*. San Salvador.
- ANDA. (2019). *Boletín Estadístico*. San Salvador.
- ANDA. (Septiembre 2017). *Resumen Ejecutivo*. San Salvador.
- ANDA, & Arévalo Herrera, D. M. (2021). *Boletín Estadístico 2020*. San Salvador.
- Cajas Flores, L. E. (2008). *Repositorio*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/453/1/T-ESPE-018404.pdf>
- IEEE. (1993). *Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*.
- IEEE. (1995). *std 739 Recommended Practice for Energy Management in Industrial and Commercial Facilities*.
- International Electrotechnical Commission IEC. (2006). International Standard IEC60034-26 Rotating Electrical Machines.
- International Energy (IEA). (Noviembre de 2016). *I World Energy Outlook 2016*. Obtenido de <https://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2016>
- International Standar IEC . (2013). *IEC 6100-4-30 Power Quality Measurement Methods Compliance Report*. California USA.
- Marrero, S. &. (2007). *Análisis de la compensación de potencia reactiva en sistemas contaminados con armónicos*.
- Multiconsult y CIA LTDA. (2011). *CNE*. Obtenido de https://estadisticas.cne.gob.sv/wp-content/uploads/2016/09/Estudio_Curva_Demanda.pdf
- NEMA. (2016). *Motors and Generators. Standar Publication ANSI/NEMA MG1*.
- Quispe, E. C., López, I. D., Ferreira, F. J., & Sousa, V. (2018). Unbalanced voltages impacts on the energy permormance of induction motors. *International Journal of Electrical and Computer Enginnering (IJECE)* vol. 8, 1412-1422.
- Ramos, M. (Febrero de 2016). *Verdad Digital*. Obtenido de <https://verdaddigital.com/7827-2/>
- Ramos, M. (Febrero de 2016). *Verdad Digital*. Obtenido de <https://verdaddigital.com/7827-2/>
- SIGET. (2021). Norma de Calidad de Calidad del Servicio de los siestmeas de distribución.

Tejada, A., & Llamas , A. R. (1999). Efectos de las Armónicas en los Sistemas Eléctricos. *ITESM Campues Monterrey Nuevo León*.

Teleprensa, R. (Agosto de 2020). *Teleprensa*. Obtenido de <https://teleprensa.sv/index.php/2020/08/07/anda-desgaste-en-paneles-de-control-habria-provocado-incendio-en-las-pavas/>

ANEXOS

Figura A.1

Archivo con muestras de tensión obtenidas en mediciones.

| | A | B | C | D | E | I | J |
|----|---------------------|----|---------|---------|---------|---|---|
| 10 | Time | N | L1 | L2 | L3 | | |
| 11 | 14.09.2006 18:40:00 | 1 | 457.943 | 463.100 | 452.657 | | |
| 12 | 14.09.2006 18:50:00 | 2 | 458.990 | 437.257 | 450.759 | | |
| 13 | 14.09.2006 19:00:00 | 3 | 451.973 | 440.652 | 452.094 | | |
| 14 | 14.09.2006 19:10:00 | 4 | 456.522 | 430.691 | 453.935 | | |
| 15 | 14.09.2006 19:20:00 | 5 | 456.030 | 431.116 | 454.947 | | |
| 16 | 14.09.2006 19:30:00 | 6 | 457.287 | 432.371 | 451.295 | | |
| 17 | 14.09.2006 19:40:00 | 7 | 453.332 | 464.088 | 453.926 | | |
| 18 | 14.09.2006 19:50:00 | 8 | 451.616 | 461.859 | 453.694 | | |
| 19 | 14.09.2006 20:00:00 | 9 | 452.800 | 457.743 | 453.239 | | |
| 20 | 14.09.2006 20:10:00 | 10 | 458.270 | 464.673 | 454.768 | | |
| 21 | 14.09.2006 20:20:00 | 11 | 450.704 | 459.735 | 454.365 | | |
| 22 | 14.09.2006 20:30:00 | 12 | 453.738 | 435.423 | 453.782 | | |
| 23 | 14.09.2006 20:40:00 | 13 | 454.373 | 449.340 | 454.522 | | |
| 24 | 14.09.2006 20:50:00 | 14 | 450.543 | 450.448 | 453.134 | | |
| 25 | 14.09.2006 21:00:00 | 15 | 457.615 | 457.420 | 454.023 | | |
| 26 | 14.09.2006 21:10:00 | 16 | 456.890 | 447.870 | 451.609 | | |
| 27 | 14.09.2006 21:20:00 | 17 | 453.542 | 449.781 | 453.967 | | |
| 28 | 14.09.2006 21:30:00 | 18 | 453.530 | 437.804 | 452.439 | | |
| 29 | 14.09.2006 21:40:00 | 19 | 453.925 | 455.204 | 454.702 | | |
| 30 | 14.09.2006 21:50:00 | 20 | 451.213 | 453.037 | 453.002 | | |
| 31 | 14.09.2006 22:00:00 | 21 | 458.819 | 442.639 | 451.012 | | |
| 32 | 14.09.2006 22:10:00 | 22 | 459.628 | 460.357 | 454.907 | | |
| 33 | 14.09.2006 22:20:00 | 23 | 453.858 | 459.694 | 450.809 | | |
| 34 | 14.09.2006 22:30:00 | 24 | 458.282 | 452.201 | 452.292 | | |
| 35 | 14.09.2006 22:40:00 | 25 | 452.314 | 444.521 | 454.142 | | |
| 36 | 14.09.2006 22:50:00 | 26 | 452.184 | 443.428 | 450.203 | | |
| 37 | 14.09.2006 23:00:00 | 27 | 456.747 | 449.580 | 450.396 | | |
| 38 | 14.09.2006 23:10:00 | 28 | 452.748 | 459.844 | 453.930 | | |
| 39 | 14.09.2006 23:20:00 | 29 | 452.880 | 445.486 | 450.017 | | |
| 40 | 14.09.2006 23:30:00 | 30 | 452.728 | 461.608 | 451.114 | | |
| 41 | 14.09.2006 23:40:00 | 31 | 457.533 | 452.913 | 450.444 | | |
| 42 | 14.09.2006 23:50:00 | 32 | 455.816 | 453.141 | 454.569 | | |
| 43 | 15.09.2006 00:00:00 | 33 | 458.710 | 461.899 | 452.207 | | |
| 44 | 15.09.2006 00:10:00 | 34 | 458.949 | 446.393 | 451.092 | | |
| 45 | 15.09.2006 00:20:00 | 35 | 452.921 | 434.907 | 450.632 | | |
| 46 | 15.09.2006 00:30:00 | 36 | 458.439 | 434.454 | 451.143 | | |
| 47 | 15.09.2006 00:40:00 | 37 | 450.095 | 452.260 | 453.413 | | |
| 48 | 15.09.2006 00:50:00 | 38 | 456.609 | 463.680 | 453.541 | | |
| 49 | 15.09.2006 01:00:00 | 39 | 459.509 | 438.092 | 450.723 | | |
| 50 | 15.09.2006 01:10:00 | 40 | 456.218 | 455.472 | 452.044 | | |
| 51 | 15.09.2006 01:20:00 | 41 | 456.785 | 453.861 | 450.131 | | |
| 52 | 15.09.2006 01:30:00 | 42 | 457.185 | 462.250 | 452.303 | | |

Figura A.2

Archivo con muestras de Corrientes de línea obtenidas en mediciones.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|----|-------------------|---|----|--------|--------|--------|---|---|---|
| 8 | | | | | | | | | |
| 9 | Tima | | N | L1 | L2 | L3 | | | |
| 10 | 12/9/202108:00:00 | | 1 | 333.06 | 337.8 | 320.24 | | | |
| 11 | 12/9/202108:10:00 | | 1 | 333.18 | 315.55 | 331.1 | | | |
| 12 | 12/9/202108:20:00 | | 2 | 328.82 | 317.44 | 325.06 | | | |
| 13 | 12/9/202108:30:00 | | 3 | 319.9 | 329.9 | 320.57 | | | |
| 14 | 12/9/202108:40:00 | | 4 | 316.77 | 319.74 | 311.04 | | | |
| 15 | 12/9/202108:50:00 | | 5 | 318.59 | 315.48 | 317.59 | | | |
| 16 | 12/9/202109:00:00 | | 6 | 312.23 | 335.1 | 314.71 | | | |
| 17 | 12/9/202109:10:00 | | 7 | 334.94 | 325.78 | 334.92 | | | |
| 18 | 12/9/202109:20:00 | | 8 | 317.55 | 323.78 | 319.77 | | | |
| 19 | 12/9/202109:30:00 | | 9 | 316.37 | 321.22 | 327.49 | | | |
| 20 | 12/9/202109:40:00 | | 10 | 337.07 | 330.66 | 323.9 | | | |
| 21 | 12/9/202109:50:00 | | 11 | 319.4 | 336.37 | 315.49 | | | |
| 22 | 12/9/202110:00:00 | | 12 | 327.95 | 331.61 | 313.88 | | | |
| 23 | 12/9/202110:10:00 | | 13 | 312.87 | 327.26 | 338.79 | | | |
| 24 | 12/9/202110:20:00 | | 14 | 316.88 | 327.27 | 322.94 | | | |
| 25 | 12/9/202110:30:00 | | 15 | 338.77 | 329.89 | 327.84 | | | |
| 26 | 12/9/202110:40:00 | | 16 | 321.55 | 336.4 | 325.54 | | | |
| 27 | 12/9/202110:50:00 | | 17 | 317.66 | 335.49 | 338.28 | | | |
| 28 | 12/9/202111:00:00 | | 18 | 313.63 | 325.36 | 318.51 | | | |
| 29 | 12/9/202111:10:00 | | 19 | 320.3 | 330.62 | 325.32 | | | |
| 30 | 12/9/202111:20:00 | | 20 | 318.84 | 335.52 | 334.06 | | | |
| 31 | 12/9/202111:30:00 | | 21 | 333.09 | 332.36 | 338.3 | | | |
| 32 | 12/9/202111:40:00 | | 22 | 310.79 | 336.17 | 332.03 | | | |
| 33 | 12/9/202111:50:00 | | 23 | 315.4 | 330.75 | 328.52 | | | |
| 34 | 12/9/202112:00:00 | | 24 | 325.75 | 316.51 | 324.82 | | | |
| 35 | 12/9/202112:10:00 | | 25 | 320.11 | 314.15 | 329.67 | | | |
| 36 | 12/9/202112:20:00 | | 26 | 329.8 | 311.25 | 331.84 | | | |
| 37 | 12/9/202112:30:00 | | 27 | 311.92 | 312.67 | 333.29 | | | |
| 38 | 12/9/202112:40:00 | | 28 | 339.86 | 332.47 | 332.64 | | | |
| 39 | 12/9/202112:50:00 | | 29 | 331.98 | 315.1 | 313.34 | | | |
| 40 | 12/9/202113:00:00 | | 30 | 333.12 | 314.97 | 318.56 | | | |
| 41 | 12/9/202113:10:00 | | 31 | 337.86 | 327.2 | 323.18 | | | |
| 42 | 12/9/202113:20:00 | | 32 | 324.7 | 314.3 | 337.29 | | | |
| 43 | 12/9/202113:30:00 | | 33 | 331.32 | 314.27 | 335.84 | | | |
| 44 | 12/9/202113:40:00 | | 34 | 314.28 | 323.7 | 319.21 | | | |
| 45 | 12/9/202113:50:00 | | 35 | 318.01 | 322.26 | 337.61 | | | |
| 46 | 12/9/202114:00:00 | | 36 | 319.86 | 332.45 | 315.33 | | | |
| 47 | 12/9/202114:10:00 | | 37 | 324.49 | 338.11 | 320.28 | | | |

Para ingresar las mediciones obtenidas en la campaña de medición se tendrá que contar con una hoja de Excel la cual es generada por el analizador de señales con el que se realizaron dichas mediciones, la cual deberá de ser una hoja .xlsx que cuente con el formato siguiente:

- Las mediciones deberán de comenzar a partir de la fila 11

- La aplicación de Excel toma en cuenta solamente las mediciones que se encuentran desde la columna C hasta la columna E.
- La hoja tendrá que tener un mínimo de 672 muestras para cada voltaje de línea o corriente de línea

Figura A.3

Formato para ingresar mediciones a aplicación de Excel VBA.

| | A | B | C | D | E |
|----|--------------------------------------|----|---------|---------|---------|
| 1 | - | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | Legend: flagged data marked with 'I' | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | Timeplot | | | | |
| 6 | Column01: V RMS L1 [V] | | | | |
| 7 | Column02: V RMS L2 [V] | | | | |
| 8 | Column03: V RMS L3 [V] | | | | |
| 9 | | | | | |
| 10 | Time | N | L1 | L2 | L3 |
| 11 | 14.09.2006 18:40:00 | 1 | 454.770 | 440.344 | 450.474 |
| 12 | 14.09.2006 18:50:00 | 2 | 453.758 | 435.426 | 453.352 |
| 13 | 14.09.2006 19:00:00 | 3 | 453.242 | 450.760 | 452.099 |
| 14 | 14.09.2006 19:10:00 | 4 | 458.199 | 436.466 | 451.367 |
| 15 | 14.09.2006 19:20:00 | 5 | 458.389 | 456.234 | 451.471 |
| 16 | 14.09.2006 19:30:00 | 6 | 452.980 | 432.830 | 451.638 |
| 17 | 14.09.2006 19:40:00 | 7 | 454.218 | 444.510 | 450.879 |
| 18 | 14.09.2006 19:50:00 | 8 | 455.490 | 434.328 | 454.186 |
| 19 | 14.09.2006 20:00:00 | 9 | 459.034 | 461.791 | 450.120 |
| 20 | 14.09.2006 20:10:00 | 10 | 451.280 | 437.984 | 454.963 |
| 21 | 14.09.2006 20:20:00 | 11 | 453.118 | 453.547 | 454.844 |

Figura A.4

Entorno de la aplicación realizada en Excel VBA.

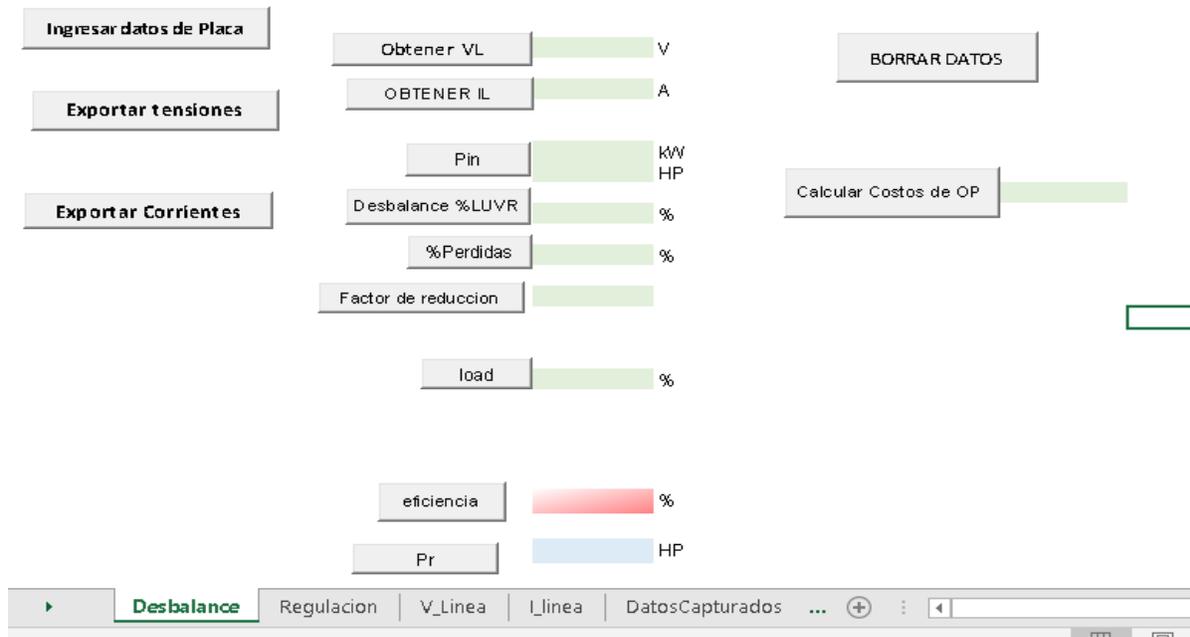


Figura A.5

Datos de placa de motor ingresados a aplicación de Excel VBA.

The screenshot shows a "UserForm1" dialog box titled "DATOS DE PLACA DEL MOTOR". It contains the following fields and controls:

- POTENCIA NOMINAL: 300 HP
- EFICIENCIA: 94,5 %
- TENSIÓN NOMINAL: 460 V
- CORRIENTE NOMINAL: 333 A
- FACTOR DE POTENCIA: 0.892
- R.P.M: 1780
- NÚMERO DE POLOS: 4
- TIPO DE DISEÑO: B (dropdown menu)
- FABRICANTE: NEMA (dropdown menu)
- Buttons: "INGRESAR DATOS", "LIMPIAR", and "CERRAR".

Figura A.6

Datos capturados por la aplicación Excel VBA.

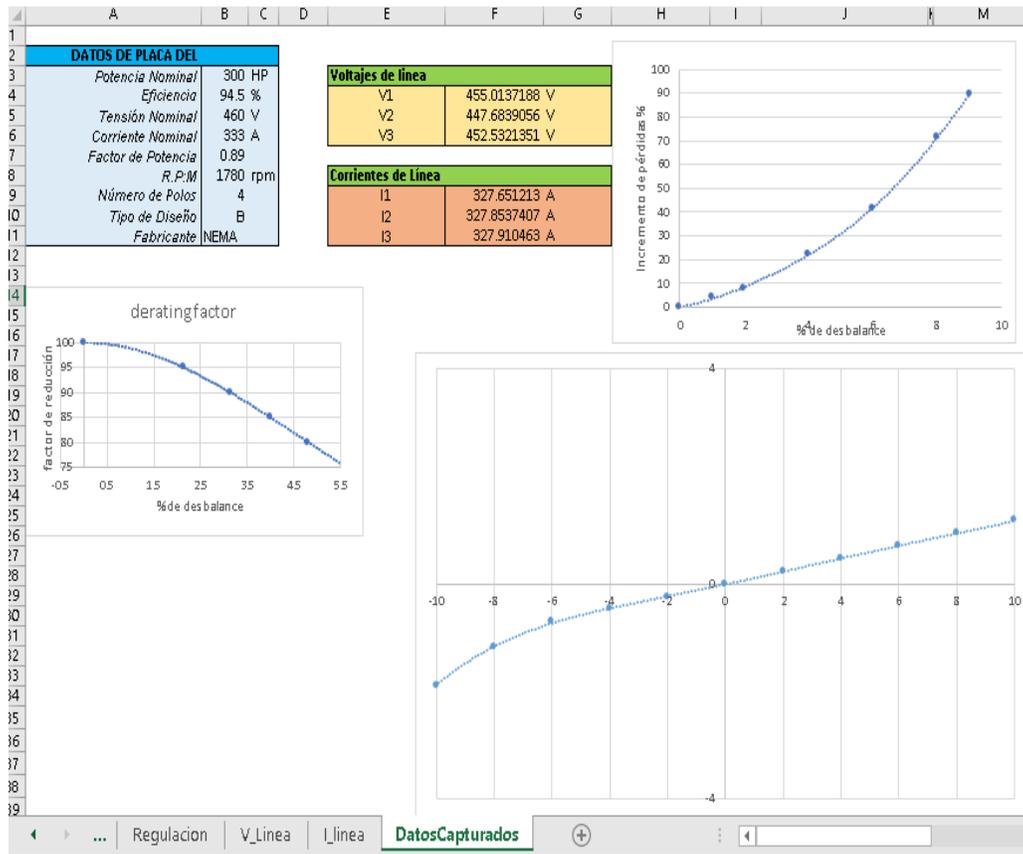


Figura A.7

Ventana de aplicación de Excel para calcular costos de operación del motor.

Costo de la Energía

Punta \$

Valle \$

Resto \$

Horas/día que opera el motor

h

h

h

Días/mes que opera el motor

Tabla A.1

Pliego tarifario de Julio de 2021

| III. GRANDES DEMANDAS (>50 kW) | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| BAJA TENSION CON MEDIDOR HORARIO | | | | | | | | | |
| | | CAESS | DEL SUR | CLESA | EEO | DEUSEM | EDESAL | B&D | ABRUZZO |
| Cargo de Comercialización: | | | | | | | | | |
| Atención al Cliente | US\$/Usuario-m | 12.253858 | 14.323192 | 11.229079 | 13.057050 | 11.885648 | 18.711930 | 16.400246 | 6.782011 |
| Cargo de Energía: | | | | | | | | | |
| Energía en Punta | US\$/kWh | 0.163997 | 0.171618 | 0.175422 | 0.173243 | 0.183891 | 0.167109 | 0.150773 | 0.142996 |
| Energía en Resto | US\$/kWh | 0.134912 | 0.144864 | 0.138890 | 0.140961 | 0.142785 | 0.138168 | 0.120355 | 0.140358 |
| Energía en Valle | US\$/kWh | 0.162343 | 0.169001 | 0.172538 | 0.171987 | 0.183814 | 0.159020 | 0.147437 | 0.133729 |
| Cargo de Distribución: | | | | | | | | | |
| Potencia: | US\$/kW-mes | 14.081315 | 21.598128 | 22.424130 | 26.988660 | 28.455883 | 30.233598 | 16.937229 | 19.887423 |
| MEDIA TENSION CON MEDIDOR HORARIO | | | | | | | | | |
| | | CAESS | DEL SUR | CLESA | EEO | DEUSEM | EDESAL | B&D | ABRUZZO |
| Cargo de Comercialización: | | | | | | | | | |
| Cargo Fijo | US\$/Usuario-m | 12.253858 | 14.323192 | 11.229079 | 13.057050 | 11.885648 | 18.711930 | 16.400246 | 6.782011 |
| Cargo de Energía: | | | | | | | | | |
| Energía en Punta | US\$/kWh | 0.151926 | 0.157099 | 0.159987 | 0.154480 | 0.162992 | 0.156144 | 0.143311 | 0.126376 |
| Energía en Resto | US\$/kWh | 0.124983 | 0.132609 | 0.126669 | 0.125695 | 0.126558 | 0.129102 | 0.114398 | 0.124045 |
| Energía en Valle | US\$/kWh | 0.150395 | 0.154703 | 0.157356 | 0.153360 | 0.162924 | 0.148586 | 0.140140 | 0.118186 |
| Cargo de Distribución: | | | | | | | | | |
| Potencia: | US\$/kW-mes | 6.881023 | 6.791453 | 12.712465 | 17.324019 | 18.540127 | 9.410379 | 10.374532 | 5.123979 |