

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**ESTUDIO DE LA CALIDAD DE SUMINISTRO DE LA  
ENERGÍA EN EL DESEMPEÑO DE MOTORES ELÉCTRICOS  
TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN**

PRESENTADO POR:

**LUIS FERNANDO AYALA CUCHILLA**

**ELMER ULISES ESCOBAR FRANCO**

**ELISEO GÓMEZ HERNÁNDEZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO DE 2018

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR:

**MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIA GENERAL:

**MSc. CRISTOBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO:

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

SECRETARIO:

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERIA 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 al Grado de:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

Título:

**ESTUDIO DE LA CALIDAD DE SUMINISTRO DE LA  
ENERGÍA EN EL DESEMPEÑO DE MOTORES  
ELÉCTRICOS TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN**

Presentado por:

**LUIS FERNANDO AYALA CUCHILLA**

**ELMER ULISES ESCOBAR FRANCO**

**ELISEO GÓMEZ HERNÁNDEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

**ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN**

SAN SALVADOR, JULIO DE 2018

Trabajo de Graduación Aprobado por:

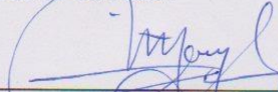
Docente Asesor:

**ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN**

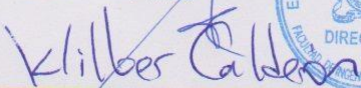
## ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, viernes 20 de julio de 2018, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 2:30 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

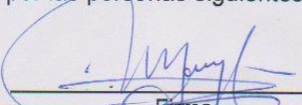
2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia  
Secretario

  
Firma

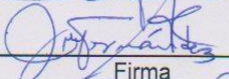


Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

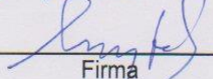
- ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN  
(Docente Asesor)

  
Firma

- ING. JOSE MIGUEL HERNANDEZ

  
Firma

- ING. MARVIN GERARDO JORGE HERNANDEZ

  
Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

ESTUDIO DE LA CALIDAD DE SUMINISTRO DE LA ENERGÍA EN EL DESEMPEÑO DE MOTORES ELÉCTRICOS TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN

A cargo de los Bachilleres:

- AYALA CUCHILLA LUIS FERNANDO

- ESCOBAR FRANCO ELMER ULISES

- GÓMEZ HERNÁNDEZ ELISEO

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 9.0

( nueve punto cero )

## **AGRADECIMIENTOS**

### **DEDICATORIA**

Casi concluyendo una de las etapas más importantes de mi vida y al presentar este trabajo, deseo expresar mis más sinceros agradecimientos primeramente a Dios por la oportunidad que me dio de culminar mis estudios superiores y por todas las bendiciones recibidas en este largo y arduo proceso. Además, agradecer a todas esas personas que han contribuido de una u otra manera para que esto sea posible.

#### **A mis familiares.**

Agradezco enormemente a mis padres Noé Antonio Ayala Alvarado y Marina del Carmen Cuchilla de Ayala, por su apoyo incondicional, por ser los pilares más importantes en mi vida y por su ejemplo de superación que ha sido mi mayor motivación en este proceso. Agradezco también a mis hermanos Carlos Noé Ayala y Brenda María Ayala por sus consejos y palabras de motivación que me brindaban cuando más lo necesitaba, así también agradecer a mis tíos y tías, primos y primas que siempre me brindaron su ayuda incondicional.

#### **A mis maestros.**

Por su dedicación para compartirnos sus conocimientos y ser esa parte fundamental de nuestro desarrollo y formación profesional, agradecer de manera especial a mi asesor de tesis Ing. Armando Martínez Calderón, por el tiempo dedicado y por la guía y apoyo brindado para la finalización de este trabajo.

#### **A mis compañeros y amigos.**

Agradezco principalmente a mis amigos y compañeros de tesis Eliseo Gómez y Elmer Franco, con quienes hemos luchado y trabajado juntos para que este trabajo haya sido culminado con éxito.

Y agradezco también a todos esos familiares y amigos que no han sido mencionados pero que siempre me brindaron su apoyo y estuvieron presentes en todas las etapas de este proceso y ayudaron para que este logro importante en mi vida sea posible. ¡Muchas Gracias!

Luis Fernando Ayala Cuchilla

## **DEDICATORIA**

Primeramente, agradecer a Dios por permitirme terminar mis estudios universitarios.

### **A mis Padres.**

Agradezco a las dos personas más importantes en mi vida, mis padres Gloria Franco de Escobar y Orlando Escobar Navarrete, los cuales me han apoyado a lo largo de mi carrera sin importar los obstáculos que se presentaron.

### **A mis hermanas.**

Ismeny Escobar y Karla Escobar las cuales me apoyaron a lo largo de mis estudios.

### **A mis Tíos.**

Agradezco sinceramente a mis Tíos Elia Franco, Ulises Franco y Leticia Franco quienes me apoyaron de una u otra manera a lo largo de mi carrera.

### **A mis maestros**

Les doy las gracias a todos los maestros que formaron parte de mi formación profesional por compartir sus conocimientos. Le doy las gracias de manera especial a mi asesor de tesis Ing. Armando Martínez Calderón, quien ha dedicado un poco de su tiempo para apoyarlos y orientarlos en este trabajo.

### **A mis amigos y compañeros**

Agradezco a mis compañeros de Tesis Eliseo Gómez Hernández y Luis Fernando Ayala, con los cuales tuvimos que superar los diferentes obstáculos que se presentaron a lo largo de este trabajo. A todos los compañeros con los cuales compartí a lo largo de mi carrera y me apoyaron para superar los desafíos que se presentaron en su momento.

Agradezco a todos mis familiares y amigos que no son mencionados pero que de una u otra manera contribuyeron con este logro.

¡Muchas Gracias!

Elmer Ulises Escobar Franco

## **DEDICATORIA**

El camino para culminar mi estudio superior no fue fácil, diferentes obstáculos se presentaron a lo largo de ello, pero sin embargo Dios estuvo en cada momento de éxito o fracaso, por lo cual primeramente agradecer a Dios padre por permitirme culminar mis estudios.

### **A mis padres**

Agradezco a los dos pilares más importantes en mi vida como lo es mi padre Manuel Antonio Gómez por ser el encargado de apoyarme cuando la carga de la universidad se tornaba pesada, y a mi madre Digna Elizabeth Hernández por ser esa parte tierna de mi vida que se encargó de convertir con sus palabras todos aquellos momentos difíciles de la carrera en momentos de tranquilidad.

### **A mis hermanos**

Agradezco a mis hermanos Francisco Antonio Gómez y Fernando Josué Gómez por estar en cada momento apoyándome con palabras de motivación para salir adelante y culminar mis estudios. También de forma muy especial agradezco a Lucia Guadalupe Jurado por ser ella una de las personas que me dio fuerzas para seguir adelante.

### **A mis maestros**

Por compartir su conocimiento tan valioso y ser esa parte fundamental de mi desarrollo y formación profesional. Agradecer de manera muy especial a mi asesor de tesis Ing. Armando Martínez Calderón, por el tiempo dedicado y por la guía y apoyo brindado para la finalización de este trabajo.

### **A mis amigos y compañeros**

Agradezco principalmente a mis compañeros de Tesis Luis Fernando Ayala y Elmer Ulises Escobar, con quienes juntos pasamos diferentes dificultades durante todo el desarrollo de este trabajo, pero que cada uno aportaba el conocimiento necesario para que este trabajo culminara con éxito. Y agradezco también a todos esos familiares y amigos que no han sido mencionados pero que siempre me brindaron su apoyo y estuvieron presentes en todas las etapas de este proceso. ¡Muchas Gracias!

Eliseo Gómez Hernández



## ÍNDICE

Capítulo 1 .....	4
DEFINICIONES .....	4
1.1 Desbalance de tensión .....	4
1.2 Regulación de tensión .....	5
1.3 Armónicos.....	6
1.4 Flicker.....	8
Capítulo 2 .....	10
COMPARACIÓN DE NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES.....	10
2.1 Normativas internacionales.....	10
2.1.1 Eficiencia energética y la norma ISO 50001.....	10
2.1.2 NEMA MG-1 .....	11
2.1.2.1 Regulación de tensión.....	12
2.1.2.2 Desbalance de tensión.....	13
2.1.2.3 Picos de voltaje.....	15
2.1.2.4 Armónicos.....	16
2.1.3 Norma IEEE.....	17
2.1.3.1 IEEE std 1159: Recomendaciones prácticas para el monitoreo de la calidad de potencia eléctrica.....	18
2.1.3.2 IEEE std 519: Recomendaciones prácticas y requerimientos para el control del contenido de armónicos en los sistemas eléctricos de potencia. ....	20
2.1.3.3 IEEE std 739-1995: Libro de bronce – Recomendaciones prácticas para la administración de energía en instalaciones comerciales e industriales.....	23
2.1.4 Norma IEC.....	25
2.1.4.1 IEC 61000-4-30: Técnicas de ensayo y medición – métodos de medición de calidad de potencia. ....	25
2.1.4.2 Estándar IEC 61000-3-2: Límites para emisiones de armónicos de corriente.....	27

2.1.4.3 Estándar IEC 61000-3-5: Límites – Limitación de los cambios de voltaje, fluctuaciones de voltaje y Flicker en los sistemas públicos de suministro. ....	28
2.2 Normativa de los países El Salvador, Costa Rica, Guatemala, Venezuela y Chile. ....	30
2.2.1 Regulación de Tensión. ....	31
2.2.2 Desbalance de tensión.....	32
2.2.3 Armónico de tensión .....	33
2.2.3.1 Límite de distorsión armónica de voltaje - El Salvador .....	34
2.2.3.2 Límite de distorsión armónica de voltaje – Costa Rica .....	34
2.2.3.3 Límite de distorsión armónica de voltaje - Venezuela.....	35
2.2.3.4 Límite de distorsión armónica de voltaje – Guatemala .....	35
2.2.3.5 Límite de distorsión armónica de voltaje – Chile .....	36
2.2.4 Armónico de corriente.....	37
2.2.4.1 Límite de distorsión armónica de corriente – El Salvador .....	38
2.2.4.2 Límite de distorsión armónica de corriente – Costa Rica.....	39
2.2.4.3 Límite de distorsión armónica de corriente – Guatemala.....	39
2.2.4.4 Límites de distorsión armónica – Venezuela .....	40
2.2.4.5 Límites de distorsión armónica – Chile.....	40
2.2.5 Flicker .....	42
2.2.6 Frecuencia.....	42
2.2.7 Factor de potencia .....	43
Capítulo 3 .....	44
EFFECTOS DE LA CALIDAD DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO SOBRE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN TRIFÁSICOS. ....	44
3.1 Circuito Equivalente De Un Motor De Inducción.....	44
3.2 Efectos Del Desbalance En Los Motores De Inducción.....	46
3.2.1 Efecto del desbalance de voltaje en el deslizamiento del motor de inducción. ....	47
3.2.2 Efecto del desbalance de voltaje en las pérdidas del motor. ....	49
3.2.3 Efecto del desbalance de voltaje en la eficiencia del motor de inducción. ....	50

3.2.4 Efecto de desbalance de voltaje en el factor de potencia de motores de inducción.	53
3.2.5 Efecto del desbalance de voltaje sobre el torque y velocidad del motor de inducción. .....	55
3.3 Efectos De Los Armónicos En Los Motores De Inducción.....	57
3.3.1 Secuencia que presentan los armónicos.....	59
3.3.2 Efectos de las componentes armónicas en los motores de inducción trifásicos. ....	60
3.3.3 Efecto que genera la secuencia de las componentes armónicas en el motor de inducción trifásico. ....	62
3.3.4 Efecto de las componentes armónicas en los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción trifásico para una señal no sinusoidal. ....	63
3.3.4.1 Variación de la reactancia por fase en presencia de armónicos. ....	64
3.3.4.2 Variación de la resistencia en el núcleo del motor con los componentes armónicos. .....	64
3.3.4.3 Efecto de los armónicos en el deslizamiento del motor. ....	64
3.3.4.4 Resistencias de pérdidas adicionales por los componentes armónicos RL1 y RL2. .....	65
3.3.5 Efecto de los componentes armónicos en la eficiencia del motor.....	66
3.3.6 Efecto de los armónicos en el factor de potencia del motor de Inducción.....	67
3.3.6.1 Potencia con distorsión armónica.....	68
3.4 Efectos Del Flicker En Los Motores De Inducción.....	69
3.4.1 Efectos de las fluctuaciones de tensión en la iluminación. ....	69
3.4.2 Efectos de las fluctuaciones de tensión sobre los motores de inducción.....	70
3.4.2.1 Efectos en la velocidad del motor.....	71
3.4.2.2 Efecto en el par desarrollado por el motor.....	72
3.4.2.3 Efectos sobre la corriente de arranque del motor de inducción. ....	73
3.4.2.4 Efecto en la eficiencia del motor.....	74
3.5 Efectos De Las Variaciones De La Frecuencia En Los Motores De Inducción Trifásicos.....	76

3.4.1 Efecto sobre la velocidad de síncrona.....	76
3.5.2 Efectos sobre la eficiencia del motor de inducción. ....	80
3.6 Efectos De La Regulación De Tensión Sobre Los Motores De Inducción. ....	81
3.6.1 Efecto de la regulación de tensión en la eficiencia de los motores de inducción. ....	81
Capítulo 4 .....	84
Evaluación de la regulación de tensión en los motores de inducción trifásicos. ....	84
4.1 Determinación de pérdidas. ....	84
4.2 Análisis del impacto económico en el motor de inducción trifásico- Regulación de tensión. 85	
4.2.1 Evaluación Económica.....	91
4.3 Análisis del impacto económico en el motor de inducción trifásico con la presencia de desbalance de tensión en el sistema de la red eléctrica. ....	94
4.3.1 Cálculo del porcentaje de desbalance de tensión. ....	94
4.3.2 Magnitud de las componentes simétricas.....	95
4.3.3 Análisis del motor de inducción con desbalance de tensión. ....	96
4.3.3.1 Corriente del estator para secuencia positiva.....	98
4.3.3.2 Corriente del estator para secuencia Negativa.....	98
4.3.3.3 Corriente por fase del rotor a secuencia positiva.....	99
4.3.3.4 Corriente por fase del rotor a secuencia negativa. ....	99
4.3.4 Sistema trifásico balanceado. ....	99
4.3.5 Sistema trifásico desbalanceado.....	101
4.3.6 Análisis de la impedancia de secuencia negativa y positiva en función del deslizamiento.....	107
4.3.7 Evaluación de las pérdidas de potencia eléctrica, potencia de salida y potencia de entrada en el motor de inducción funcionando con desbalance de tensión.....	110
4.3.7.1 Pérdidas en el cobre del estator y rotor.....	111
4.3.8 Potencia de salida.....	112
4.3.9 Potencia de entrada.....	113

4.3.10 Comportamiento del torque desarrollado en función del desbalance de tensión en el sistema trifásico. ....	114
4.3.11 Evaluación de la velocidad mecánica en el eje del motor de inducción cuando es operado con desbalance de tensión. ....	114
4.3.12 Eficiencia del motor de inducción operando con desbalance de tensión. ....	116
4.3.13 Costo de operación del motor de inducción trifásico 50 HP/460 VLL con presencia de desbalance de tensión en el sistema de alimentación.....	117
CONCLUSIONES.....	119
ANEXOS.....	122
BIBLIOGRAFIA.....	123

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Variación de voltaje para motores de corriente alterna.....	13
Tabla 2.2: Factor para determinar el voltaje pico en el motor de inducción <sup>3</sup> .....	15
Tabla 2.3: Distorsiones que afectan la calidad del suministro eléctrico <sup>4</sup> .....	19
Tabla 2.4: Limite de distorsión armónica total THD <sup>5</sup> .....	21
Tabla 2.5: Limite de distorsión armónica de corriente 120 V hasta 69 kV <sup>5</sup> .....	22
Tabla 2.6: Limite de distorsión armónica de corriente 69 V hasta 161 kV <sup>5</sup> .....	22
Tabla 2.7: Limite de distorsión armónica de corriente para voltajes mayores a 161 kV <sup>5</sup> ..	22
Tabla 2.8: Variación de parámetros eléctricos según IEEE STD 739.....	24
Tabla 2.9: Límites IEC 61000-3-2 clases A y B .....	28
Tabla 2.10: Niveles de tensión establecidos por cada país.....	31
Tabla 2.11: Límites de variaciones de tensión permitidos .....	32
Tabla 2.12: Límites de desbalance de tensión. ....	33
Tabla 2.13: Limite de distorsión armónica de voltaje en redes de media y baja tensión...	34
Tabla 2.14: Límite de distorsión armónica máxima de tensión. ....	34
Tabla 2.15:Límite de distorsión máxima de tensión armónica. ....	36
Tabla 2.16: Límite de distorsión armónica individual de tensión.....	37
Tabla 2.17: Limite de distorsión armónica de corriente de carga en media tensión y baja tensión.....	38
Tabla 2.18: Límite de distorsión amónica de corriente para usuarios <sup>10</sup> .....	39
Tabla 2.19: Límite de distorsión amónica de corriente para usuarios- Guatemala. <sup>12</sup> .....	40
Tabla 2.20: Límite de distorsión amónica de corriente para media tensión-Chile. <sup>13</sup> .....	41
Tabla 2.21: Límite de distorsión amónica de corriente para baja tensión-Chile .....	41
Tabla 2.22: Límite de severidad del Flicker.....	42
Tabla 2.23: Límite permitidos de la variación de la frecuencia fundamental .....	42
Tabla 2.24: Límite del factor de potencia .....	43
Tabla 3.1: Secuencias de armónicos. ....	59
Tabla 3.2: Efectos de variación de tensión sobre las características de un motor. ....	83
Tabla 4.1: Características de un motor de inducción trifásico. ....	84
Tabla 4.2: Variación de la corriente del estator y rotor. ....	86
Tabla 4.3: Pérdidas del estator y rotor. ....	88
Tabla 4.4: Potencia de salida y potencia de entrada.....	89
Tabla 4.5: Incremento de la energía en función de la regulación de tensión. ....	90
Tabla 4.6: Reducción en las pérdidas en función de la regulación de tensión.....	90

Tabla 4.7: Costo de energía.....	91
Tabla 4.8: Costo de operación del motor. ....	92
Tabla 4.9: Ahorro en el costo de operación por regulación de tensión Negativa. ....	93
Tabla 4.10: Costo de operación para 5 motores de inducción de 50 HP/460 VLL.....	93
Tabla 4.11: Componente de la secuencia positiva, negativa y secuencia cero. ....	94
Tabla 4.12: Voltaje de Línea- Línea y Línea Neutro. ....	99
Tabla 4.13: Tensión de voltaje con desbalance. ....	102
Tabla 4.14: Componentes simétricas.....	106
Tabla 4.15: Corriente del estator y rotor para la componente de secuencia positiva y negativa .....	108
Tabla 4.16: Flujo de corrientes trifásicas desbalanceadas por el devanado del estator. ....	109
Tabla 4.17: Potencia mecánica desarrollada .....	110
Tabla 4.18: Pérdida de potencia en el estator y pérdida de potencia en rotor. ....	111
Tabla 4.19: Pérdida de potencia eléctrica total.....	112
Tabla 4.20: Potencia de salida. ....	113
Tabla 4.21: Potencia entrada .....	113
Tabla 4.22: Torque inducido por la secuencia negativa. ....	114
Tabla 4.23: Velocidad mecánica en función del desbalance de tensión.....	115
Tabla 4.24: Eficiencia del motor de inducción para diferentes % de desbalance de tensión. ....	116
Tabla 4.25: Eficiencia del motor de inducción para diferentes % de desbalance de tensión. ....	117
Tabla 4.26: Eficiencia del motor de inducción para diferentes % de desbalance de tensión. ....	118

## ÍNDICE DE GRÁFICO

Gráfico 1.1: Representación de la señal fundamental hasta la 4ta armónica. ....	7
Gráfico 1.2: Fluctuaciones de tensión (Flicker). ....	9
Gráfico 2.1: Curva de ajuste en función del porcentaje de desbalance de tensión <sup>3</sup> .....	14
Gráfico 2.2: Curva de ajuste de la potencia de salida en presencia de armónicos <sup>3</sup> .....	17
Gráfico 2.3: Porcentaje de variación de voltaje y frecuencia <sup>6</sup> .....	25
Gráfico 3.1: Curva Par-Velocidad de un motor de inducción. ....	56
Gráfico 3.2: Armónicos Impares.....	57
Gráfico 3.3: Señal fundamental con distorsión armónica. ....	58
Gráfico 3.4: Secuencias de fases en el sistema trifásico.....	59
Gráfico 3.5: Secuencias de Armónicos 1º, 2º y 3º Armónica. ....	63
Gráfico 3.6: Curva Fluctuaciones de tensión contra el tiempo de ocurrencia del mismo. ..	69
Gráfico 3.7: Curva Eficiencia – potencia de salida (motor de inducción). ....	75
Gráfico 3.8: Curva Par – velocidad mecánica en función de variaciones de la frecuencia.77	
Gráfico 3.9: Curva Par – velocidad mecánica para +5% de variación de la frecuencia.....	78
Gráfico 4.1: Corriente del estator en función de la tensión de alimentación.....	87
Gráfico 4.2: Comportamiento de las pérdidas del estator y rotor. ....	88
Gráfico 4.3: Forma de onda para un sistema trifásico balanceado. ....	100
Gráfico 4.4: Forma de onda con desbalance del 3%.....	103
Gráfico 4.5: Forma de onda con desbalance del 5%.....	104
Gráfico 4.6: Forma de onda con desbalance del 10% .....	105
Gráfico 4.7: Impedancia equivalente positiva y negativa en función de “s” .....	107
Gráfico 4.8: Flujo de corrientes trifásicas desbalanceadas por el devanado del estator para 6%.....	109
Gráfico 4.9: Flujo de corrientes trifásicas en estado estable.....	110
Gráfico 4.10: Pérdida de potencia eléctrica: Estator, Rotor, Total. ....	112
Gráfico 4.11: Eficiencia del motor con desbalance .....	117
Gráfico 4.12: Energía/mes extra en condición de tensiones desbalanceadas.....	118



## INDICE DE FIGURA

Figura 1.1: Sistema desbalanceado compuesto por los 3 tipos de secuencia en sus fasores.....	4
Figura 1.2: Esquema general del sistema de alimentación de energía eléctrica.....	5
Figura 2.1: Eficiencia energética y su ciclo .....	11
Figura 3.1: Circuito equivalente del motor de inducción. ....	45
Figura 3.2: Componentes de secuencia generados en un sistema trifásico desbalanceado <sup>14</sup> .....	46
Figura 3.3: Circuito equivalente del motor de inducción de secuencia positiva. ....	49
Figura 3.4: Circuito equivalente del motor de inducción de secuencia negativa. ....	50
Figura 3.5: Flujo de potencia del motor de inducción operando en condiciones de desbalance de voltaje. ....	51
Figura 3.6: Triángulo de potencia. ....	54
Figura 3.7: Circuito del motor alimentado por fuentes independientes. ....	61
Figura 3.8: Circuito equivalente para un motor de inducción con tensiones armónica "n".	61
Figura 3.9: Circuito equivalente del rotor.....	79
Figura 4.1: Circuito equivalente de secuencia positiva sin pérdidas en el núcleo. ....	97
Figura 4.2: Circuito equivalente de secuencia negativa sin pérdidas en el núcleo. ....	98
Figura 4.3: Fasores con desbalance del 3%.....	103
Figura 4.4: Fasores con desbalance del 5%.....	104
Figura 4.5: Fasores con desbalance del 10%.....	105

## INTRODUCCIÓN

En el trabajo presente se realizó un estudio del efecto que tiene los cambios en los factores que definen la calidad del suministro eléctrico de energía sobre el funcionamiento de los motores eléctricos trifásicos, tomando en cuenta normas nacionales e internacionales que definen los límites permitidos para un producto técnico con altos estándares de calidad. Se estimó el impacto sobre la vida útil del motor y los costos de económicos que se relacionan con estos cambios en la calidad del suministro.

El trabajo partió de una definición precisa de los cuatro principales efectos presentes en el suministro de energía eléctrica (desbalance de voltaje, armónicos de voltaje y corriente, regulación de voltaje). Se analizó la norma nacional de calidad de suministro de potencia, SIGET, y se estableció una comparación entre los límites con normas equivalentes internacionales de distintos países cercanos a nuestra región (Chile, Guatemala, Costa Rica y Venezuela). Además, se tomó en cuenta los límites para cada efecto que se establecen en las normas internacionales de estándares de calidad y las normas utilizadas para la fabricación de motores trifásicos de inducción.

Dichos límites delimitaron los parámetros que tiene los cambios en los factores que definen la calidad del suministro eléctrico y se analizó como estos factores mencionados afectan al funcionamiento del motor, los problemas internos que presentan los motores, como afecta en la eficiencia y como varía el consumo de energía eléctrica demandado por el motor.

Toda esta investigación sirvió para evaluar el impacto económico en el funcionamiento del motor con respecto a la variación de los parámetros de calidad de la energía en los costos de operación de los motores, el funcionamiento del motor se simuló utilizando el software de SIMULINK.

Este trabajo buscó ampliar el criterio y la discusión sobre la importancia de la eficiencia energética y los límites de los parámetros de calidad del suministro eléctrica para un buen funcionamiento de los motores de inducción y una reducción de los costos de operación y por ende de consumo de energía eléctrica.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General:**

- Analizar el efecto de la calidad de suministro de energía sobre la operación de los motores eléctricos trifásicos de inducción.

### **Objetivos específicos:**

- Analizar la norma nacional de calidad de suministro de potencia, compararla con normas equivalentes internacionales para establecer una comparación entre los límites de regulación de parámetros.
- Analizar el impacto de la calidad de suministro de energía en el consumo de energía en motores eléctricos.
- Evaluar la norma ISO 50001 para gestión de la energía aplicada a industrias que utilizan motores eléctricos
- Evaluar económicamente la variación de los parámetros de calidad de la energía en los costos de operación de los motores eléctricos.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Existe una ley de calidad de suministro de potencia que establece límites para la variación en algunos parámetros eléctricos. Estas variaciones aplicadas a motores afectan su desempeño, la intención es evaluar cuanto impactan estos cambios sobre la vida útil del motor de inducción trifásico y su consumo de energía.

El desafío energético actual es optimizar el uso de la energía eléctrica y la eficiencia en los motores eléctricos, debido a que el 65% de la energía eléctrica producida a nivel mundial es consumida por motores eléctricos. Existen otros datos importantes que incentivan al consumidor final a sustituir los motores eléctricos con baja eficiencia por motores con eficiencia PREMIUM como: El precio de compra del motor corresponde a 8 – 12 semanas del propio consumo eléctrico, el costo de la inversión inicial representa 1 – 2% del costo operacional del motor durante su vida útil, motores confiables con altos niveles de eficiencia energética garantizan menores costos económicos durante el ciclo de vida. Debido a que los motores eléctricos funcionan normalmente durante miles de horas al año, cualquier mejora de rendimiento obtenida por el cambio con un motor de mayor rendimiento se traduce en ahorros considerables, lo que amortizaría la inversión en unos pocos años, y a veces incluso meses.

El aumento de precios de la energía no es la única razón por la que los fabricantes y operadores hacen frente a los retos de ahorro de energía, reducen los costos y aumentan la rentabilidad en la planificación de nuevos sistemas o amplían las instalaciones de producción existentes. Mejorar la eficiencia energética en el mundo entero es la forma más rápida, más sustentable y más barata de reducir las emisiones de gases del efecto invernadero y para mejorar la confiabilidad energética.

## Capítulo 1

### DEFINICIONES

#### 1.1 Desbalance de tensión

El desbalance de voltaje es el fenómeno que ocurre en sistemas trifásicos donde las tensiones y/o ángulos entre fases consecutivas no son iguales. Es prácticamente imposible que el voltaje presente en la red sea totalmente balanceado debido al constante cambio de cargas presentes, este cambio de cargas en la red causa una magnitud de desbalance en constante variación. La conexión de cargas residenciales de naturaleza monofásicas provoca un estado de cargas en el sistema trifásico que no es equilibrado entre fases, de allí que las caídas de tensión del sistema tampoco serán equilibradas dando por resultado niveles de tensión desequilibradas. A modo de recordar, un sistema de generación simétrico, es aquel donde las tres tensiones tienen igual magnitud de tensión y sus fasores están separados  $120^\circ$  entre sí. Una carga trifásica simétrica, es aquella que genera tres corrientes de magnitudes y fases iguales respecto a la tensión.

Los sistemas desbalanceados pueden analizarse a partir de la representación por medio de tres sistemas trifásicos compuestos, como lo indica la Figura 1.1, por dos sistemas trifásicos simétricos y un tercero compuesto por 3 fasores de igual magnitud y fase.

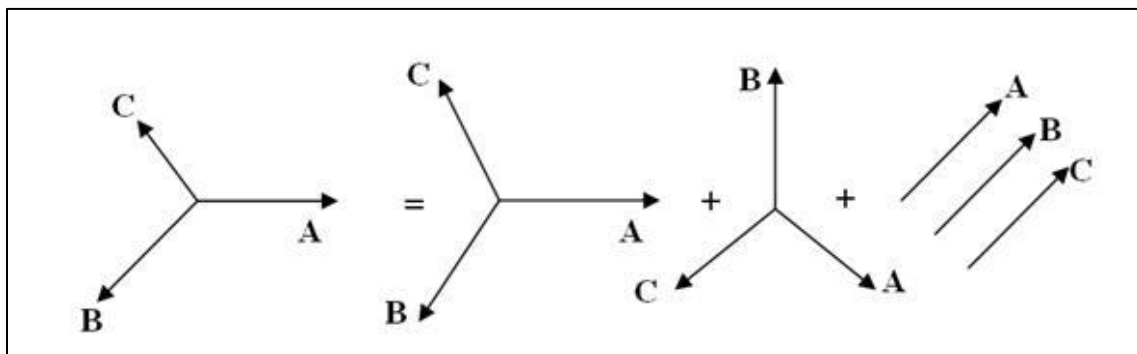


Figura 1.1: Sistema desbalanceado compuesto por los 3 tipos de secuencia en sus fasores.

- *Sistema de secuencia positiva*: corresponde al flujo de potencia que proviene de la red hacia la carga, es decir, desde el generador hacia aguas abajo. La potencia suministrada o energía eléctrica generada tiene únicamente representación de secuencia positiva, o sea, no existe generación de secuencia negativa u homopolar en los sistemas de generación simétricos.

- *Sistema de secuencia negativa*: la componente negativa, es una indicación de la medida de desbalance existente en el sistema (trifásico), o sea, de la falta de simetría entre los fasores de tensión en el punto de conexión.
- *Sistema de secuencia homopolar*: se vincula a la conexión respecto de tierra. Las corrientes homopolares son aquellas que no cierran el circuito por las fases activas, sino que lo hacen por el neutro, o por tierra.

## 1.2 Regulación de tensión

Las variaciones de tensión son un problema frecuente en el sistema de distribución de energía eléctrica del país, debidas principalmente a la mala impedancia de la línea, así como a las variaciones de carga y a la sobrecarga en algunos puntos. Las compañías generadoras de energía eléctrica tratan de mantener la tensión suministrada a los usuarios dentro de un rango presentado por la mayoría de normas nacionales e internacionales el cual es de  $\pm 5\%$  del valor nominal (Regulación de tensión).

En la Figura 1.2 se muestra el diagrama general del sistema de alimentación, si la impedancia es alta, la tensión cae a un valor bajo cuando existe una demanda grande de corriente.

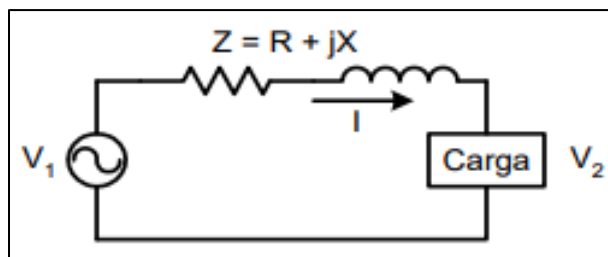


Figura 1.2: Esquema general del sistema de alimentación de energía eléctrica<sup>1</sup>.

Las principales perturbaciones de tensión son las siguientes:

---

<sup>1</sup> Rodolfo Echavarría, Eduardo Berber "Reguladores rápidos de tensión", Vol. 6 N° 1 junio 2009

- *Sobretensión de larga duración:* Es un incremento superior al 110% de la tensión nominal, durante un tiempo mayor a un minuto. Generalmente resultan de la desconexión de una carga muy grande.
- *Baja tensión de larga duración:* Es una disminución a un valor menor que el 90% del nominal, durante un tiempo mayor a un minuto. Su principal causa es la sobrecarga en las líneas.
- *Sobretensión de corta duración (swell):* Es un incremento a un valor entre el 110% y el 180% del nominal, con una duración entre 0.5 ciclos de línea a 1 minuto. De manera similar a la sobretensión de larga duración, se produce generalmente por la desconexión de cargas muy grandes.
- *Baja tensión de corta duración (sag):* Es una disminución a un valor entre el 10% y el 90% del nominal, con una duración entre 0.5 ciclos de línea a 1 minuto. Generalmente es ocasionado por la conexión de grandes cargas o el encendido de motores.

Debido a estos fenómenos presentes en la distribución de energía eléctrica, está establecido una regulación de tensión la cual indica los parámetros y rangos en los que idealmente el voltaje tendría que variar para así asegurar un ideal funcionamiento en motores y demás dispositivos conectados a la red.

### **1.3 Armónicos**

Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales que poseen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual el sistema de alimentación está diseñado para operar. Las formas de onda distorsionadas pueden ser descompuestas en una suma de la señal de frecuencia fundamental y las armónicas como se muestra en la Gráfica 1.1. La distorsión armónica se origina debido a las características no lineales de los equipos y cargas de un sistema de potencia.

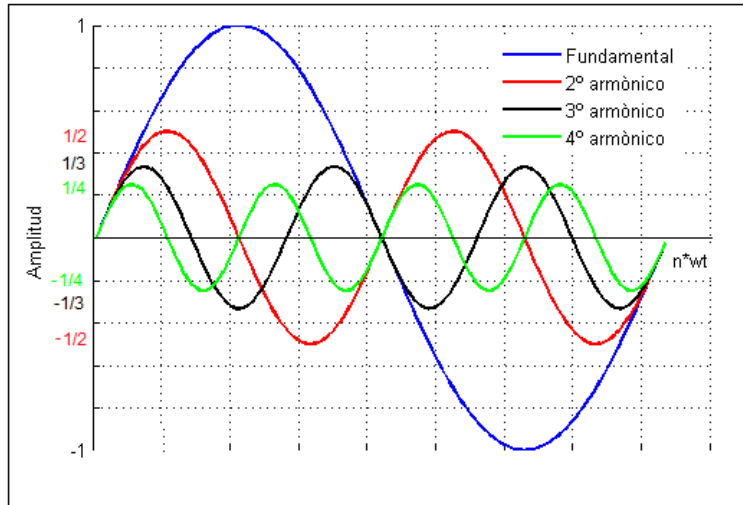


Gráfico 1.1: Representación de la señal fundamental hasta la 4ta armónica.

La representación matemática de los armónicos en el dominio del tiempo parte tomando como bases armónicas a diferentes frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental.

El voltaje y la corriente en una red eléctrica están definidos por:

$$v(t) = V \cos w_0 t \quad (1.1)$$

$$i(t) = I \cos w_0 t \quad (1.2)$$

Cuando el sistema de distribución se ve afectado por presencia de armónicos, Ecuaciones 1.1 y 1.2 se presentan variaciones las cuales están indicadas por cada componente armónico y su correspondiente frecuencia, las ecuaciones que representan dicho efecto son:

$$v(t) = V_1 \cos(w_0 t + \theta_1) + V_2 \cos(2w_0 t + \theta_2) + V_3 \cos(3w_0 t + \theta_3) + \dots \quad (1.3)$$

$$i(t) = I_1 \cos(w_0 t + \theta_1) + I_2 \cos(2w_0 t + \theta_2) + I_3 \cos(3w_0 t + \theta_3) + \dots \quad (1.4)$$

Estas se pueden representar en forma de sumatoria:

$$v(t) = \sum_{n=1}^k V_n \cos(nw_0 t + \theta_n) \quad (1.5)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^k I_n \cos(nw_0 t + \theta_n) \quad (1.6)$$



Donde:

$V_n$ : Armónica de voltaje de orden n

$I_n$ : Armónica de corriente de orden n

$\theta_n$ : Ángulo de la armónica n

#### **1.4 Flicker**

Consiste en variaciones cíclicas de la tensión, con valores entre el 90% y el 110% del valor nominal. Se le conoce por este nombre (en inglés Flicker) debido al efecto que tiene sobre la operación normal de las lámparas. Son causados por la variación de la demanda debida a ciertos tipos de cargas, como los hornos de arco.

El Flicker también se puede entender como el fenómeno de variación de la intensidad del flujo luminoso que afecta a la visión humana generado por fluctuaciones en la tensión de la red. Es un problema de percepción visual, puesto que el fenómeno depende principalmente de las personas que lo observan.

Las principales causas son las conexiones de grandes motores de inducción, compresores, trenes laminadores, bancos de capacitores, soldadoras y hornos de arco (cargas no lineales) entre otras, en redes eléctricas deficientes, de baja potencia de corto circuito, o en aquellas sin sistemas de control de eliminación de transitorios. El Flicker puede clasificarse según su naturaleza, en dos categorías: *sistemático o periódico* y *aleatorio o no periódico*, pudiendo manifestarse simultáneamente. El Flicker periódico puede ser consecuencia de cargas ó servicios repetitivos como pueden ser compresores, soldadoras de punto y de arco, en cambio, el Flicker no periódico es provocado por la eventual conexión de grandes cargas. Ambos tipos de Flicker pueden presentarse simultáneamente en presencia de cargas tales como hornos y soldadoras de arco.

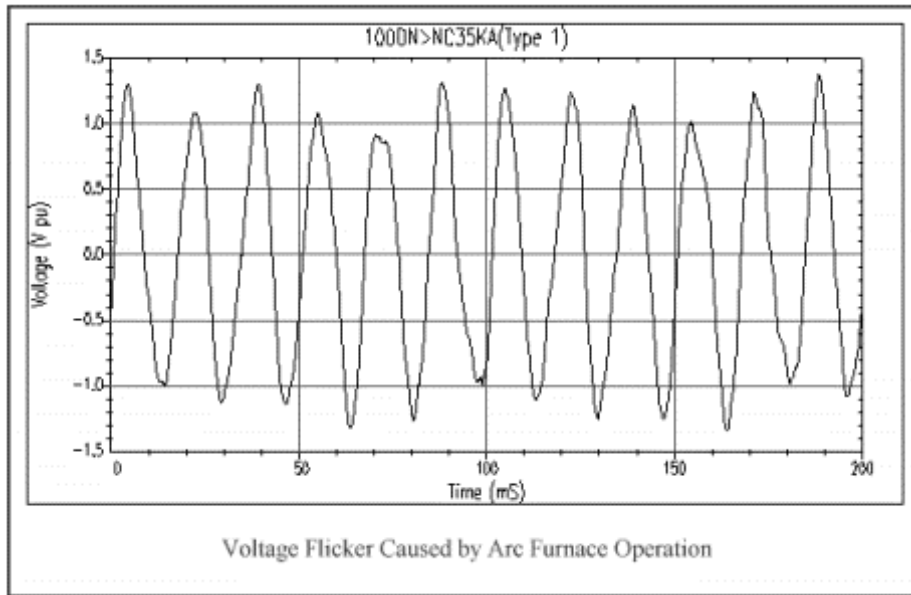


Gráfico 1.2: Fluctuaciones de tensión (Flicker)<sup>2</sup>.

En la Figura 1.4 se muestra la forma de onda de la señal de voltaje afectada por el efecto del Flicker el cual presenta fluctuaciones en un corto periodo de tiempo.

---

<sup>2</sup> Norma IEEE ESTANDAR 1159, 1995.

## Capítulo 2

### COMPARACIÓN DE NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES.

#### 2.1 Normativas internacionales

Esta sección comprende de normas internacionales que establecen los límites en la variación de los parámetros que afectan la calidad del suministro eléctrico. Se considera la norma para la construcción de motores de corriente alterna, motores de corriente directa y generadores, denominada NEMA MG-1, así como también se analizan los estándares americanos como la IEEE y la norma IEC. Sin embargo, también se tiene como objetivo comprender como dichos entes reguladores calculan los porcentajes, establecen límites máximos y mínimos, así como también cual es la función que la norma o estándar desempeña para mantener la calidad de la energía.

##### 2.1.1 Eficiencia energética y la norma ISO 50001.

Para mejorar la eficiencia energética en la industria, la Organización Internacional de Normalización (ISO en inglés) ha desarrollado la norma de gestión energética ISO 500001, de carácter voluntario y similar a la norma de gestión de calidad ISO 9001.

Se basa en el ciclo PLAN – DO – CHECK – ACT (planear, hacer, verificar y actuar), de eficacia probada, para mejorar estructuralmente la eficiencia energética industrial.

La norma de gestión energética ISO 50001 puede resumirse así:

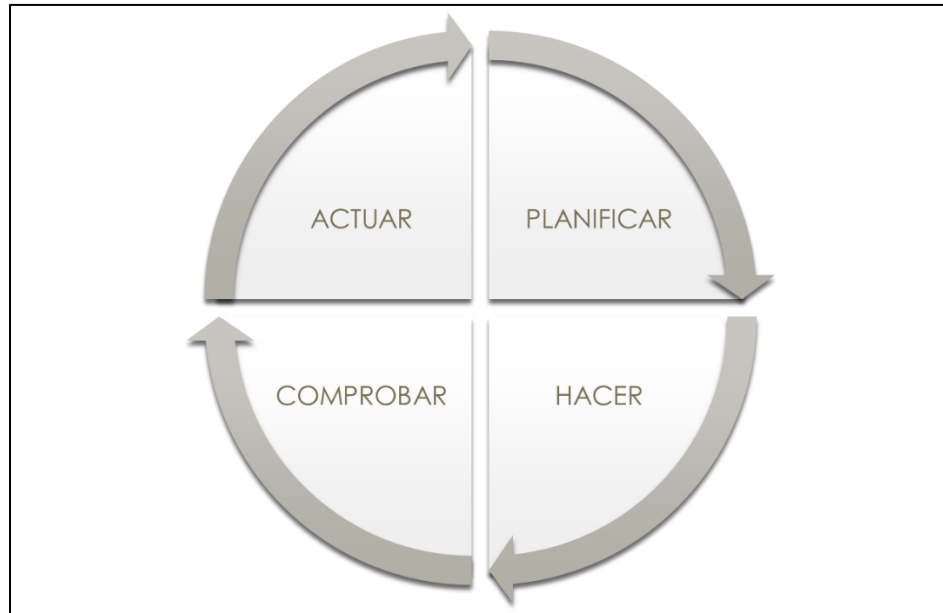
**Planifica:** Realizar inspecciones energéticas, establecer indicadores de referencia de rendimiento energético, fijar objetivos y metas, trazas planes de acción.

**Implementa:** Implementar planes de gestión de energía.

**Verifica:** Controlar y medir procesos y compararlos con los objetivos y las políticas energéticas. Informar sobre los resultados.

**Actuar:** Tomar medidas para mejorar continuamente el rendimiento.

**Beneficios:** Ahorre dinero en energía.



*Figura 2.1: Eficiencia energética y su ciclo*

### 2.1.2 NEMA MG-1

La Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (The National Electrical Manufacturers Association NEMA MG-1) es una de las normas americanas encargadas de establecer los lineamientos constructivos de las máquinas eléctricas (motores y generadores en general). En esta norma se encuentra la clasificación de las máquinas eléctricas de acuerdo a su tamaño (potencia disponible en el eje de la máquina o HP), de acuerdo al tipo de aplicación para la cual la máquina es diseñada, también se encuentran las especificaciones de diseño de acuerdo con el tipo de alimentación de la máquina eléctrica, ya sea motores polifásicos, motores monofásicos o motores trifásicos. Además, en la norma se establece una clasificación de acuerdo a las condiciones ambientales a las que estará expuesta la máquina, así como también, los métodos de enfriamiento y aislamiento en la máquina.

Lo mencionado anteriormente forma parte de como una máquina eléctrica ya sea generador o motor; AC o DC debe de ser construida físicamente y también cual debe ser su rendimiento general para determinadas tareas. NEMA MG-1 establece los límites en porcentaje o factor de las variaciones de los parámetros eléctricos en el sistema de alimentación a los cuales es sometida la máquina eléctrica, para este caso, el motor de inducción trifásico. A estos parámetros eléctricos también se le conocen como perturbaciones y/o distorsiones, ya que afectan la calidad del suministro eléctrico en los terminales de alimentación de la máquina eléctrica.

Algunas de estas perturbaciones no pueden ser controladas por el usuario final ya que estas provienen desde la distribuidora, también existen otros tipos de perturbaciones que son generadas por el usuario dentro de su misma instalación. En la siguiente sección se analizan las definiciones básicas que la norma hace para cada una de estas distorsiones y se extraen las variaciones de porcentaje, también los límites máximos y mínimos para cada uno de ellos.

### 2.1.2.1 Regulación de tensión

Esta norma establece los límites máximos y mínimos de voltaje en el sistema de alimentación de un motor de inducción polifásico a los cuales pueden estar sometidos. NEMA MG-1 muestra estos límites en porcentajes, también establece los límites de variación de la frecuencia nominal de la red y una combinación de ambos. La ecuación matemática que proporciona la norma para determinar el voltaje de utilización en los terminales del motor de inducción es:

$$V_{\text{util}} = V_{\text{nom}} \pm V_{\text{nom}} * (\% \Delta V) \quad (2.1)$$

Donde  $V_{\text{nom}}$  es el voltaje de placa del motor.

Los motores de corriente alternan deben de operar a un alto rendimiento bajo condiciones de operación en estado estable, es decir cuando el motor desarrolla la potencia mecánica nominal o la velocidad nominal en el eje o en ciertos casos un porcentaje de potencia nominal, dicho rendimiento es afectado si el sistema de alimentación del motor presenta una variación en el voltaje y/o la frecuencia de:

- $\pm 10\%$  de variación en el voltaje nominal, con frecuencia nominal para motores de inducción.<sup>3</sup>
- $\pm 5$  de variación en la frecuencia nominal, con voltaje nominal para motores de inducción<sup>3</sup>.
- Una combinación en la variación del voltaje y la frecuencia del 10% (suma de valores absolutos del porcentaje de variación del voltaje con el porcentaje de variación de frecuencia) de los valores nominales, esta combinación es aceptable

---

<sup>3</sup> NEMA MG-1

para NEMA MG-1 mientras el porcentaje de variación de la frecuencia no exceda  $\pm 5\%$  de la frecuencia nominal, y la variación de voltaje de motores no exceda  $\pm 6\%$  de la tensión nominal<sup>3</sup>.

### 2.1.2.1.1 Tensión nominal en motores de corriente alterna – NEMA MG-1

Los voltajes nominales de diseño para los motores eléctricos son los estipulados en la Tabla 2.1 bajo estándares americanos a una frecuencia de trabajo de 60 Hz. Dentro de la categoría de motores polifásicos se encuentran los motores trifásicos de inducción.

MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA	TENSION NOMINAL	VARIACION DE VOLTAJE
MONOFASICOS	115 V	$\pm 10\%$
	200 V	
	230 V	
POLIFASICOS	115 V	$\pm 10\%$

Tabla 2.1: Variación de voltaje para motores de corriente alterna.

Por lo tanto, no importando el tipo de motor de inducción que se encuentre conectado al sistema eléctrico este no debe de presentar variaciones mayores a  $\pm 10\%$  en el voltaje nominal.

### 2.1.2.2 Desbalance de tensión

NEMA MG-1 en la Sección 14.36 considera el efecto que produce el desbalance de tensión en el rendimiento de los motores de inducción polifásicos. El porcentaje de desbalance no es propiamente una especificación de diseño de la máquina, más bien la norma establece los porcentajes de variación permisibles de este parámetro a los cuales un motor de inducción es sometido cuando este es conectado a un sistema de alimentación trifásico con baja calidad de energía.

La definición matemática que la norma establece para calcular el desbalance de la tensión es la relación del valor máximo de la diferencia de los voltajes línea - línea con el valor del voltaje promedio entre el voltaje promedio.

$$\% \text{ Desbalance de tensión} = 100 \times \frac{V_{LL} - V_{prom}}{V_{prom}} \quad (2.2)$$

Ejemplo: considere un sistema de alimentación trifásico de los cuales se extraen los siguientes valores de tensión línea – línea<sup>3</sup>.

- $V_{AB} = 460 V_{LL}$
- $V_{BC} = 467 V_{LL}$
- $V_{AC} = 450 V_{LL}$

El voltaje promedio es  $459 V_{LL}$

$$\% \text{ Desbalance de tensión} = 100 \times \frac{467 V_{LL} - 459 V_{LL}}{459 V_{LL}} = 1.74\%$$

Para este ejemplo la ecuación establece que el desbalance presente en el sistema de alimentación es de 1.74%. Por las variables que la norma considera para calcular este parámetro se genera cierta incertidumbre en el resultado final puesto que solo se toman mediciones de voltajes de línea-línea sin considerar ángulos de desfase o componentes simétricas, como se verá en secciones posteriores.

Una vez calculado el porcentaje de desbalance en el voltaje de alimentación de la máquina se analiza que sucede con el rendimiento del motor de inducción, estos efectos serán tratados en secciones posteriores. Por lo tanto, NEMA MG-1 establece que un motor no debe de ser operado cuando la tensión de línea – línea aplicada en sus terminales presenta un desbalance mayor al 5%.

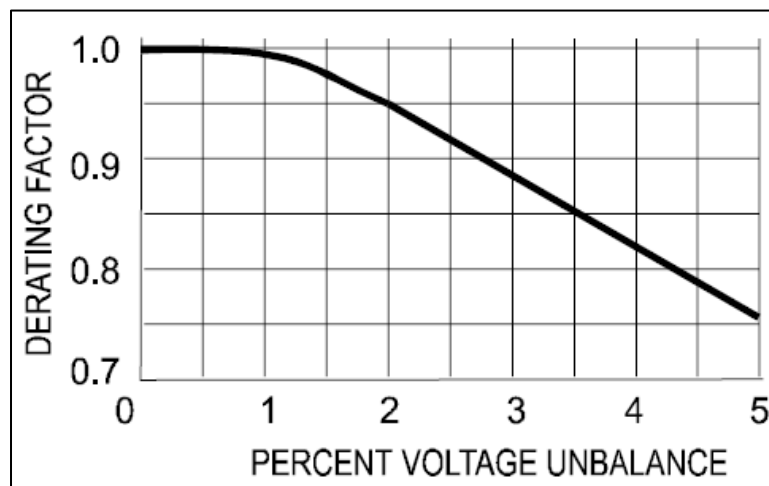


Gráfico 2.1: Curva de ajuste en función del porcentaje de desbalance de tensión<sup>3</sup>

La Gráfica 2.1 establece que cuando se presente una situación de desbalance mayor al 1% y menor o igual al 5% se debe de realizar un ajuste en el motor que varía entre el 75% y el 100% de la carga nominal en el eje, sin embargo, mantener continuamente en operación el motor entre estos porcentajes de desbalance produce daños físicos al motor. Cuando el porcentaje es menor al 1% el motor puede continuar con el 100% de su carga.

### 2.1.2.3 Picos de voltaje

Otro aspecto a considerar que afecta la calidad del suministro eléctrico y por ende al motor de inducción son los picos de voltaje o transitorios, estos afectan la forma de onda sinusoidal con un incremento repentino en la magnitud de voltaje en cualquier instante de tiempo. Por lo tanto, la norma NEMA MG-1 establece el factor multiplicador del voltaje nominal para determinar la amplitud máxima de tensión en los terminales del motor de inducción al cual puede ser sometido.

Para motores con voltaje nominal menor o igual a 600 V, la amplitud máxima que la máquina de inducción soporta es:

$$V_{\text{pico}} \leq 1.1 \times 2 \times \sqrt{2} \times V_{\text{nom}} = 3.1 \times V_{\text{nom}}$$

$$V_{\text{pico}} \leq 3.1 V_{\text{nom}}$$

Para motores con voltaje nominal mayor a 600 V:

$$V_{\text{pico}} \leq 2.5 \times \left( \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \right) \times V_{\text{nom}} = 2.04 \times V_{\text{nom}}$$

$$V_{\text{pico}} \leq 2.04 \times V_{\text{nom}}$$

Junto con estos factores de incremento en la magnitud de la tensión la norma también establece los tiempos de subida (Rise time) de la señal. Este tiempo es el requerido para que la magnitud de la tensión cambie del 10% de su valor en estado estable al 90% ya sea antes de un voltaje pico o en ausencia del mismo<sup>3</sup>.

Tensión nominal	Factor multiplicador	Tiempo de subida (rise time)
$\leq 600 V$	3.1	0.1 $\mu\text{S}$
$> 600 V$	2.04	1.0 $\mu\text{S}$

Tabla 2.2: Factor para determinar el voltaje pico en el motor de inducción<sup>3</sup>



#### 2.1.2.4 Armónicos

El contenido de armónicos presente en la red eléctrica afecta al motor de inducción trifásico al incrementar las pérdidas de potencia, decremento en la eficiencia, así como también incrementos en la temperatura del mismo, algunos estos efectos negativos serán considerados más adelante. Por lo tanto, el propósito de esta sección es establecer el contenido de componentes armónicos que son introducidos al motor de inducción cuando el voltaje aplicado a la máquina incluye componentes de voltajes a frecuencias diferentes de la fundamental.

La ecuación matemática que proporciona NEMA para cuantificar el contenido de armónicos es definida como HVF (The harmonic factor).

$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{V_n^2}{n}} \quad (2.3)$$

Donde:

$n$  = Orden de armónicos impar, no incluye aquellos que son divisibles por 3

$V_n$  = Magnitud en por unidad del voltaje en la  $n$  frecuencia armónica.

Un motor de inducción conectado en estrella no aterrizada a la red eléctrica de un sistema equilibrado posee la característica que la corriente de secuencia cero no circula por el devanado del estator. De igual manera para un sistema en delta no existe la componente de secuencia cero por la falta de un neutro físico. Sin embargo, el desbalance de tensión es un motivo por el cual se contamina la red con armónicos de orden impar y secuencia negativa ( $5^\circ, 7^\circ, 11^\circ$  etc.) ya que estas componentes no necesitan un neutro o conexión a tierra para fluir por la red. Por esa razón la ecuación para calcular el HFV no considera los armónicos que son múltiplos de 3.

La Gráfica 2.2 es proporcionada por la norma para mostrar la variación en el contenido de armónicos presente en la red eléctrica al cual es conectado un motor de inducción.

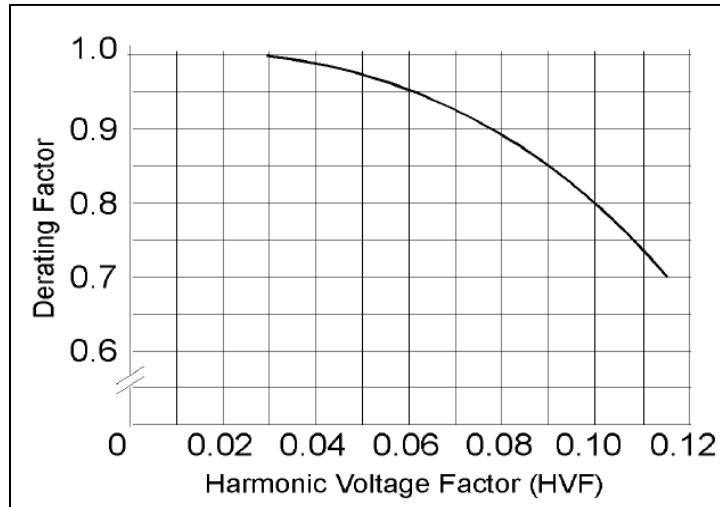


Gráfico 2.2: Curva de ajuste de la potencia de salida en presencia de armónicos <sup>3</sup>

Según la norma, cuando un motor es operado con voltajes con contenido armónico a componentes de frecuencias mayores o menores a la fundamental, los HP nominales del motor deben de ser multiplicados por un factor de decremento de potencia (Derating Factor, Gráfica 2.2) para reducir la posibilidad de daño del motor. De igual manera la norma establece que la gráfica es solo aplicable cuando el contenido de armónico es impar y no son múltiplos de 3.

### 2.1.3 Norma IEEE

IEEE posee una amplia gama de estándares en referencia a aplicaciones de la ingeniería eléctrica e ingeniería electrónica. Por lo tanto, en esta sección se analizan algunos de los estándares que el instituto establece para mantener la calidad del suministro eléctrico, IEEE std 1159, IEEE std 739, IEEE std 519 son algunos de ellos. Esta norma no trata directamente los efectos negativos que genera el desbalance de tensión, regulación de voltaje, armónicos, etc., sobre el motor de inducción trifásico, sino más bien establece recomendaciones prácticas para la regulación de estos parámetros.

### **2.1.3.1 IEEE std 1159: Recomendaciones prácticas para el monitoreo de la calidad de potencia eléctrica.**

“Esta norma se desarrolló con el propósito de estandarizar los resultados obtenidos por los instrumentos de medición que los investigadores utilizaban, ya que cada aparato de medición posee su propio algoritmo, sin embargo, en la actualidad esto no es posible porque cada fabricante propone sus propios diseño y productos”<sup>4</sup>. Por lo tanto, el análisis de esta norma es para extraer de ella los límites de los diferentes fenómenos que afectan la calidad de la potencia eléctrica ya que se basa en recomendaciones prácticas para el monitoreo e interpretación de datos de los parámetros en las redes eléctricas.

Las secciones en las que se desglosa la norma para la medición de los parámetros eléctricos son:

- Monitoreo del fenómeno eléctrico que provoca deficiencia en la calidad de potencia eléctrica.
- Instrumentos de medición.
- Aplicación de técnicas para la medición.
- Interpretación de los resultados obtenidos.

Por lo tanto, dentro de estas secciones mencionadas se establecen algunas condiciones y pasos que se deben de tomar en cuenta antes y después de realizar las mediciones, así como también consideraciones para el monitoreo de la/as distorsión/es. Algunas de estas recomendaciones son:

- Caracterización del objetivo o perturbación a monitorear.
- Localización de los puntos a monitorear en un circuito eléctrico.
- Determinación de los parámetros eléctricos a medir.
- Diagnósticos de compatibilidad entre la fuente de alimentación y la carga.
- Evaluar el entorno eléctrico para desarrollar una línea base de la calidad de energía.
- Determinar límites y umbrales de mediciones para los parámetros eléctricos
- Tiempo de la medición.
- Interpretación de los resultados obtenidos <sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> IEEE STD 1159

Los límites o umbrales de medición dependiendo de la perturbación a analizar basado en el estándar 1159 se tienen en la Tabla 2.3.

<b>Distorsiones que afectan la calidad del suministro eléctrico</b>		
<b>Distorsión</b>	<b>Límites de duración</b>	<b>Límites de variación</b>
Desbalance de tensión	Estado estable	0.5 – 2%
Sobre voltaje	> 1 min	1.1 – 1.2 p.u
Bajo voltaje	> 1 min	0.8 – 0.9 p.u
Transitorios o picos de tensión.		10 - 20% de la tensión nominal fase-neutro.
Armónicos tensión.	- -	0 – 20% THD
Armónicos corriente	- -	20% pequeños clientes. 5% grandes clientes.
Interarmónicos	0 – 6kHz	0 – 2%
Fluctuaciones de voltaje		0.1 – 7%
<b>Instantáneas</b>		
Sag	0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 p.u
Swell	0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 p.u
<b>Momentáneas</b>		
Interrupciones	0.5 – 3 sg	< 0.1 p.u
Sag	30 ciclos – 3sg	0.1 – 0.9 p.u
Swell	30 ciclos – 3sg	1.1 – 1.4 p.u
<b>Temporal</b>		
Interrupción	3sg – 1 min	< 0.1 p.u
Sag	3sg – 1 min	0.1 – 0.9 p.u
Swell	3sg – 1 min	1.1 – 1-2 p.u

Tabla 2.3: Distorsiones que afectan la calidad del suministro eléctrico <sup>4</sup>

Las interrupciones ocurren cuando la voltaje de alimentación o la corriente de carga decrece menos del 0.1 p.u para un periodo de tiempo no mayor a 1 minuto. Estas interrupciones pueden ser el resultado de fallas en el sistema de alimentación, fallas en equipos. “Las interrupciones se miden por su duración ya que la magnitud del voltaje siempre es inferior al 10% de su valor nominal” <sup>4</sup>.

Otro fenómeno que la IEEE considera para mantener la calidad del suministro eléctrico es el Sag. “Este fenómeno se genera en la forma de onda del voltaje cuando existen fallas en el sistema de alimentación, pero también puede ser causado con la conexión y desconexión de motores de gran potencia”<sup>4</sup>. Este parámetro puede ocurrir de manera instantánea, momentáneas, y de manera temporal sobre la red eléctrica con límites de duración de: 0.5 – 30 ciclos, 30 ciclos – 3sg, 3sg – 1 min respectivamente.

Por último, el termino Swell según la IEEE es definido como un incremento en valor del voltaje RMS que puede tener un tiempo de duración de 0.5 ciclos hasta 1 minutos. “Este

fenómeno puede ocurrir debido a fallas de línea – tierra, a diferencia del Sag, este fenómeno puede afectar la calidad de potencia eléctrica debido a la desconexión y conexión de bancos de capacitores”<sup>4</sup>.

### **2.1.3.2 IEEE std 519: Recomendaciones prácticas y requerimientos para el control del contenido de armónicos en los sistemas eléctricos de potencia.**

Esta norma se desarrolló con el fin de controlar el contenido de armónicos de voltaje y el contenido de armónicos de corriente,  $THD_V$  y  $THD_I$  respectivamente. Dicho estándar establece los límites del contenido de armónicos de corriente en la red eléctrica, a diferencia de la norma NEMA MG-1 que únicamente considera el efecto que el  $THD_V$  produce en los motores de inducción y proporciona la Gráfica 2.2 para corregir futuros daños a la máquina

Los límites en las recomendaciones prácticas que la norma establece son destinados a la medición en un punto de conexión común entre la distribuidora y el usuario final. El punto de medición según el tipo de cliente conectado al sistema es:

- Para usuarios industriales, el punto de medición entre distribuidora y usuario final se realiza en el lado de alto voltaje del transformador de potencia.<sup>5</sup>
- En el caso de usuarios comerciales (oficinas, centros comerciales, etc.) el punto de medición se realiza en el lado de bajo voltaje del transformador<sup>5</sup>.

Por lo tanto, el mantenimiento de tensión y corrientes armónicas por debajo de los límites establecidos por la norma en la red eléctrica requiere que:

- Todos los usuarios deben de limitar sus emisiones de corriente armónicas a valores razonables determinados de manera equitativa para cada uno de ellos, independientemente del tipo de participación que tenga el usuario con la distribuidora encargada del suministro eléctrico <sup>5</sup>.
- Cada propietario u operador del sistema actúa para disminuir los niveles de distorsión de tensión modificando las características de impedancia del sistema de suministro según sea necesario <sup>5</sup>.

Según IEEE std 519 “La magnitud de una componente armónica es definida como el valor de una frecuencia central (60, 120,180 etc. y 50,100, 150 etc. Hz Para una frecuencia en

---

<sup>5</sup> IEEE STD 519

el sistema de potencia de 60 Hz y 50 Hz respectivamente) combinado con dos segmentos de frecuencia de 5Hz. La combinación de estos 3 valores define la magnitud del armónico para la componente de frecuencia centrar en particular”<sup>5</sup>. Por último, la norma establece dos ecuaciones para realizar mediciones del contenido armónico en el suministro de energía eléctrica, estas fórmulas son para tiempos muy cortos de medición de armónicos y tiempos largos de medición.

**Tiempos cortos de medición (Very Short = vs).**

$$F_{n,vs} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} F_{n,t}^2} \quad (2.4)$$

Esta ecuación se basa en intervalos de medición cada 3 segundos, donde F representa el voltaje o corriente (RMS para ambos casos), n representa el orden del armónico.

**Tiempos largos de medición.**

$$F_{n,sh} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} F_{(n,vs),t}^2} \quad (2.5)$$

Para esta ecuación la norma establece que se realice en intervalos de medición de 10 minutos.

Todo lo anterior es una breve descripción del contenido del estándar IEEE 519 en referencia a la calidad del suministro eléctrico. Los límites y umbrales para el contenido de armónicos de voltajes y corrientes se detallan en las Tablas 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7.

*Límites de distorsión de voltaje*

<b>Voltaje en el punto de conexión en común (distribuidora y usuario)</b>	<b>Porcentaje de distorsión armónica (%)</b>	<b>Distorsión armónica total THD (%)</b>
$\leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1.0 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5*

\*Los sistemas de alto voltaje pueden tener hasta un 2.0% de THD cuando la causa es un terminal HVDC cuyos efectos se habrán atenuado en los puntos de la red donde los futuros usuarios pueden estar conectados.

Tabla 2.4: Limite de distorsión armónica total THD<sup>5</sup>

Los porcentajes establecidos en la Tabla 2.4 son aplicados a armónicos de voltaje cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia nominal del sistema.

*Límites de distorsión de corrientes*

Sistemas eléctricos con voltaje nominal de 120 V hasta 69 kV.

<b>Máxima distorsión de corriente armónica en porcentajes de <math>I_L</math></b>						
<b>Orden del armónico (armónico impar)<sup>a,b</sup></b>						
$\frac{I_{SC}}{I_L}$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
$> 1000$	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Tabla 2.5: Límite de distorsión armónica de corriente 120 V hasta 69 kV <sup>5</sup>

Sistemas eléctricos con voltaje nominal de 69 kV hasta 161 kV

<b>Máxima distorsión de corriente armónica en porcentajes de <math>I_L</math></b>						
<b>Orden del armónico (armónico impar)<sup>a,b</sup></b>						
$\frac{I_{SC}}{I_L}$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$< 20^c$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$20 < 50$	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
$50 < 100$	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
$100 < 1000$	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
$> 1000$	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Tabla 2.6: Límite de distorsión armónica de corriente 69 V hasta 161 kV <sup>5</sup>

Sistemas eléctricos con voltaje nominal mayores que 161 kV

<b>Máxima distorsión de corriente armónica en porcentajes de <math>I_L</math></b>						
<b>Orden del armónico (armónico impar)<sup>a,b</sup></b>						
$\frac{I_{SC}}{I_L}$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$< 25^c$	1.0	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
$25 < 50$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$\geq 50$	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Tabla 2.7: Límite de distorsión armónica de corriente para voltajes mayores a 161 kV <sup>5</sup>

Donde:

$I_{sc}$  = Valor máximo de la corriente de corto circuito en el punto de entrega

$I_L$  = Máxima corriente de carga demanda (componente de la frecuencia fundamental.)

Por lo tanto, para efectos de estudio de los armónicos en los motores de inducción únicamente se utiliza la Tabla 2.5 la cual corresponde a tensiones nominales de 120 V hasta 69 kV que es donde la gran parte de motores de inducción trifásico operan y la Tabla 2.4 correspondiente a la distorsión armónica para voltajes menores a 1.0 kV.

### **2.1.3.3 IEEE std 739-1995: Libro de bronce – Recomendaciones prácticas para la administración de energía en instalaciones comerciales e industriales.**

Este estándar fue desarrollado por IEEE como una serie de guías para la administración de energía eléctrica. También establece técnicas y procedimientos de ingeniería para la optimización de la eficiencia en el diseño y operación de un sistema eléctrico, la norma no solo considera aspectos aplicados a la ingeniería, sino también establece aspectos como seguridad, costos económicos, aspectos medio ambientales. Por lo tanto, esta norma surge de la necesidad de hacer una óptima gestión de energía eléctrica.

En cuanto a optimización, se refiere al diseño o modificación de los sistemas eléctricos de la industria para utilizar la menor energía eléctrica posible, justificando esta reducción con los costos económicos o de consumo.

IEEE std 793 se basa en los siguientes campos para la administración de energía.

- Ingeniería
- Administración.
- Economía
- Análisis financiero.
- Investigación de operaciones (análisis de sistemas eléctricos)
- Ingeniería ambiental.

En la organización para la administración de energía es importante conocer la aplicación de la energía eléctrica en los diferentes procesos. Por ejemplo, los espacios acondicionados: estos utilizan directamente la energía eléctrica para calentar o enfriar un



área determina. También la energía eléctrica aplicada a motores de corriente alterna o motores de corriente directa para el accionamiento de bombas hidráulicas, ventiladores industriales, líneas de producción, etc. Algunos procesos ciertamente requieren un consumo mínimo de energía, por lo tanto, adicionar equipos con un consumo de energía alto requiere de una evaluación de costos y/o buscar alternativas más eficientes comparando los costos de energía.

También la norma hace mención al valor del dinero en el tiempo y la importancia que un análisis económico tiene dentro de la empresa. “El ingeniero puede utilizar economía básica para desarrollar un programa energético para determinar la mejor alternativa de diseño y operación de un sistema eléctrico” <sup>6</sup>.

Lo mencionado anteriormente son generalidades del contenido de la norma, sin embargo, el objetivo principal de mencionar la IEEE std 739 en esta sección es para establecer los límites en las variaciones de los parámetros eléctricos que de una u otra forma hacen que el suministro de energía en los terminales de una máquina eléctrica sea deficiente. Los factores importantes relacionados con la tensión del motor que tiene un efecto en la eficiencia son el voltaje nominal, la tensión de utilización, y los armónicos.

<b>Factores relacionados con la calidad de tensión sobre los motores.</b>		
<b>Factor</b>	<b>Porcentaje de variación</b>	<b>Observación</b>
Operación a bajo voltaje	10%	Este porcentaje es un decremento en la tensión nominal de la máquina.
Operación con sobre voltaje	10% – 15%	Este valor se aplica al voltaje nominal
Operación con voltaje desbalanceado	0 – 5%	A diferencia de NEMA MG-1 esta norma utiliza el voltaje de línea- neutro para su cálculo.
Operación con contenido armónico en el voltaje	0.12 *	Variación correspondiente al THD
*Ver graficas 2.2 correspondiente a las especificadores del fabricante en relación al contenido armónico permisible en los terminales de alimentación del motor polifásico.		

Tabla 2.8: Variación de parámetros eléctricos según IEEE STD 739<sup>6</sup>

Los parámetros proporcionados en la Tabla 2.8 son iguales a los porcentajes de variación que establece el fabricante (NEMA MG-1) de las máquinas eléctricas. Sin embargo, la norma

<sup>6</sup> IEEE STD 739- Libro de Bronce.

establece una serie de curvas (Gráfica 2.3) que están en función del porcentaje de variación de la tensión y el porcentaje de variación en la frecuencia del sistema aplicado a los terminales de la máquina eléctrica.

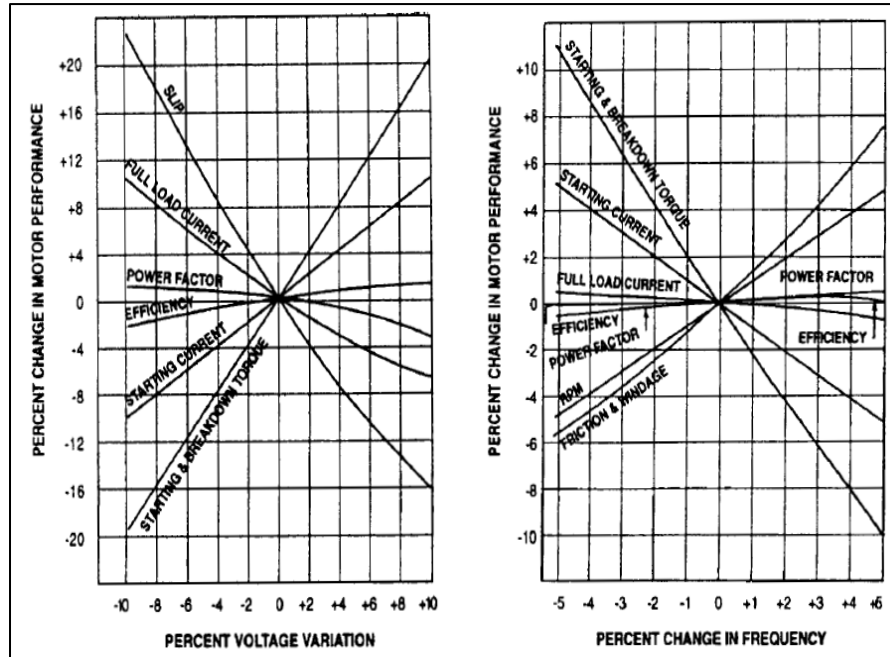


Gráfico 2.3: Porcentaje de variación de voltaje y frecuencia <sup>6</sup>

Para la Gráfica de la izquierda, las variaciones en el voltaje afectan el deslizamiento, corriente a plena carga, factor de potencia del sistema, la eficiencia, corriente de arranque y el par de arranque. Los efectos se analizan con detalle en secciones posteriores. Mientras que las variaciones de frecuencia mantienen los efectos negativos sobre los mismos parámetros mencionados para el voltaje con la adición de incrementos en las RPM del motor para variaciones positivas de la frecuencia y caso contrario para negativas.

## 2.1.4 Norma IEC.

### 2.1.4.1 IEC 61000-4-30: Técnicas de ensayo y medición – métodos de medición de calidad de potencia.

Esta sección se analiza el estándar europeo en referencia a la calidad del suministro eléctrico, tal como es el caso la IEC (International Electrotechnical Commission) 61000-4-30. Este estándar define los procedimientos de medida de cada uno de los parámetros eléctricos en base a los cuales se determina la calidad del suministro eléctrico para así obtener resultados confiables.

Por lo tanto, el objetivo del estándar 61000-4-30 es establecer dos clases de mediciones en base a la calidad del instrumento utilizado para la medición.

Los parámetros que el estándar incluye son:

- Frecuencia del voltaje de alimentación<sup>7</sup>.
- Magnitud de la tensión de alimentación.
- Flicker (parpadeo de voltaje)
- Armónicos e interarmónicos.
- Fluctuaciones de la tensión de alimentación.
- Interrupciones en la tensión de alimentación.
- Desbalance de tensión.
- Cambios rápidos en la tensión.

Las dos clases de medición se clasifican como: mediciones clase A y mediciones clase B.

En la norma NEMA MG-1 y los estándares de la IEEE analizados en las secciones anteriores, se determinó que estos dos entes reguladores calculan el desbalance de tensión como la relación del valor máximo de la diferencia del voltaje línea – línea para el caso de NEMA MG-1 y con voltajes línea- neutro para la IEEE, es decir:

$$\% \text{ Desbalance de tensión} = 100 \times \frac{V_{LL} - V_{prom}}{V_{prom}} \quad \text{NEMA MG - 1}$$

$$\% \text{ Desbalance de tensión} = 100 \times \frac{V_{LN} - V_{prom}}{V_{prom}} \quad \text{IEEE}$$

Por lo tanto, los porcentajes de incertidumbre que se obtienen con las ecuaciones anteriores para el porcentaje de desbalance son altos, debido a que únicamente evalúa las magnitudes de las tensiones línea a línea o línea – neutro del sistema. Sin embargo, la IEC considera el desbalance de tensión como la relación de la componente de secuencia negativa del voltaje entre la componente de secuencia negativa. Expresada en forma matemática se tiene:

$$VUR = \frac{V_2}{V_1} \times 100\% \quad (2.6)$$

---

<sup>7</sup> IEC 61000-4-30

Donde:

VUR: Factor de voltajes desbalanceado.

$V_2$ : Magnitud de voltaje provocado por la componente de secuencia negativa

$V_1$ : Magnitud de voltaje provocado por la componente de secuencia positiva.

#### **2.1.4.2 Estándar IEC 61000-3-2: Límites para emisiones de armónicos de corriente.**

Esta norma indica los límites de corriente armónico permitidos en la Unión Europea, los límites establecidos en esta sección están definidos para sistemas eléctricos de 220/380, 230/400 y 240/415 los cuales se operan a 50 o 60 Hz, dependiendo de lo establecido por cada región.

Esta norma está establecida para emisiones de corriente armónica que no sean mayores a 16 amperios. Se limitan las corrientes armónicas en 4 clasificaciones de equipo, los cuales son:

**CLASE A:** Equipo trifásico balanceado, utensilios domésticos (excluyendo equipos clasificados como clase D), herramientas (excluyendo herramientas portátiles), controladores de lámparas incandescentes y equipo de audio.

**CLASE B:** Herramientas portátiles y equipos de soldadura de arco que no son equipos profesionales.

**CLASE C:** Equipo de iluminación.

**CLASE D:** Computadoras personales y televisores.

Debido a que los motores en su mayoría son equipos trifásicos, su clasificación se encuentra dentro de los equipos clase A. En la Tabla 2.9 se presentan los límites establecidos por la norma 61000-3-2 para los equipos clase A.

Armónico Orden [n]	Corriente Armónica Máxima Permissible [A]	
	Clase A	Clase B
3	2.30	3.45
5	1.14	1.71
7	0.77	1.16
9	0.40	0.60
11	0.33	0.50
13	0.21	0.32
15=n=39	0.15*15/n	0.23*15/n
Armónicos Pares	Clase A	Clase B
2	1.08	1.62
4	0.43	0.65
6	0.3	0.45
8=n=40	0.23*8/n	0.35*8/n

Tabla 2.9: Límites IEC 61000-3-2 clases A y B<sup>8</sup>

### 2.1.4.3 Estándar IEC 61000-3-5: Límites – Limitación de los cambios de voltaje, fluctuaciones de voltaje y Flicker en los sistemas públicos de suministro.

Esta norma establece límites y métodos de evaluación para equipos de baja tensión con corrientes nominales mayores que 16 A. La base para la evaluación del Flicker está dado en la norma IEC 61000-3-3, la cual establece que la base para la medición del Flicker es el cambio en la forma de onda de voltaje en los terminales del equipo que está bajo prueba, esto es la diferencia  $\Delta V$  de dos valores sucesivos de voltaje de fase con respecto al neutro  $V(t_1)$  y  $V(t_2)$ .

$$\Delta V = V(t_1) - V(t_2) \quad (2.7)$$

El cambio de voltaje es debido al cambio de tensión en la impedancia compleja de referencia  $Z$ , causada por el cambio de corriente compleja fundamental  $\Delta I$  de los equipos sometidos a prueba. Los cambios de la corriente  $\Delta I$  se establecen en dos partes que son el cambio de la corriente activa  $\Delta I_p$  y el cambio de la corriente reactiva  $I_q$  donde:

$$\Delta I = \Delta I_p - \Delta I_q = I(t_1) - I(t_2) \quad (2.8)$$

Para equipos monofásicos y trifásicos simétricos, el cambio de voltaje puede aproximarse a:

---

<sup>8</sup> IEC 61000-3-2

$$\Delta V = |\Delta I_p \cdot R - \Delta I_q \cdot X| \quad (2.9)$$

Donde R y X son elementos de la impedancia compleja de referencia Z.

El cambio de voltaje relativo se expresa por:

$$d = \frac{\Delta V}{V_n} \quad (2.10)$$

El valor de severidad de Flicker a corto plazo Pst se define en la norma IEC 61000-4-15. Para determinar el Pst se muestrea el Flicker instantáneo en función del tiempo, el Pst se calcula a partir de las estadísticas nivel – tiempo.

Se emplea la siguiente fórmula:

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}}$$

Donde  $P_{0.1}$ ,  $P_1$ ,  $P_3$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{50}$  son los niveles de Flicker excedidos a lo largo del 0.1, 1, 3, 10 y 50% del tiempo de duración del período de observación:

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{\sum_i^N P_{st}^3}{N}} \quad (2.11)$$

Donde Pst (i = 1, 2, 3,) son las lecturas consecutivas de la severidad de Flicker a corto plazo Pst.

Los límites serán aplicables a las fluctuaciones y parpadeo de tensión en las terminales de suministro de los equipos bajo prueba. Los siguientes límites de aplicación son:

- El valor de Pst no deberá ser superior a 1.0
- El valor de Plt no podrá ser superior a 0.65
- El equipo no producirá una fluctuación relativa máxima,  $d_{max}$ , de voltaje RMS, no excederá a más del 4%.
- Los cambios de voltaje de estado estable, dc, no excederá a más del 3%.

El período de medición para los métodos de análisis de Flicker será:

- Para Pst = 10 minutos.
- Para Plt = 2 horas.

## **2.2 Normativa de los países El Salvador, Costa Rica, Guatemala, Venezuela y Chile.**

Las normas de calidad del servicio de los sistemas de distribución en los países son elaboradas con el objetivo de establecer reglas a las empresas distribuidoras de energía eléctrica y a los usuarios de este servicio. En las normas se definen los límites de los parámetros de la calidad de la energía eléctrica, para que las empresas distribuidoras de energía eléctrica y usuarios los cumplan; la norma de El Salvador toma en cuenta la calidad del servicio técnico, la calidad del producto técnico y la calidad del servicio comercial.

En la calidad del servicio técnico se establece los límites para las interrupciones que tiene el servicio en un determinado momento, en la calidad del producto técnico se establecen los límites permitidos en las distorsiones que se encuentran en el suministro de energía tales como: Niveles de Tensión, Perturbaciones en la onda de voltaje (Flicker, Distorsión armónica) y la incidencia que tiene el usuario en la calidad; en la calidad del servicio comercial se establece la atención al usuario por parte de las distribuidoras de energía eléctrica, los medios de atención al usuario y las características de los equipos de medición. Para esta comparación se tomarán en cuenta las normas de El Salvador, Costa Rica, Guatemala, Venezuela y Chile.

Los efectos y variaciones a comparar son los siguientes:

- Regulación de Tensión.
- Desbalance de Tensión.
- Armónico de Tensión.
- Armónica de Corriente.
- Flicker.
- Frecuencia.
- Factor de potencia.

Los niveles de tensión en las diferentes normas analizadas están clasificados en tres secciones: baja tensión, media tensión y alta tensión. En la Tabla 2.10 se presentan los valores definidos para cada clasificación. Es importante recalcar que dependiendo el nivel de tensión así serán las exigencias de calidad en el suministro, a mayor nivel de tensión, mayores son las exigencias, debido a que las pérdidas aumentan.

<b>País.</b>	<b>Nivel de Tensión.</b>	<b>Tensión</b>
<b>El Salvador</b>	Baja Tensión	$\leq 600 \text{ V}$
	Media Tensión	$600 \text{ V} < V < 115 \text{ kV}$
<b>Costa Rica</b>	Baja Tensión	$\leq 1 \text{ kV}$
	Media Tensión	$1 \text{ kV} > V \leq 100 \text{ kV}$
	Alta Tensión	$100 \text{ kV} > V$
<b>Guatemala</b>	Baja Tensión	$\leq 1 \text{ kV}$
	Media Tensión	$1 \text{ kV} > V \leq 60 \text{ kV}$
	Alta Tensión	$60 \text{ kV} > V \leq 230 \text{ kV}$
<b>Venezuela</b>	Baja Tensión	$\leq 1 \text{ kV}$
	Media Tensión	$1 \text{ kV} > V < 69 \text{ kV}$
	Alta Tensión	$69 \text{ kV} \geq V$
<b>Chile</b>	Baja Tensión	$\leq 1 \text{ kV}$
	Media Tensión	$1 \text{ kV} > V < 23 \text{ kV}$

*Tabla 2.10: Niveles de tensión establecidos por cada país.*

### **2.2.1 Regulación de Tensión.**

En la Tabla 2.11 se tiene los límites permitidos para los indicadores que corresponden a la regulación de tensión. Tomando en cuenta que los límites que se presentan son para los sectores urbanos, áreas donde la densidad de carga es alta y los niveles de tensión son más fluctuantes.

Los porcentajes de regulación de tensión muestran que para El Salvador en baja tensión se permite un  $\pm 7\%$ , el cual se encuentra por debajo de los límites permitidos por Guatemala y Chile,  $\pm 8\%$  y  $\pm 7.5\%$ ; las normas de Venezuela (6%) y Costa Rica (5%) son más exigentes que la salvadoreña en este nivel de tensión.



<b>Normativa</b>	<b>Nivel de tensión</b>	<b>Límites</b>	<b>País.</b>
<b>SIGET</b>	Baja Tensión	$\pm 7\%$	El Salvador
	Media Tensión	$\pm 6\%$	
<b>ARESEP</b>	Baja Tensión	$\pm 5 \%$	Costa Rica
	Media Tensión	$\pm 5 \%$	
	Alta Tensión	$\pm 5 \%$	
<b>CORPOELEC</b>	Baja Tensión	$\pm 6 \%$	Venezuela
	Media Tensión	$\pm 6 \%$	
	Alta Tensión	$\pm 5 \%$	
<b>CNEE</b>	Baja Tensión	$\pm 8 \%$	Guatemala
	Media Tensión	$\pm 6 \%$	
	Alta Tensión	$\pm 5 \%$	
<b>CNE</b>	Baja Tensión	$\pm 7.5 \%$	Chile
	Media Tensión	$\pm 6\%$	

Tabla 2.11: Límites de variaciones de tensión permitidos

En media tensión los límites permitidos son iguales en casi todos los países (6%), exceptuando Costa Rica que también en este nivel de tensión son más exigentes, permitiendo una variación de 5%.

### 2.2.2 Desbalance de tensión

El desbalance es un parámetro relevante en la calidad de energía eléctrica ya que en presencia de este problema los equipos eléctricos no trabajan con una eficiencia plena y esto representa un aumento en el consumo de energía; a pesar que es un grave problema en la eficiencia energética hay normas que no toman en cuenta este parámetro. En la Tabla 2.12 se muestran los límites permitidos por ciertas normas.

En la norma de El Salvador no se considera el desbalance en la calidad del producto técnico, aunque en el Artículo 19 de la norma SIGET se menciona. Junto con la norma salvadoreña solo la norma venezolana no toma en cuenta el desbalance de tensión.

Las empresas distribuidoras en El Salvador al no estar regulado el parámetro del desbalance de tensión por la SIGET no están obligadas a cumplir con los estándares internacionales de calidad de energía eléctrica.

<b>Normativa</b>	<b>Nivel de tensión</b>	<b>Límites</b>	<b>País.</b>
<b>SIGET</b>	Baja Tensión	<b>No lo considera</b>	<b>El Salvador</b>
	Media Tensión		
<b>ARESEP</b>	Baja Tensión	$\pm 3 \%$	<b>Costa Rica</b>
	Media Tensión	$\pm 3 \%$	
	Alta Tensión	$\pm 3 \%$	
<b>CORPOELEC</b>	Baja Tensión	<b>No lo considera</b>	<b>Venezuela</b>
	Media Tensión		
	Alta Tensión		
<b>CNEE</b>	Baja Tensión	$\pm 3 \%$	<b>Guatemala</b>
	Media Tensión	$\pm 3 \%$	
	Alta Tensión	$\pm 1 \%$	
<b>CNE</b>	Baja Tensión	$\pm 3 \%$	<b>Chile</b>
	Media Tensión	$\pm 2 \%$	
	Alta Tensión	$\pm 2 \%$	

*Tabla 2.12: Límites de desbalance de tensión.*

En baja tensión y media tensión Costa Rica y Guatemala permiten un  $\pm 3\%$ , la norma chilena se muestra más exigente en media tensión permitiendo únicamente un  $\pm 2\%$ . En alta tensión Guatemala es el país que más destaca, permitiendo solo 1% de desbalance de tensión.

### **2.2.3 Armónico de tensión**

La onda sinusoidal de voltaje mantiene una forma de onda simétrica y por lo tanto solo es afectada por los componentes armónicos impares, las componentes de orden par aparecen cuando la forma de onda presenta asimetría. Debido a la distorsión en la forma de onda que estas componentes provocan, las normas de calidad de distribución de energía eléctrica establecen límites de los parámetros que regulan este tipo de distorsión

### 2.2.3.1 Límite de distorsión armónica de voltaje - El Salvador

En la Tabla 2.13 se presenta los límites de distorsión armónica de tensión para El Salvador.

Ordenes impares no múltiplos de 3 (n)	Tasa de distorsión individual (%)	Ordenes impares múltiplos de 3 (n)	Tasa de distorsión individual (%)	Ordenes Pares (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	$0.2+1.3*25/n$				
<b>LÍMITE DE LA TASA DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL=8%</b>					

Tabla 2.13: Límite de distorsión armónica de voltaje en redes de media y baja tensión<sup>9</sup>.

El límite total de distorsión armónica de tensión en El Salvador es de 8%.

### 2.2.3.2 Límite de distorsión armónica de voltaje – Costa Rica

Los límites de distorsión armónica de tensión para Costa Rica se presentan en la Tabla 2.14.

	≤ 69 kV	69-161 kV	> 161 kV
Armónica Individual	3.0	1.5	1.0
Total de distorsión armónica de tensión (TDA)	5.0	2.5	1.5

Tabla 2.14: Límite de distorsión armónica máxima de tensión.<sup>10</sup>

“De igual forma se deberá considerar lo dispuesto en las normas: IEEE-1547 “Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems” e IEEE-519 “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, más recientes”<sup>10</sup>.

En Costa Rica el límite de distorsión armónica de tensión está considerado por las normas IEEE-519 y IEEE-1547, teniendo en cuenta que la distorsión armónica total en el rango de

<sup>9</sup> Acuerdo No. 192-E-2004, Ley de la calidad de energía SIGET.

<sup>10</sup> AR-NT-POASEN, Planeación, operación y acceso al sistema eléctrico nacional.

voltaje menores o igual a 69 kV es del 5% y en el rango de 69 kV a 161 kV un 2.5% y niveles de tensión arriba de 161 kV solo permite 1.5%.

### 2.2.3.3 Límite de distorsión armónica de voltaje - Venezuela

“La Tasa de Distorsión Total de Tensiones Armónicas será medida en valor eficaz y no deberá ser mayor del ocho por ciento (8%) durante más de un cinco por ciento (5%) del tiempo total del período de medición”. <sup>11</sup>

“Estas mediciones se realizarán en forma simultánea con las de niveles de tensión y las de Fluctuación Rápida de Tensión” <sup>11</sup>.

En esta norma venezolana no se proporcionan los límites de distorsión individual de cada componente armónico, solo se establece un límite de distorsión armónico total de 8%, lo mismo que en la norma SIGET de El Salvador.

### 2.2.3.4 Límite de distorsión armónica de voltaje – Guatemala

En la Tabla 2.15 se encuentran los límites de distorsión armónica de tensión correspondiente a la norma de calidad de energía de Guatemala.

ORDEN DE LA ARMÓNICA (n)	DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL DE TENSIÓN DAIT [%]	
	Baja y media tensión $V \leq 60$ kV	Alta tensión $60 \text{ kV} < V \leq 230 \text{ kV}$
<b>Impares no Múltiplos de 3</b>		
5	6.0	2.0
7	5.0	2.0
11	3.5	1.5
13	3.0	1.5
17	2.0	1.0
19	1.5	1.0
23	1.5	0.7
25	1.5	0.7
>25	$0.2 + 1.3 * 25/n$	$0.1 + 0.6 * 25/n$
5	6.0	2.0

<sup>11</sup> Normas de calidad del servicio de distribución de electricidad - Venezuela

7	5.0	2.0
11	3.5	1.5
<b>Impares</b>		
<b>Múltiplos de 3</b>		
3	5.0	2.0
9	1.5	1.0
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
>21	0.2	0.2
<b>Pares</b>		
2	2.0	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.5	0.4
10	0.5	0.4
12	0.2	0.2
>12	0.2	0.2
<b>Distorsión armónica total de tensión DTT, en [%]</b>	8	3

Tabla 2.15: Límite de distorsión máxima de tensión armónica.<sup>12</sup>

Guatemala tiene los mismos límites de distorsión armónica que exige la norma de El Salvador, con la diferencia que Guatemala considera la distorsión armónica en alta tensión.

### 2.2.3.5 Límite de distorsión armónica de voltaje – Chile

En la Tabla 2.16 se tiene los límites de distorsión armónica de tensión, correspondiente a la norma de distribución de calidad de energía eléctrica de Chile.

---

<sup>12</sup> Normas técnicas del servicio de distribución NTSD, Guatemala.

Armónicas impares no múltiplos de 3		Armónicas impares múltiplos de 3		Armónicas pares	
Orden	Armónica tensión (%)	Orden	Armónica tensión (%)	Orden	Armónica tensión (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3,5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
>25	1.5				

Tabla 2.16: Límite de distorsión armónica individual de tensión<sup>13</sup>

“En Estado Normal y durante el 95% del tiempo de cualquiera semana del año o de siete días corridos de medición y registro, los valores eficaces de la tensión promediados en 10 minutos, deberán ser tales que la distorsión armónica total de tensión no supere el 8%, tanto en baja tensión como en Media tensión”<sup>13</sup>.

La tasa total de distorsión armónica que exigen las normas de distribución de El Salvador, Venezuela, Chile y Guatemala es del 8% y los límites de distorsión armónica de tensión de los componentes individuales de cada armónico son los mismos, a excepción de Costa Rica que exige el 5% que es una de las más exigente en este parámetro.

#### 2.2.4 Armónico de corriente

El suministro de energía también se ve afectado por distorsiones armónicas presentes en las señales de corriente, los cuales también están delimitadas por las normas nacionales de cada país para obtener un producto técnico de mejor calidad y evitar los daños a los equipos.

---

<sup>13</sup> Norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución, Chile.

### 2.2.4.1 Limite de distorsión armónica de corriente – El Salvador

En la Tabla 2.17 se tienen los límites permitidos de distorsión armónica de corriente para los usuarios.

Orden de la armónica (n)		Potencia <3.5 kW	Potencia ≥3.5 kW
		Intensidad de la Componente armónica (Amperios)	Distorsión armónica individual de Corriente (%)
Ordenes impares no múltiplos de 3	5	2.28	12.0
	7	1.54	8.5
	11	0.66	4.3
	13	0.42	3.0
	17	0.26	2.7
	19	0.24	1.9
	23	0.20	1.6
	25	0.18	1.6
>25	4.5/n	0.2+0.8*25/n	
Ordenes impares múltiplos de 3	3	4.60	16.6
	9	0.80	2.2
	15	0.30	0.6
	21	0.21	0.4
	>21	4.5/n	0.3
Ordenes pares	2	2.16	10.0
	4	0.86	2.5
	6	0.60	1.0
	8	0.46	0.8
	10	0.37	0.8
	12	0.31	0.4
	>12	3.68/n	0.3
<b>Distorsión armónica Total de corriente (%)</b>			<b>20</b>

Tabla 2.17: Limite de distorsión armónica de corriente de carga en media tensión y baja tensión

“Se considerará que la energía eléctrica es de mala calidad cuando en un lapso de tiempo mayor al cinco por ciento (5%) del empleado en las mediciones en el Período de Medición, se compruebe que la Distorsión Armónica de la Corriente de Carga ha excedido el rango de tolerancias establecida”<sup>9</sup>.

El límite de distorsión armónica total de corriente es de 20%, para los usuarios del servicio de energía eléctrica de El Salvador.

### 2.2.4.2 Limite de distorsión armónica de corriente – Costa Rica

Los límites para los usuarios en Costa Rica se encuentran en la Tabla 2.18.

<b>Límites de distorsión armónica de corriente para usuarios conectados en redes generales de distribución.</b>				
<b>Tensión de 120 a 69000 [V]</b>				
<i>I<sub>sc</sub>/I<sub>L</sub></i>	<i>h &lt; 11</i>	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 20$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	20.0

Tabla 2.18: Límite de distorsión armónica de corriente para usuarios<sup>10</sup>

Donde:

*h*: Orden de la armónica.

*I<sub>sc</sub>*: Máxima corriente de cortocircuito en el punto de entrega.

*I<sub>L</sub>*: El valor RMS de la máxima corriente activa demandada por la carga durante el periodo de medición.

TDD: Tasa de distorsión total de corriente, en % de la máxima corriente activa demandada por la carga.

Los límites establecidos por Costa Rica en la Tabla 2.18, varían dependiendo el orden de la armónica y la relación de las corrientes de cortocircuito y valor RMS, esto hace que se diferencien de los límites brindados por la norma SIGET.

### 2.2.4.3 Limite de distorsión armónica de corriente – Guatemala

En la Tabla 2.19 se encuentran los límites de distorsión armónica de corriente que son los mismos límites que establece la norma de El Salvador, con la diferencia que son para diferentes niveles de tensión.



Orden de la armónica (n)		P≤10 kW V≤1kV	P>10 kW 1kV<V≤60kV	P>50kW V>60Kv
		Intensidad Armónica Máxima (Amperios)	Distorsión Armónica Individual de Corriente Dall, en %	
Ordenes impares no múltiplos de 3	5	2.28	12.0	6.0
	7	1.54	8.5	5.1
	11	0.66	4.3	2.9
	13	0.42	3.0	2.2
	17	0.26	2.7	1.8
	19	0.24	1.9	1.7
	23	0.20	1.6	1.1
	25	0.18	1.6	1.1
	>25	4.5/n	0.2+0.8*25/n	0.4
Ordenes impares múltiplos de 3	3	4.60	16.6	7.5
	9	0.80	2.2	2.2
	15	0.30	0.6	0.8
	21	0.21	0.4	0.4
	>21	4.5/n	0.3	0.4
Ordenes pares	2	2.16	10.0	10.0
	4	0.86	2.5	3.8
	6	0.60	1.0	1.5
	8	0.46	0.8	0.5
	10	0.37	0.8	0.5
	12	0.31	0.4	0.5
	>12	3.68/n	0.3	0.5
<b>Distorsión armónica Total de Corriente DATI, en %</b>			<b>20</b>	<b>12</b>

Tabla 2.19: Límite de distorsión armónica de corriente para usuarios- Guatemala.<sup>12</sup>

#### 2.2.4.4 Límites de distorsión armónica – Venezuela

La norma de Venezuela menciona la distorsión armónica de corriente, pero no establece límites para este tipo de distorsión.

#### 2.2.4.5 Límites de distorsión armónica – Chile

Chile considera la distorsión armónica para media tensión y baja tensión, en la Tabla 2.20 se encuentran los límites de distorsión armónica de corriente para los usuarios en ese país en media tensión.

<b>Orden de la armónica j (armónicas impares)</b>						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq j < 11$	$11 \leq j < 17$	$17 \leq j < 23$	$23 \leq j < 35$	$35 \leq j < 50$	<b>TDD</b>
$\leq$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	<b>5.0</b>
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	<b>8.0</b>
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	<b>12.0</b>
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	<b>15.0</b>
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	<b>20.0</b>
-Las armónicas pares están limitadas al 25% de los límites establecidos para las armónicas impares. -Se deberá controlar hasta la armónica 50, - $I_{sc}$ correspondiente a la máxima corriente de cortocircuito en el Punto común de conexión						

Tabla 2.20: Límite de distorsión armónica de corriente para media tensión-Chile.<sup>13</sup>

Los límites de distorsión armónica de corriente para baja tensión se encuentran en la Tabla 2.21.

<b>Orden de la armónica (n)</b>	<b>Usuarios de tarifa de baja tensión-1</b>	<b>Usuarios de tarifa de baja tensión, excepto los de baja tensión-1</b>
<b>Armónicos Impares No múltiplos de 3</b>		
5	2,25	12
7	1,54	8,5
11	0,66	4,3
13	0,42	3
17	0,26	2,7
19	0,24	1,9
23	0,2	1,6
25	0,18	1,6
>25	4,5/n	0,2+0,8+25/n
<b>Ordenes impares múltiplos de 3</b>		
3	4,6	16,6
9	0,8	2,2
15	0,3	0,6
21	0,21	0,4
>21	4,5/n	0,3
<b>Armónicos Pares</b>		
2	2,16	10
4	0,86	2,5
6	0,6	1
8	0,46	0,8
10	0,37	0,8
12	0,31	0,4
>12	3,68/n	0,3
THD <sub>I</sub>	No Aplica	20

Tabla 2.21: Límite de distorsión armónica de corriente para baja tensión-Chile

Los límites de distorsión armónica de corriente que se establecen en la norma de Chile (Tabla 2.20) son los mismos que se consideran en la norma de Costa Rica (Tabla 2.18). De igual manera en los límites para baja tensión para la norma de Chile (Tabla 2.21) son los mismos límites adoptados por la norma de El Salvador (Tabla 2.17) y la norma de Guatemala (Tabla 2.19).

### 2.2.5 Flicker

Los indicadores de severidad para este parámetro son el de corto plazo (Pst) y de largo plazo (Plt); en la Tabla 2.22, se encuentran los límites para Pst y Plt, de las normas consideradas.

País.	Pst( 10 minutos)	Plt
El Salvador	$\leq 1$	No lo toma en cuenta
Costa Rica	$\leq 1$	$\leq 1$ (7 Días)
Guatemala	$\leq 1$	No lo toma en cuenta
Venezuela	$\leq 1$	No lo toma en cuenta
Chile	$\leq 1$	$\leq 0.8$ (2 horas)

Tabla 2.22: Límite de severidad del Flicker

La norma de El Salvador, Costa Rica, Venezuela, Guatemala y Chile coinciden con el límite de tolerancia máxima para el índice de severidad de corto Plazo (Pst) que tiene que ser menor o igual a 1 a media Tensión, el Plt solo es considerado por las normas nacionales de Costa Rica y de Chile.

### 2.2.6 Frecuencia

En la Tabla 2.23 se estable los límites de variación de la frecuencia.

País.	Frecuencia Fundamental	Límites de Variación.
El Salvador	60 (Hz)	No establece limites
Costa Rica	60 (Hz)	$60 \pm 1.65\sigma$ (Hz)
Guatemala	60 (Hz)	No establece limites
Venezuela	60 (Hz)	No establece limites
Chile	50 (Hz)	$49.5 \leq f < 50.5$ (Hz)

Tabla 2.23: Límite permitidos de la variación de la frecuencia fundamental

En el caso de El Salvador, Guatemala y Venezuela no establecen límites hasta donde puede variar la frecuencia; Costa Rica y Chile si toma en cuenta los límites de variación de la frecuencia. Costa Rica considera una variación de  $\pm 1.65\sigma$ , donde  $\sigma$  es la desviación estándar de la frecuencia promedio en periodos de 10 minutos, el valor de  $\sigma=0.03$  Hz; Chile permite una variación de  $\pm 1\%$  de la frecuencia fundamental.

### 2.2.7 Factor de potencia

El factor de potencia es monitoreado al usuario, debido a que el usuario es el que afecta este factor de dependiendo de las cargas que estén conectadas a la red, en la Tabla 2.24 se encuentran los límites permitidos a los usuarios.

<b>País.</b>	<b>Rango</b>	<b>F.P.</b>
El Salvador	Usuarios con potencias superiores a 10 kW	0.90
Costa Rica	Usuarios $\leq 1$ MW	0.90
	1 MW > Usuarios $\leq 5$ MW	0.95
	Usuarios > 5000 Kw	0.98
Guatemala	Usuarios con potencias de hasta 11 kW	0.85
	Usuarios con potencias superiores a 11 kW	0.90
Venezuela	En Condiciones normales	0.90

Tabla 2.24: Límite del factor de potencia

## Capítulo 3

### **EFFECTOS DE LA CALIDAD DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO SOBRE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN TRIFÁSICOS.**

El objetivo de esta sección es evaluar los efectos que se producen en los motores de inducción trifásicos cuando el suministro de energía eléctrica presenta distorsiones o perturbaciones en la señal de voltaje y/o corriente. La calidad del producto técnico en el punto de entrega al usuario debe de presentar variaciones mínimas en sus parámetros como: desbalance de tensión, armónicos, variaciones de tensión entre otros, mientras que el usuario final también es responsable de mantener las cargas monofásicas conectadas al sistema trifásico de una manera balanceada, así como también mantener un alto factor de potencia no solo para evitar daños en los equipos eléctricos sino también para evitar multas económicas por parte de la distribuidora. Cuando se tiene un motor de inducción operando bajo las condiciones anteriores ya sean provocadas por usuario final o por parte la distribuidora se generan diferentes efectos que hacen que la máquina de inducción reduzca su rendimiento, que afecte la vida útil del motor y en cuestiones económicas aumente los costos de operación del motor de inducción.

Por tanto, es importante conocer los parámetros eléctricos y los parámetros mecánicos del motor de inducción que son afectados cuando se tiene una mala calidad del producto técnico, pero primero se debe de conocer los parámetros eléctricos que rigen el funcionamiento de la máquina para evaluar cuales son los parámetros internos que son afectados por una mala calidad del suministro eléctrico, para ello se establece el circuito equivalente del motor de inducción.

#### **3.1 Circuito Equivalente De Un Motor De Inducción.**

Para modelar el motor de inducción de forma que se facilite el análisis para cada uno de sus parámetros eléctricos más importantes es necesario hacer un esquema por fase del mismo. Cuando se energiza un motor de inducción trifásico por medio de una fuente trifásica balanceada, las corrientes en los devanados de fase deben ser de igual magnitud y tener una diferencia de fase de  $120^\circ$  eléctricos.

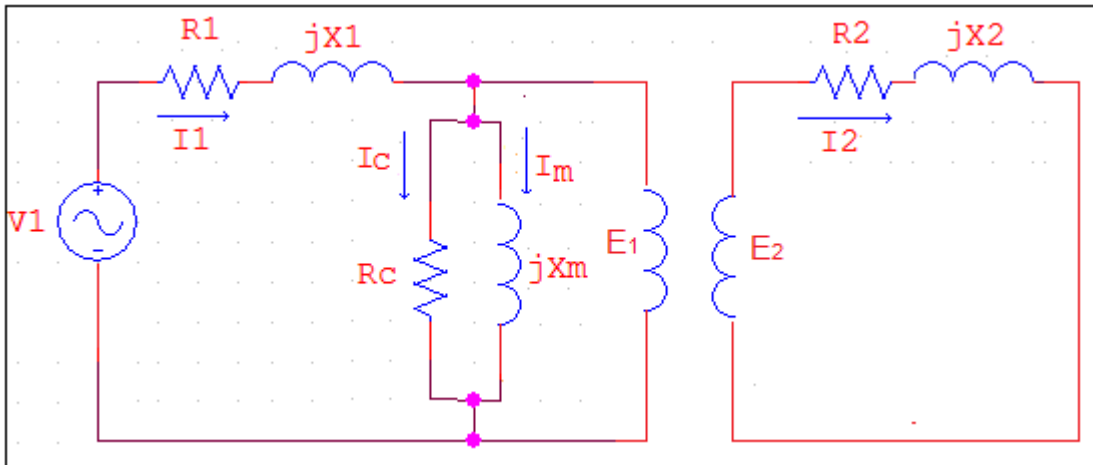


Figura 3.1: Circuito equivalente del motor de inducción.

De la Figura 3.1 el voltaje  $E_1$  corresponde a la fuerza electromotriz inducida por el devanado del estator hacia las barras del rotor, en otras palabras, es el voltaje inducido. Cada devanado por fase del estator presenta una resistencia por fase  $R_1$  en serie con la inductancia de dispersión  $jX_1$  por fase del devanado. El campo magnético de dispersión no contribuye a la transmisión de energía a través del entrehierro de la máquina. La resistencia  $R_c$  corresponde a la pérdida en el núcleo por fase en paralelo con la reactancia de magnetización  $jX_m$ , todo estos parámetros eléctricos corresponden al estator del motor de inducción, de manera análoga en el rotor de la máquina existen pérdidas provocadas por la resistencia  $R_2$  por fase del devanado del mismo junto con la reactancia de dispersión  $jX_2$ , esta última reactancia se ve afectada por el deslizamiento  $S$  del motor.

La corriente de magnetización está compuesta por la sumatoria de la corriente por fase de la pérdida en el núcleo más la corriente por magnetización por fase.

$$I = I_\phi = I_c + I_m \quad (3.1)$$

Mientras que la corriente  $I_1$  representa la corriente por fase de la fuente de alimentación, e  $I_2$  es la corriente por fase del devanado del rotor.

La tensión inducida por el devanado del estator se expresa como:

$$E_1 = 4.44fN_1k_{w1}\phi_m \quad (3.2)$$

Esta ecuación deja claro que la tensión inducida en las barras del rotor es directamente proporcional a la amplitud del flujo de magnetización por fase producido por el devanado del estator, así como también en función de la frecuencia del sistema  $f$ , el número de vueltas

por fase del devanado del estator  $N_1$  y del factor de devanado para el devanado del estator  $k_{w1}$ .

### 3.2 Efectos Del Desbalance En Los Motores De Inducción.

Uno de los principales problemas en los motores de inducción es el desbalance de voltaje presente en el suministro eléctrico, cuando el motor de inducción es alimentado por un sistema de voltajes trifásicos desbalanceados, las corrientes en las fases del motor serán diferentes y producirán en cada fase, campos magnéticos de diferente magnitud. Por lo tanto, en el entrehierro del motor se tendrá como resultante dos campos giratorios, uno con flujo magnético giratorio en el sentido de giro del motor (secuencia positiva) y otro en sentido opuesto al giro del motor (secuencia negativa).

Las causas del desequilibrio en el voltaje pueden ocurrir en la etapa de transmisión, distribución e incluso en el interior de las instalaciones eléctricas de la industria. Las causas principales del desbalance de voltaje que afectan a los motores eléctricos son: conexión asimétrica de cargas monofásicas, el efecto de un banco trifásico de capacitores con una fase fuera de servicio, hornos de arcos trifásicos, conexión de cargas asimétricas trifásicas.

Entre los principales efectos del desbalance en los motores de inducción destacan: elevación de temperatura en los bobinados y por lo tanto aumento de pérdidas por calor, disminución en la potencia y el par, reducción de la velocidad y disminución en la eficiencia. En la Figura 3.2 se muestra los 3 diferentes tipos de secuencias que están presentes en un sistema trifásico desbalanceado:

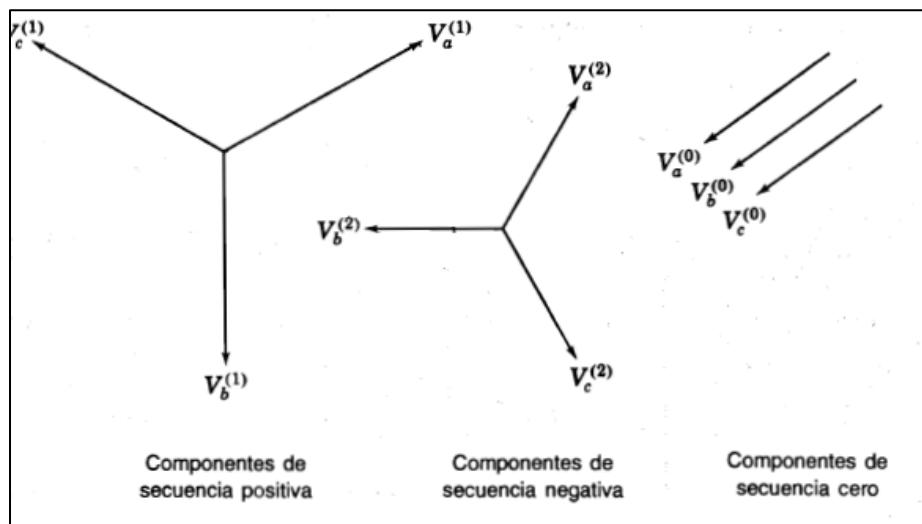


Figura 3.2: Componentes de secuencia generados en un sistema trifásico desbalanceado <sup>14</sup>

**1. Componente de secuencia positiva:** Consiste de tres fasores de igual magnitud desplazados uno de otro por una fase de  $120^\circ$  y que tienen la misma secuencia de fase de los fasores originales.<sup>14</sup>

**2. Componente de secuencia Negativa:** Consiste de tres fasores de igual magnitud desplazados uno de otro por una fase de  $120^\circ$  y que tienen la misma secuencia de fase opuesta a la de los fasores originales.<sup>14</sup>

**3. Componente de secuencia Cero:** Consiste en tres fasores de igual magnitud y con desplazamiento de fase cero uno de otro.<sup>14</sup>

Las corrientes de secuencia negativa producen en el entrehierro un flujo opuesto al flujo rotatorio del motor producido por las componentes de secuencia positiva. Las componentes negativas producen altas corrientes en el motor. Por lo tanto, para un determinado porcentaje de desbalance y a una carga dada, las corrientes en las fases y la elevación de temperatura serán mucho mayores que cuando opera bajo las mismas condiciones de carga, pero con voltajes balanceados, afectando por lo tanto el desempeño del motor. Las condiciones de tensiones desbalanceadas producen en el motor:

- Elevación de la temperatura en el bobinado.
- Pérdidas en la potencia activa.
- Aumento en las corrientes inducidas en el entrehierro, provocando así un aumento de pérdidas.
- Precarga en el motor.
- Vibraciones mecánicas.

### **3.2.1 Efecto del desbalance de voltaje en el deslizamiento del motor de inducción.**

Cada componente de los voltajes de secuencia positiva y negativa aporta por separado un conjunto de corrientes balanceadas en el motor de inducción, la resultante de la combinación de los dos conjuntos representa la corriente trifásica real producida en el estator alimentado por el voltaje desbalanceado real.

“El comportamiento del motor con el voltaje de secuencia positiva es esencialmente el mismo que resultaría si el voltaje de alimentación fuera balanceado. El voltaje de secuencia

---

<sup>14</sup> John J. Grainger, William D. Stevenson Jr, Análisis de sistemas de potencia



negativa sin embargo crea un campo giratorio contrario, de tal forma que, si el deslizamiento respecto al campo de secuencia positiva es (S), el deslizamiento al campo de secuencia negativa será (2-S)<sup>15</sup>.

El deslizamiento del rotor respecto al campo de secuencia positiva es igual al deslizamiento normal (S):

$$S_1 = \frac{N_{sinc} - N_{mec}}{N_{sinc}} = S \quad (3.3)$$

Donde:

$N_{sinc}$ : Velocidad de síncrona

$N_{mec}$ : Velocidad mecánica

La diferencia de velocidad angular del campo giratorio (velocidad síncrona) con la velocidad angular del motor produce el deslizamiento del rotor con respecto al campo de secuencia negativa, este queda de la siguiente manera:

$$S_2 = \frac{-N_{sinc} - N_{mec}}{-N_{sinc}} = 1 + \frac{N_{mec}}{N_{sinc}} \quad (3.4)$$

Por lo tanto, el deslizamiento producido por la componente de secuencia negativa se puede expresar en términos del deslizamiento S:

$$S = 1 - \frac{N_{mec}}{N_{sinc}}$$

$$\frac{N_{mec}}{N_{sinc}} = 1 - S$$

$$S_2 = 1 + \frac{N_{mec}}{N_{sinc}} = 2 - S \quad (3.5)$$

Debido al deslizamiento ( $S_2$ ) generado por la componente de secuencia negativa, el motor se comporta como si fuera la resultante de dos motores separados, uno de ellos girando a un deslizamiento (S) alimentado con un voltaje de secuencia positiva y otro girando a un deslizamiento (2 - S) alimentado con el voltaje de secuencia negativa, a esta condición se

---

<sup>15</sup> Juan Carlos Pretel Tamayo, Modelo matemático para el análisis en estado estable del motor de inducción con asimetría en el estator o rotor.

le conoce como precarga debido a que el motor tiene que vencer primeramente el efecto de la componente de secuencia negativa para que este comience a trabajar, esto demandará más potencia en el arranque y por ende un mayor consumo de energía.

### 3.2.2 Efecto del desbalance de voltaje en las pérdidas del motor.

Las pérdidas de operación del motor de inducción determinan la eficiencia y la energía consumida por el motor. En condiciones de desbalance de voltajes, las pérdidas se incrementan, pues la componente de tensión de secuencia negativa genera un campo magnético en dirección opuesta a la rotación del motor, creando efectos negativos en su operación. El efecto del desbalance de voltajes sobre las pérdidas del motor de inducción es importante por su efecto sobre la eficiencia y el consumo energético y económico.

En la Figura 3.3 se presenta el circuito equivalente de un motor de inducción con secuencia positiva, el término  $I_2^+$  representa la corriente del rotor la cuál referida al estator se convierte en  $\frac{I_2^+}{a}$ .

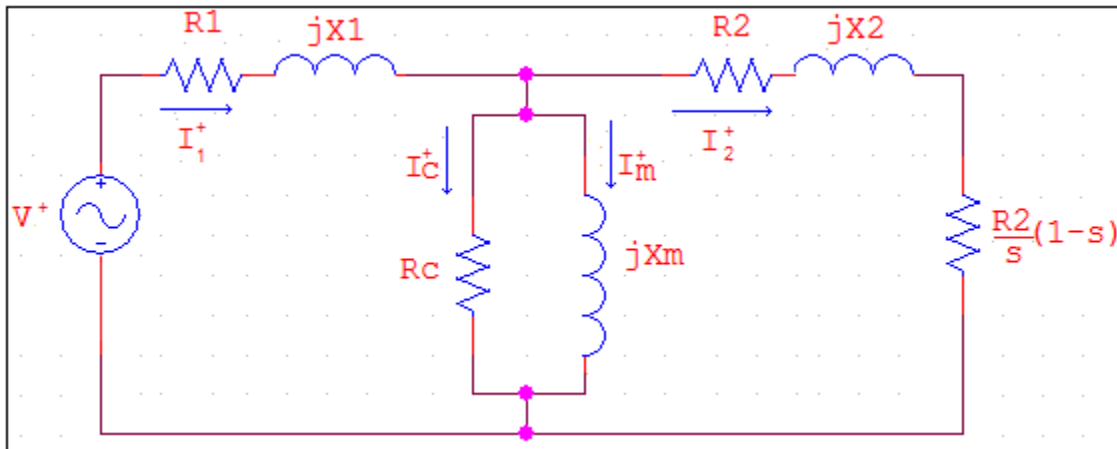


Figura 3.3: Circuito equivalente del motor de inducción de secuencia positiva.

Usando el circuito de secuencia positiva se obtiene que las pérdidas presentes son:

$$P_{\text{perd}_1} = P_{\text{Cu Est}_1} + P_{\text{Fe}_1} + P_{\text{Cu Rot}_1}$$

$$P_{\text{perd}_1} = 3R_1(I_1^+)^2 + 3R_C(I_C^+)^2 + 3R_2(I_2^+)^2 \quad (3.6)$$

De la misma manera se puede representar el motor de inducción en su modelo equivalente para secuencia negativa, mostrado en la Figura 3.4:

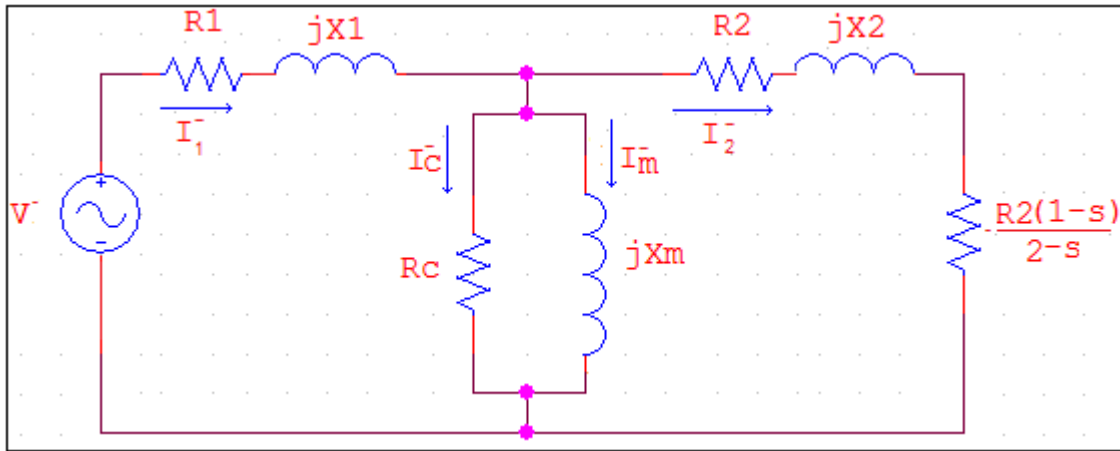


Figura 3.4: Circuito equivalente del motor de inducción de secuencia negativa.

De la Figura 3.4 se puede obtener las pérdidas presentes cuando un motor se ve afectado por voltajes con secuencia negativa:

$$P_{\text{perd}_2} = P_{\text{Cu Est}_2} + P_{\text{Fe}_2} + P_{\text{Cu Rot}_2}$$

$$P_{\text{perd}_2} = 3R_1(I_1^-)^2 + 3R_C(I_C^-)^2 + 3R_2(I_2^-)^2 \quad (3.7)$$

Las pérdidas totales del motor son:

$$P_{\text{Perd}_\text{Tot}} = P_{\text{perd}_1} + P_{\text{perd}_2} + P_{\text{fv}}$$

$$P_{\text{Perd}_\text{Tot}} = 3 \cdot (R_1(I_1^+)^2 + R_C(I_C^+)^2 + R_2(I_2^+)^2 + R_1(I_1^-)^2 + R_C(I_C^-)^2 + R_2(I_2^-)^2) + P_{\text{fv}} \quad (3.8)$$

Donde:

$P_{\text{fv}}$  = Pérdidas por fricción y ventilación.

De la Ecuación 3.8 se muestra claramente que al operar el motor con presencia de desbalance de voltajes las pérdidas presentan un aumento, ya que el total de ellas resulta ser la suma de las pérdidas con voltaje de secuencia positiva (Ecuación 3.6) y las pérdidas con voltaje con secuencia negativa (Ecuación 3.7).

### 3.2.3 Efecto del desbalance de voltaje en la eficiencia del motor de inducción.

La eficiencia y el factor de potencia son factores importantes que determinan el consumo energético del motor de inducción. Estos factores dependen tanto de la secuencia positiva como de la secuencia negativa.

La eficiencia se define como la relación entre la potencia que la máquina entrega en el eje  $P_{\text{salida}}$  y la potencia que toma de la red eléctrica a la cual está conectado  $P_{\text{entrada}}$ .

$$\eta = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{entrada}}} \quad (3.9)$$

La eficiencia que presenta un motor de inducción sirve para conocer cuanta de la energía eléctrica se convierte en energía mecánica y a la vez para conocer cuánta energía eléctrica se pierde en forma de calor, considerando que existen otros tipos de pérdidas a las cuales está expuesta la operación de un motor de este tipo. A medida que los motores tienen una mayor eficiencia, sus pérdidas serán menores, reflejando un menor consumo de energía eléctrica.

En la Figura 3.5, se muestra el flujo de potencia que ocurre en el motor en condiciones de desbalance de voltajes siendo  $P_1$  y  $P_2$  las potencias activas de entrada de secuencia positiva y negativa, respectivamente.

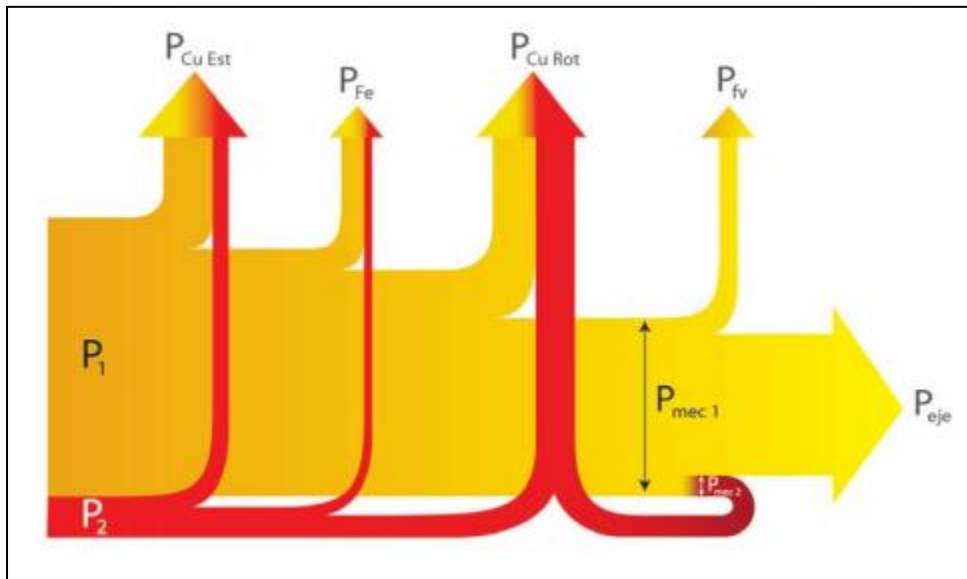


Figura 3.5: Flujo de potencia del motor de inducción operando en condiciones de desbalance de voltaje.<sup>16</sup>

La potencia activa que ingresa al motor  $P_{\text{entrada}}$  tiene dos componentes:  $P_1$  potencia activa de secuencia positiva y  $P_2$  que es la potencia activa de secuencia negativa.

<sup>16</sup> Enrique Ciro Quispe, Efectos del desequilibrio de tensiones sobre la operación del motor de inducción trifásico.

La potencia de salida del motor es la potencia presente en el eje  $P_{eje}$  y está compuesta por la suma de las potencias de salida que aporta cada secuencia.

Para el cálculo de  $P_{eje}$  se necesita conocer la potencia en el entrehierro ( $P_{Entreh_1}$ ), esta resulta ser la potencia que se transfiere al rotor de la máquina a través del entrehierro situado entre el rotor y el estator.

$$P_{Entreh_1} = 3(I_2^+)^2 \frac{R_2}{s} \quad (3.10)$$

La potencia mecánica convertida (potencia mecánica desarrollada) de secuencia positiva es:

$$P_{mec_1} = P_{Entreh_1} - P_{Cu Rot_1}$$

$$P_{mec_1} = 3R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) (I_2^+)^2 \quad (3.11)$$

La potencia mecánica de salida,  $P_{eje_1}$  será la potencia mecánica convertida menos las pérdidas por fricción y ventilación:

$$P_{eje_1} = 3R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) (I_2^+)^2 - P_{fv} \quad (3.12)$$

Se sigue el mismo procedimiento para el voltaje de secuencia negativa:

$$P_{Entreh_2} = 3(I_2^-)^2 \frac{R_2}{(2-s)} \quad (3.13)$$

La potencia mecánica convertida por la secuencia negativa es:

$$P_{mec_2} = P_{Entreh_2} - P_{Cu Rot_2}$$

$$P_{mec_2} = 3R_2 \left( \frac{s-1}{2-s} \right) (I_2^-)^2 \quad (3.14)$$

La potencia mecánica de salida para este caso será:

$$P_{eje_2} = 3R_2 \left( \frac{s-1}{2-s} \right) (I_2^-)^2 - P_{fv} \quad (3.15)$$

La potencia de salida total del motor será la suma de las potencias de salida de componente de secuencia positiva y negativa.

$$P_{eje} = P_{mec_1} + P_{mec_2} - P_{fv}$$

$$P_{eje} = 3R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) (I_2^+)^2 + 3R_2 \left( \frac{s-1}{2-s} \right) (I_2^-)^2 - P_{fv} \quad (3.16)$$

Debido a los niveles y zonas mecánicas de potencia donde opera el motor el deslizamiento varía entre 0.01 y 0.05. De la Ecuación 3.16 y en esta zona de operación hace que la potencia de secuencia negativa  $P_{mec_2}$  sea negativa, esto puede ser interpretado como la potencia que se gasta en vencer el par producido por el flujo magnético de secuencia negativa (condición de precarga). Esta potencia se disipa en forma de pérdidas de calor del circuito de secuencia negativa.

La ecuación de la eficiencia (Ecuación 3.9) se puede escribir además en términos de las pérdidas presentes en el funcionamiento del motor, estableciendo que la potencia de salida es la potencia presente el eje y la potencia de entrada es la suma de las potencias activas que aportan los voltajes de secuencia positiva y negativa.

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} = \frac{P_{eje}}{P_1 + P_2} = \frac{P_{eje}}{P_{eje} + P_{Perd\_Tot}} \quad (3.17)$$

Debido al aumento de las pérdidas por efecto de desbalance de voltaje, la eficiencia se reduce, esto a su vez refleja un aumento en el consumo de energía eléctrica debido a que el motor debe superar la condición de precarga lo cual ocasiona un incremento en la corriente demandada.

### **3.2.4 Efecto de desbalance de voltaje en el factor de potencia de motores de inducción.**

En el caso de motores de inducción, la manera más práctica de analizar el factor de potencia es basada en el triángulo de potencia mostrado en la Figura 3.6:

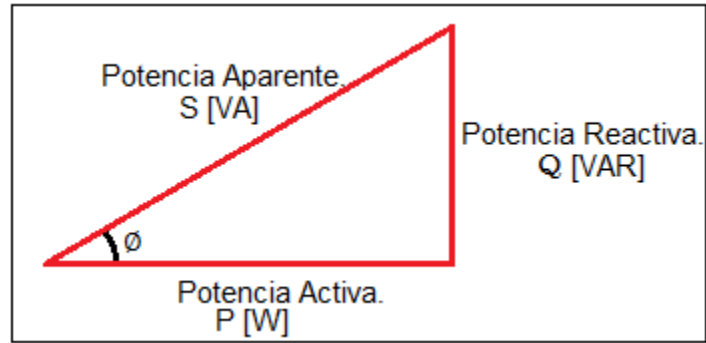


Figura 3.6: Triángulo de potencia.

El factor de potencia está definido por la relación entre la Potencia activa P y la potencia aparente S.

De la Figura 3.6 se obtiene:

$$\frac{P}{S} = \cos\phi \quad (3.18)$$

Por lo tanto, el factor de potencia es:

$$FP = \cos\phi \quad (3.19)$$

La potencia aparente (S) absorbida por el motor en condiciones de desbalance de voltaje se puede expresar en términos de los voltajes de secuencia positiva y negativa.

$$S_{ent} = 3 V_1^+ \times (I_1^+) + 3 V_1^- \times (I_1^-) \quad (3.20)$$

Donde:

$V_1^+$  = Voltaje de entrada de secuencia positiva

$V_1^-$  = Voltaje de entrada de secuencia negativa

$I_1^+$  = Corriente de secuencia positiva

$I_1^-$  = Corriente de secuencia negativa

Basado en el triángulo de potencia (Figura 3.6) se puede expresar la potencia aparente S como la suma vectorial de la potencia activa P y la potencia reactiva Q.

$$S_{ent} = P_{ent} + jQ_{ent} \quad (3.21)$$

Donde:

$$P_{ent} = \mathcal{R}e[S_{ent}]$$

$$Q_{ent} = \mathcal{I}m[S_{ent}]$$

“La componente de secuencia positiva varía con la carga del motor, mientras la componente de secuencia negativa se mantiene aproximadamente constante, pues su impedancia no varía con la carga.”<sup>16</sup>

Tomando en cuenta esta consideración y basándose en las Ecuaciones 3.18 y 3.19, el factor de potencia se expresa:

$$FP = \frac{\mathcal{R}e[S_{ent}]}{|S_{ent}|} \quad (3.22)$$

El factor de potencia depende de la magnitud del voltaje de secuencia positiva  $V_1$  y de la carga del motor.

### **3.2.5 Efecto del desbalance de voltaje sobre el torque y velocidad del motor de inducción.**

El par inducido  $\tau_{ind}$  en una máquina se define como el par generado por la conversión de potencia interna de eléctrica a mecánica, este par difiere del par especificado en los datos de placa de la máquina debido a las pérdidas por fricción y rozamiento. Por lo tanto, el par inducido se establece como la relación de la potencia mecánica entre la velocidad mecánica del mismo.

$$\tau_{ind} = \frac{P_{mec}}{W_{mec}} \quad (3.23)$$

Partiendo de la Ecuación 3.23 se establece que el par inducido es inversamente proporcional a la velocidad mecánica de la máquina dando lugar a que el desbalance en la tensión tenga efectos negativos en el motor debido a que la velocidad mecánica está en función de la velocidad síncrona y el deslizamiento. Utilizando la Ecuación 3.3 de deslizamiento  $S_1$  en términos de velocidad mecánica y aplicando únicamente componente de secuencia positiva, se puede establecer que la velocidad mecánica del motor es:



$$w_{mec} = (1 - S_1)w_{sinc} \quad (3.24)$$

Si la velocidad aumenta, el par desarrollado por el motor en el eje sufre una disminución, mientras que una reducción en la velocidad genera un aumento en el par desarrollado como se muestra en la Gráfica 3.1.

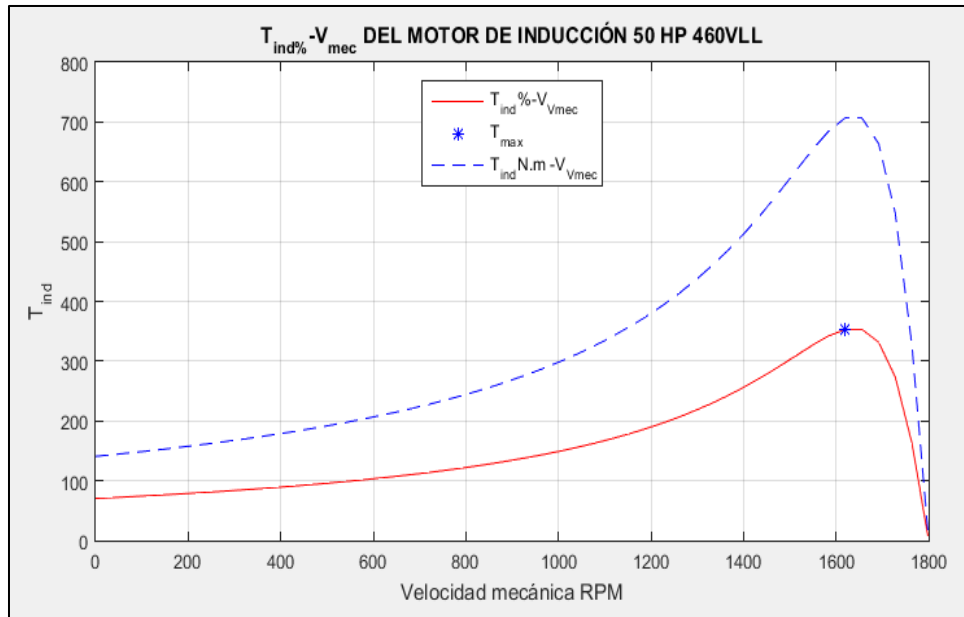


Gráfico 3.1: Curva Par-Velocidad de un motor de inducción.

Cuando el motor de inducción es alimentado con tensiones desbalanceadas, se genera el efecto de las componentes simétricas de secuencia negativa, de la Ecuación 3.4 se obtiene la expresión para velocidad mecánica:

$$w_{mec} = (S_2 - 1)w_{sinc} \quad (3.25)$$

Con un deslizamiento presentado por el voltaje de secuencia negativa menor que uno, la velocidad mecánica tendrá sentido contrario a la velocidad síncrona, esto genera un torque mecánico contrario al torque generado por el voltaje de secuencia positiva. Al incrementar el nivel de desbalance en el motor, aumenta la magnitud de la componente de secuencia negativa, disminuyendo su velocidad mecánica resultante, por lo tanto, se incrementa el torque en la carga lo cuál puede ser perjudicial para algunos procesos.

### 3.3 Efectos De Los Armónicos En Los Motores De Inducción.

En el sistema eléctrico de El Salvador la frecuencia fundamental es de 60 Hz. En los Gráfico 3.2 se presenta en: a) la forma de onda fundamental a 60 Hz, b) la tercera armónica, c) la quinta armónica, d) la séptima armónica, la novena armónica y f) onceava armónica.

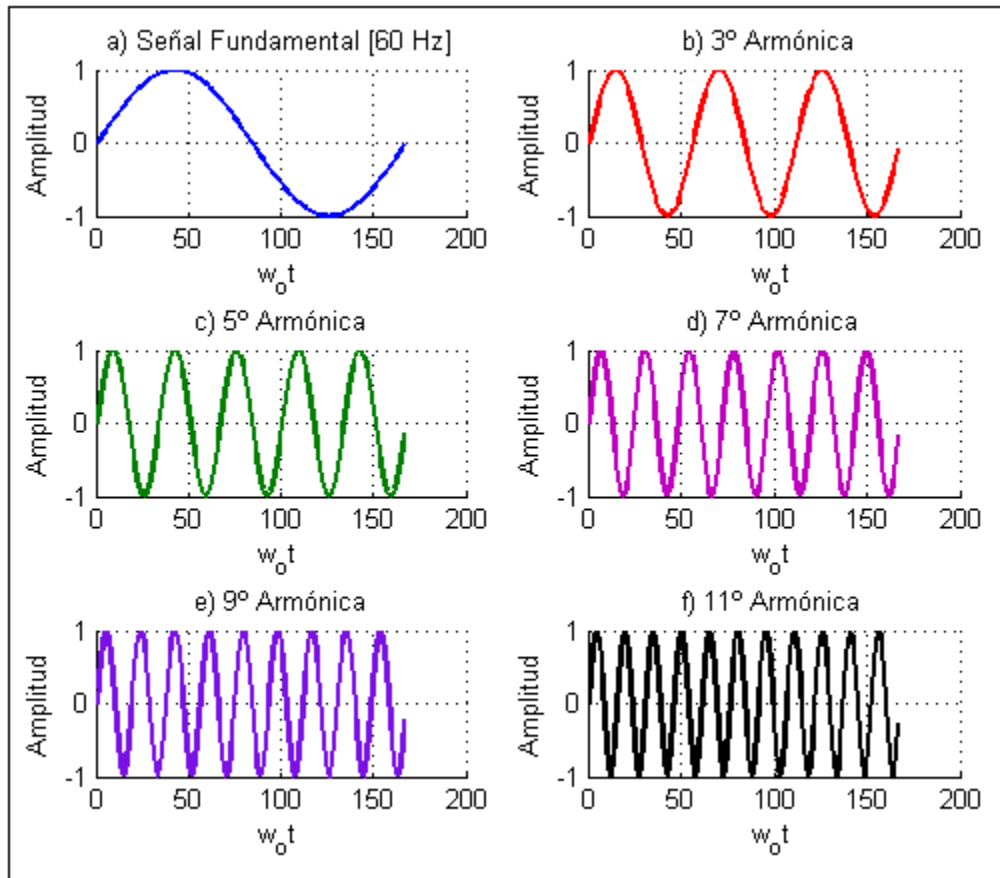


Gráfico 3.2: Armónicos Impares

Si a la onda sinusoidal fundamental de la señal eléctrica le agregamos la distorsión armónica, la forma de onda que se obtiene es la representada en la Gráfica 3.3.

En la Grafica 3.3 se tiene la forma de onda afectada por la 3º, 5º, 7º, 9º y 11º armónica.

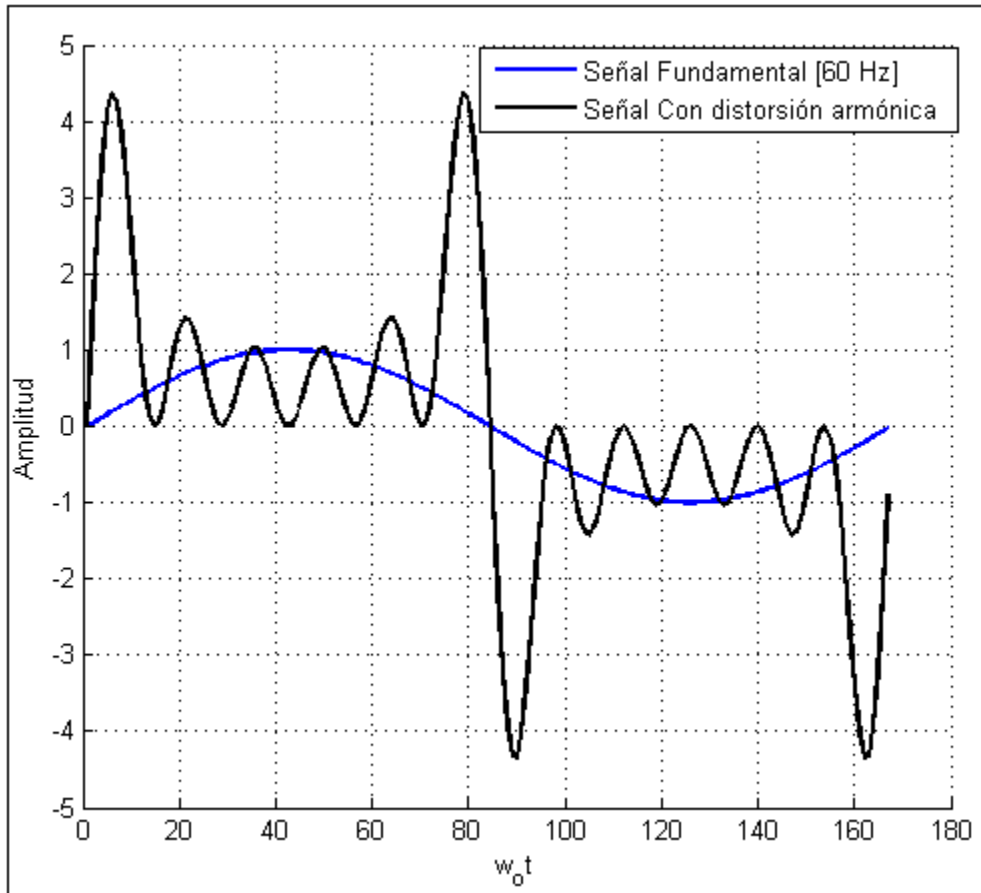


Gráfico 3.3: Señal fundamental con distorsión armónica.

Los armónicos se presentan en las redes de distribución eléctrica, ocasionando distorsión en la forma de onda de la señal eléctrica (Gráfica 3.3). Los armónicos son ocasionados por las diferentes cargas no lineales que se conectan a la red; el efecto que realizan los armónicos en la forma de onda de la señal eléctrica es afectar la frecuencia fundamental de esta. Las componentes armónicas que afectan la frecuencia son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la onda de la señal eléctrica, todas las componentes no fundamentales conforman la distorsión armónica.

Los armónicos están compuestos por componentes pares e impares, la forma de onda de la señal eléctrica por ser una onda sinusoidal la cual es simétrica, es afectada por los componentes impares.

### 3.3.1 Secuencia que presentan los armónicos.

Los armónicos en los sistemas trifásicos se presentan en las tres secuencias; secuencia positiva, secuencia negativa y de secuencia cero; la secuencia positiva tiene una rotación de fase igual que la tensión trifásica aplicada al sistema, la secuencia negativa tiene una rotación de fases contraria a la tensión aplicada al sistema y la de secuencia cero o secuencia homopolar presenta armónicas triples divisibles entre 3. La secuencia que se genera es la que se muestra en la Tabla 3.1.

Armónicos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	N
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	....

Tabla 3.1: Secuencias de armónicos.

El valor del voltaje trifásico instantáneo cuando hay presencia de armónicos en la red eléctrica es determinado por las siguientes ecuaciones:

$$V_{a(n)} = A \left( \frac{a_n}{n} \right) \cos(n\omega t) \quad (3.26)$$

$$V_{b(n)} = A \left( \frac{a_n}{n} \right) \cos[n(\omega t + 120)] \quad (3.27)$$

$$V_{c(n)} = A \left( \frac{a_n}{n} \right) \cos[n(\omega t - 120)] \quad (3.28)$$

Donde  $n$  es el orden del armónico y  $a_n$  es la magnitud porcentual del armónico; en la Gráfica 3.4 se muestra la secuencia sin distorsión armónica.

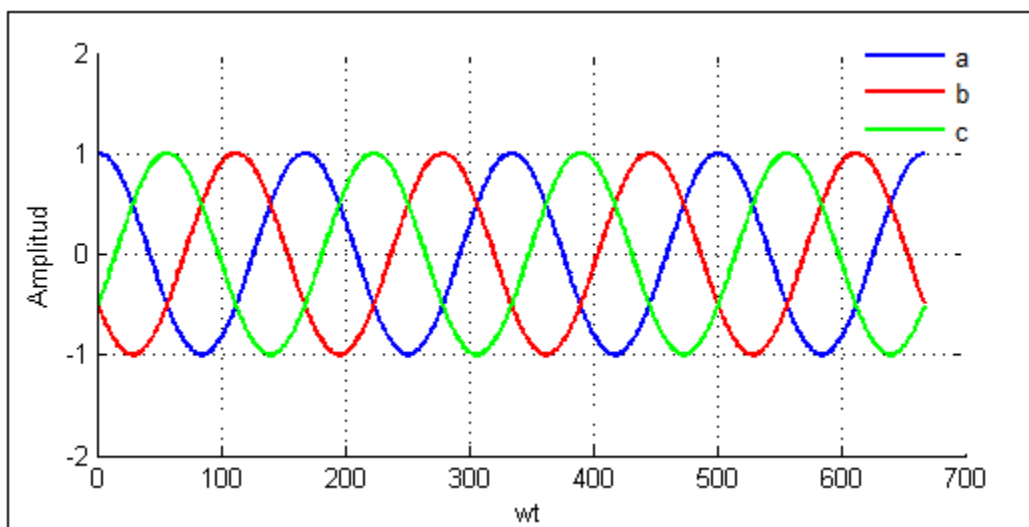


Gráfico 3.4: Secuencias de fases en el sistema trifásico.

### **3.3.2 Efectos de las componentes armónicas en los motores de inducción trifásicos.**

Los armónicos ocasionan una serie de problemas en los equipos eléctricos, desde un mal funcionamiento hasta el incremento en las pérdidas. En esta sección se analiza el efecto que tiene los armónicos en los motores trifásicos de inducción.

Algunos efectos que ocasionan los armónicos en los motores de inducción son:

- Aumento de pérdidas.
- Reducción de la eficiencia.
- Sobre calentamiento.
- Vibraciones mecánicas.
- Torque pulsante.
- Deterioro del aislamiento.
- Reducción de su Vida útil.

Para determinar el efecto de los armónicos en el motor, se tendrá en cuenta las series de Fourier; que consiste en el estudio de señales periódicas distorsionadas que conlleva a la descomposición de la señal en una sumatoria infinita de señales sinusoidales. Teniendo en cuenta este análisis se puede alimentar a un motor con "X" cantidad de fuentes independientes (Véase la Figura 3.7).

Con el principio de superposición se puede analizar el motor con cada una de las fuentes independientes, cada fuente tiene una componente armónica diferente (Véase la Figura 3.7) que al final se sumarán formando la señal distorsionada por los componentes armónicos de cada fuente.

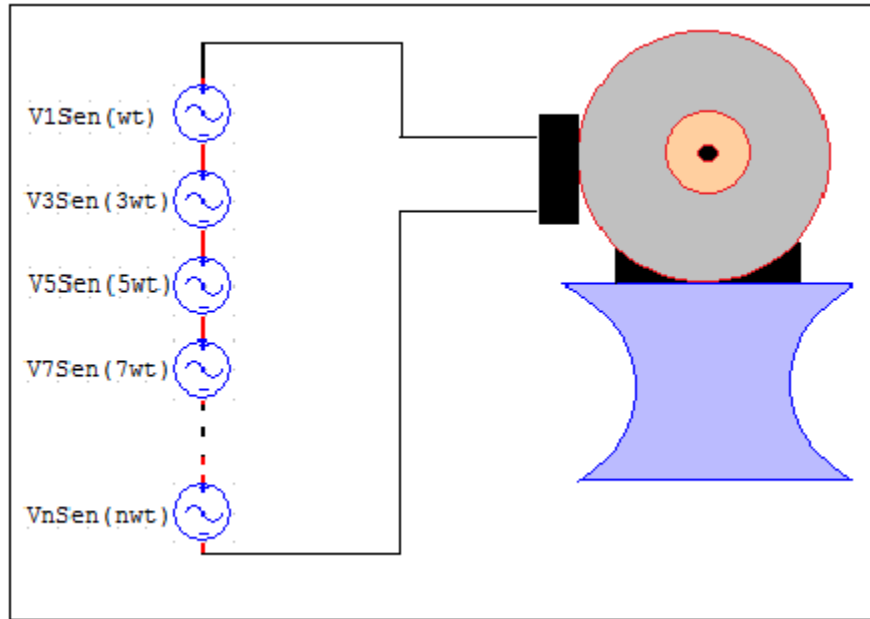


Figura 3.7: Circuito del motor alimentado por fuentes independientes.

Para un mejor análisis el circuito equivalente del motor de inducción a tensión sinusoidal se modifica para obtener el circuito equivalente con el efecto que causa los armónicos en este circuito como se muestra en la Figura 3.8.

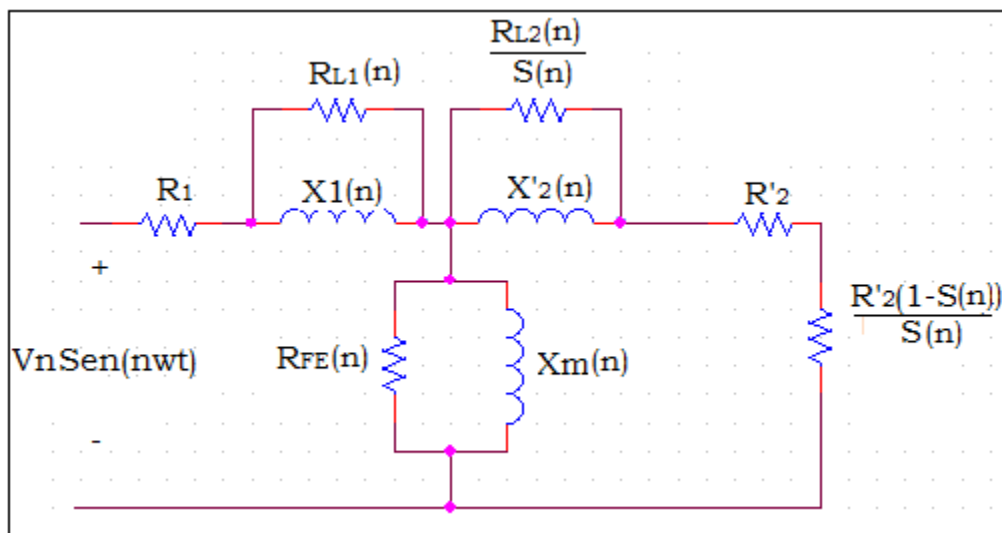


Figura 3.8: Circuito equivalente para un motor de inducción con tensiones armónica "n"<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Efecto de distorsión armónica de tensión sobre la eficiencia y potencia del motor de inducción trifásico  
Murphy & Honsinger, 1982, Vamvakari y Diego Fernando Valencia García.

Donde:

$R_1$	<b>Resistencia por fase del estator</b>
$R_{L1}(n)$	Resistencia de pérdidas adicionales del estator.
$X1(n)$	Reactancia de dispersión afecta por los componentes armónicos.
$R_{L2}(n)$	Resistencia de pérdidas adicionales del rotor referida al estator.
$X'2(n)$	Reactancia de dispersión afecta por los componentes armónicos.
$R'2$	Resistencia por fase del rotor referida al estator.
$S(n)$	Deslizamiento afectado por los componentes armónicos.
$R_{FE}(n)$	Resistencia de pérdidas en el núcleo afectada por componentes armónicos.
$X_m(n)$	Reactancia de magnetización afectada por los componentes armónicos.

Los cambios que sufre el circuito equivalente del motor en alimentación sinusoidal son los que se presentan en el circuito de la Figura 3.8, la resistencia  $R_{L1n}$ , que corresponde a la del estator, representa las pérdidas adicionales causadas por los componentes armónicos y  $R_{L2n}$  corresponde a las pérdidas adicionales presentes en el rotor,  $S_n$  también es afectada por los componentes armónicos.

### 3.3.3 Efecto que genera la secuencia de las componentes armónicas en el motor de inducción trifásico.

La dirección de giro del flujo magnético en un motor de inducción trifásico se encuentra definida por la secuencia en las fases a la que se conecta el motor. La presencia de armónicos en la alimentación del motor genera flujos electromagnéticos de secuencia positiva, negativa y cero, el efecto de cada secuencia se hace presente dependiendo del componente armónico.

La secuencia positiva genera un flujo magnético giratorio en el mismo sentido que gira el motor, pero la forma de onda presenta una distorsión provocada por los armónicos de secuencia positiva (Véase la Tabla 3.1) lo que ocasiona un calentamiento en el motor, reduciendo la eficiencia y poniendo en riesgo el aislamiento del devanado del estator.

La secuencia negativa que se generan por los componentes armónicos (Véase la Tabla 3.1) genera un flujo magnético en el entre hierro del motor con sentido contrario al del giro de rotación del rotor, lo que ocasiona un frenado en el giro del rotor, provocando un

calentamiento en las bobinas del estator e incrementando las pérdidas en este; teniendo en cuenta que en esta secuencia las pérdidas son mucho mayores a las que se ocasionan por la secuencia positiva (véase la Gráfica 3.5).

La secuencia cero provoca un campo pulsante, generando un efecto joule y corrientes de Eddy en el rotor; cuando la conexión del motor cuenta con un neutro las corrientes de secuencia cero se suman entre sí generando el torque pulsante. (Véase la Gráfica 3.5)

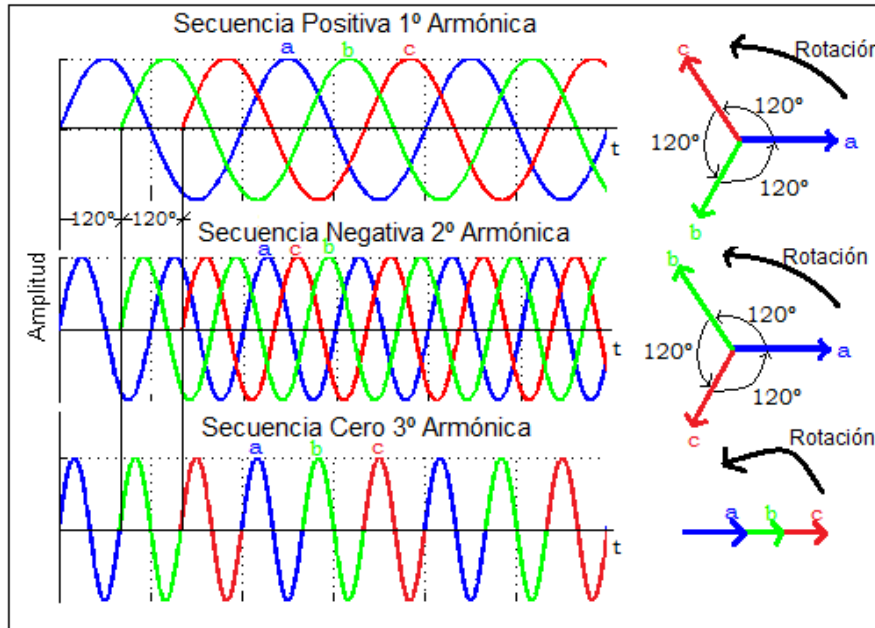


Gráfico 3.5: Secuencias de Armónicos 1º, 2º y 3º Armónica.

Los elementos del circuito equivalente del motor de inducción presentan una variación con cada componente armónico.

### 3.3.4 Efecto de las componentes armónicas en los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción trifásico para una señal no sinusoidal.

Los parámetros del circuito equivalente afectados por los componentes armónicos tienen una variación con cada componente armónico que se hace presente en la alimentación de este.



### 3.3.4.1 Variación de la reactancia por fase en presencia de armónicos.

La reactancia en condiciones normales de alimentación sinusoidal está definida por Ecuación 3.29.

$$X_L = 2\pi fL \quad (3.29)$$

Los componentes armónicos afectan directamente la frecuencia fundamental de la señal de alimentación, dando lugar al incremento de la frecuencia  $n \times f$ ; tomando en cuenta este efecto la Ecuación 3.29 cambia.

$$X_{L(n)} = 2\pi * n * fL \quad (3.30)$$

Al sustituir la ecuación 3.29 en la ecuación 3.30 se obtiene:

$$X_{L(n)} = n * X_L \quad (3.31)$$

### 3.3.4.2 Variación de la resistencia en el núcleo del motor con los componentes armónicos.

Las pérdidas en el núcleo tienen una variación aproximada con respecto a la frecuencia en condiciones sinusoidales,  $R_{FE}$  está determinada por:

$$R_{FE} = \frac{1}{\frac{K_H}{2\pi f} + K_E} \quad (3.32)$$

Donde  $K_H$  y  $K_E$  Corresponden a las constantes de histéresis y corriente de Eddy; incluyendo los efectos por las componentes armónicas en la frecuencia se define  $R_{FE(n)}$ .

$$R_{FE(n)} = \frac{1}{\frac{K_H}{2\pi(nf)} + K_E} \quad (3.33)$$

### 3.3.4.3 Efecto de los armónicos en el deslizamiento del motor.

La velocidad síncrona en el motor está definida por:

$$N_{sinc} = \frac{120f}{P} \quad (3.34)$$

Donde también existe una velocidad relativa o velocidad de deslizamiento ( $N_r$ ), la cual está definida por la diferencia de la velocidad síncrona y la velocidad del rotor ( $N_{mec}$ ).

$$N_r = N_{sinc} - N_{mec} \quad (3.35)$$

Las ecuaciones 3.3, 3.34 y 3.35 son válidas para tensiones sinusoidales, por tanto, en presencia de las componentes armónicas el deslizamiento es afectado. Tomando en cuenta los efectos de los armónicos, el deslizamiento se expresa como:

$$S_n = \frac{n \times N_s \pm N_m}{n \times N_s} \quad (3.36)$$

El deslizamiento bajo efecto de armónicos también se puede expresar en función del deslizamiento a frecuencia fundamental:

$$S_n = \frac{n \pm (1 - S)}{n} \quad (3.37)$$

El signo  $\pm$  en las Ecuaciones 3.36 y 3.37 está definido por la secuencia de los armónicos (Véase la Tabla 3.1), en secuencia positiva tenemos un signo negativo y en secuencia negativa un signo positivo.

El efecto más notable sobre el deslizamiento es el que produce la secuencia negativa, por generar un flujo magnético en el entrehierro contrario al del giro del motor, provocando una disminución en la velocidad del rotor ( $N_{mec}$ ) y produciendo un deslizamiento armónico ( $S_n$ ) mayor que la unidad.

#### **3.3.4.4 Resistencias de perdidas adicionales por los componentes armónicos $R_{L1}$ y $R_{L2}$ .**

Las pérdidas adicionales en condiciones sinusoidales están dadas por:

$$P_{L(n)} = I_{L(n)}^2 * R_{L(n)} \quad (3.38)$$

Donde  $I_{L(n)}$  está determinada por

$$I_{L(n)} = I_{1(n)} \left( \frac{X_{(n)}}{\sqrt{R_{L(n)}^2 + X_{(n)}^2}} \right) \quad (3.39)$$

De la Ecuación 3.38 y 3.39 se tiene que:

$$P_{L(n)} = I_{L(n)}^2 * \frac{R_{L(n)}}{1 + \left(\frac{R_{L(n)}}{X_{(n)}}\right)} \quad (3.40)$$

Las pérdidas adicionales en el estator están definidas:

$$P_{L(n)} = \lambda P_{salida} \quad (3.41)$$

Donde  $P_{salida}$  está definida por  $\eta \times V_1 \times I_1 \times \cos(\phi)$ , y  $\eta$  es la eficiencia del motor,  $\lambda$  representa las pérdidas adicionales cuando el motor es alimentado con una señal sinusoidal, expresado en ecuación se tiene:

$$P_{L(n)} = \lambda * \eta * V_1 * I_{(n)}^2 * r_{equi} \quad (3.42)$$

$r_{equi}$ : Resistencia equivalente de entrada del motor.

$$R_{L1} = X_1^2 * \frac{I_1}{2\lambda\eta V_1 \cos(\phi)} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2\lambda\eta V_1 \cos(\phi)}{I_1 * X_1}\right)^2} \right] \quad (3.43)$$

Por tanto se tiene  $R_{L1(n)}$  es afectada por los componentes armónicos:

$$R_{L1(n)} = R_{L1} * n \left( \frac{1 + f\gamma}{1 + n * f\gamma} \right) \quad (3.44)$$

El término “ $\gamma$ ” representa el cociente entre las pérdidas por histéresis y por corrientes de Eddy que por simplicidad se consideran iguales.

Si analizamos con los mismos componentes sinusoidales para  $R_{L2}$  del rotor se tiene que:

$$R_{L2(n)} = R_{L2} * \left(\frac{S_n * n}{S}\right) \left(\frac{1 + Sf\gamma}{1 + S_n * n * f\gamma}\right) \quad (3.45)$$

### 3.3.5 Efecto de los componentes armónicos en la eficiencia del motor.

La eficiencia en el motor es afectada debido al incremento en las perdidas, cuando el motor es alimentado con una fuente que contiene armónicos los flujos magnéticos que estos ocasionan dan lugar a que se le agreguen pérdidas adicionales a las que ya existen en el motor.

Cuando el motor está expuesto a distorsión armónica en el suministro de energía eléctrica la norma NEMA MG-1-2004 para motores recomienda reducir la carga en el eje del motor para prevenir daños físicos; en el Capítulo 2 donde se estudió la parte normativa en la Ecuación 2.3 se calcula el factor HVF, el cual se utiliza en la Gráfica 2.2 para ajustar la potencia entregada en el eje.

La eficiencia en el motor está determinada por la Ecuación 3.17, al incrementar las pérdidas la eficiencia disminuye. NEMA recomienda la Ecuación 3.46 para calcular la nueva eficiencia del motor en presencia de armónicos en la tensión.

$$\eta_c = \frac{DF^2}{\frac{1}{\eta} + DF^2 - 1} \quad (3.46)$$

Donde:

$\eta$ : Es la eficiencia del motor alimentado con tensión sinusoidal.

$\eta_c$ : Es la eficiencia del motor cuando el voltaje aplicado contiene distorsión armónica.

En general debido a que las pérdidas aumentan en el motor por la distorsión armónica la eficiencia de este disminuye considerablemente, causando esto un consumo de recurso mayor a los que consumiría en operaciones normales.

### 3.3.6 Efecto de los armónicos en el factor de potencia del motor de Inducción.

En condiciones sinusoidales el factor de potencia se calcula con:

$$FP = \frac{P_1}{\sqrt{3}V_1 * I_1} \quad (3.47)$$

Pero en presencia de armónicos la expresión cambia debido a efecto que ocasionan los componentes armónicos. Teniendo en cuenta que el factor de potencia es una relación de la potencia activa y la potencia reactiva, en presencia de armónicos la potencia activa se calcula con la descomposición de la tensión y la corriente en sus componentes armónicas como:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\varphi_n) \quad (3.48)$$

Donde  $\varphi_n$  es la diferencia del ángulo de la tensión y la corriente ( $\varphi_V - \varphi_I$ )

La potencia reactiva se define para la frecuencia fundamental de la onda y está definida por:

$$Q = V_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (3.49)$$

### 3.3.6.1 Potencia con distorsión armónica.

La potencia aparente S en condiciones sinusoidales está definida por:

$$S = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \quad (3.50)$$

En presencia de componentes armónicos la ecuación para la potencia aparente se expresa como:

$$S^2 = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \varphi_n \quad (3.51)$$

En condiciones sinusoidales la potencia aparente es:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (3.52)$$

Pero cuando existe distorsión armónica la Ecuación 3.52 no es válida. En presencia de componentes armónicos aparece el término de potencia de distorsión (D)

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (3.53)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3.54)$$

El factor de potencia es la relación entre la parte real y potencia aparente como se expresó en la Ecuación 3.22.

### 3.4 Efectos Del Flicker En Los Motores De Inducción.

#### 3.4.1 Efectos de las fluctuaciones de tensión en la iluminación.

El fenómeno del Flicker es una de las respuestas perceptibles por el ojo humano ante la presencia de fluctuaciones en la tensión, siendo este fenómeno generado por la conexión o desconexión de grandes cargas, dentro las cuales se encuentran el arranque de motores eléctricos de gran capacidad. También es generado por hornos de arco, compresores, conexión- desconexión de banco de capacitores, soldadoras y por sistemas de baja potencia de corto circuito. El Flicker se observa en el sistema de iluminación de la instalación con el efecto del parpadeo en las luminarias. La Gráfica 3.6 muestra las fluctuaciones por segundo, minutos y horas que el ser humano puede soportar y la cantidad de las mismas a las cuales el Flicker se vuelve molesto para la visión.

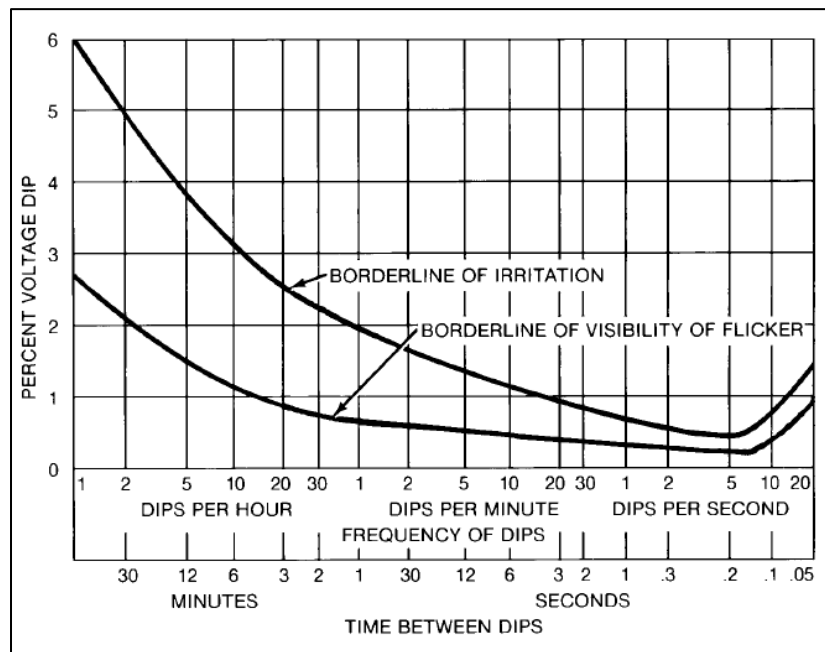


Gráfico 3.6: Curva Fluctuaciones de tensión contra el tiempo de ocurrencia del mismo.<sup>18</sup>

La norma IEEE STD 141 establece dos curvas en función de las variaciones en la magnitud de la tensión contra la frecuencia de ocurrencias del mismo. La curva inferior de la Gráfica 3.6 establece el límite al cual el ser humano comienza a detectar la presencia del Flicker en

<sup>18</sup> IEEE std 141-1993

el sistema de iluminación de la instalación. Mientras que la curva superior muestra el límite al cual el Flicker comienza a irritar la visión humana. Por ejemplo, para 10 fluctuaciones por hora el Flicker es detectado para variaciones de aproximadamente el 1% de la tensión. Si estas mismas fluctuaciones alcanzan una variación del 3% de la tensión del sistema este fenómeno comienza a irritar (perturbar) la visión humana. Un análisis similar se puede dar para las fluctuaciones por minuto y por segundo. El fenómeno del FLICKER es una respuesta a los parámetros que distorsionan la señal de voltaje, sin embargo, las fluctuaciones de tensión son generadas en ocasiones por los mismos motores de inducción debido a su conexión y desconexión de la red eléctrica afectando a si al resto de carga que en ocasiones son otros motores de inducción en operación los que se encuentran conectados, generando así fallas en su funcionamiento.

### **3.4.2 Efectos de las fluctuaciones de tensión sobre los motores de inducción.**

Al energizar un motor de inducción trifásico se genera en el devanado del estator un flujo de corrientes trifásicas, este flujo de corriente a su vez genera un campo magnético giratorio que induce voltaje en las barras de un rotor (supóngase un rotor jaula de ardilla), dichas barras se encuentran cortocircuitadas en sus extremos. El campo magnético inducido en el rotor gira aproximadamente igual a la velocidad de síncrona, esta diferencia entre la velocidad del campo magnético del estator y rotor es la que hace posible que en eje del motor se tenga un torque capaz de mover la carga aplicada en el eje de la máquina. Por esa diferencia entre las dos velocidades se le atribuye el nombre de “máquinas eléctricas asíncronas”. La ecuación que hace posible la inducción del voltaje del devanado de estator hacia el rotor se expresa:

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad (3.55)$$

Donde:

$e_{ind}$ : voltaje inducido

$v$ : velocidad de la barra.

$B$ : Vector de densidad de flujo magnético.

$l$ : longitud del conductor en el campo magnético.

La Ecuación 3.55 es uno de los principios del funcionamiento del motor de inducción, el voltaje inducido es el encargado de desarrollar en la máquina eléctrica la velocidad mecánica, el par electromagnético, vencer la inercia que la carga presenta en el eje del motor, entre otros. El término  $B$  en la ecuación representa la densidad flujo magnético que atraviesa al devanado del rotor, este flujo es generado por las corrientes trifásicas en los devanados del estator que dependen del voltaje aplicado en los terminales del motor, es por ese motivo que la presencia de fluctuaciones de tensión se considera dañinas para el desempeño de la máquina. Cuando el voltaje en la red eléctrica presenta variaciones en la tensión se observan dos situaciones, primero que la iluminación se atenúa en ciertos intervalos de tiempo (Flicker) y segundo que en los motores de inducción se escucha una aceleración repentina de la máquina o caso contrario, una desaceleración en el eje de la misma. Teniendo en cuenta que dentro de una instalación eléctrica no solo en estas dos situaciones se presentan cuando se tiene una distorsión de tensión. Mencionado lo anterior el objetivo de esta sección es analizar el rendimiento del motor de inducción bajo condición de operación con variaciones de tensión en el suministro eléctrico.

#### **3.4.2.1 Efectos en la velocidad del motor.**

Cuando se tienen fluctuaciones de tensión en el voltaje aplicado a los terminales del motor de inducción, el eje seguirá girando con la excepción que lo hará a una velocidad diferente a la velocidad nominal de la máquina. A medida que aumente o disminuya la variación en la magnitud de la tensión así serán los efectos que tendrá sobre la velocidad mecánica. Cabe mencionar que el estudio de este fenómeno no hace consideración de un variador de velocidad conectado al motor. De la Gráfica 2.3 en la sección de normativas internacionales del presente estudio, el estándar IEEE STD 739 hace referencia al porcentaje de variación en la tensión y frecuencia, así como también los parámetros que son afectados por dichos cambios.

Tomando como ejemplo una variación en la tensión del 6% aplicado en los terminales del motor se tiene que el deslizamiento “ $s$ ” disminuye aproximadamente en un 11% de su valor nominal. El deslizamiento está ligado a la velocidad mecánica del motor. Tal como se muestra en la Ecuación 3.3



Asumiendo que la frecuencia se mantiene constante, el término  $N_{sinc}$  se mantiene constante debido a que depende directamente de la frecuencia del sistema en Hz y el número de polos de la máquina (Ecuación 3.10).

Entonces reescribiendo la ecuación para el deslizamiento, se tiene que ante la fluctuación que genera el aumento del 6% en la magnitud de la tensión se produce una disminución de velocidad mecánica en el eje de la máquina debido a que el deslizamiento en la máquina disminuye. Tal como se muestra en la Ecuación 3.56.

$$\begin{aligned} (S \times N_{sinc}) &= N_{sinc} - N_{mec} \\ N_{mec} &= N_{sinc} - (S \times N_{sinc}) \\ N_{mec} &= N_{sinc} (1 - S) \end{aligned} \quad (3.56)$$

Caso contrario se tiene con fluctuaciones que disminuyan la magnitud del voltaje por un determinado tiempo, el deslizamiento aumenta aproximadamente a un 13% (véase la Gráfica 2.3) de su valor nominal, por lo cual el motor de inducción reduce las revoluciones por minuto en el eje. Como este fenómeno es tratado para motores de inducción trifásicos se asume que la fluctuación de tensión esté presente en las 3 fases del sistema desfasadas  $120^\circ$ . Este aumento o disminución de la velocidad debido a la variación en el deslizamiento de la máquina se genera por el principio de funcionamiento (Ecuación 3.55 “Tensión Inducida”) del motor de inducción ya que el incremento en la velocidad es a causa de que el motor necesita mayor corriente eléctrica en sus terminales para vencer la inercia que la carga ejerce sobre el eje de la máquina y así mantener constante el par mecánico, dicho aumento en la corriente genera un aumento de la densidad de flujo magnético  $B$  en el entrehierro de la máquina, por tanto se tiene un aumento en la corriente de carga aproximadamente del 6% para fluctuaciones de la tensión de -6%. De manera análoga sucede con un incremento del 6% en el voltaje de la red eléctrica, la densidad de flujo magnético en el entrehierro disminuye debido a que la corriente de carga en los terminales del motor bajo aproximadamente en un 2% de su valor nominal.

#### **3.4.2.2 Efecto en el par desarrollado por el motor.**

En la sección “*efectos del desbalance de tensión en los motores de inducción*” se establece la ecuación que determina el par inducido (Ecuación 3.23). El término  $P_{mec}$  está en función de la potencia entregada en el entrehierro de la máquina menos las pérdidas eléctricas en el circuito del rotor (Ecuación 3.9).

$$P_{mec_1} = P_{Entreh_1} - P_{Cu Rot_1}$$

Mientras que la potencia que cruza el entrehierro tiene una relación directa con la resistencia de carga del circuito equivalente (Véase la Figura 3.2) ya que la potencia en el entrehierro debe de ser aproximadamente igual la potencia de entrada en los terminales de la máquina, sin embargo, como ya se estableció, las pérdidas de potencia en el cobre del estator y perdidas magnética, afectan la potencia de salida de la máquina, es decir

$$P_{Entreh} = P_{IN} - P_{Cu estator} - P_{MAG} \approx 3I_2^2 \times \frac{R_2}{s} \quad (3.57)$$

De esta ecuación aparece el término  $\frac{R_2}{s}$  que también es afectado por la variación en el deslizamiento del motor de inducción. La Gráfica 3.1 establece la relación directa que existe entre el toque inducido contra la velocidad mecánica del motor.

Cuando se tiene un incremento en la velocidad mecánica se genera una aproximación de las RPM mecánicas a la velocidad de síncrona  $N_{sinc}$  (con frecuencia de la red eléctrica constante) con lo cual provoca que el par desarrollado a plena carga disminuya.

### 3.4.2.3 Efectos sobre la corriente de arranque del motor de inducción.

Cuando la tensión decae por debajo de su valor nominal el motor demanda mayor corriente de arranque (véase la Grafica 2.3), entonces asumiendo nuevamente una variación de la tensión del +6%, la corriente de arranque que el motor de inducción demanda es de aproximadamente del +6% de su valor nominal. Por tanto, la curva PAR-VELOCIDAD se modifica ya que el par de arranque (véase la Grafica 3.1) en condiciones normales de operación es de aproximadamente el 200% del par a plena carga, generando un incremento extra en el par de arranque debido a incremento en la magnitud de la tensión de aproximadamente 12%, es decir se tendría que el motor en condiciones de arranque exigirá el 212% del par a plena carga. Debido a estos incrementos en las corrientes trifásicas de arranque se generan daños físicos en el motor de inducción como pueden ser aumentos en la temperatura de la máquina, vibraciones, daños en los rodamientos. En síntesis, daños que afecta la vida útil del motor de inducción.

#### 3.4.2.4 Efecto en la eficiencia del motor.

El rendimiento de los motores de inducción no solo depende de la calidad del suministro eléctrico con el cual este es alimentado, también depende del diseño constructivo, el tipo de enfriamiento, la clase del motor, el medio ambiente al cual este se encuentra expuesto, estos parámetros forman parte de los criterios a considerar para que el rendimiento del motor sea el optimo. Sin embargo, el objetivo de esta sección es establecer los efectos negativos sobre el parámetro de la eficiencia a los cuales un motor de inducción trifásico es sometido cuando las fluctuaciones de tensión están presentes en sus terminales de alimentación. Este estudio se basa en las curvas (véase la Grafica 2.3) proporcionadas por la norma IEEE std 739- libro de bronce.

La Ecuación 3.9 es expresada de forma ideal sin considerar todas las pérdidas de potencia que se dan en la conversión de energía eléctrica a energía mecánica.

$$\eta = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{entrada}}}$$

A medida que los motores de inducción tienen una mayor eficiencia sus pérdidas de potencia son menores tal como lo refleja la siguiente ecuación. Esta reducción de pérdidas genera un menor consumo eléctrico y un mayor rendimiento de la máquina.

$$\eta = 1 - \frac{P_{\text{perdidas}}}{P_{\text{entrada}}} \quad (3.58)$$

Estas pérdidas son generalmente denominadas perdidas del rotor, perdidas por el cobre del estator y las magnéticas. También se encuentran las pérdidas por fricción y viento que corresponde a las pérdidas mecánicas de la máquina

Las fluctuaciones de tensión en los terminales del motor de inducción generan variaciones en el valor nominal de la eficiencia debido al cambio en la corriente y la potencia de salida. Las pérdidas de potencia que depende de las corrientes estáticas y de carga generan que el término  $P_{\text{perdidas}}$  aumente o disminuya. La Gráfica 3.7 muestra la curva eficiencia contra la potencia de salida un motor de inducción en la cual se establecen los porcentajes en por unidad en los cuales varia el parámetro de la eficiencia dependiendo de la potencia entregada en el eje de la máquina.

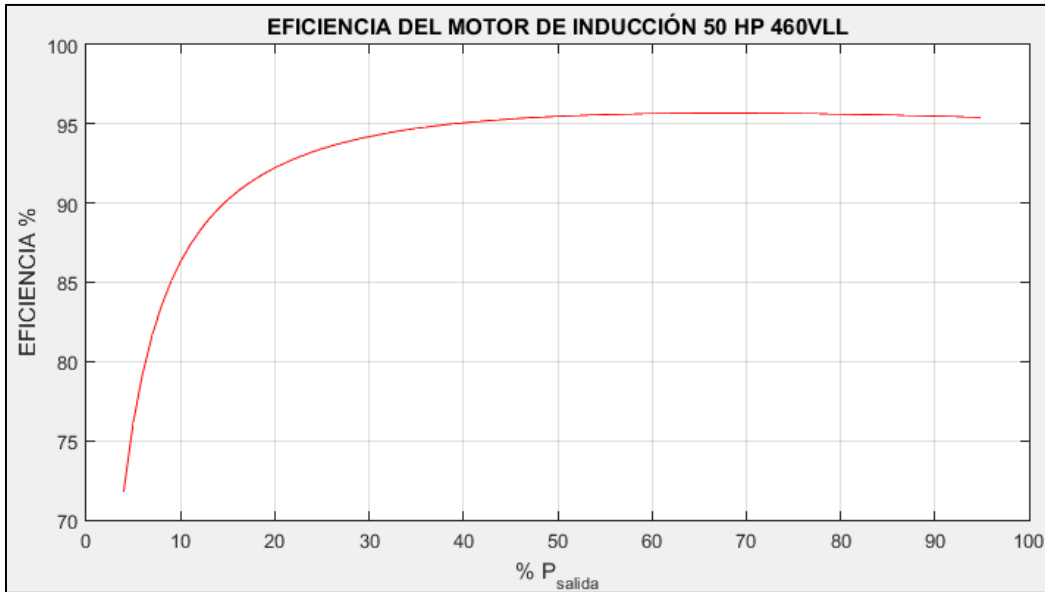


Gráfico 3.7: Curva Eficiencia – potencia de salida (motor de inducción).

La norma IEEE std 739- Recomendaciones prácticas para la administración de energía en instalaciones comerciales e industriales establece que ante un aumento de la corriente de carga la eficiencia del motor de inducción se reduce en cierto porcentaje (véase la Gráfica 2.3), en un caso práctico, ante la presencia de una fluctuación que produce una disminución del 6% en la magnitud de la tensión, la eficiencia de la máquina se reduce aproximadamente en un 2% de su valor nominal debido a que la corriente de carga aumenta en un 7%, generando que las pérdidas de potencia eléctrica también aumenten y por tanto la potencia de salida sea menor. En la Gráfica 3.7 se observa que una disminución de la potencia de salida provoca una leve disminución de la eficiencia de la máquina, los porcentajes de variación no son tan alto en comparación de los parámetros como; la corriente de carga, el deslizamiento, corriente a plena carga etc. Sin embargo, este parámetro eléctrico es fundamental en cuanto al ahorro económico para la operación del motor de inducción trifásico. Caso contrario ocurre cuando se produce un aumento en las tensión del 6% de su valor nominal, la corriente a plena carga disminuye y con ello el término  $P_{perdidas}$  se reduce, por tanto la eficiencia se aumenta en un 2%.

### **3.5 Efectos De Las Variaciones De La Frecuencia En Los Motores De Inducción Trifásicos.**

En las redes de distribución eléctricas la regulación de frecuencia es un factor importante para la estabilidad del sistema, mantener la continuidad del suministro y también para que la energía eléctrica en el punto de entrega al usuario presente parámetros que la categoricen con una alta calidad. Algunas causas que generan la variación de la frecuencia son:

- Cuando el consumo de la carga es superior a la capacidad de generación se produce una variación negativa en la frecuencia. Si la disminución de la frecuencia excede los límites permitidos se produce un colapso en el sistema y se procede a la desconexión temporal y selectiva de carga.
- Cuando el consumo es menor a la generación se produce una variación positiva de la frecuencia. Si el aumento de la frecuencia excede los límites permitidos se produce una disminución en la capacidad de generación para adecuarla a la carga.

#### **3.4.1 Efecto sobre la velocidad de síncrona.**

Las variaciones de tensión afectan directamente la velocidad mecánica del motor de inducción mientras que las variaciones en la frecuencia generan un cambio directo en la velocidad de síncrona de la máquina sin embargo este cambio genera de forma indirecta variaciones en las RPM mecánicas de la máquina. Retomando la Ecuación 3.56 se determina que es mayor el efecto producido por la variación de la velocidad de síncrona que una variación del deslizamiento ( $S$ ) sobre la velocidad mecánica, por ejemplo una variación del +5% (variación máxima de la frecuencia según la norma IEEE STD 739) se genera un incremento aproximadamente de 90 RPM en la velocidad  $N_{sinc}$  para una frecuencia fundamental de 60Hz y suponiendo un motor de 4 polos. Por tanto, la velocidad total de sincronismo será de 1890 RPM. Un aumento considerable para esta variación pequeña en la frecuencia.

La Gráfica 3.8 muestra la curva par inducido contra la velocidad mecánica del eje en la cual se tiene diferentes curvas en respuesta a un cambio en la frecuencia fundamental del sistema.

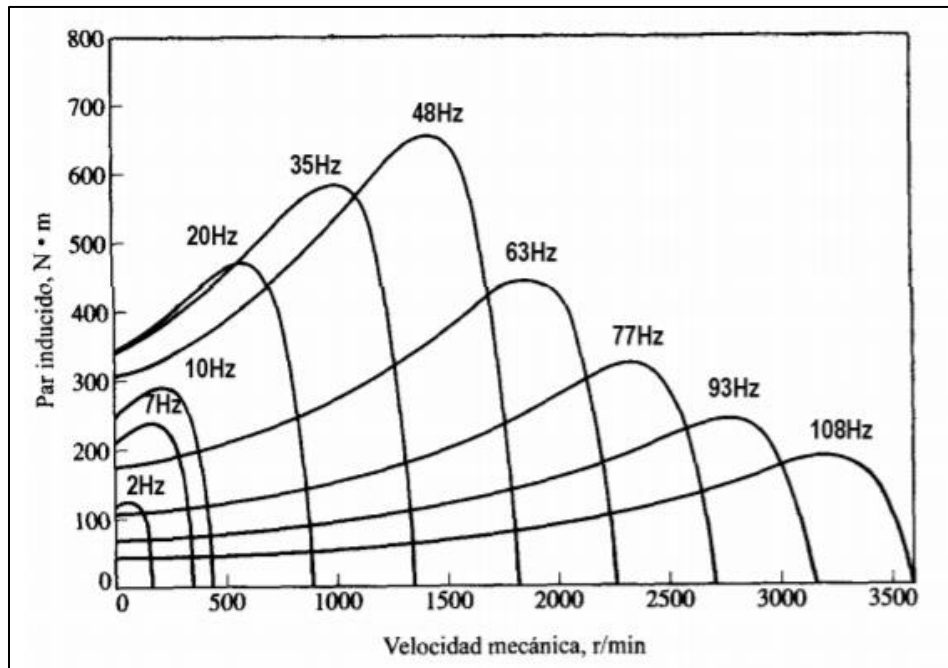


Gráfico 3.8: Curva Par – velocidad mecánica en función de variaciones de la frecuencia.

La curva correspondiente a una frecuencia de 63 Hz es similar a la Gráfica 3.1 por lo tanto retomando los tres momentos desarrollados por la máquina: el Par de arranque, par máximo y par a plena carga para cada uno de ellos existe una disminución considerable cuando se tiene aumentos en la frecuencia fundamental. El par de arranque por lo general tiende a ser de 1.6 a 2 veces el torque inducido nominal de la máquina, del Gráfica 2.3 para el porcentaje de variación en la frecuencia, el par de arranque presenta una pendiente, lo cual significa que ante aumentos de la frecuencia este par disminuye, por ejemplo, para una variación del 2% el par de arranque disminuye en un 5% de su valor nominal. De la Gráfica 3.9 se observa la variación de velocidad síncrona en función del +5% en la variación de la frecuencia fundamental.

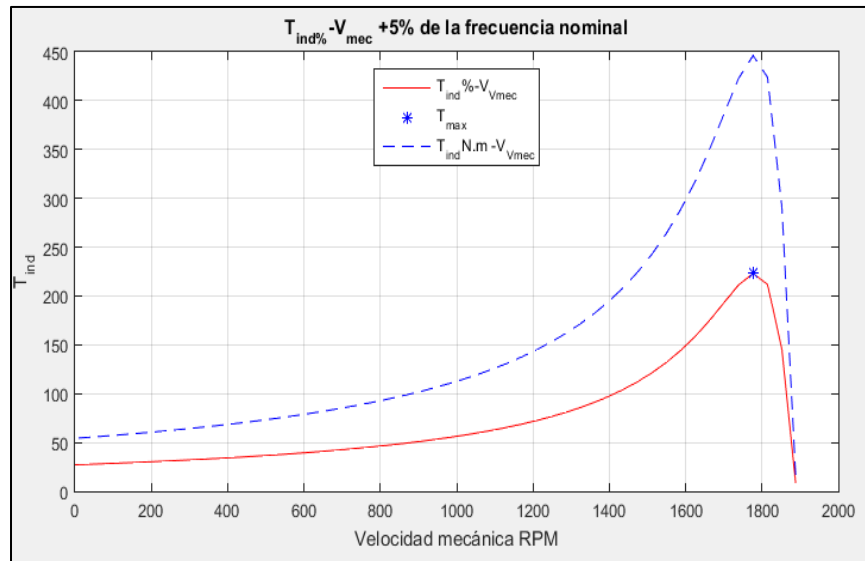


Gráfico 3.9: Curva Par – velocidad mecánica para +5% de variación de la frecuencia

El par a plena carga se genera cuando el motor entrega aproximadamente el 100% del par inducido en el eje de la máquina girando este a una velocidad cercana a la síncrona (véase la Gráfica 3.1). Como el incremento en la velocidad síncrona también genera un incremento en la velocidad mecánica de la máquina produciendo así que el punto de intersección entre el par a plena carga y la velocidad mecánica se modifica, tal como se observa en la Gráfica 3.8, por tanto, para cada aumento en la frecuencia se genera una disminución del par a plena carga.

Caso contrario sucede para este torque cuando se tiene una variación que hace que la frecuencia disminuya, en el caso del par de arranque se presenta un incremento de aproximadamente 11% para una caída del 5% en la frecuencia del sistema. Mientras que el par a plena carga es afectado debido a que la velocidad mecánica de la máquina disminuye, por tanto, el par inducido aumenta ya que su relación con la velocidad mecánica es inversamente proporcional.

Las variaciones del torque a plena carga y de arranque se debe a los cambios en la magnitud de la corriente a plena carga y corriente de arranque del motor de inducción. Las líneas del campo magnético en el devanado de estator disminuyen o aumentan según se den las variaciones en la frecuencia. La corriente de arranque disminuye cuando la frecuencia incrementa, por ejemplo, para un incremento de la frecuencia del 5% la corriente de arranque disminuye en igual porcentaje (5%), este comportamiento entre la variación de la frecuencia y la corriente de arranque de un motor de inducción es de forma lineal, por lo tanto, a medida que la frecuencia aumente o disminuya la corriente de arranque lo hará en

igual porcentaje. Para la corriente a plena carga se tiene una pendiente menos pronunciada lo cual indica que las variaciones de la frecuencia no la afectan en gran porcentaje, para un incremento del 5% en la frecuencia la corriente de carga únicamente disminuye aproximadamente el 1% de su valor nominal generando así una disminución en el par a plena carga. Para estos porcentajes véase la Gráfica 2.3.

¿Por qué se genera una disminución en la corriente de arranque y plena carga del motor de inducción al variar la frecuencia? El circuito equivalente para el rotor del motor de inducción es en función de la resistencia del rotor y la reactancia, tal como se muestra en la Figura 3.9.

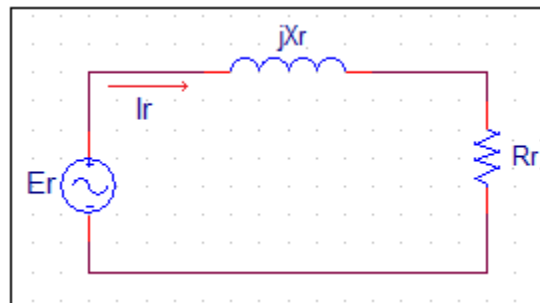


Figura 3.9: Circuito equivalente del rotor.

La reactancia del rotor  $jX_r$  del motor de inducción depende de la inductancia del rotor y de la frecuencia del voltaje y la corriente del rotor. Entonces si la inductancia del rotor es  $L_R$ , la reactancia del rotor está dada por

$$X_r = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R \quad (3.59)$$

El término  $f_r$  hace referencia a la frecuencia del rotor, dicha frecuencia mantiene una relación directamente proporcional a la frecuencia eléctrica del sistema, en este caso 60Hz, también es en función del deslizamiento de la máquina, es decir

$$f_r = S \times f_e (60\text{Hz}) \quad (3.60)$$

Entonces la ecuación para la reactancia del rotor se puede escribir de la siguiente manera,

$$X_r = S \times (2\pi f_e (60\text{Hz}) L_R) \quad (3.61)$$

Por lo tanto, a medida que se generen cambios en la frecuencia del sistema de igual manera lo harán los parámetros eléctricos de la máquina, en este caso la reactancia del rotor. Partiendo entonces del circuito equivalente del rotor se tiene que la corriente en el rotor es



$$I_r = \frac{E_r}{R_r + jX_r} \quad (3.62)$$

Cuando se generan aumentos en la frecuencia la corriente del rotor disminuye debido a que la reactancia del rotor aumente en igual proporción, por lo tanto, el término del denominador crece, haciendo que la corriente disminuya, de manera análoga sucede cuando la frecuencia del sistema disminuye, la reactancia disminuye y para ambos casos la resistencia del rotor se asume constante, la corriente en el rotor aumenta.

### 3.5.2 Efectos sobre la eficiencia del motor de inducción.

Es claro que la eficiencia del motor de inducción es afectada directamente por variaciones en la frecuencia fundamental del sistema eléctrico, en la Gráfica 3.6 se tiene variaciones en la potencia de salida de la máquina debido al cambio en el par a plena carga de la máquina ante dichas variaciones. La Grafica 2.3 establece que si se produce un aumento en la frecuencia del sistema se genera con ello un leve aumento en la eficiencia de la máquina sin embargo si este aumento en la frecuencia crece más allá del 5% la eficiencia del motor cae.

Al tener una disminución en la corriente a plena carga en el motor de inducción las pérdidas de potencia eléctrica  $I^2R$  disminuyen, por lo tanto la potencia de salida en el motor aumenta, generando así que la eficiencia de la máquina aumente en cierto porcentaje, por ejemplo para una variación en la frecuencia del 3% la corriente de carga disminuye en aproximadamente 0.5%, entonces la eficiencia del motor aumenta aproximadamente en 1% en relación a su valor nominal. De manera análoga ocurre para variaciones que generen una disminución en la frecuencia, es decir cuando la corriente de carga aumenta las pérdidas de potencia lo hacen de igual manera, teniendo como efecto una disminución en la potencia de salida y por tanto en la eficiencia de la máquina una variación del -3% genera un aumento en la corriente de aproximadamente 1%, entonces la eficiencia decae aproximadamente en un 0.5% de su valor nominal.

Los porcentajes en los cuales varía la eficiencia cuando se producen cambios en la frecuencia del sistema son menores a los producidos por las fluctuaciones de voltaje. Sin embargo, fenómenos (frecuencia, voltaje) generan costos económicos debido al consumo eléctrico por operar en condiciones anormales, también estos cambios generan un aumento en la temperatura del motor afectando el aislante del devanado del estator de la máquina

eléctrica. Dependiendo la clase del motor así serán el nivel de aislamiento térmico que este soporte. Las variaciones de la corriente de carga son mayores cuando el fenómeno presente en los terminales de la máquina son las fluctuaciones de tensión.

### **3.6 Efectos De La Regulación De Tensión Sobre Los Motores De Inducción.**

Cuando el voltaje en los terminales de los equipos se desvía del valor de placa especificado para cada equipo, el rendimiento y la vida de operación del equipo quedan afectados. El efecto puede ser menor o puede ser grave dependiendo de las características del equipo y la cantidad de variación de voltaje de los valores de placa del equipo. Puede decirse que casi nunca el motor trabaja en sus condiciones nominales de tensión, a veces por encima y a veces por debajo de la tensión nominal.

Aunque la mayoría de las normas internacionales establecen una variación no mayor del 5%, muchas veces hay que considerar variaciones mayores debido a que existe la posibilidad real de que la tensión en algún punto de la red no cumpla la norma. Estas variaciones afectan de manera significativa, por una parte, al sistema mecánico que recibe la energía mecánica convertida a partir de la eléctrica, y, por otra parte, al sistema o red eléctrica encargada del suministro de la energía.

#### **3.6.1 Efecto de la regulación de tensión en la eficiencia de los motores de inducción.**

La variación de voltaje existe cuando hay diferencia entre el voltaje de operación del motor y el voltaje nominal del mismo, esto ocasiona que las características de operación del motor cambien provocando mayores pérdidas y disminuyendo la eficiencia del motor.

La variación de 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:

$$\%AVV = \left[ \frac{\text{Voltaje promedio o entre fases}}{\text{Voltaje nominal}} - 1 \right] \cdot 100 \quad (3.63)$$

Donde el voltaje promedio o voltaje promedio de fases, está dado por la siguiente expresión:

$$V_{\text{promedio}} = \frac{[(V_{1-2}) + (V_{2-3}) + (V_{3-1})]}{3} \quad (3.64)$$

Por lo tanto, el voltaje entre fases será:

$$V_{\text{entre_fases}} = \sqrt{3}V_{\text{promedio}} \quad (3.65)$$

La potencia que el motor entrega en el eje es siempre determinada por la carga que tenga conectada, ese valor de potencia junto con la eficiencia del motor determina la potencia que el motor demanda a la red,  $P_{\text{ent}}$ .

$$P_{\text{ent}} = \sqrt{3}V_L I_L \cos\phi (\text{kW}) \quad (3.66)$$

De la Ecuación 3.57 se observa que si la carga establece la potencia que el motor debe tomar de la red, el valor será constante. En el caso en el que la tensión de operación del motor se aumenta, para que la potencia permanezca constante, la corriente tendrá que disminuir.

La disminución de dicha corriente, que circula por los devanados del motor trae como resultado la disminución en las pérdidas del estator y del rotor. Pero un aumento en el voltaje también puede presentar algunos percances para el funcionamiento del motor, en la mayoría de los casos producen la destrucción del aislante de los devanados, cosa que acaba destruyendo el motor, además de una disminución considerable del factor de potencia.

En caso contrario en que el voltaje de alimentación del motor sea reducido, para suplir la carga conectada, tendrá que aumentar el valor de la corriente, esto refleja que aumentarán las pérdidas del estator y del rotor, disminuyendo la eficiencia.

En la Tabla 3.2 se presenta un resumen de los efectos que sufre el motor cuando se aumenta o disminuye el voltaje de operación:

Característica	Proporcional	Variación de Voltaje	
		90 % placa	110 % placa
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%	+0.2 a 1.0%
Corriente de arranque	Voltaje	-10%	10%
Corriente a Plena Carga	Varía con el diseño	+5 a +10%	-5 a -10%
Corriente Sin Carga	Varía con el diseño	-10 a -30%	+10 a +30%
Aumento de la Temperatura	Varía con el diseño	+10 a +15%	-10 a -15%
Eficiencia a plena carga	Varía con el diseño	-1 a -3%	+1 a +3%
Factor de Potencia a Plena Carga	Varía con el diseño	+3 a +7%	-2 a -7%
Ruido Magnético	Varía con el diseño	Ligera Disminución	Ligero Aumento

Tabla 3.2: Efectos de variación de tensión sobre las características de un motor.<sup>19</sup>

---

<sup>19</sup> Stephen J. Chapman, Máquinas Eléctrica, Tercera edición

## Capítulo 4

### Evaluación de la regulación de tensión en los motores de inducción trifásicos.

Para analizar el efecto que tiene la regulación de tensión en el motor de inducción se selecciona un motor con las siguientes características Tabla 4.1.

<b>Características del motor de inducción trifásico</b>	
Potencia nominal	50 HP
Tensión Nominal	460 V
Frecuencia	60 Hz
RPM	1780
Polos	4
Resistencia del Estator	0.09961 ohm
Reactancia de Estator	0.3268 ohm
Reactancia del núcleo	11.4568 Ohm
Resistencia del Rotor (Referida al estator)	0.05837 ohm
Reactancia del Rotor (Referida al estator)	0.3268 Ohm

Tabla 4.1: Características de un motor de inducción trifásico.

#### 4.1 Determinación de pérdidas.

La potencia de salida disponible en el eje de la máquina considera las pérdidas mecánica de fricción y viento, debido a que los circuitos equivalentes presentados en esta sección no hacen consideración de la resistencia  $R_c$  correspondiente a las pérdidas por fase en el núcleo del motor de inducción, también las pérdidas por fricción y viento son desconocidas para el modelo del motor en estudio. Una forma aproximada para determinar la magnitud de estas pérdidas es realizar una prueba en vacío al motor de inducción. Dicha prueba consiste en alimentar el motor a tensión nominal y con cero cargas en el eje, la potencia absorbida o potencia de entrada en la prueba de vacío es igual a las pérdidas en el cobre del estator, las pérdidas en el núcleo más las pérdidas mecánica o pérdidas por fricción y viento.

$$P_{\text{entrada-vacío}} = P_{\text{Cu esta}} + P_{\text{FE}} + P_{\text{FyV}}$$

La evaluación para determinar pérdidas rotacionales se realiza en Matlab utilizando el entorno grafico SIMULINK la cual contiene las librerías para máquinas de inducción trifásica.

La corriente del estator tiene una magnitud RMS de:

$$I_1 = 23.64 [A]$$

Por tanto, la pérdida en el cobre del estator operando el motor de inducción en vacío tiene un valor de:

$$P_{\text{cu esta}} = 3 * (I_1^+)^2 R_1 = 3 * (23.64)^2 * (0.09961 \Omega)$$

$$P_{\text{cu esta}} = 166.98 [W]$$

Potencia de entrada en vacío.

$$P_{\text{entrada-vacío}} = 1020 [W]$$

Asumiendo que la potencia por pérdidas mecánicas es igual a la pérdida de potencia en el núcleo del motor se tiene que:

$$P_{\text{entrada-vacío}} = P_{\text{cu esta}} + 2 * P_{\text{FE}}$$

$$1020 = 166.98 + 2 * (P_{\text{FE}}) [W]$$

Las pérdidas en el núcleo del motor de inducción son:

$$P_{\text{FE}} = 426.51 [W]$$

Por tanto, las pérdidas de potencia mecánica por fricción y viento son:

$$P_{\text{FyV}} = 426.51 [W]$$

Estos valores de potencia son constantes para el funcionamiento del motor de inducción independientemente del porcentaje de carga conectado en el eje.

## **4.2 Análisis del impacto económico en el motor de inducción trifásico-Regulación de tensión.**

La regulación de tensión se define como el porcentaje del cambio del voltaje de la diferencia del voltaje de nominal de la máquina menos el voltaje de operación.

$$\% \Delta V = \frac{V_{\text{nominal}} - V_{\text{Operación}}}{V_{\text{nominal}}} * 100 \quad (4.1)$$

La Tabla 4.2 muestra la variación de la corriente del estator y rotor en función de los cambios de tensión.

<b>Regulación de Tensión 460 [V]</b>			
<b>%<math>\Delta V</math></b>	<b>V<sub>oper</sub> [V]</b>	<b>I<sub>1</sub> [A]</b>	<b>I<sub>2</sub> [A]</b>
10	414.00	48.59	43.88
9	418.60	48.19	43.69
8	423.20	47.81	42.96
7	427.80	47.48	42.18
6	432.40	47.21	41.43
5	437.00	46.88	40.72
4	441.60	46.63	40.11
3	446.20	46.32	39.95
2	450.80	46.03	39.81
1	455.40	45.71	39.77
<b>0</b>	<b>460.00</b>	<b>45.46</b>	<b>39.64</b>
-1	464.60	45.33	39.22
-2	469.20	45.06	38.84
-3	473.80	44.84	38.23
-4	478.40	44.65	37.90
-5	483.00	44.42	37.27
-6	487.60	44.27	37.06
-7	492.20	44.16	36.54
-8	496.80	43.93	36.32
-9	501.40	43.78	35.48
-10	506.00	43.67	34.83

Tabla 4.2: Variación de la corriente del estator y rotor.

Como se esperaba la corriente en el motor tanto en el estator como en el rotor a medida se incrementa el nivel de tensión por arriba del voltaje nominal las corrientes tienen una reducción todo lo contrario sucede cuando la tensión de alimentación es menor que la nominal las corrientes aumentan y por lo tanto las pérdidas en el cobre se incrementan.

La corriente en el estator con una tensión de +10% se incrementa en un 6.89% respecto a la corriente en condiciones normales alimentando con 460 V

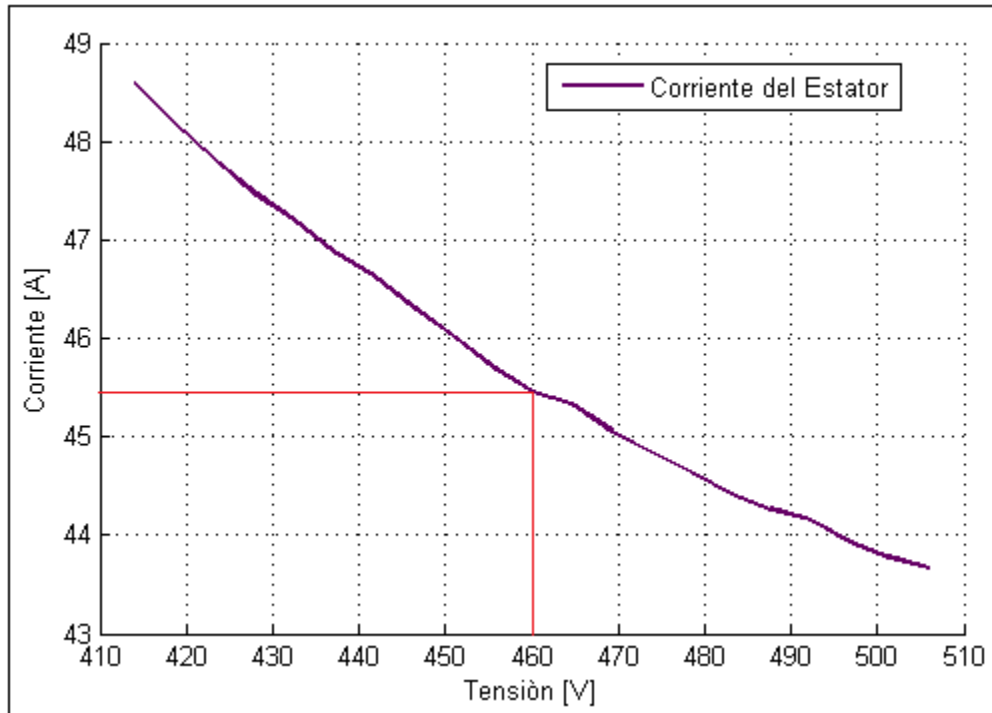


Gráfico 4.1: Corriente del estator en función de la tensión de alimentación.

En el Gráfico 4.1 se tiene el comportamiento de la corriente del estator en el cual se puede apreciar de mejor forma el cambio que tiene la corriente con una regulación de tensión de  $\pm 10\%$  en la alimentación del motor

Las pérdidas en el cobre del estator y rotor se ven afectadas con esta variación de la corriente en el caso de una regulación de tensión negativa las pérdidas tienden a reducirse lo contrario sucede con una regulación positiva las pérdidas aumentan, en la Tabla 4.3 se tienen las pérdidas que se obtuvieron con el cambio que presenta la corriente.

$\% \Delta V$	$V_{oper}$ [V]	$P_{cu Est}$ [W]	$P_{cu Rot}$ [W]
10	414.00	705.60	337.21
9	418.60	693.95	334.18
8	423.20	683.19	323.23
7	427.80	673.53	311.53
6	432.40	665.93	300.56
5	437.00	656.78	290.28
4	441.60	649.67	281.78
3	446.20	641.03	279.50
2	450.80	633.22	277.52
1	455.40	624.31	276.93
<b>0</b>	<b>460.00</b>	<b>617.56</b>	<b>275.16</b>



-1	464.60	614.11	269.30
-2	469.20	606.66	264.18
-3	473.80	600.96	255.97
-4	478.40	595.67	251.54
-5	483.00	589.64	243.26
-6	487.60	585.71	240.50
-7	492.20	582.72	233.84
-8	496.80	576.76	230.96
-9	501.40	572.87	220.38
-10	506.00	569.91	212.37

Tabla 4.3: Pérdidas del estator y rotor.

En el Grafico 4.2 se tiene una mejor apreciación de como las pérdidas en el cobre se ven afectadas con la regulación de la tensión; en el Grafico 4.1 se tiene las pérdidas en el cobre del estator y rotor.

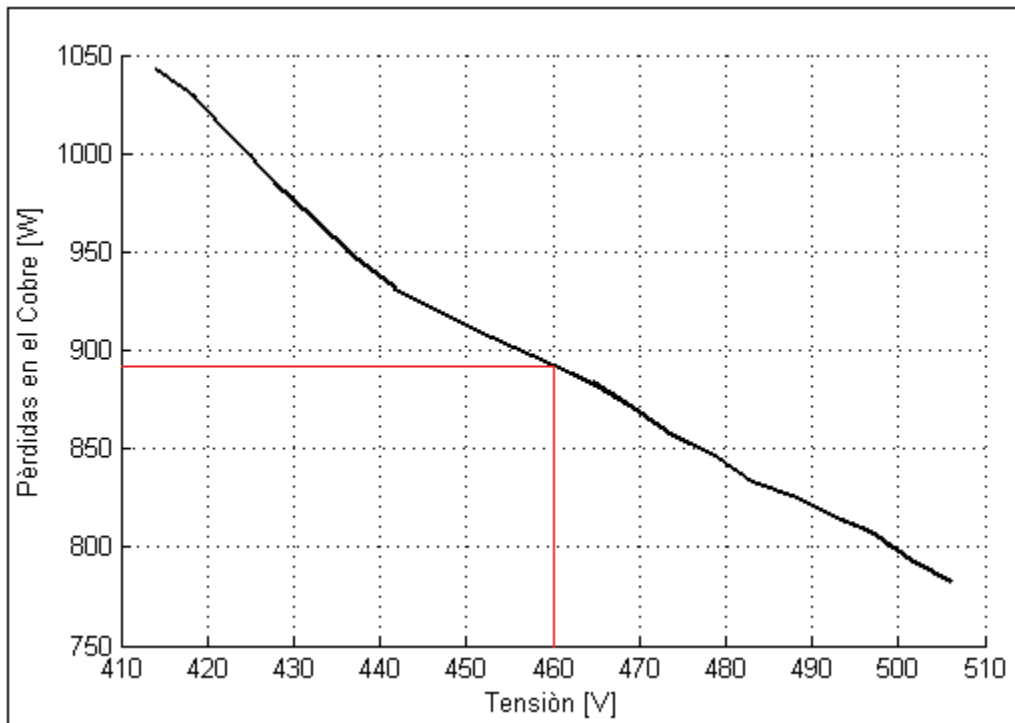


Gráfico 4.2: Comportamiento de las pérdidas del estator y rotor.

Con el incremento de las pérdidas la potencia que el motor demanda a la entrada se incrementa (Véase la Tabla 4.4).

La potencia de salida está determinada:

$$P_{\text{salida}} = P_{\text{conv}} - P_{\text{FyV}}$$

La potencia de la entrada se determina.

$$P_{\text{entrada}} = P_{\text{salida}} + P_{\text{FyV}} + P_{\text{nucleo}} + P_{\text{cuEst}} + P_{\text{cuRot}}$$

%ΔV	V <sub>oper</sub> [V]	P <sub>cov</sub> [W]	P <sub>salida</sub> [W]	P <sub>entrada</sub> [W]	η [%]
<b>10</b>	414.00	28391.18	27964.67	29860.51	93.65
<b>9</b>	418.60	28391.18	27964.67	29845.81	93.70
<b>8</b>	423.20	28391.18	27964.67	29824.12	93.77
<b>7</b>	427.80	28391.18	27964.67	29802.75	93.83
<b>6</b>	432.40	28391.18	27964.67	29784.18	93.89
<b>5</b>	437.00	28391.18	27964.67	29764.76	93.95
<b>4</b>	441.60	28391.18	27964.67	29749.14	94.00
<b>3</b>	446.20	28391.18	27964.67	29738.22	94.04
<b>2</b>	450.80	28391.18	27964.67	29728.43	94.07
<b>1</b>	455.40	28391.18	27964.67	29718.93	94.10
<b>0</b>	<b>460.00</b>	28391.18	<b>27964.67</b>	<b>29710.41</b>	<b>94.12</b>
<b>-1</b>	464.60	28391.18	27964.67	29701.10	94.15
<b>-2</b>	469.20	28391.18	27964.67	29688.53	94.19
<b>-3</b>	473.80	28391.18	27964.67	29674.62	94.24
<b>-4</b>	478.40	28391.18	27964.67	29664.90	94.27
<b>-5</b>	483.00	28391.18	27964.67	29650.59	94.31
<b>-6</b>	487.60	28391.18	27964.67	29643.90	94.34
<b>-7</b>	492.20	28391.18	27964.67	29634.25	94.37
<b>-8</b>	496.80	28391.18	27964.67	29625.41	94.39
<b>-9</b>	501.40	28391.18	27964.67	29610.94	94.44
<b>-10</b>	506.00	28391.18	27964.67	29599.97	94.48

Tabla 4.4: Potencia de salida y potencia de entrada

Por el incremento en las pérdidas en el cobre cuando tenemos regulación positiva la potencia a la entrada se incrementa por lo que la eficiencia disminuye y la carga del motor se incrementa (Véase la Tabla 4.4) y cuando tenemos regulación negativa las pérdidas en el cobre se reducen y la carga en el motor también lo hace, la eficiencia se mejora.

En la Tabla 4.5 se tiene el incremento de las pérdidas y la energía extra que consumen el motor cuando la tensión de alimentación es menor que la nominal.

$\% \Delta V$	$V_{oper}$ [V]	Incremento en las pérdidas [W]	Incremento en la energía consumida en un mes [kWh]	Incremento en la energía consumida en un año [kWh]
10	414.00	150.09	108.07	1314.81
9	418.60	135.40	97.49	1186.10
8	423.20	113.70	81.87	996.05
7	427.80	92.34	66.48	808.88
6	432.40	73.76	53.11	646.15
5	437.00	54.34	39.13	476.04
4	441.60	38.72	27.88	339.21
3	446.20	27.80	20.02	243.54
2	450.80	18.02	12.97	157.86
1	455.40	8.51	6.13	74.57

Tabla 4.5: Incremento de la energía en función de la regulación de tensión.

Como los damos cuenta las pérdidas en la operación del motor con una regulación positiva, las pérdidas en un mes operando las 24 horas son considerables con una regulación de 10% en la tensión nominal de alimentación del motor se tiene 108.07 kWh en pérdidas, en un año las pérdidas alcanzan 1314.81 kWh, los cuales tienen un efecto considerable en los costos de operación del motor (Véase la Tabla 4.8).

En la Tabla 4.6 se tiene la reducción que presenta las pérdidas con una regulación negativa.

$\% \Delta V$	$V_{oper}$ [V]	Disminución en las pérdidas [W]	Reducción en la energía consumida en un mes [kWh]	Reducción en la energía consumida en un año [kWh]
-1	464.60	9.31	6.70	81.57
-2	469.20	21.88	15.76	191.70
-3	473.80	35.79	25.77	313.52
-4	478.40	45.52	32.77	398.71
-5	483.00	59.82	43.07	524.04
-6	487.60	66.52	47.89	582.70
-7	492.20	76.16	54.84	667.17
-8	496.80	85.00	61.20	744.64
-9	501.40	99.48	71.62	871.40
-10	506.00	110.44	79.52	967.46

Tabla 4.6: Reducción en las pérdidas en función de la regulación de tensión.

Cuando la tensión de alimentación del motor es mayor que el voltaje nominal, se tiene una ventaja porque reducir las pérdidas en el cobre del motor y la potencia consumida es menor para un mes de operación se puede tener una disminución de 79.52 kWh operado las 24 hora y en un año de 967.46 kWh con una regulación de 10% hay que tener en cuenta que la normas NEMA MG-1 recomienda que la regulación de tensión en la alimentación del motor se encuentre entre  $\pm 10\%$  (Véase la Tabla 2.1).

#### 4.2.1 Evaluación Económica

Para realizar la evaluación económica se tomas los precios de la energía vigentes actualmente en el país los cuales se pueden en contra en el sitio web de la SIGET, los precios de la energía para gran demanda vigentes del 15 de abril del 2018 (Tabla 4.7).

CAESS	\$/kWh
Energía en punta	0,152137
Energía en Resto	0,146683
Energía en Valle	0,152125
Promedio	0,150315

Tabla 4.7: Costo de energía

Se tomará el promedio del precio de la energía porque los costos pueden cambiar tiempo y solo se busca tener una percepción en el consumo del motor bajo esto el efecto de regulación de tensión y desbalance.

Los costos de operación se determinan con la siguiente expresión:

$$\Delta\$ = 0.746 \times HP \times L \times N \times C \times 1/E$$

Dónde: 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.

Reestructurando la ecuación para establecer los costos de operación en función de la energía extra consumida por el motor eléctrico:

$$\text{Costo de operación} = (\text{energía consumida(extra) [kwh]}) \left( \text{Precio} \left[ \frac{\$}{\text{kWh}} \right] \right)$$

El incremento en el costo de operación del motor se obtiene con la energía que el motor consume extra que cuando el motor se encuentra alimentado con el voltaje nominal correspondiente a su placa.

En la Tabla 4.8 se tiene el incremento en el costo de operación del motor con la regulación detención correspondiente.

$\% \Delta V$	$V_{\text{oper}} [\text{V}]$	Incremento en la energía consumida en un mes [kWh]	Incremento en la energía consumida en un año [kWh]	Incremento en el Costo de operación del motor [\$/mes]	Incremento en el Costo de operación del motor [\$/año]
10	414.00	108.07	1314.81	16.24	197.64
9	418.60	97.49	1186.10	14.65	178.29
8	423.20	81.87	996.05	12.31	149.72
7	427.80	66.48	808.88	9.99	121.59
6	432.40	53.11	646.15	7.98	97.13
5	437.00	39.13	476.04	5.88	71.56
4	441.60	27.88	339.21	4.19	50.99
3	446.20	20.02	243.54	3.01	36.61
2	450.80	12.97	157.86	1.95	23.73
1	455.40	6.13	74.57	0.92	11.21

Tabla 4.8: Costo de operación del motor.

Los costos de operación en un mes de operación se incrementan en \$ 9.99 con una regulación de tensión de 7% y en un año en \$121.59, recordando que la norma del país (SIGET) permite este límite en regulación de tensión.

Lo contrario sucede con una regulación de tensión negativa porque reduces las pérdidas y los costos de operación baja Tabla 4.9.

% $\Delta V$	$V_{oper}$ [V]	Reducción en la energía consumida en un mes [kWh]	Reducción en la energía consumida en un año [kWh]	Reducción en el Costo de operación del motor [\$/mes]	Reducción en el Costo de operación del motor [\$/año]
-1	464.60	6.70	81.57	1.01	12.26
-2	469.20	15.76	191.70	2.37	28.81
-3	473.80	25.77	313.52	3.87	47.13
-4	478.40	32.77	398.71	4.93	59.93
-5	483.00	43.07	524.04	6.47	78.77
-6	487.60	47.89	582.70	7.20	87.59
-7	492.20	54.84	667.17	8.24	100.29
-8	496.80	61.20	744.64	9.20	111.93
-9	501.40	71.62	871.40	10.77	130.99
-10	506.00	79.52	967.46	11.95	145.42

Tabla 4.9: Ahorro en el costo de operación por regulación de tensión Negativa.

Con una regulación de tensión Negativa se consigue reducir las pérdidas en el cobre por lo que el costo de operación en el motor disminuye.

Esto es para un solo motor, pero si consideramos que en una empresa se tiene 5 motores con las mismas características y alimentados con una regulación de tensión positiva los costos son considerables Tabla 4.10.

Incremento en el Costo de operación del motor								
% $\Delta V$	2 motor		3 motor		4 motor		5 motor	
	\$/mes	\$/año	\$/mes	\$/año	\$/mes	\$/año	\$/mes	\$/año
10	32.49	395.27	48.73	592.91	64.98	790.54	81.22	988.18
9	29.31	356.58	43.96	534.87	58.62	713.16	73.27	891.44
8	24.61	299.44	36.92	449.16	49.22	598.89	61.53	748.61
7	19.99	243.17	29.98	364.76	39.97	486.34	49.97	607.93
6	15.97	194.25	23.95	291.38	31.93	388.50	39.91	485.63
5	11.76	143.11	17.64	214.67	23.53	286.23	29.41	357.78
4	8.38	101.98	12.57	152.97	16.76	203.95	20.95	254.94
3	6.02	73.22	9.03	109.82	12.04	146.43	15.04	183.04
2	3.90	47.46	5.85	71.19	7.80	94.92	9.75	118.64
1	1.84	22.42	2.76	33.63	3.69	44.83	4.61	56.04

Tabla 4.10: Costo de operación para 5 motores de inducción de 50 HP/460 VLL

El costo de operación para 5 motores ya es considerable \$ 607.93 en el año operando las 24 hora con el 7% de regulación de tensión, con 10% los costos de operación se incrementan a \$ 988.18.

### 4.3 Análisis del impacto económico en el motor de inducción trifásico con la presencia de desbalance de tensión en el sistema de la red eléctrica.

#### 4.3.1 Cálculo del porcentaje de desbalance de tensión.

La norma IEC establece que el porcentaje de desbalance de tensión es en función de la componente de secuencia negativa y la componente de secuencia positiva de los voltajes línea-neutro que componen el sistema trifásico, por tanto el objetivo de esta sección es calcular el porcentaje de desbalance en el sistema de alimentación eléctrico basado en el método de las componentes simétricas presentes en un sistema trifásico desbalanceado para luego estimar las pérdidas de potencia eléctrica y calcular las variaciones en la eficiencia de la máquina. La representación de las tensiones trifásicas desequilibradas del sistema genera tres conjuntos de tensiones simétricas equilibradas las cuales se analizan de manera independiente para luego determinar el resultado final. Las amplitudes de las tensiones de secuencia positiva, negativa y cero no son iguales entre si y dependen del grado de desbalance que presenten las tensiones. La Tabla 4.11 muestra las componentes simétricas para un sistema desbalanceado.

Voltaje L-N	Secuencia Positiva	Secuencia Negativa	Secuencia Homopolar
$V_{aN}$	$V_{aN}^+$	$V_{aN}^-$	$V_{aN}^0$
$V_{bN}$	$V_{bN}^+ = a^2 * V_{aN}^+$	$V_{bN}^- = a * V_{aN}^-$	$V_{bN}^0 = V_{aN}^0$
$V_{cN}$	$V_{cN}^+ = a * V_{aN}^+$	$V_{cN}^- = a^2 * V_{aN}^-$	$V_{cN}^0 = V_{aN}^0$

Tabla 4.11: Componente de la secuencia positiva, negativa y secuencia cero.

La componente de secuencia homopolar no es considerada debido a que los motores de inducción en general son conectados a la red de alimentación en delta y en algunos casos conexión en estrella no aterrizada lo cual hace que no circulen componente de secuencia cero por los devanados del motor de inducción trifásico.

El factor "a" representa el vector de giro  $a = 1 \angle 120^\circ \cong -0.5 + 0.866j$  y  $a^2 = 1 \angle -120^\circ \cong -0.5 - 0.866j$ . Este vector posee la unidad como magnitud y orientado a  $120^\circ$  en dirección positiva. Cuando un vector o en este caso una fase del sistema trifásico se multiplica por "a" no cambia de magnitud pero si de ángulo, es girado en sentido anti horario  $120^\circ$ .

Los voltajes Línea-neutro son expresados en términos de las componentes de secuencia positiva, negativa y cero como:

$$V_{aN} = V_{aN}^+ + V_{aN}^- + V_{aN}^0 \quad (4.6)$$

$$V_{bN} = a^2 * V_{aN}^+ + a * V_{aN}^- + V_{aN}^0 \quad (4.7)$$

$$V_{cN} = a * V_{aN}^+ + a^2 * V_{aN}^- + V_{aN}^0 \quad (4.8)$$

#### 4.3.2 Magnitud de las componentes simétricas.

La Ecuación 4.7 se multiplica por el vector de giro "a" para obtener la rotación en 120° del fasor original correspondiente a la fase b.

$$a * V_{bN} = a^3 * V_{aN}^+ + a^2 * V_{aN}^- + a * V_{aN}^0$$

$$a * V_{bN} = V_{aN}^+ + a^2 * V_{aN}^- + a * V_{aN}^0$$

Para la rotación de la fase c se multiplica la Ecuación 4.8 por el vector de giro  $a^2$  tal como se muestra.

$$a^2 * V_{cN} = a^3 * V_{aN}^+ + a^4 * V_{aN}^- + a^2 * V_{aN}^0$$

$$a^2 * V_{cN} = V_{aN}^+ + a * V_{aN}^- + a^2 * V_{aN}^0$$

Por tanto la magnitud del voltaje para la componente de secuencia positiva es expresado en la Ecuación 4.9, la propiedad  $1 + a + a^2$  hace que la sumatoria de las componentes simétricas sea igual a cero, por lo tanto:

$$V_{aN} = V_{aN}^+ + V_{aN}^- + V_{aN}^0$$

$$a * V_{bN} = V_{aN}^+ + a^2 * V_{aN}^- + a * V_{aN}^0$$

$$a^2 * V_{cN} = V_{aN}^+ + a * V_{aN}^- + a^2 * V_{aN}^0$$

$$V_{aN} + a * V_{bN} + a^2 * V_{cN} = 3 * V^+ \quad (4.9)$$

Para la secuencia negativa se multiplica la fase b por el vector de giro  $a^2$  para hacer girar los fasores del sistema trifásico en secuencia A-C-B

$$a^2 * V_{bN} = a^4 * V_{aN}^+ + a^3 * V_{aN}^- + a^2 * V_{aN}^0$$

$$a^2 * V_{bN} = a * V_{aN}^+ + V_{aN}^- + a^2 * V_{aN}^0$$

El vector de la fase c se gira 120° es decir, el vector de giro  $a$



$$a * V_{cN} = a^2 * V_{aN}^+ + a^3 * V_{aN}^- + a * V_{aN}^0$$

$$a * V_{cN} = a^2 * V_{aN}^+ + V_{aN}^- + a * V_{aN}^0$$

Por tanto la magnitud de la componente de secuencia negativa se obtiene de la Ecuación 4.10:

$$V_{aN} = V_{aN}^+ + V_{aN}^- + V_{aN}^0$$

$$a^2 * V_{bN} = a * V_{aN}^+ + V_{aN}^- + a^2 * V_{aN}^0$$

$$a * V_{cN} = a^2 * V_{aN}^+ + V_{aN}^- + a * V_{aN}^0$$

$$V_{aN} + a^2 * V_{bN} + a * V_{cN} = 3 * V^- \quad (4.10)$$

Apartir de las Ecuaciones 4.6, 4.9 y 4.10 se determinan los fasores de las componente de secuencia positiva, negativa y cero en función de los voltajes Línea-Neutro para un sistema trifásico desbalanceado.

$$V^+ = \frac{V_{aN} + a * V_{bN} + a^2 * V_{cN}}{3} \quad (4.11)$$

$$V^- = \frac{V_{aN} + a^2 * V_{bN} + a * V_{cN}}{3} \quad (4.12)$$

$$V^0 = \frac{V_{aN} + V_{cN} + V_{cN}}{3} \quad (4.13)$$

### 4.3.3 Análisis del motor de inducción con desbalance de tensión.

El circuito de la Figura 3.3 considera la resistencia en el núcleo  $R_c$  correspondientes a las perdidas de núcleo, para este analisis no se calculan las perdidas en base a la ecuación  $P_{nucleo} = 3E_1^2 G_c$ , para ello se utilizan los resultados obtenidos de la prueba de vacio de la sección anterior, por lo tanto el circuito se reduce al mostrado en la Figura 4.1 que corresponde al circuito equivalente de secuencia positiva.

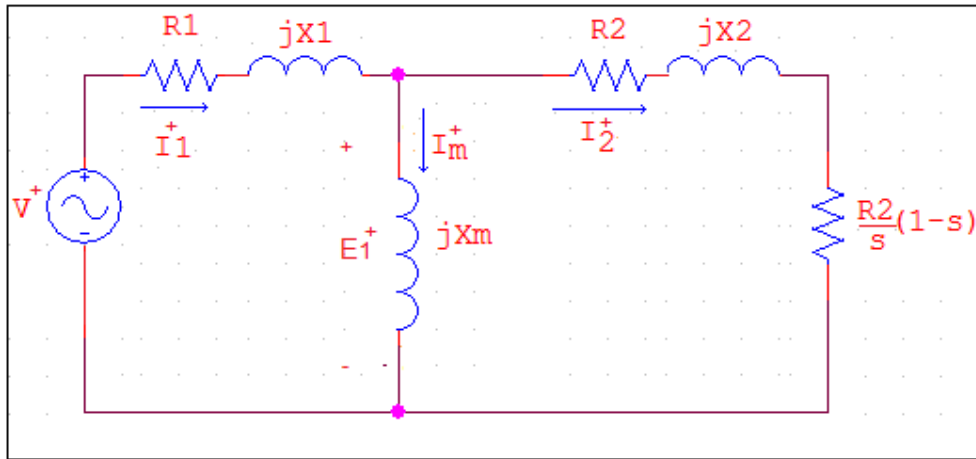


Figura 4.1: Circuito equivalente de secuencia positiva sin pérdidas en el núcleo.

El circuito de la Figura 3.4 también muestra la resistencia  $R_C$  por lo cual en el circuito de secuencia negativa de la Figura 4.2 se anula dicha resistencia. La resistencia de carga es ahora dividida por un factor  $(2 - S)$  en función del deslizamiento ( $S$ ) en condiciones normales de operación (0% de desbalance), el resultado obtenido corresponde al deslizamiento de la componente de secuencia negativa ( $S^-$ ) que el motor experimenta cuando es alimentado con tensiones desbalanceadas, la Ecuación 3.5 muestra el desarrollo para obtener la magnitud de este deslizamiento. La potencia mecánica desarrollada por el motor de inducción para este tipo de deslizamiento es negativa, por lo cual el motor de inducción experimenta una carga extra en el eje, tal como se determina más adelante. Al estar presente dos componente simétricas en los terminales de alimentación del motor de inducción se puede analizar la máquina por superposición, es decir alimentar la máquina a secuencia negativa y estimar todas las pérdidas correspondientes al flujo de corriente positiva  $I_1^+$ , luego analizar para la componente de secuencia negativa y los efectos que produce la corriente  $I_1^-$  sobre el rendimiento de la máquina. La Figura 4.2 muestra el circuito equivalente a secuencia negativa.

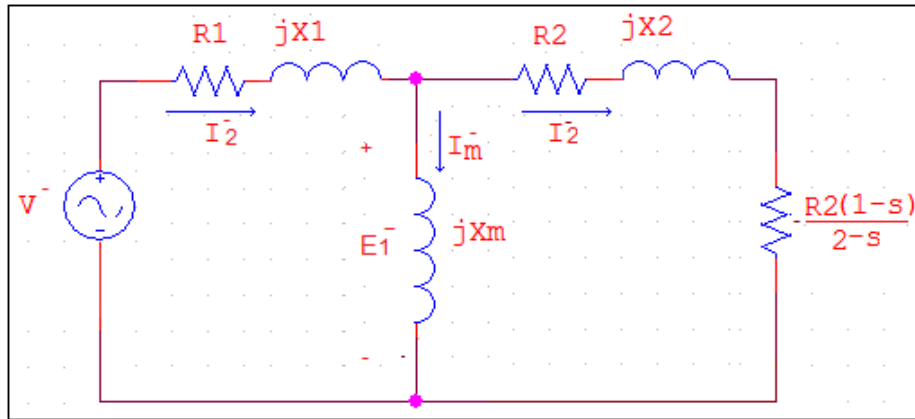


Figura 4.2: Circuito equivalente de secuencia negativa sin pérdidas en el núcleo.

De la Figura 4.1 y Figura 4.2 se determina la magnitud y ángulo de la corriente por fase que fluye por el devanado del estator para tensiones desbalanceadas, por lo tanto se reduce el circuito a una impedancia equivalente total del motor de inducción.

#### 4.3.3.1 Corriente del estator para secuencia positiva.

$$I_1^+ = \frac{V_1^+}{Z_T^+} \quad (4.14)$$

En donde  $Z_T^+$  corresponde a la impedancia equivalente del motor:

$$Z_T^+ = Z_{\text{estator}} + \frac{1}{Z_{\text{rotor}}^+}$$

$$Z_T^+ = (R_1 + jX_1) + \frac{1}{\frac{1}{jX_m} + \frac{1}{\frac{R_2}{S} + jX_2}}$$

#### 4.3.3.2 Corriente del estator para secuencia Negativa.

$$I_1^- = \frac{V_1^-}{Z_T^-} \quad (4.15)$$

Donde:

$$Z_T^- = (R_1 + jX_1) + \frac{1}{\frac{1}{jX_m} + \frac{1}{jX_2 + \frac{R_2}{2-S}}}$$

La corriente del rotor se calcula de forma aproximada utilizando un divisor de corriente, con lo cual se obtiene la magnitud y ángulo por fase de las corrientes rotoricas.

#### 4.3.3.3 Corriente por fase del rotor a secuencia positiva.

$$I_2^+ = I_1^+ * \frac{jX_m}{\frac{R_2}{s} + j(X_2 + X_m)} \quad (4.16)$$

#### 4.3.3.4 Corriente por fase del rotor a secuencia negativa.

$$I_2^- = I_1^- * \frac{jX_m}{\left(\frac{R_2}{2-s}\right) + j(X_2 + X_m)} \quad (4.17)$$

Las pérdidas de potencia eléctrica tiene un relación directamente proporcional con las variaciones en la corriente de estator y rotor, mientras mayor sea la magnitud de las pérdidas menor será la eficiencia o el rendimiento del motor de inducción. La corriente de secuencia negativa que fluye por el rotor es menor en magnitud en comparación con la corriente de secuencia positiva.

En el capítulo 3 se establecen las ecuaciones para determinar las pérdidas de potencia en el motor de inducción a secuencia positiva y negativa.

#### 4.3.4 Sistema trifásico balanceado.

Los voltajes línea-línea para un sistema balanceado (0% de desbalance) es el mostrado en la Tabla 4.12.

$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$	$V_{aN}$	$V_{bN}$	$V_{cN}$
460 V	460 V	460 V	265.58 V	265.58 V	265.58 V

Tabla 4.12: Voltaje de Línea- Línea y Línea Neutro.

Cuando un sistema trifásico es balanceado la magnitud de cada una de sus fases (a-b-c) poseen igual magnitud pero desfasa  $120^\circ$  eléctricos una con respecto a la otra, por lo tanto para el sistema de secuencia positiva se tiene que los ángulos para cada una de las fases es, las componente de secuencia negativa aproximadamente igual a cero:

$$V_{aN} = 265.58 \angle 0^\circ$$

$$V_{bN} = 265.58 \angle 240^\circ$$

$$V_{cN} = 265.58 \angle 120^\circ$$

Es de tomar en consideración que estos son valores RMS de las señales de voltaje. Por lo tanto la Gráfica 4.3 se muestra el sistema trifásico para una red balanceada.

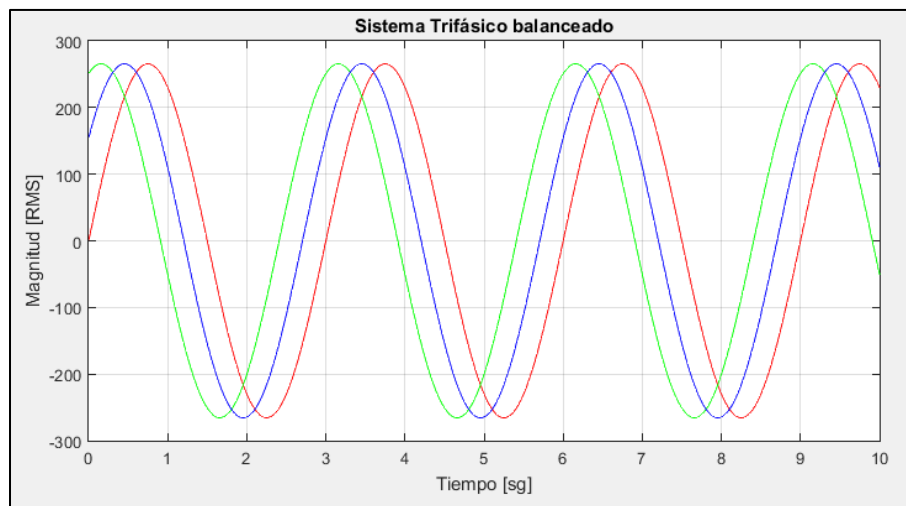


Gráfico 4.3: Forma de onda para un sistema trifásico balanceado.

#### 4.3.5 Sistema trifásico desbalanceado.

En esta sección se presenta la Tabla 4.13 en la cual se detallan los voltajes línea-neutro que generan el desbalance en la red de alimentación. Los porcentajes de desbalance a los cuales será sometido el motor de inducción trifásico serán del 1% al 10%. Las normas internacionales tanto IEC, NEMA MG-1 e IEEE recomiendan operar el motor de inducción con un máximo del 5% de desbalance, pero se evalúa la máquina arriba del 5% recomendado como casos críticos de desbalance a los cuales el motor está operando y establecer así los costos de operación con esa calidad del suministro eléctrico.

Aplicando las Ecuaciones 4.11 y 4.12 se obtienen las magnitudes y ángulos de las componentes de secuencia positiva y negativa para las diferentes tensiones de línea-neutro de la Tabla 4.13. El valor absoluto de la relación de la secuencia negativa entre la secuencia positiva proporciona el porcentaje de desbalance que está presente en la red eléctrica o en el punto de entrega al usuario, sin embargo, no necesariamente se deben cumplir los valores de tensión presentados para obtener un determinado desbalance de tensión, una gran cantidad de combinaciones pueden proporcionar un mismo porcentaje de desbalance. Existen diferentes formas por medio de las cuales se puede producir el desbalance, por mencionar algunas como:

- Desbalance por caída de tensión en una fase
- Desbalance por caída de tensión en dos fases.
- Desbalance por caída de tensión en tres fases.
- Desbalance por sobretensión en una fase.
- Desbalance por sobretensión en dos fases.
- Desbalance por sobretensión en tres fases.
- Desbalance por desfase de ángulo de una fase.
- Desbalance por desfase de ángulo de dos fases.

Para la Tabla 4.13 algunos porcentajes de desbalance son generados por sobretensión en una y dos fases, en otros casos son producidos por el desfase de ángulo de una o dos fases, etc. Por lo tanto el sistema eléctrico puede presentar cualquiera de estos tipos de desbalances mencionados. En la Gráfica 4.4, Gráfica 4.5, Gráfica 4.6 se muestra el comportamiento de la forma de onda para los desbalances de 3%, 5%, 10% respectivamente.

Desbalance		VLN $\angle \phi^0$ [V]	VLL $\angle \phi^0$ [V]	
1%	V <sub>aN</sub>	265.58 $\angle$ 0	V <sub>ab</sub>	464.512 $\angle$ 30.463
	V <sub>bN</sub>	271.35 $\angle$ - 119.79	V <sub>bc</sub>	460.508 $\angle$ - 90.486
	V <sub>cN</sub>	260.30 $\angle$ 120.19	V <sub>ca</sub>	455.871 $\angle$ 150.426
2%	V <sub>aN</sub>	265.58 $\angle$ 0	V <sub>ab</sub>	469.250 $\angle$ 30.401
	V <sub>bN</sub>	282.17 $\angle$ - 120.37	V <sub>bc</sub>	459.087 $\angle$ - 91.155
	V <sub>cN</sub>	256.81 $\angle$ 120.39	V <sub>ac</sub>	453.299 $\angle$ 150.745
3%	V <sub>aN</sub>	262.58 $\angle$ 0	V <sub>ab</sub>	471.318 $\angle$ 31.310
	V <sub>bN</sub>	282.17 $\angle$ - 119.77	V <sub>bc</sub>	462.197 $\angle$ - 91.488
	V <sub>cN</sub>	252.09 $\angle$ 120.54	V <sub>ac</sub>	446.995 $\angle$ 150.938
4%	V <sub>aN</sub>	264.00 $\angle$ 1	V <sub>ab</sub>	478.637 $\angle$ 30.863
	V <sub>bN</sub>	282.18 $\angle$ - 121.37	V <sub>bc</sub>	461.458 $\angle$ - 92.436
	V <sub>cN</sub>	254.27 $\angle$ 120.04	V <sub>ac</sub>	446.675 $\angle$ 151.153
5%	V <sub>aN</sub>	271.29 $\angle$ 2.40	V <sub>ab</sub>	484.629 $\angle$ 29.592
	V <sub>bN</sub>	273.17 $\angle$ - 123.40	V <sub>bc</sub>	449.048 $\angle$ - 92.727
	V <sub>cN</sub>	255.45 $\angle$ 120.33	V <sub>ac</sub>	451.459 $\angle$ 152.391
6%	V <sub>aN</sub>	273.69 $\angle$ 3.30	V <sub>ab</sub>	489.014 $\angle$ 30.00
	V <sub>bN</sub>	273.69 $\angle$ - 123.30	V <sub>bc</sub>	445.879 $\angle$ - 92.592
	V <sub>cN</sub>	252.73 $\angle$ 120.98	V <sub>ac</sub>	450.603 $\angle$ 153.520
7%	V <sub>aN</sub>	277.29 $\angle$ 4.70	V <sub>ab</sub>	491.246 $\angle$ 32.350
	V <sub>bN</sub>	277.29 $\angle$ - 120	V <sub>bc</sub>	451.582 $\angle$ - 92.413
	V <sub>cN</sub>	242.59 $\angle$ 119.55	V <sub>ac</sub>	438.487 $\angle$ 154.566
8%	V <sub>aN</sub>	277.29 $\angle$ 4.70	V <sub>ab</sub>	495.779 $\angle$ 32.019
	V <sub>bN</sub>	280.01 $\angle$ - 120.95	V <sub>bc</sub>	464.512 $\angle$ 30.463
	V <sub>cN</sub>	240.64 $\angle$ 118.72	V <sub>ac</sub>	452.073 $\angle$ - 93.598
9%	V <sub>aN</sub>	278.06 $\angle$ 6.34	V <sub>ab</sub>	498.324 $\angle$ 33.613
	V <sub>bN</sub>	281.63 $\angle$ - 119.49	V <sub>bc</sub>	457.012 $\angle$ - 93.453
	V <sub>cN</sub>	238.51 $\angle$ 117.77	V <sub>ac</sub>	427.381 $\angle$ 155.044
10%	V <sub>aN</sub>	265.33 $\angle$ 4.91	V <sub>ab</sub>	507.145 $\angle$ 29.236
	V <sub>bN</sub>	286.99 $\angle$ - 128.38	V <sub>bc</sub>	433.625 $\angle$ - 94.940
	V <sub>cN</sub>	250.41 $\angle$ 124.23	V <sub>ac</sub>	445.155 $\angle$ 155.540

Tabla 4.13: Tensión de voltaje con desbalance.

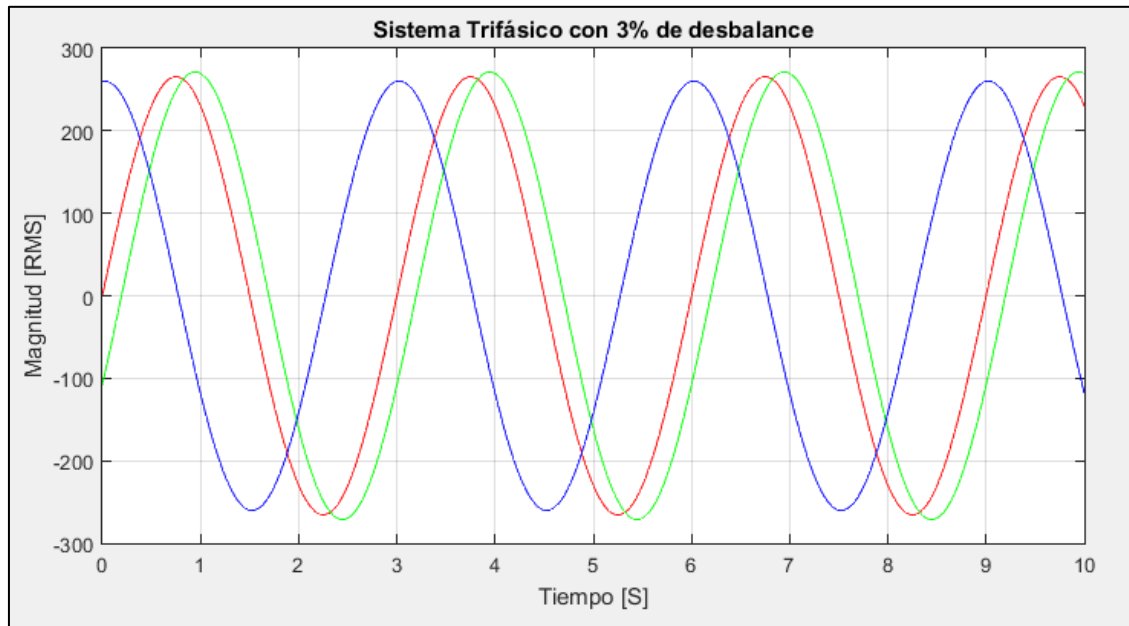


Gráfico 4.4: Forma de onda con desbalance del 3%

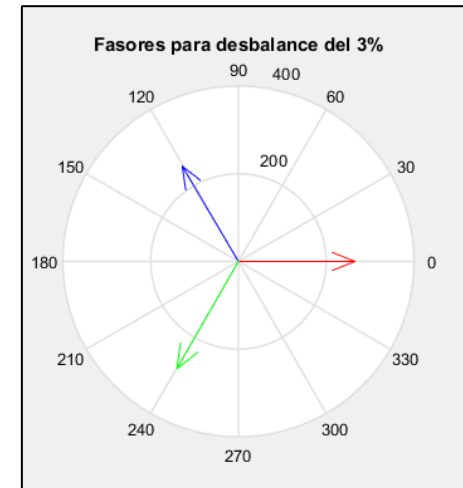


Figura 4.3: Fasores con desbalance del 3%



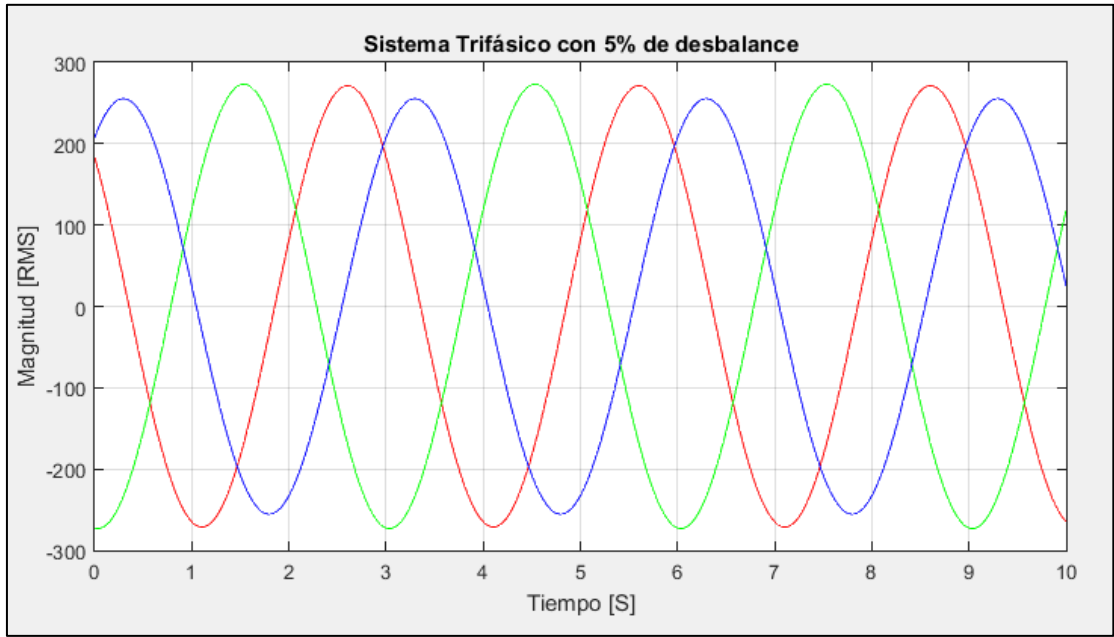


Gráfico 4.5: Forma de onda con desbalance del 5%

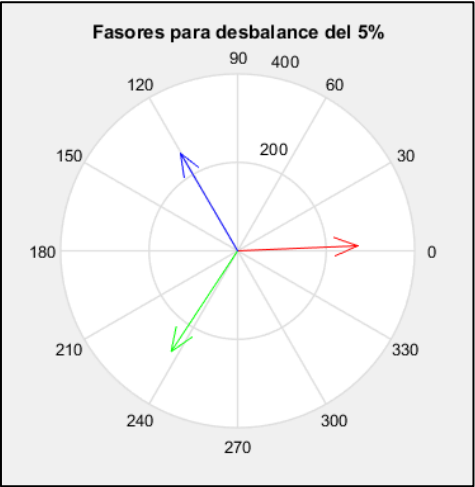


Figura 4.4: Fasores con desbalance del 5%

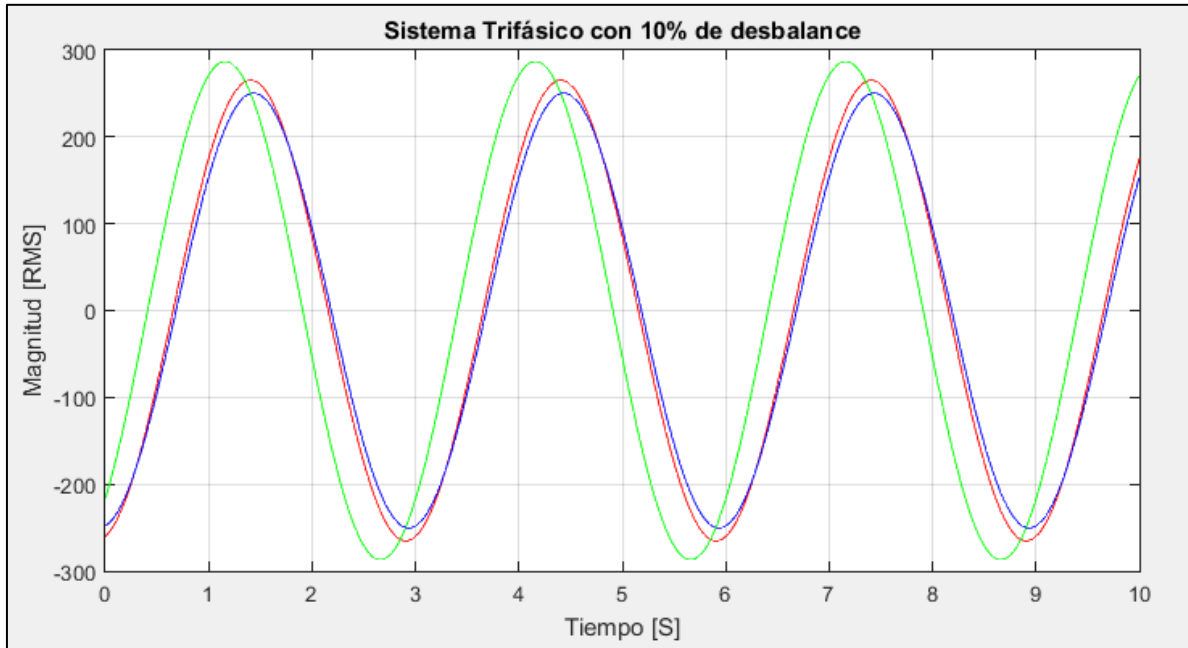


Gráfico 4.6: Forma de onda con desbalance del 10%

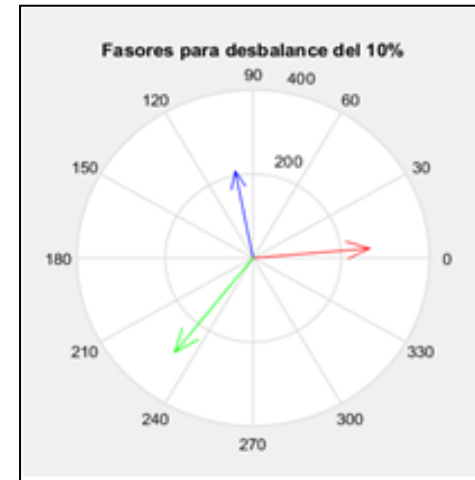


Figura 4.5: Fasores con desbalance del 10%

La Tabla 4.14 muestra la magnitud y ángulo de las componentes de secuencia positiva y negativa, y el porcentaje de desbalance que se tiene en el sistema de alimentación con el cual es operado el motor de inducción trifásico de 50 HP/460 VLL

Desbalance	$V^+ \angle \theta^0$ [V]	$V^- \angle \theta^0$ [V]
0%	265.58 $\angle$ 0	0 $\angle$ 0
1%	265.58 $\angle$ 0	2.88 $\angle$ 92.32
2%	265.58 $\angle$ 0	5.40 $\angle$ 80.70
3%	265.58 $\angle$ 0	8.18 $\angle$ 98.07
4%	265.58 $\angle$ 0	10.68 $\angle$ 86.79
5%	265.58 $\angle$ 0	13.43 $\angle$ 56.39
6%	265.58 $\angle$ 0	16.01 $\angle$ 54.82
7%	265.58 $\angle$ 0	18.58 $\angle$ 74.63
8%	265.58 $\angle$ 0	21.25 $\angle$ 75.97
9%	265.58 $\angle$ 0	23.96 $\angle$ 85.06
10%	265.58 $\angle$ 0	27.03 $\angle$ 52.15

Tabla 4.14: Componentes simétricas.

Con las componentes simétricas calculadas se determina la magnitud y ángulo de la corriente del rotor para cada uno de los porcentajes de desbalance. La impedancia equivalente del motor para cada una de las secuencias es:

$$Z_T^+ = 4.2422 + j2.4913 \text{ } [\Omega] \quad Z_T^- = 0.1273 + j0.6446 \text{ } [\Omega]$$

Las impedancias son calculadas en función del deslizamiento ( $S^+$ ) las cuales cambian de magnitud por cada valor que tome la velocidad mecánica del motor de inducción, por lo tanto los valores presentados son en función de un deslizamiento a plena carga, es decir que el motor en su eje se mantiene una velocidad constante de 1780 RPM en estado estable. Por lo general los motores de inducción entregan su máximo rendimiento a condiciones del 75% de la carga nominal del motor, al aumentar la carga en la máquina su eficiencia baja. Con la ayuda del software SIMULINK se estima la velocidad mecánica del motor a un 75% de carga operando a condiciones normales (0% de desbalance).

La máquina entrega un par nominal de

$$T_{nom} = 200.10 \text{ N.m}$$

Entonces

$$T_{mec@75\%} = 200.1 \times 75\% \text{ N.m}$$

$$T_{mec@75\%} = 150.08 \text{ N.m}$$

La velocidad mecánica del motor de inducción para 150 N.m de carga mecánica es 1786 RPM, por lo tanto la velocidad aumento 6 RPM en comparación a de la velocidad

mecánica a condiciones de plena carga. Los nuevos valores para las impedancias equivalentes para las secuencias negativas son:

$$Z_T^+ = 5.1466 + j33.8589 [\Omega] \quad Z_T^- = 0.1273 + j0.6446 [\Omega]$$

La impedancia a secuencia negativa cambia poco con respecto al porcentaje de carga en el eje de la máquina, en la siguiente sección se evalúa dicho comportamiento.

#### 4.3.6 Análisis de la impedancia de secuencia negativa y positiva en función del deslizamiento

La presencia del desbalance de tensión en la red eléctrica genera la impedancia  $Z_T^-$  la cual es prácticamente independiente del deslizamiento de la máquina como se muestra en la Gráfica 4.6, la magnitud permanece constante independientemente del valor que tome el deslizamiento, por lo cual se puede establecer que las corrientes generadas por la componente de voltaje a secuencia negativa permanecerán con magnitud constante independientemente si aumenta o disminuye la velocidad de la máquina provocado por el desbalance de tensión. De la única manera que varíe la corriente a secuencia negativa es modificando la magnitud de la componente de voltaje  $V^-$ , es decir aumento el desbalance de tensión, por lo cual entre mayor el desbalance mayor es la magnitud de la corriente (véase la Tabla 4.13)

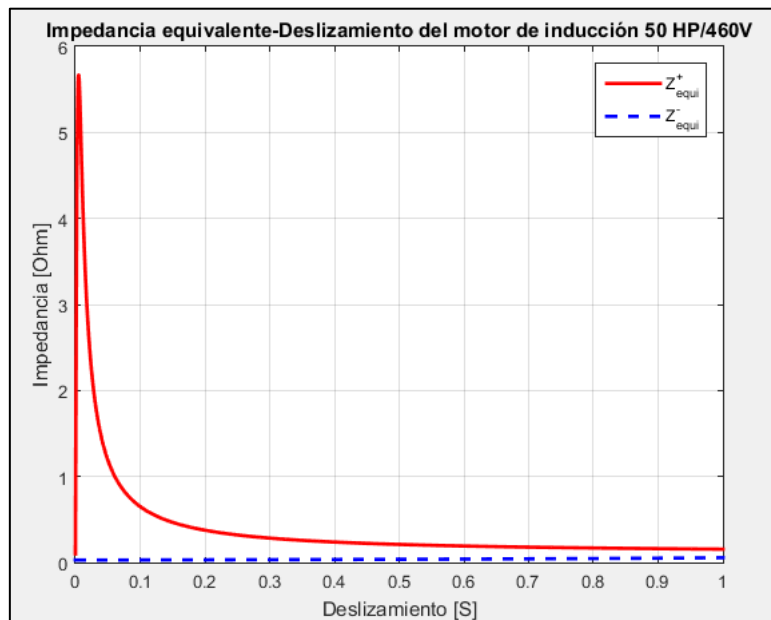


Gráfico 4.7: Impedancia equivalente positiva y negativa en función de "s"

En el caso de la impedancia de secuencia positiva se analizan 2 puntos en la Gráfica 4.7:

1° punto: cuando la impedancia tiene una tendencia a permanecer constante en el intervalo de  $S= 0.5$  a  $S=1.0$  se dice que el motor de inducción está en condiciones de rotor bloqueado, es decir existe un campo magnético giratorio en los devanados del estator, pero no se produce velocidad mecánica en el eje de la máquina.

2° Punto: Dentro del intervalo de deslizamiento  $[0.01-0.49]$  es cuando el motor opera en condiciones normal, es decir la máquina en su eje experimenta cambios de velocidad debido a la carga mecánica conectada, por lo cual se establece que la impedancia de secuencia positiva depende fuertemente del deslizamiento del motor de inducción. En el punto de 0 deslizamiento se tiene una condición de aproximadamente 0 carga en el eje, por lo cual la velocidad mecánica aumenta y esta se acerca a valores cercanos de la velocidad síncrona.

La Tabla 4.15 muestra la magnitud y el ángulo de la corriente del estator y rotor para cada uno de los casos de desbalance de tensión.

<b>Desbalance</b>	$I_1^+ \angle \theta^0$ [A]	$I_1^- \angle \theta^0$ [A]	$I_2^+ \angle \theta^0$ [A]	$I_2^- \angle \theta^0$ [A]
0%	$45.47 \angle -34.95$	--	$35.65 \angle -2.17$	---
1%	$45.47 \angle -34.95$	$4.43 \angle 13.09$	$35.65 \angle -2.17$	$4.30 \angle 13.23$
2%	$45.47 \angle -34.95$	$8.28 \angle 1.68$	$35.65 \angle -2.17$	$8.05 \angle 1.82$
3%	$45.47 \angle -34.95$	$12.53 \angle 19.25$	$35.65 \angle -2.17$	$12.18 \angle 19.39$
4%	$45.47 \angle -34.95$	$16.35 \angle 7.85$	$35.65 \angle -2.17$	$15.90 \angle 7.99$
5%	$45.47 \angle -34.95$	$20.57 \angle -22.42$	$35.65 \angle -2.17$	$20.00 \angle -22.28$
6%	$45.47 \angle -34.95$	$24.75 \angle -24.29$	$35.65 \angle -2.17$	$24.06 \angle -24.15$
7%	$45.47 \angle -34.95$	$28.43 \angle -4.22$	$35.65 \angle -2.17$	$27.64 \angle -4.08$
8%	$45.47 \angle -34.95$	$32.5 \angle -2.84$	$35.65 \angle -2.17$	$31.60 \angle -2.70$
9%	$45.47 \angle -34.95$	$36.63 \angle 6.17$	$35.65 \angle -2.17$	$35.61 \angle 6.32$
10%	$45.47 \angle -34.95$	$41.38 \angle -26.68$	$35.65 \angle -2.17$	$40.23 \angle -26.54$

Tabla 4.15: Corriente del estator y rotor para la componente de secuencia positiva y negativa

Cuando el desbalance de tensión se presenta en el suministro eléctrico del motor de inducción genera un flujo de corrientes trifásicas por el devanado del estator las cuales también poseen la cualidad de estar desbalanceadas. La Tabla 4.16 muestra los efectos del desbalance sobre las corrientes por fase en el estator.

Desbalance	$I_A \angle \theta^0$ [A]	$I_B \angle \theta^0$ [A]	$I_C \angle \theta^0$ [A]
0%	45.55 $\angle$ - 34.93	45.45 $\angle$ - 155.0	45.48 $\angle$ 85.17
1%	48.59 $\angle$ - 30.94	47.03 $\angle$ - 160.0	41.17 $\angle$ 86.5
2%	52.37 $\angle$ - 29.57	47.17 $\angle$ - 165.0	38.03 $\angle$ 89.97
3%	53.87 $\angle$ - 23.89	51.84 $\angle$ - 167.50	33.07 $\angle$ 87.65
4%	58.65 $\angle$ - 24.57	51.96 $\angle$ - 173.5	30.35 $\angle$ 93.23
5%	65.71 $\angle$ - 31.35	44.14 $\angle$ 178.2	34.92 $\angle$ 110.1
6%	70.00 $\angle$ - 31.27	44.39 $\angle$ 173.4	34.94 $\angle$ 116.8
7%	71.86 $\angle$ - 22.37	53.51 $\angle$ 174.4	25.73 $\angle$ 120.9
8%	75.36 $\angle$ - 21.16	56.64 $\angle$ 170.90	23.22 $\angle$ 128.2
9%	77.56 $\angle$ - 15.79	63.14 $\angle$ 171.8	17.15 $\angle$ 135
10%	86.91 $\angle$ - 31.11	49.14 $\angle$ 153.3	38.11 $\angle$ 143.2

Tabla 4.16: Flujo de corrientes trifásicas desbalanceadas por el devanado del estator.

El comportamiento de las corrientes del estator para tensiones desbalanceadas en un 6% se muestra en la Gráfica 4.8

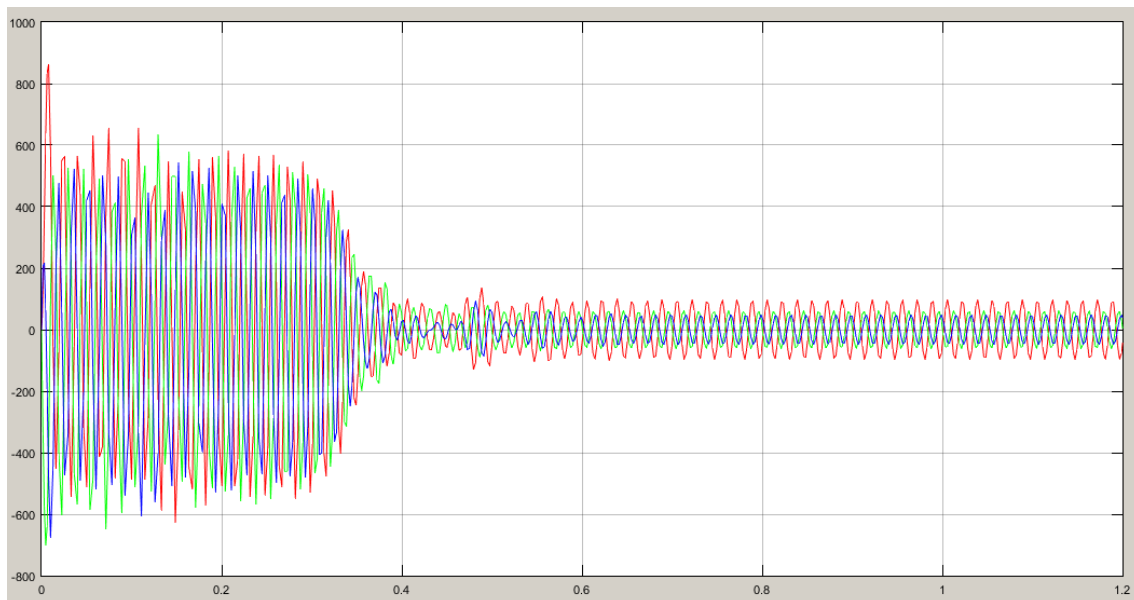


Gráfico 4.8: Flujo de corrientes trifásicas desbalanceadas por el devanado del estator para 6%

En el arranque del motor de inducción las corrientes del estator son hasta 7 veces la corriente nominal, en la Gráfica 4.8 las magnitudes de la corriente de arranque son aproximadamente de 600 A para una de las fases debido a que las magnitudes de las corrientes no son iguales entre sí, este comportamiento es por un determinado tiempo hasta que el motor logra la condición de estado estable. Ampliando la Gráfica para las corrientes en estado estable se tiene el siguiente comportamiento de la Gráfica 4.9.

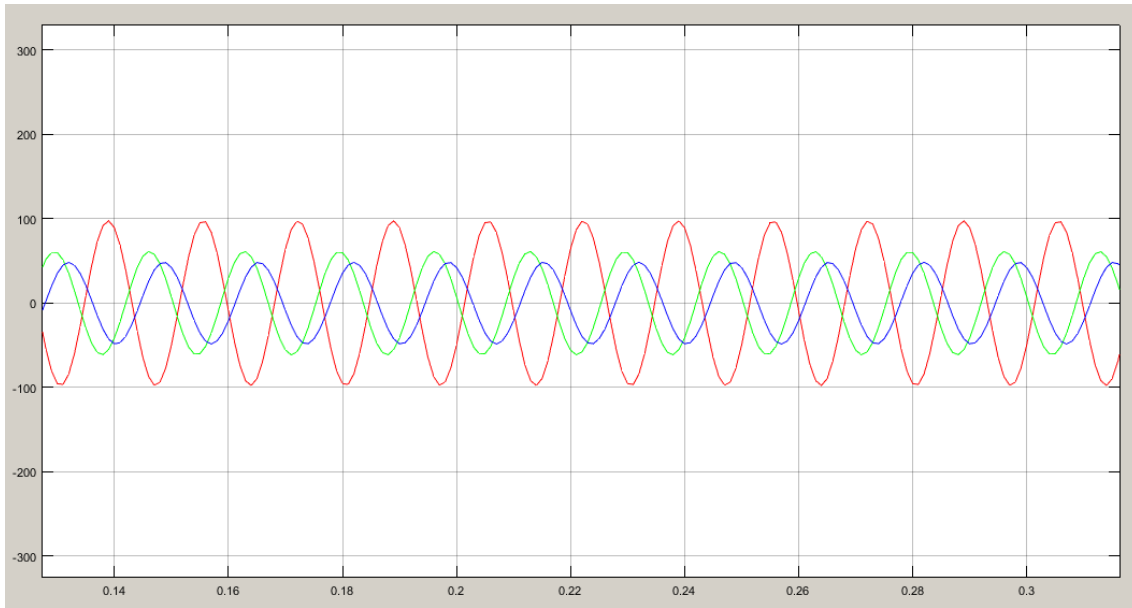


Gráfico 4.9: Flujo de corrientes trifásicas en estado estable

#### 4.3.7 Evaluación de las pérdidas de potencia eléctrica, potencia de salida y potencia de entrada en el motor de inducción funcionando con desbalance de tensión.

En esta sección se analiza el comportamiento de las pérdidas de potencia eléctrica cuando en el sistema de la red eléctrica que alimenta al motor de inducción presenta desbalance de tensión. De las ecuaciones planteadas en el Capítulo 3, se tienen las siguientes magnitudes de potencia mecánica desarrollada para cada uno de los casos de desbalance. Las pérdidas debidas al cobre del rotor ya son implícitamente consideradas, por lo tanto, en la Tabla 4.17 se muestra la potencia convertida para cada una de la secuencia positiva y secuencia negativa.

Desbalance	$P_{conv}^+$ [W]	$P_{conv}^-$ [W]	$P_{conv\ total}$ [W]	$P_{conv\ total}$ [kW]
0%	28391.18	0.00	28391.18	28.39
1%	28391.18	-1.62	28389.56	28.39
2%	28391.18	-5.65	28385.53	28.39
3%	28391.18	-12.94	28378.24	28.38
4%	28391.18	-22.04	28369.14	28.37
5%	28391.18	-34.88	28356.30	28.36
6%	28391.18	-50.50	28340.68	28.34
7%	28391.18	-66.64	28324.54	28.32
8%	28391.18	-87.08	28304.10	28.30
9%	28391.18	-110.62	28280.56	28.28
10%	28391.18	-141.17	28250.01	28.25

Tabla 4.17: Potencia mecánica desarrollada

#### 4.3.7.1 Pérdidas en el cobre del estator y rotor.

Las pérdidas de potencia eléctrica en el estator y rotor son directamente proporcionales a la corriente del estator y rotor respectivamente, en condiciones normales de operación únicamente circula por el devanado del estator corriente de secuencia positiva, pero si el motor operar con tensiones desbalanceadas se genera una nueva pérdida de potencia eléctrica debido a la corriente de secuencia negativa (véase la Tabla 4.15), la cual se suma a las pérdidas de secuencia positiva y por lo tanto la magnitud total de las pérdida de potencia es mayor. Dichas pérdidas son la que afectan directamente el rendimiento del motor de inducción. La Tabla 4.18 muestra el comportamiento de las pérdidas para los diferentes porcentajes de desbalance de tensión.

<b>Desbalance</b>	<b><math>P_{cu\ Est}^+</math> [W]</b>	<b><math>P_{cu\ Est}^-</math> [W]</b>	<b><math>P_{cu\ Est}</math> [W]</b>	<b><math>P_{cu\ Rot}^+</math> [W]</b>	<b><math>P_{cu\ Rot}^-</math> [W]</b>	<b><math>P_{cu\ Rot}</math> [W]</b>
0%	617.84	0.00	<b>617.84</b>	222.55	0.00	<b>222.55</b>
1%	617.84	5.86	<b>623.70</b>	222.55	3.25	<b>225.80</b>
2%	617.84	20.49	<b>638.32</b>	222.55	11.35	<b>233.90</b>
3%	617.84	46.92	<b>664.75</b>	222.55	25.99	<b>248.54</b>
4%	617.84	79.88	<b>697.72</b>	222.55	44.25	<b>266.80</b>
5%	617.84	126.44	<b>744.28</b>	222.55	70.04	<b>292.59</b>
6%	617.84	183.05	<b>800.89</b>	222.55	101.40	<b>323.95</b>
7%	617.84	241.53	<b>859.37</b>	222.55	133.79	<b>356.34</b>
8%	617.84	315.64	<b>933.48</b>	222.55	174.84	<b>397.39</b>
9%	617.84	400.96	<b>1018.79</b>	222.55	222.10	<b>444.65</b>
10%	617.84	511.69	<b>1129.53</b>	222.55	283.44	<b>505.99</b>

Tabla 4.18: Pérdida de potencia en el estator y pérdida de potencia en rotor.

#### Pérdida de potencia eléctrica total.

Por tanto, la pérdida de potencia eléctrica total correspondientes al motor de inducción de 50HP/460VLL para cada porcentaje de desbalance es la sumatoria de la pérdida de potencia en el devanado del estator más la pérdida de potencia por el cobre del devanado del rotor de jaula de ardilla para el motor de inducción en estudio.



Desbalance	$P_{cu\ esta} [W]$	$P_{cu\ rotor} [W]$	$P_{total} [W]$
0%	617.84	222.55	840.39
1%	623.70	225.80	849.50
2%	638.32	233.90	872.22
3%	664.75	248.54	913.29
4%	697.72	266.80	964.52
5%	744.28	292.59	1036.87
6%	800.89	323.95	1124.84
7%	859.37	356.34	1215.72
8%	933.48	397.39	1330.87
9%	1018.79	444.65	1463.45
10%	1129.53	505.99	1635.52

Tabla 4.19: Pérdida de potencia eléctrica total.

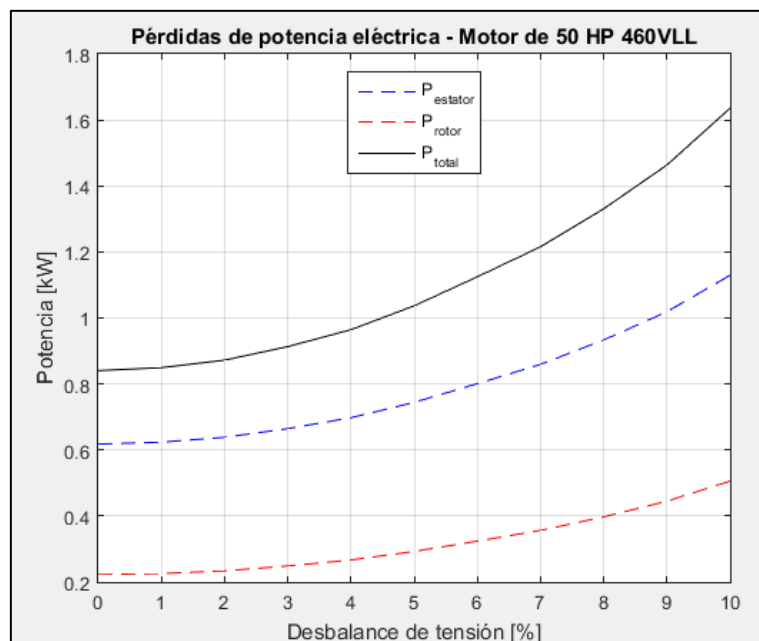


Gráfico 4.10: Pérdida de potencia eléctrica: Estator, Rotor, Total.

#### 4.3.8 Potencia de salida

La potencia de salida del motor de inducción considerando las pérdidas de potencia de eléctrica y mecánica en función del porcentaje de desbalance de tensión en la red eléctrica es el mostrado en la Tabla 4.20.

<b>Desbalance</b>	<b>P<sub>conv</sub> [W]</b>	<b>P<sub>FyV</sub> [W]</b>	<b>P<sub>salida</sub> [W]</b>
0%	28391.18	426.51	27964.67
1%	28389.56		27963.05
2%	28385.53		27959.02
3%	28378.24		27951.73
4%	28369.14		27942.63
5%	28356.30		27929.79
6%	28340.68		27914.17
7%	28324.54		27898.03
8%	28304.10		27877.59
9%	28280.56		27854.05
10%	28250.01		27823.50

Tabla 4.20: Potencia de salida.

#### 4.3.9 Potencia de entrada

La potencia de entrada a secuencia negativa es la sumatoria de las pérdidas de potencia en el cobre del estator, rotor más la potencia inducida o potencia en el entrehierro.

<b>Desbalance</b>	<b>P<sup>+</sup><sub>entrada</sub> [W]</b>	<b>P<sup>-</sup><sub>entrada</sub> [W]</b>	<b>P<sub>entrada</sub> [W]</b>
0%	29658.08	0.00	29658.08
1%	29656.46	7.49	29663.95
2%	29652.43	26.18	29678.61
3%	29645.13	59.96	29705.10
4%	29636.04	102.10	29738.13
5%	29623.19	161.60	29784.79
6%	29607.58	233.95	29841.53
7%	29591.44	308.69	29900.13
8%	29571.00	403.40	29974.40
9%	29547.46	512.44	30059.90
10%	29516.91	653.96	30170.87

Tabla 4.21: Potencia entrada

La Tabla 4.21 determina que independientemente la carga conectada en el eje del motor de inducción este experimenta un incremento en la potencia de entrada que el motor consume de la red eléctrica. Como se mencionó anteriormente que la carga en el eje es de 75% para esa misma condición de carga se experimenta incrementos en la potencia de entrada, debido a que el motor debe de vencer la precarga ejercida por la secuencia negativa sobre el eje del motor, por ejemplo, para un 5% de desbalance de tensión el motor tiene un incremento de 126.79 W, en sección posteriores se evalúa de forma más detalla.

#### 4.3.10 Comportamiento del torque desarrollado en función del desbalance de tensión en el sistema trifásico.

La precarga en el eje del motor de inducción es generada por la componente simétrica de secuencia negativa, dicha componente produce en el entrehierro una potencia “negativa” sobre el devanado del rotor (Jaula de ardilla). El torque expresado en unidades de Newton-Metro ejerce sobre el eje de la máquina un giro contrario, lo cual se traduce a una carga extra que el motor debe de vencer.

$$T_{ind} = \frac{P_{conv}^-}{W_{mec}}$$

La carga extra que el motor 50 HP/460 VLL que el motor experimenta para cada porcentaje de desbalance es el mostrado en la Tabla 4.22.

Desbalance	$P_{conv}^-$ [W]	$\tau_{conv}^-$ [N. m]
0%	0	0.00
1%	-1.62	-0.01
2%	-5.65	-0.03
3%	-12.94	-0.06
4%	-22.04	-0.11
5%	-34.88	-0.18
6%	-50.50	-0.26
7%	-66.64	-0.35
8%	-87.08	-0.46
9%	-110.62	-0.59
10%	-141.17	-0.71

Tabla 4.22: Torque inducido por la secuencia negativa.

#### 4.3.11 Evaluación de la velocidad mecánica en el eje del motor de inducción cuando es operado con desbalance de tensión.

El siguiente análisis se basa en determinar el comportamiento del deslizamiento del motor de inducción en estudio cuando se opera con tensiones desbalanceadas. La velocidad mecánica que desarrolla el motor en condiciones de plena carga es de aproximadamente 1.11%, considerando que se ha reducido la carga a un 75% de la nominal sumado a eso la pérdidas de potencia eléctrica provocada por el desbalance de tensión generan que la potencia a la salida cambie tal como se determina en la Tabla 4.21, por cada incremento del 1% de desbalance la potencia de salida cambia. Por lo cual también se tienen un cambio en las RPM desarrolladas por el eje. En algunos casos la potencia de salida aumenta y en otros disminuye.

Para establecer los cambios de la velocidad mecánica en función de la potencia de salida hace uso de la Ecuación 4.18, la cual se deriva de la potencia de la siguiente Ecuación.

$$P_{\text{salida}} = 3 * (I_2^+) R_2 \frac{1-s}{s} - P_{\text{FyV}}$$

$$P_{\text{salida[HP]}} = \frac{\left(\frac{3}{746}\right) V_1^2 X_m^2 R_2 \left[\frac{1-s}{s}\right]}{\left[\left(\frac{R_2}{s}\right) (X_1 + X_m) + R_1 (X_2 + X_m)\right]^2 + \left[-\frac{R_1 R_2}{s} + X_1 X_2 + X_m (X_1 + X_2)\right]^2} - \frac{P_{\text{FyV}}}{746} \quad (4.18)$$

La Ecuación permite hacer una evaluación de la potencia de salida en función del deslizamiento considerando todos los parámetros del motor de inducción y cambiando el voltaje aplicado, en este caso el voltaje de secuencia positiva.

El deslizamiento para cada valor de potencia de salida es el mostrado en la Tabla 4.23

<b>Desbalance</b>	<b>S [%]</b>	<b>V<sub>mecanica</sub> [RPM]</b>
0%	0.86600781	1784.41
1%	0.8649174	1784.43
2%	0.86670318	1784.40
3%	0.85846811	1784.55
4%	0.86082309	1784.51
5%	0.86037641	1784.51
6%	0.86453547	1784.44
7%	0.86435906	1784.44
8%	0.86442741	1784.44
9%	0.86063413	1784.51
10%	0.86063413	1784.51

Tabla 4.23: Velocidad mecánica en función del desbalance de tensión.

Por lo tanto, el resultado obtenido aplicando la Ecuación 4.18 establece que la velocidad mecánica teórica para el motor al 75% es de 1784.40 RPM. Para cada porcentaje de desbalance presente en el sistema de alimentación del motor de inducción trifásico las variaciones de la Velocidad mecánica son prácticamente despreciables, por ejemplo, un caso crítico como un 10% de desbalance de tensión las RPM del eje se mantienen constantes. Aunque también como se mencionó anteriormente para cada porcentaje de desbalance existen muchas combinaciones posibles para generar ese mismo porcentaje, lo cual quiere decir que pueden existir variaciones de la magnitud y ángulo de la tensión demasiados grandes que puedan generar una disminución en la velocidad mecánica.

#### 4.3.12 Eficiencia del motor de inducción operando con desbalance de tensión.

Conociendo las magnitudes de todas las pérdidas de potencia se calcula la eficiencia del motor de inducción para los diferentes porcentajes de desbalances de tensión. De la Gráfica 4.10 es claro que el rendimiento de la máquina se reduce debido al incremento de las pérdidas generadas el porcentaje de desbalance. Por tanto, de la relación de cada valor de potencia salida con su respectiva potencia de entrada genera los siguientes porcentajes de eficiencia.

<b>Desbalance</b>	<b><math>\eta</math> 75% [%]</b>
0%	94.29
1%	94.27
2%	94.21
3%	94.10
4%	93.96
5%	93.77
6%	93.54
7%	93.30
8%	93.00
9%	92.66
10%	92.22

Tabla 4.24: Eficiencia del motor de inducción para diferentes % de desbalance de tensión.

La eficiencia del motor de inducción no solo se puede ver afectada por la presencia de tensiones desbalanceadas en el sistema de la red eléctrica ya que existen diversos factores que pueden afectar el rendimiento de la máquina, como se ve en la sección 4.2 (para la regulación de tensión). Un factor que no depende de la calidad de la calidad del suministro eléctrico como lo es el porcentaje de carga en el eje del motor también puede reducir la eficiencia, ya que para operar un motor de inducción lo recomendable es cargarlo al 75% de su potencia nominal para desarrollar la máxima eficiencia, por ejemplo: se tiene una carga que requiere 100 HP de potencia mecánica, no es recomendable colocar a esa carga un motor con 100 HP de potencia nominal porque se reduce el rendimiento, lo recomendable es colocar un motor de inducción con potencia de salida de 125 HP para que este trabaje aproximadamente el 75%.

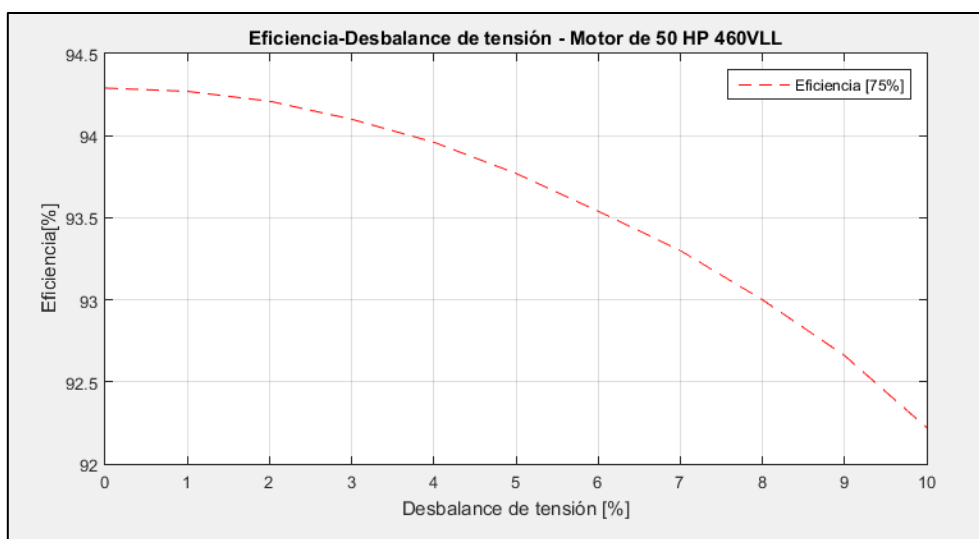


Gráfico 4.11: Eficiencia del motor con desbalance

La Gráfica 4.11 muestra el comportamiento de la eficiencia en función de la carga y el porcentaje de desbalance.

#### 4.3.13 Costo de operación del motor de inducción trifásico 50 HP/460 VLL con presencia de desbalance de tensión en el sistema de alimentación.

La Compañía de Alumbrado Eléctrico de San Salvador (CAESS), establece los costos de energía por índice horario aplicados a mediana demanda  $10 < \text{kW} < 50$  (Véase la Tabla 4.7), sin embargo dichos cargos son variables con el tiempo, por tanto el objetivo de esta sección es establecer la potencia neta extra que el motor de inducción demanda de la red eléctrica cuando es operado con tensiones desbalanceadas, la Tabla 4.25 muestra la energía consumida por el motor de inducción.

Desbalance	$P_{\text{extra } 75\%}$ [W]	Energía <sub>75%</sub> [kWh]
0%	0.00	0.00
1%	5.87	4.23
2%	20.53	14.78
3%	47.02	33.85
4%	80.06	57.64
5%	126.72	91.24
6%	183.45	132.08
7%	242.06	174.28
8%	316.32	227.75
9%	401.82	289.31
10%	512.79	369.21

Tabla 4.25: Eficiencia del motor de inducción para diferentes % de desbalance de tensión.

Los costos de operación con el pliego tarifario vigente son mostrados en la Tabla 4.26

Desbalance	Costo de operación/mes [\\$]	Costo extra/mes [\\$]
0%	3209.80	0.00
1%	3210.43	0.64
2%	3212.02	2.22
3%	3214.89	5.09
4%	3218.46	8.66
5%	3223.51	13.71
6%	3229.65	19.85
7%	3236.00	26.20
8%	3244.03	34.23
9%	3253.29	43.49
10%	3265.30	55.50

Tabla 4.26: Eficiencia del motor de inducción para diferentes % de desbalance de tensión.

La Gráfica 4.12 muestra la cantidad de energía extra para cada uno de los porcentajes de desbalance de tensión que el usuario paga a la empresa distribuidora [CAESS] independientemente del costo de energía por US\$/kWh al operar el motor con un suministro eléctrico de baja calidad.

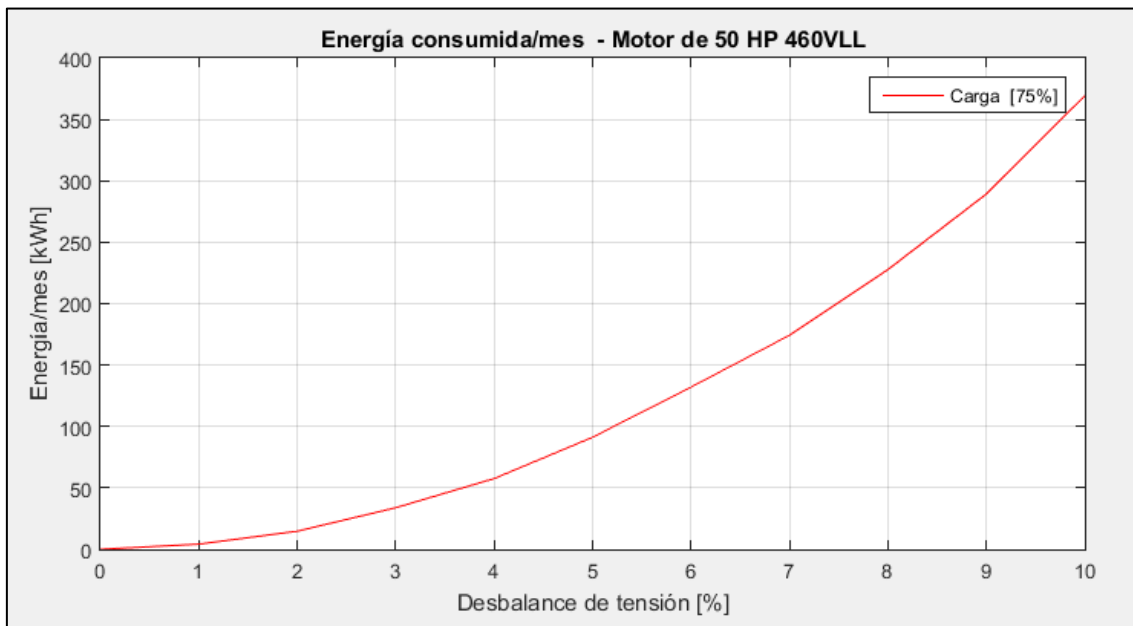


Gráfico 4.12: Energía/mes extra en condición de tensiones desbalanceadas.

## CONCLUSIONES

- Las normas internacionales correspondientes a la IEEE e IEC analizadas en este estudio únicamente son recomendaciones generales para la administración de la calidad de la energía eléctrica para proveer de técnicas y procedimientos que permitan una alta eficiencia en el diseño y operación de los sistemas eléctricos. Así como también estándares orientados a recomendaciones para el monitoreo de la calidad de potencia eléctrica y requerimientos para el control del contenido armónico tanto de voltaje  $THD_V$  y contenido armónico de corriente  $THD_I$ .
- La norma nacional SIGET es una de las menos rigurosas de la región en cuanto a calidad del producto técnico se refiere, en sus apartados no define límites establecidos para el desbalance, el cuál es uno de los factores más importantes que determina la calidad de la energía, se puede decir que Costa Rica es el país cercano a nuestra región con límites más rigurosos para los diferentes efectos de la calidad de la energía, esto indica que presenta los mejores índices de calidad y más fiabilidad en el suministro eléctrico.
- El contenido armónico según la IEEE se debe de calcular en función de la robustez del sistema eléctrico, es decir, determinar la corriente de cortocircuito en el punto de entrega de la distribuidora para luego relacionarla con la corriente demandada del sistema que a diferencia de la norma NEMA MG-1 solo considera la magnitud de la corriente de la componente armónica entre la corriente nominal a frecuencia fundamental del sistema. Sin embargo, para realizar la medición de este parámetro se debe de tener claro que tipo de usuario está conectado a la red para así realizar las mediciones en el lado de alta o baja tensión del transformador de potencia.
- La norma IEC considera el desbalance de tensión como la relación de las componentes simétricas (positiva y negativa) del cual los resultados obtenidos representan de una forma más exacta el porcentaje de desbalance presente en la red eléctrica ya que la norma NEMA MG-1 e IEEE únicamente consideran la magnitud de la tensión de línea-línea, Sin embargo, IEC considera los ángulos de desfase debido a que el desbalance de tensión puede ser ocasionado por las variaciones en los ángulos.



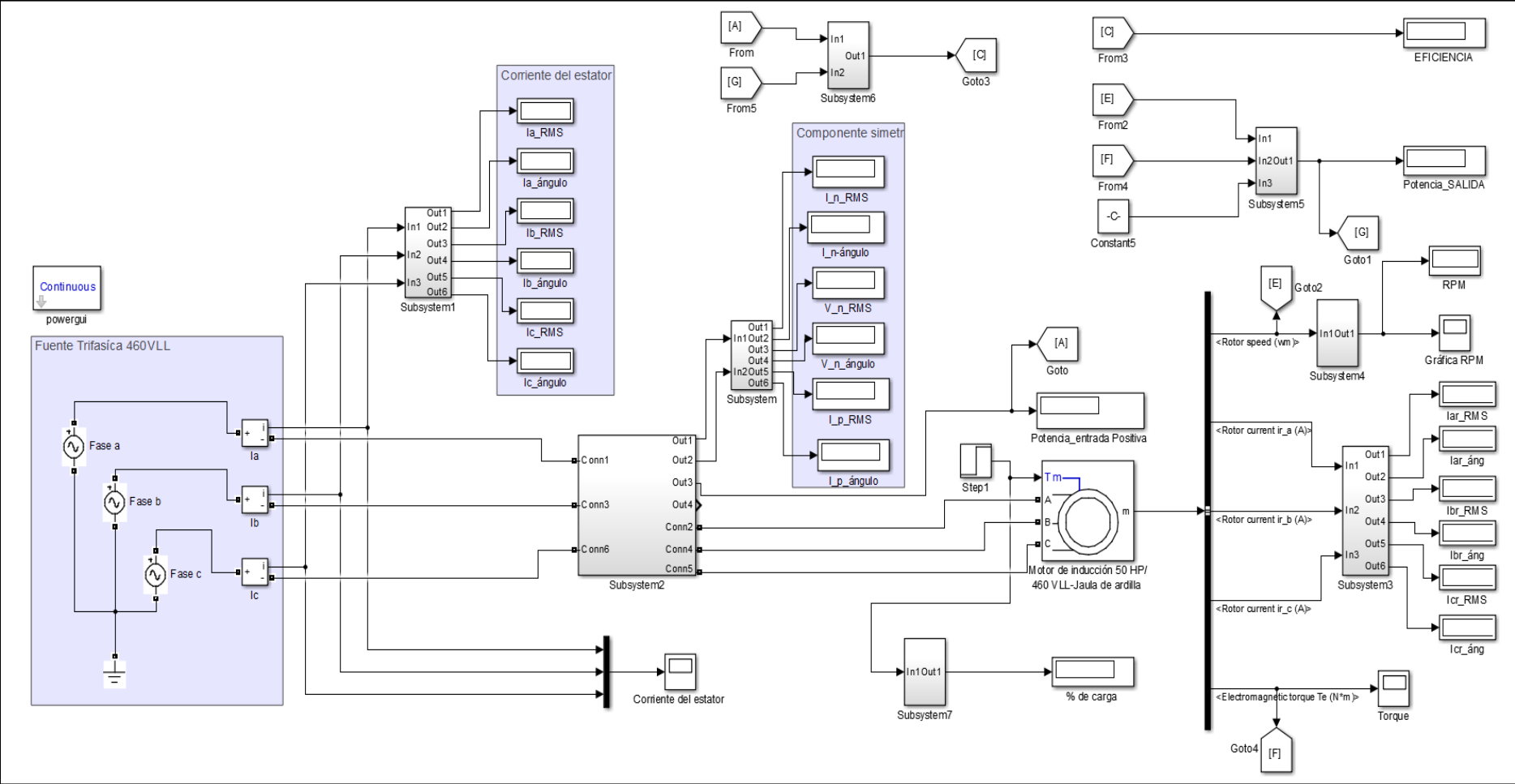
- De los cuatro efectos estudiados en este trabajo el desbalance de voltaje es probablemente el más perjudicial para la eficiencia de los motores de inducción, debido que este efecto presenta una condición de precarga en el funcionamiento de los motores y aumenta el consumo de energía al momento de suplir la carga conectada en el eje. Además, por la naturaleza y por cómo se origina el desbalance de voltaje es muy común que esté presente en el suministro de nuestro país, debido a que se tiene muchas cargas monofásicas que no están conectadas de una manera balanceada.
- Los componentes armónicos en el motor ocasionan aumento en las pérdidas causando calentamiento en las bobinas por los flujos magnéticos de dispersión que se generan por las altas frecuencia de la señal de alimentación; los parámetros que son más afectados en el circuito de la Figura 3.8 son los que están relacionados directamente con la frecuencia como son las reactancias de dispersión (estator, rotor y núcleo) y el deslizamiento todos esto lleva a tener las pérdidas adicionales en el motor.
- En el desbalance de voltaje las pérdidas por calor aumentan en gran medida ya que por los devanados circulan corrientes meramente desbalanceadas, la presencia excesiva de calor resulta en daños a la máquina y disminuye la vida útil.
- Las distorsiones en la forma de onda generadas por las fluctuaciones en la tensión (Flicker) tienen un comportamiento errático debido a la naturaleza del fenómeno (periódico y aleatorio o no periódico), por lo cual, analizar el motor de inducción trifásico bajo los efectos del Flicker es errático y complejo, pero tomando en cuenta que el Flicker son elevaciones o disminuciones de la tensión se hace una aproximación a los efectos que se tendrían en el motor con la ayuda de las gráficas proporcionadas por el estándar IEEE – 739 denominado Libro de bronce.
- El usuario final es el responsable de mantener libre de contaminación de armónicos la red eléctrica para no afectar la frecuencia fundamental del sistema (60Hz), para que así las variaciones en este parámetro sean controladas por la distribuidora, ya sea con una desconexión temporal y selectiva de carga para evitar que la frecuencia del sistema caiga por debajo de su valor nominal, o en

el caso de generadora, deberá disminuir la capacidad de generación para evitar que la frecuencia aumente.

- La variación de frecuencia en el sistema de la red eléctrica tiene efectos más severos sobre el motor trifásico de inducción en comparación con los producidos por fluctuaciones de tensión, debido a que el punto de operación nominal para la velocidad síncrona de la máquina cambia, así como también los parámetros eléctricos (reactancia por fase del estator y rotor) cambien su magnitud y ángulo ya que estos tienen una relación directamente proporcional a la frecuencia.
- La regulación de tensión en el funcionamiento del motor juega un papel fundamental porque con un buen manejo de esta se puede mejorar la eficiencia, lo contrario sucede con un mal manejo; en la evaluación realizada se obtiene que para una regulación de tensión del 10% las pérdidas en el cobre se incrementa 150.09 W, lo cual conlleva a que el motor incremente el consumo de la energía en 108.07 kWh operando las 24 hora en un mes; para una regulación de tensión de -10% la energía consumida por el motor tiene una reducción de 79.52 kWh en un mes. Teniendo esto en cuenta se puede determinar que opera el motor de inducción a un nivel de tensión por debajo de su tensión nominal se incrementa su costo de operación.
- El desbalance de tensión genera los voltajes y corrientes de secuencia negativa tanto en el estator como en el rotor del motor de inducción dando lugar a la existencia de la impedancia equivalente de secuencia negativa, pero la magnitud de dicha impedancia se mantiene constante independientemente del porcentaje de desbalance presente en la red eléctrica ya que el término  $2 - S$  para el deslizamiento de componente negativa no cambia en gran proporción.
- A medida que el porcentaje de desbalance de tensión aumenta, los costos de operación de la máquina se incrementan debido a que el motor experimenta un aumento en la potencia demandada por la máquina, en un caso crítico de desbalance del 10% la máquina experimenta un incremento en la energía consumida al mes de aproximadamente 369.21kWh lo cual se traduce en aproximadamente en \$56.0/mes.

# ANEXOS

## SIMULACIÓN DEL MOTOR TRIFASICO DE INDUCCIÓN EN EL SOFTWARE SIMULINK



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Rodolfo Echavarría, Eduardo Berber “Reguladores rápidos de tensión”, Vol. 6 N° 1 junio 2009
- [2] Norma IEEE ESTANDAR 1159, 1995
- [3] NEMA MG-1
- [4] IEEE STD 1159
- [5] IEEE STD 519
- [6] IEEE STD 739- Libro de Bronce.
- [7] IEC 61000-4-30
- [8] IEC 61000-3-2
- [9] Acuerdo No. 192-E-2004, Ley de la calidad de energía SIGET.
- [10] AR-NT-POASEN, Planeación, operación y acceso al sistema eléctrico nacional.
- [11] Normas de calidad del servicio de distribución de electricidad – Venezuela
- [12] Normas técnicas del servicio de distribución NTSD, Guatemala
- [13] Norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución, Chile
- [14] John J. Grainger, William D. Stevenson Jr, Análisis de sistemas de potencia
- [15] Juan Carlos Pretel Tamayo, Modelo matemático para el análisis en estado estable del motor de inducción con asimetría en el estator o rotor.
- [16] Enrique Ciro Quispe, Efectos del desequilibrio de tensiones sobre la operación del motor de inducción trifásico.
- [17] Efecto de distorsión armónica de tensión sobre la eficiencia y potencia del motor de inducción trifásico Murphy & Honsinger, 1982, Vamvakari y Diego Fernando Valencia García.
- [18] IEEE std 141-1993
- [19] Stephen J. Chapman, Máquinas Eléctrica, Tercera edición