

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



**ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA EN LA
OPERACIÓN EFICIENTE DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO DE
AGUA POTABLE**

PRESENTADO POR:

ROBERTO JOSÉ GONZÁLEZ ARÉVALO

MANUEL JOSUÉ RECINOS BOLAÑOS

KAREN MARCELA SIGÜENZA DÍAZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE 2021

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

PHD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título:

**ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA EN LA
OPERACIÓN EFICIENTE DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO
DE AGUA POTABLE**

Presentado por:

**ROBERTO JOSÉ GONZÁLEZ ARÉVALO
MANUEL JOSUÉ RECINOS BOLAÑOS
KAREN MARCELA SIGÜENZA DÍAZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

SAN SALVADOR, NOVIEMBRE 2021

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, martes 31 de agosto de 2021, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 3:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón
Director



Firma



2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario

por: 

Firma

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

- ING. ARMANDO MARTINEZ CALDERON
(Docente Asesor)



Firma

- ING. JOSE ROBERTO RAMOS LOPEZ

Por: 

Firma

- MSC. LUIS ROBERTO CHEVEZ PAZ



Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA EN LA OPERACIÓN EFICIENTE DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO DE AGUA POTABLE

A cargo de los Bachilleres:

- GONZÁLEZ ARÉVALO ROBERTO JOSÉ

- RECINOS BOLAÑOS MANUEL JOSUÉ

- SIGÜENZA DÍAZ KAREN MARCELA

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.7

(ocho punto siete)

DEDICATORIA

A pocos pasos de lograr el sueño de convertirme en ingeniero, utilizo estas líneas para agradecer de todo corazón el empeño y disposición de mis compañeros de tesis y amigos, con quienes ha sido un honor trabajar en nuestro proceso de titulación. Además, reconocer la guía y conocimientos brindados por nuestro asesor, cuya ayuda ha sido esencial durante toda la investigación.

Asimismo, agradecer el enorme apoyo de mis padres, mi hermano, demás familiares, amigos y seres queridos que, de una u otra forma, aportaron en este proceso. Y, sobre todas las cosas, agradecer profundamente a Dios por la extraordinaria bendición de poder conseguir uno de mis más ansiados objetivos de vida.

Espero que la presente investigación pueda ser útil en el tema de eficiencia en motores y equipos de bombeo, y, de alguna manera aportar al progreso de nuestro país. Le agradezco a usted, lector, por tomar en cuenta estas palabras y espero encuentre beneficioso este documento.

- Roberto José González Arévalo

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen María, por todas las bendiciones que me ha dado durante mi vida, por permitirme culminar esta etapa que fue una de las mejores de mi vida, por todo el amor, la familia, la salud, el apoyo, la protección, la fortaleza, la motivación.

A mi papá Oscar Sigüenza y mi mamá Maribel Díaz, por su amor, trabajo, paciencia, esfuerzo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy, ustedes son mi pilar, el motor que impulsa mis sueños y esperanzas. A mi hermana Andrea, a quién amo y que también ha sido un ejemplo a seguir. ¡Este triunfo es de ustedes!

De manera especial a nuestro asesor de tesis: Ingeniero Armando Calderón por habernos guiado y apoyado; gracias por compartir gran parte de sus conocimientos, su paciencia y motivación, los cuales han sido fundamentales para culminar este trabajo.

A mis compañeros de tesis por haber recorrido este viaje juntos, hoy nos toca cerrar un capítulo maravilloso en esta historia de vida, agradecerles por su apoyo y constancia. Gracias a todas esas amistades que hice durante este largo viaje.

-Karen Marcela Sigüenza Díaz

DEDICATORIA

Hubiera sido muy difícil llegar a este punto de mi carrera universitaria sin contar con personas que estuvieron presente y aportaron bastantes cosas, como tiempo, dinero, consejos, tutorías, conocimiento y más. Primero a mi familia porque confiaron en mí y me apoyaron a pesar del largo proceso, pero sabían que lo podía lograr. A mis amigos de la universidad, que siempre mostraron su apoyo en cualquier momento y entre nosotros nos comprometimos a no usar el camino fácil para poder salir bien, quizá no lográbamos excelentes notas, pero siempre había la satisfacción de hacer bien las cosas. A mis amigos y amigas de infancia porque siempre estaban atentos y dispuestos a ayudar, económicamente pero también emocional. Y finalmente, a Dios porque siempre me sigue mostrando su fidelidad y que sus planes son mejores que los míos.

- Manuel Josué Recinos Bolaños.

Tabla de Contenido

| | |
|--|----|
| RESUMEN..... | 16 |
| INTRODUCCIÓN | 17 |
| OBJETIVOS | 18 |
| Objetivo General | 18 |
| Objetivos Específicos..... | 18 |
| ALCANCES | 19 |
| CAPÍTULO I: Generalidades | 20 |
| 1.1 Impulsión en fluidos..... | 21 |
| 1.1.1 Ecuación de continuidad..... | 21 |
| 1.1.2 Ecuación de energía..... | 21 |
| 1.1.3 Cargas en el sistema..... | 22 |
| 1.2 Bombas hidráulicas..... | 24 |
| 1.2.1 Bombas centrifugas..... | 24 |
| 1.2.2 Impulsores cerrados..... | 25 |
| 1.3 Motor de inducción trifásico..... | 26 |
| 1.3.1 Modelo de Circuito Equivalente de un Motor de Inducción..... | 27 |
| 1.3.2 Par y Flujo de Potencia..... | 28 |
| Bibliografía..... | 30 |
| CAPÍTULO II: Calidad de la energía eléctrica | 31 |
| 2.1 Calidad de la energía eléctrica..... | 32 |
| 2.1.1 Parámetros..... | 32 |
| 2.2 Flujo de potencia, conjunto motor-bomba..... | 43 |
| 2.3 Eficiencia en motores de inducción | 45 |
| 2.3.1 Motores de Eficiencia Estándar (IE1): | 46 |
| 2.3.2 Motores de Alta Eficiencia (IE2): | 46 |
| 2.3.3 Motores de Eficiencia Premium (IE3):..... | 47 |
| 2.3.4 Motores de Inducción Clase B..... | 48 |
| 2.4 Eficiencia en bombas..... | 49 |
| Bibliografía..... | 53 |
| CAPÍTULO III: Factores asociados a la eficiencia del motor | 54 |
| 3.1 Factores asociados a la eficiencia del motor..... | 55 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1.1 Relación entre Energía y variaciones en el Torque del motor. | 55 |
| 3.2 Variaciones de la velocidad debido a problemas en la calidad de energía..... | 57 |
| 3.2.1 Límites de Distorsión Armónica. | 57 |
| 3.2.2 Efectos del Desbalance de Tensiones en Motores de Inducción | 58 |
| 3.2.3 Variación de tensión..... | 60 |
| 3.2.4 Control de velocidad mediante el cambio de la frecuencia..... | 63 |
| 3.2.5 Relación de potencia, velocidad y voltaje | 64 |
| 3.2.6 Variación en la resistencia (Deslizamiento) | 64 |
| 3.3 Análisis de motores desbalanceados por el método de Componentes Simétricas. | 65 |
| 3.3.1 Método de las componentes simétricas en sistemas desbalanceados | 68 |
| 3.3.2 Pérdidas en funcionamiento desequilibrado y rendimiento | 70 |
| Bibliografía. | 73 |
| CAPITULO IV: Factores asociados a la eficiencia de la bomba | 74 |
| 4.1 Teoría de modelos..... | 75 |
| 4.2 Leyes de semejanza y curvas características..... | 75 |
| 4.3 Aplicación de las leyes de semejanza..... | 78 |
| 4.4 Eficiencia de la bomba centrífuga | 80 |
| 4.5 Características del funcionamiento de las bombas a velocidad constante (aplicación a ingeniería) | 80 |
| 4.6 Características de funcionamiento con velocidades y tamaños distintos | 81 |
| 4.6.1 Efecto del tamaño del impulsor | 82 |
| 4.6.2 Efecto de la velocidad | 82 |
| 4.6.3 Potencia requerida | 83 |
| 4.6.4 Eficiencia..... | 84 |
| 4.6.5 Cavitación. | 84 |
| 4.7 Punto de operación de la bomba | 87 |
| Bibliografía. | 90 |
| CAPÍTULO V: Aplicación de la Metodología | 91 |
| 5.1 Manual de Auditoría Energética | 92 |
| 5.2 Etapas de la Auditoría Energética | 92 |
| 5.2.1 Etapa 1: Planeamiento de la Auditoría Energética..... | 92 |
| 5.2.2 Etapa 2: Reunión de Apertura..... | 93 |
| 5.2.3 Etapa 3: Recopilación de Datos..... | 94 |

| | |
|---|-----|
| 5.2.4 Etapa 4: Plan de medición | 95 |
| 5.2.5 Etapa 5: Realización de la visita. | 95 |
| 5.2.6 Etapa 6: Análisis..... | 95 |
| 5.2.7 Etapa 7: Informe de Auditoría..... | 97 |
| 5.2.8 Etapa 8: Reunión de Cierre..... | 97 |
| 5.3 Ejemplo de aplicación..... | 98 |
| Equipo Auditor: | 98 |
| Alcances de la Auditoría Energética..... | 98 |
| Limitantes de la Auditoría | 98 |
| Objetivos de la auditoría | 98 |
| Análisis..... | 100 |
| Método Gráfico | 100 |
| Método Analítico..... | 105 |
| RESUMEN DE RESULTADOS..... | 108 |
| Informe de Auditoría:..... | 113 |
| Bibliografía | 115 |
| CONCLUSIONES..... | 116 |
| RECOMENDACIONES | 118 |
| GLOSARIO TÉCNICO | 119 |
| ANEXOS..... | 122 |
| Anexos A3..... | 122 |
| Anexos A5..... | 124 |

Contenido de figuras

| | |
|--|-----|
| Figura 1. 1. Cargas en el sistema de bombeo | 23 |
| Figura 1. 2. Diagrama de cargas | 24 |
| Figura 1. 3. Partes de una bomba centrífuga | 24 |
| Figura 1. 4. Impulsor cerrado | 25 |
| Figura 1. 5. Comparación de la eficiencia según el tipo de impulsor | 25 |
| Figura 1. 6. Circuito equivalente de un motor de inducción | 27 |
| Figura 1.7. Circuito Equivalente por fase referido al lado del estator de un motor de inducción | 27 |
| Figura 1.8. Curva de Magnetización de un Motor de Inducción vs un Transformador | 28 |
| Figura 1. 9 Diagrama de Flujo de Potencia de Motor..... | 28 |
| Figura 2. 1. Factor de Potencia | 33 |
| Figura 2. 2. Desbalance de tensión en magnitud y en fase | 35 |
| Figura 2. 3. Diagrama de Flujo de Potencia de un conjunto Motor-Bomba | 43 |
| Figura 2. 4. Diagrama de Flujo de Potencia de una Bomba | 49 |
| Figura 3. 1 Diagrama de pérdidas en motores eléctricos..... | 55 |
| Figura 3. 2. Diagrama correspondiente al operador | 65 |
| Figura 3. 3. Diagrama fasorial correspondiente a cada una de las secuencias | 67 |
| Figura 3. 4. Flujo de Potencia de un motor con desbalance de tensión | 68 |
| Figura 3. 5. Circuito Equivalente para Secuencia Positiva y Secuencia Negativa..... | 69 |
| Figura 4. 1. Cavitación en la aspiración del impulsor | 85 |
| Figura 5. 1. Planeamiento de la auditoría energética | 92 |
| Figura 5.2. Ubicación del Equipo que se someterá a estudio | 99 |
| Figura 5. 3. Modelo de un motor de Inducción. Tomando en cuenta la resistencia de magnetización para secuencia positiva..... | 105 |
| Figura 5. 4. Ubicación del Equipo que se someterá a estudio | 108 |

Contenido de tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 2. 1. Penalización por bajos valores de Factores de potencia según SIGET | 34 |
| Tabla 2. 2. Límites normativos de los indicadores de calidad | 37 |
| Tabla 2. 3. IEEE Std 519-1992 Límites de voltajes armónicos | 37 |
| Tabla 2. 4. Límites de distorsión armónica de tensión en redes de media y baja tensión .. | 38 |
| Tabla 2. 5. IEEE 519-1992 Límites de corriente armónica | 39 |
| Tabla 2. 6 Límites de distorsión armónica de corriente de carga de media y baja tensión. | 41 |
| Tabla 2. 7. Comparación entre las regulaciones internacionales y las exigencias de la SIGET en el país..... | 42 |
| Tabla 2. 8. Umbrales Permitidos de Tensiones de Fase | 42 |
| Tabla 2. 9. Eficiencias a plena carga en la energía eficiente de motores..... | 46 |
| Tabla 2. 10. Eficiencias para motores de inducción trifásicos, clasificación B | 48 |
| Tabla 3. 1 Cuantificación de datos del gráfico 3.2..... | 57 |
| Tabla 5. 1. Parámetros del sistema Motor-Bomba | 99 |
| Tabla 5. 2. Resumen de valores de los parámetros del circuito equivalente | 108 |
| Tabla 5. 3. Resumen de valores de los parámetros del circuito equivalente | 113 |

Contenido de gráficas

| | |
|--|----|
| Gráfica 2. 1. Valores típicos de trabajo útil y pérdidas para un sistema de bombeo | 44 |
| Gráfica 2. 2. Pérdidas de energía en un sistema real | 44 |
| Gráfica 2. 3. Graficas de eficiencias en los motores (IE1, IE2 IE3)..... | 47 |
| Gráfica 2. 4. Característica Par vs Velocidad para diferentes clases de motores | 48 |
| Gráfica 2. 5. Relación entre el rendimiento de diversas bombas centrífugas y su velocidad específica | 50 |
| Gráfica 2. 6. Punto de máximo rendimiento o PMR | 51 |
| Gráfica 2. 7. Curvas de rendimiento de una bomba centrífuga | 52 |
| Gráfica 3. 1. Variación del par y velocidad al aumentar la potencia..... | 55 |
| Gráfica 3. 2. Porcentaje de variación de parámetros al cambiar la tensión nominal | 56 |
| Gráfica 3. 3. Gráfica del Factor de reducción | 58 |
| Gráfica 3. 4 Relación entre Reducción de Potencia y Desbalance de Tensiones | 60 |
| Gráfica 3. 5. Curva par | 61 |
| Gráfica 3.6. Curva par-velocidad para un motor de 4 polos | 62 |
| Gráfica 3. 7. Curva Intensidad | 62 |
| Gráfica 3. 8. Curva roja, frecuencia alta, tensión alta. Curva verde, menor tensión a una frecuencia menor | 63 |
| Gráfica 3. 9. Control de Velocidad mediante variación de la resistencia del rotor de un motor de inducción de rotor devanado | 64 |
| Gráfica 4. 1. Ilustración del rendimiento de una bomba para diámetros diferentes rodete | 79 |
| Gráfica 4. 2. Curva de Carga total vrs Capacidad | 80 |
| Gráfica 4. 3. Curvas características de una bomba de flujo axial típica | 81 |
| Gráfica 4. 4. Curvas características de una bomba centrífuga de flujo mixta típica | 81 |
| Gráfica 4. 5. Curvas características de funcionamiento de una bomba de flujo mixto | 82 |
| Gráfica 4. 6. Ilustración del rendimiento de una bomba para diámetros diferentes de impulsor | 82 |
| Gráfica 4. 7. Rendimiento de una bomba centrífuga de 2x3-10 cuando opera a 1750 rpm | 83 |
| Gráfica 4. 8. Rendimiento de una bomba para diámetros diferentes del impulsor con la potencia requerida | 83 |

| | |
|--|-----|
| Gráfica 4. 9. Rendimiento de una bomba para diámetros diferentes del impulsor con la eficiencia..... | 84 |
| Gráfica 4. 10. Curvas de Altura neta de succión positiva requerida y disponible | 86 |
| Gráfica 4. 11. Curva NPSHr | 86 |
| Gráfica 4. 12 Curvas de funcionamiento para bomba centrifuga modelo TE-5.5..... | 87 |
| Gráfica 4. 13. Punto de Operación de la Bomba | 87 |
| Gráfica 4. 14. Rangos de funcionamiento de una bomba | 88 |
| Gráfica 4. 15. Efectos del uso de una bomba fuera de su zona óptima de operación..... | 89 |
| Gráfica 5. 1. Incremento de pérdidas..... | 102 |
| Gráfica 5. 2. Factor de redimensionamiento..... | 103 |
| Gráfica 5. 3. Porcentaje de calentamiento de un motor de inducción | 104 |

RESUMEN

El presente documento de tesis desarrolla el estudio de los efectos del desequilibrio de tensiones sobre la potencia nominal de un motor de inducción trifásico en una subestación de bombeo, usando como metodología de análisis el método gráfico y el método de componentes simétricas.

Para lograr esto, se plantea el primer capítulo donde se detalla el funcionamiento del motor y la bomba, estudiando características, y, para el caso de la bomba, cómo es su comportamiento según diferentes condiciones de operación. Seguidamente, se desarrolla un segundo capítulo con el estudio de los fenómenos que causan impacto directo y significativo a los sistemas de bombeo tales como desbalances de tensión, distorsión armónica, sobretensiones, etc. Es allí donde las normas nacionales e internacionales juegan un papel vital en todo proceso de medición de calidad de energía eléctrica, puesto que ellas brindan directrices y normatividades necesarias para los equipos, pasos y metodologías de monitoreo y la recopilación de datos.

Antes de entrar al desarrollo de los efectos del desequilibrio, se explica de manera puntual el análisis de componentes simétricas; la idea básica del método es considerar que todo circuito trifásico desequilibrado puede ser expresado como la suma o composición de tres sistemas simétricos.

Se detalla un método de auditoría energética general basado en normas internacionales, pero enfocado al desbalance de tensiones y sus efectos.

Con todos los elementos desarrollados, se finaliza con una guía y un ejemplo de aplicación para la evaluación y análisis de eficiencia de los equipos de bombeo, así como también, el estudio de costos debido a las pérdidas provocadas por desbalances, y, el informe de la auditoría.

INTRODUCCIÓN

Los problemas en la calidad de la potencia de los sistemas eléctricos han aumentado debido a al incremento en la cantidad de equipos contaminantes y por el aumento considerable de la potencia y sensibilidad de las cargas.

El presente trabajo, detalla el estudio de la calidad de la potencia de suministro de energía para estaciones de bombeo de agua potable, proponiendo alternativas de solución, con prácticas que reduzcan las pérdidas en operación del conjunto motor-bomba. De igual manera, se evalúa la operación del equipo de bombeo para uso eficiente de la energía, como un complemento al análisis de la calidad de la potencia.

Debido a que los motores de inducción representan un porcentaje muy alto de las cargas eléctricas, genera interés en conocer el efecto que producen las deficiencias en la calidad de potencia a este tipo de cargas, ya que, las maquinas eléctricas son menos eficientes cuando trabajan con sistemas desequilibrados. En este caso, se pretende evaluar cómo influye el desbalance de tensión en el desempeño de los motores de inducción, y éste, al funcionamiento del sistema de bombeo.

En un sistema equilibrado, puede fácilmente analizarse por medio de su equivalente monofásico. Por otro lado, un sistema, como un motor con desbalances de tensiones en sus fases presenta una complicación mayor en su análisis. En este trabajo se propone dos métodos para determinar las pérdidas producidas por el desbalance de tensión y ver cómo afecta esto en la eficiencia del motor, el primer método es de manera gráfica y el segundo, utilizando las componentes simétricas de Charles Legeyt Fortescue.

También, se describen las etapas necesarias para realizar una auditoria energética. Este método se basa esencialmente en determinar la energía consumida y las pérdidas en cada componente del sistema motor-bomba. Además, las principales técnicas de ingeniería que se utilizan para el diagnóstico y la evaluación de las oportunidades de ahorro en este tipo de sistemas, donde, se desarrolla una guía para la aplicación y evaluación de la metodología a utilizar en el análisis de los equipos de bombeo.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Analizar el impacto de la calidad de servicio de la potencia para la operación eficiente en equipos de bombeo de agua potable y la evaluación de alternativas de ahorro de energía.

Objetivos Específicos

- Identificar oportunidades de ahorro de energía en el sistema, reduciendo pérdidas eléctricas y/o mecánicas.
- Recomendar modificaciones para mejorar el rendimiento en la operación del sistema de bombeo de agua potable con base en la información recolectada y a las mediciones realizadas en los equipos y en la red eléctrica.
- Aplicar normativas nacionales e internacionales, para la correcta medición y aplicación de los límites recomendados por las normativas para un funcionamiento óptimo del equipo.
- Desarrollar una guía para la aplicación y evaluación de la metodología a utilizar en el análisis de los equipos de bombeo.

ALCANCES

- Realizar un estudio técnico-económico de la eficiencia en la operación del equipo de bombeo y ahorro de energía eléctrica.
- Evaluar la relación entre la energía suministrada al lugar y la que realmente es aprovechada para bombear el agua de la estación.
- Determinar posibles oportunidades de ahorro energético en el equipo de bombeo de agua potable.

CAPÍTULO I: Generalidades

1.1 Impulsión en fluidos.

Para que el fluido pueda desarrollarse con normalidad en un sistema de flujo, estos deben de atravesar por sistemas complejos, tanto en longitud como en conducción (tienen que atravesar por conductos rectos, curvos, válvulas, codos entre otros). Entonces, el fluido solo fluye de manera espontánea si su energía total disminuye en la dirección del flujo; y al no ser así, se deberá de suministrar energía de manera externa, por medio de dispositivos como bombas para el caso de fluidos y para los gases se pueden utilizar lo que son compresores o ventiladores.

La energía aplicada al fluido dependerá con el caudal, la altura, la presión que se requiera al final del recorrido, longitudes y diámetros de tuberías, sistemas de accesorios (válvulas, codos) y de las propiedades del fluido.

Para tener un mejor conocimiento, se deben de conocer ciertas fórmulas donde no solo se entenderá el comportamiento del fluido en un sistema; sino también, con ciertas modificaciones, se comprenderá el comportamiento del fluido en presencia de un sistema de bombeo.

1.1.1 Ecuación de continuidad.

Al pasar un fluido incompresible por un conducto de diámetro variable, genera un cambio de velocidad, siendo este cambio inversamente proporcional a la superficie del conducto, en un punto de la sección transversal. La ecuación de continuidad viene a ser un caso particular del principio de conservación de la masa, basándose en que el caudal (Q) del fluido ha de permanecer constante a lo largo de toda la conducción. [1]

Dado que el caudal es el producto de la superficie de una sección del conducto por la velocidad con que fluye el fluido, tendremos que en dos puntos de una misma tubería se debe cumplir que:

$$Q = A_1 * V_1 = A_2 * V_2 \quad 1.1$$

Donde:

Q: Caudal (m³/s)

A_{1,2}: Sección transversal (m²)

V_{1,2}: Velocidad (m/s)

Esta ecuación es aplicable a fluidos incompresibles tanto para flujo estacionario como no estacionario, dentro de contornos fijos.

1.1.2 Ecuación de energía.

La ecuación de energía debe tener en cuenta las fuentes, intercambios y la disipación de energía que sufrirá. A diferencia con la ecuación de Bernoulli es que se eliminan la aproximación de flujo no viscoso, como también la suposición de movimiento a lo largo de una línea de corriente.

La representación de las pérdidas ocurre cuando la energía que se dispone en el flujo del fluido, viene y se convierte en energía térmica a través de los esfuerzos cortantes viscosos o también turbulencias. [2]

Para un flujo incompresible $\rho_1=\rho_2=\rho$, entonces la ecuación de energía vendría a ser:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = H_s + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_{1-2} \quad 1.2$$

Donde:

$\frac{V}{2g}$: *Altura cinética.*

$\frac{P}{\gamma}$: *Altura de presión.*

$\frac{P}{\gamma} + Z$: *Altura piezométrica.*

h_{1-2} : *Pérdidas de carga.*

H_s : *Altura proporcionada por la bomba.*

La ecuación de la energía vista anteriormente vendrá a ser base fundamental para describir los fenómenos que se dan en un sistema de bombeo. Fabricantes de bombas, redes de distribución de agua potable, de riego y residuales, optan por dicha ecuación ya que se puede abordar y realizar balances de energía mecánica.

1.1.3 Cargas en el sistema.

La pérdida de carga viene a ser la diferencia de presión entre dos puntos, para un determinado caudal. Si el fluido no está en movimiento entonces no puede haber pérdida de carga. [3]

La carga del sistema la podemos dividir en dos:

- **Carga de aspiración o succión:** Valor de energía que posee el fluido en el momento en que llega a la entrada de succión de la bomba hidráulica.

$$H_{as} = \frac{P_{as}}{\gamma} + Z_{as} + \frac{V_{as}^2}{2g} \quad 1.3$$

- **Carga de impulsión o descarga:** Es el valor que posee el fluido en el punto de salida de la bomba hidráulica.

$$H_d = \frac{P_d}{\gamma} + Z_d + \frac{V_d^2}{2g} \quad 1.4$$

- **Carga total:** Es la diferencia entre la carga de impulsión y la carga de aspiración.

$$h = H_d - H_{as} = \frac{P_d}{\gamma} + Z_d + \frac{V_d^2}{2g} - \left(\frac{P_{as}}{\gamma} + Z_{as} + \frac{V_{as}^2}{2g} \right) \quad 1.5$$

Se tiene un sistema típico de bombeo en la figura 1.1:

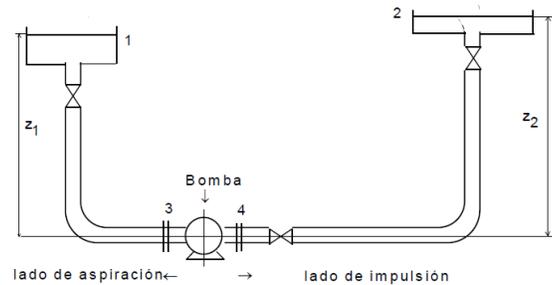


Figura 1. 1. Cargas en el sistema de bombeo

Para poder plantear las ecuaciones de los conceptos antes vistos, primero tomamos como nuestro punto de referencia el punto 3, donde $Z_3 = Z_4 = 0$.

Entonces, si se plantea un balance de energía mecánica entre los puntos 1 y 3 se tendría:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_3}{\gamma} + Z_3 + \frac{V_3^2}{2g} + h_{1-3} \quad 1.6$$

Sabiendo que:

$$H_{as} = \frac{P_3}{\gamma} + Z_3 + \frac{V_3^2}{2g} = \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - h_{1-3} \quad 1.7$$

Siguiendo los mismos pasos, pero ahora para el punto 2 y 4:

$$H_d = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_{4-2} \quad 1.8$$

En (1.6) el término h_{1-3} viene a ser la pérdida carga que hay debido a la fricción en la zona de aspiración y de igual forma en (1.8) h_{4-2} sería la pérdida de carga por fricción en la zona de impulsión.

Para representar todo el sistema y tomando la ecuación (1.5) tendríamos una carga total:

$$h = H_d - H_{as} = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right) + (Z_2 - Z_1) + \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} \right) + h_{4-2} + h_{1-3} \quad 1.9$$

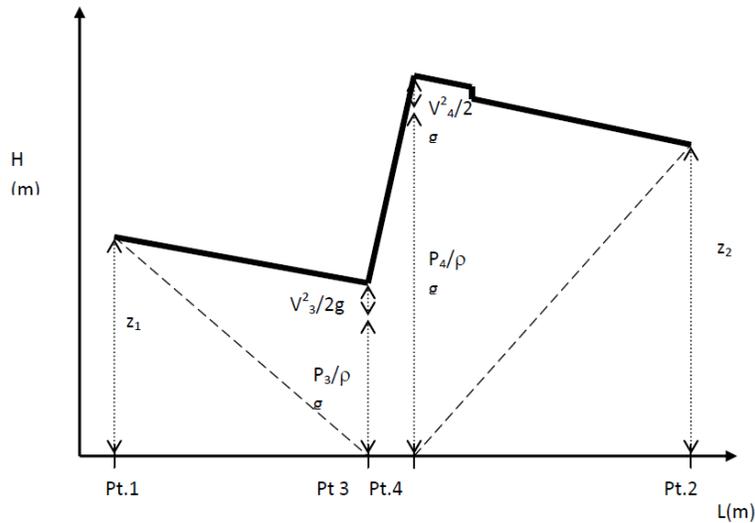


Figura 1. 2. Diagrama de cargas.

1.2 Bombas hidráulicas.

Por simplicidad del estudio del presente trabajo, se selecciona una bomba centrífuga tipo impulsor cerrado.

1.2.1 Bombas centrífugas

Una bomba centrífuga transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio en la energía cinética y potencial que se necesiten, también llamadas bombas roto-dinámicas son las más utilizadas en la actualidad para bombear líquidos de casi cualquier tipo. El 80% de la producción mundial de bombas está constituido por las bombas centrífugas.

Las bombas centrífugas (Figura. 1.3) son del tipo bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor. El fluido entra por el centro de un rodete que se compone por unos alabes para conducir el fluido y por la acción de la fuerza centrífuga es impulsado hacia el exterior donde es recogido por la caja o carcasa de la bomba que por el contorno su forma lo conduce hacia las tuberías de salida o hacia el siguiente rodete. [4]

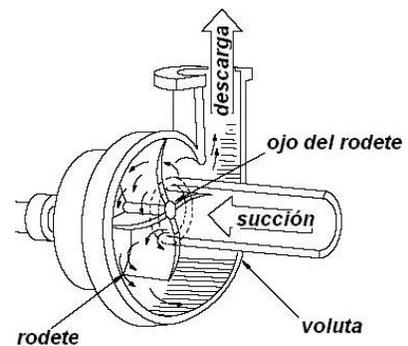


Figura 1. 3. Partes de una bomba centrífuga

El impulsor o rodete está formado por un conjunto de álabes que pueden adoptar diversas formas según la misión que vaya a desarrollar la bomba (impulsor abierto, semi-abierto, cerrado). Estos álabes giran dentro de una carcasa circular. El impulsor es accionado por un motor, y va unido solidariamente al eje, siendo este la parte móvil de la bomba

Uno de los objetos de estudio del presente trabajo también es el motor eléctrico, ya que, el objetivo es mejorar su eficiencia, con el fin de que aumente la eficiencia final con la bomba seleccionada. El estudio de motor – bomba es en donde se convierte la energía eléctrica en energía hidráulica. Los motores habituales en bombas centrífugas son eléctricos de corriente alterna y potencias entre 1 y

100 HP, con revoluciones variable en función de frecuencia y voltaje de la línea. Los progresos en los motores eléctricos han propiciado el desarrollo de bombas centrífugas, mucho más ligeras y baratas.

1.2.2 Impulsores cerrados.

El impulsor cerrado (Figura. 1.4) tiene una pared posterior y una frontal para una resistencia máxima. Se usan en bombas grandes con alta eficiencia y bajo NPSHR. Pueden operar en servicio de sólidos suspendidos sin obstrucción, pero presentarán altas tasas de desgaste. El tipo de impulsor cerrado es el tipo de impulsor más utilizado para bombas centrífugas que manejan líquidos claros. Confían en los anillos de desgaste de espacio libre cercanos en el impulsor y en la carcasa de la bomba. Los anillos de desgaste separan la presión de entrada de la presión dentro de la bomba, reducen las cargas axiales y ayudan a mantener la eficiencia de la bomba.



Figura 1. 4. Impulsor cerrado

A continuación, se presenta la comparación de bombas centrífugas con idénticas características, pero, con distinto tipo de impulsor, obteniendo eficiencias y resultados económicos diferentes. Es por esto que, los fabricantes optan por el tipo de impulsor cerrado, porque puede alcanzar una alta eficiencia, y, es esto lo que se busca para tener una mejor calidad de trabajo en la relación motor – bomba. [4]

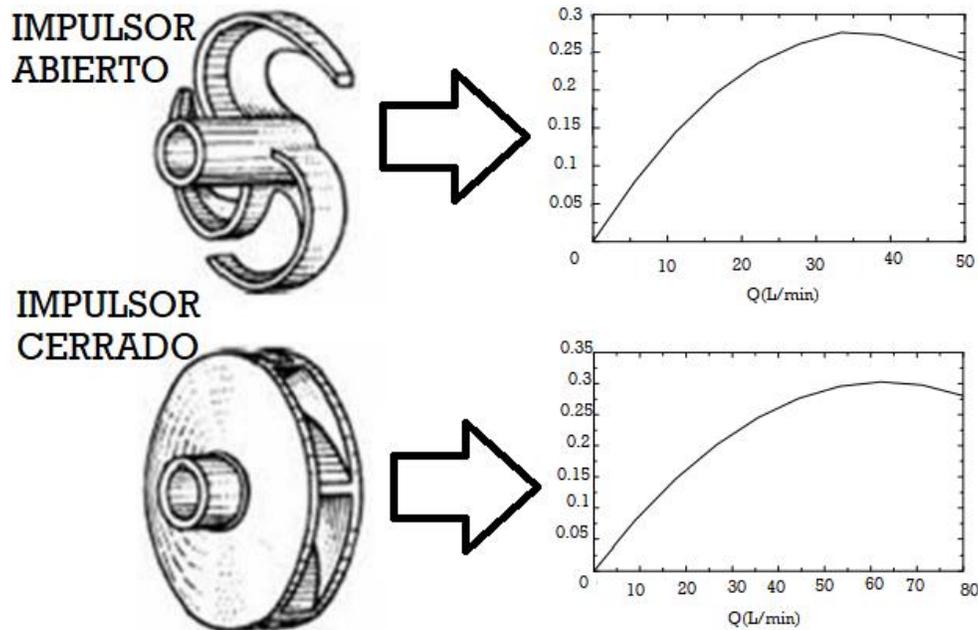


Figura 1. 5. Comparación de la eficiencia según el tipo de impulsor

1.3 Motor de inducción trifásico

Los motores de inducción son las máquinas empleadas para propulsar de manera simple y eficiente las bombas utilizadas en los sistemas de saneamiento. Sus ventajas radican en su reducido tamaño y peso en comparación con otros sistemas motrices; en su limpieza, no contaminan el medio ambiente y producen menos ruido; en su facilidad de operación y finalmente en menor costo en comparación a sus similares de combustión interna.

Un motor de inducción es una máquina que consta de dos partes principales: el rotor y el estator; en la que, al aplicar un conjunto trifásico de voltajes al estator, fluye de él un conjunto trifásico de corrientes. Estas corrientes producen un campo magnético B_s que rota en dirección opuesta a las manecillas del reloj; este campo magnético giratorio B_s pasa sobre las barras del rotor e induce un voltaje en ellas.

Lo que produce el voltaje inducido en la barra del rotor es el movimiento relativo del rotor en comparación con el campo magnético del estator; y, ya que el rotor es inductivo la corriente pico del rotor queda en atraso con relación al voltaje pico del rotor. El flujo de corriente del rotor produce el campo magnético del rotor B_R y finalmente el par inducido en el motor está dado por

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_S \quad 1.10$$

La dirección del par resultante va en sentido contrario a las manecillas del reloj. Puesto que la dirección del par inducido en el rotor va en sentido contrario a las manecillas del reloj el rotor acelera en esa dirección.

En operación normal los campos magnéticos B_R y B_S que corresponden al rotor y el estator rotan conjuntamente a la velocidad síncrona n_{sinc} mientras que el rotor en si gira a una velocidad menor.

Un concepto importante es la velocidad de deslizamiento definida como la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor:

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m \quad 1.11$$

Dónde:

n_{des} = velocidad de deslizamiento del motor

n_{sinc} = velocidad del campo magnético

n_m = velocidad mecánica del eje del motor

El otro término utilizado para describir el movimiento relativo es el deslizamiento, el cual representa la velocidad relativa expresada en por unidad o en porcentaje. El deslizamiento S se define de la siguiente manera:

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \times 100\% \quad 1.12$$

Ambas expresiones pueden expresarse en términos de velocidad angular ω_{sinc} y ω_m .

1.3.1 Modelo de Circuito Equivalente de un Motor de Inducción

Este tipo de motores dependen de la inducción de voltajes y corrientes en el circuito del rotor desde el circuito del estator (acción transformadora). Dado que los voltajes y corrientes inducidos en el circuito del rotor de un motor de inducción son una operación transformadora, el circuito equivalente de un motor de inducción será muy similar al circuito equivalente de un transformador.

Se puede deducir el circuito equivalente de un motor de inducción a partir del conocimiento de los transformadores y luego tomando en cuenta los efectos de la frecuencia variable del rotor.

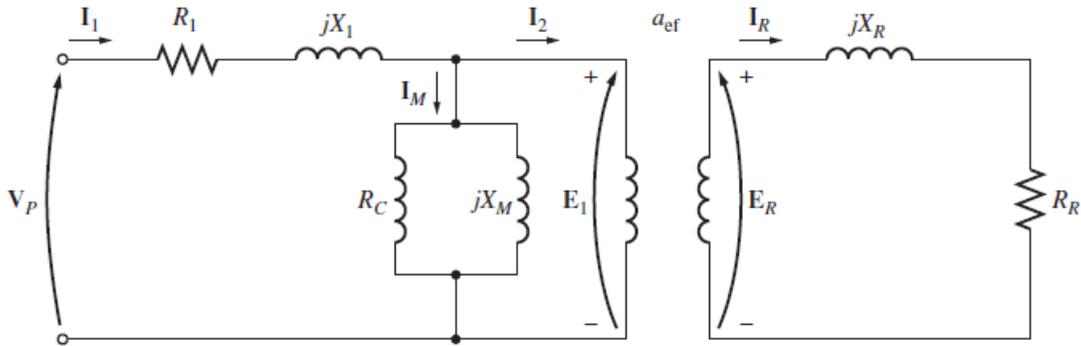


Figura 1. 6. Circuito equivalente de un motor de inducción

Del mismo modo que con un transformador; para analizar el comportamiento del motor de inducción, se debe referir parte del circuito al primario, es decir a la parte del estator. Dando como resultado el siguiente circuito:

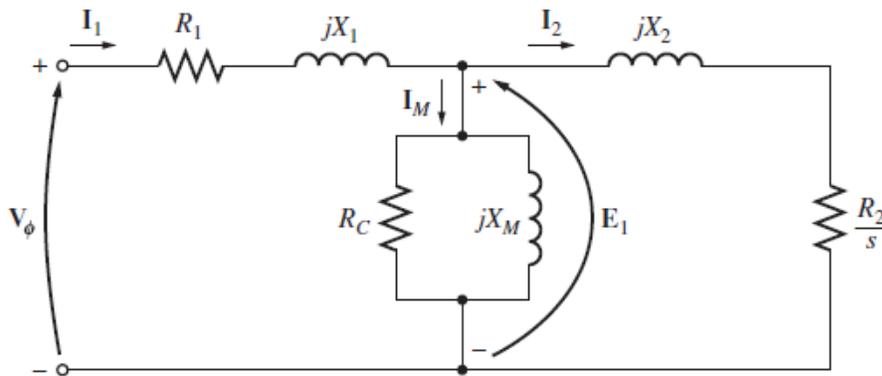


Figura 1. 3. Circuito Equivalente por fase referido al lado del estator de un motor de inducción.

Cabe notar que la pendiente de la curva de la fuerza magnetomotriz y el flujo del motor de inducción es mucho menos pronunciada que la curva de un buen transformador. Esto es porque debe haber un entrehierro en los motores de inducción, que incrementa fuertemente la reluctancia del camino del flujo y, por lo tanto, reduce el acoplamiento entre los devanados primario y secundario. Mientras más alta sea la reluctancia que provoca el entrehierro, mayor será la corriente de magnetización que se requiera para obtener cierto nivel de flujo. Por lo tanto, la reactancia de magnetización X_M en el circuito equivalente tendrá que ser mucho menor de lo que sería en un transformador ordinario. [5]

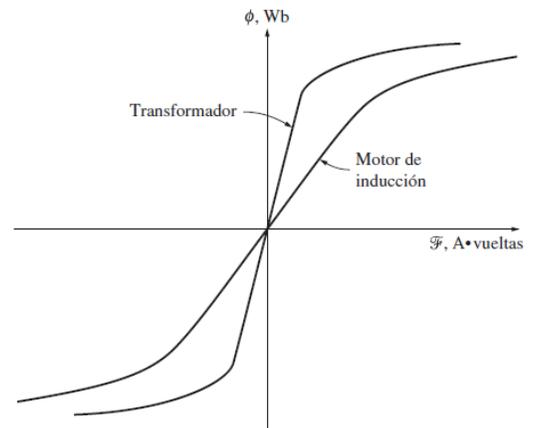


Figura 1. 8. Curva de Magnetización de un Motor de Inducción vs un Transformador

1.3.2 Par y Flujo de Potencia

Los devanados del rotor de un motor de inducción están en cortocircuito, por lo que no hay salida de electricidad de los motores de inducción. En cambio, la salida es mecánica. La relación entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica de salida del motor se muestra en el diagrama de flujo de potencia:

Del diagrama se puede listar las siguientes pérdidas:

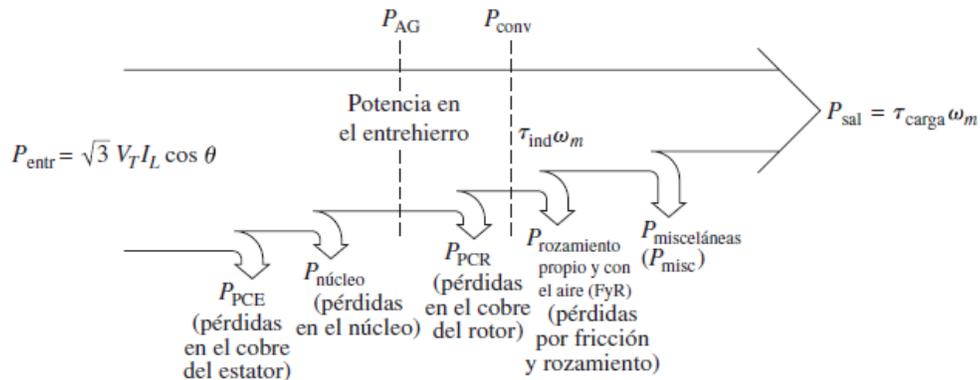


Figura 1. 4. Diagrama de Flujo de Potencia de Motor

- Pérdidas en el cobre del estator y en el rotor; las cuales son equivalentes a IR^2 .
- Pérdidas en el núcleo: son pérdidas de potencia debidas a la histéresis y las corrientes parásitas del estator.
- Pérdidas por fricción y rozamiento.
- Pérdidas misceláneas.

Mientras mayor sea la velocidad del motor de inducción, mayores serán las pérdidas por fricción, por rozamiento con el aire y misceláneas. Por otro lado, mientras más alta sea la velocidad del motor (hasta n_{sinc}), menores serán las pérdidas en el núcleo. Por lo tanto, a veces estas tres categorías de pérdidas se agrupan y se denominan pérdidas rotacionales.

El objetivo es reducir a lo mínimo posible todas estas pérdidas, de manera que el motor funcione con la mayor eficiencia posible. Tomando en cuenta estas pérdidas y con el conocimiento que el par inducido viene de:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sinc}} \quad 1.13$$

Se vuelve necesario saber los parámetros que modifican los valores de la Potencia del Entrehierro (P_{AG}). Ahora si sabemos que P_{AG} es:

$$P_{AG} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{(R_{TH} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad 1.14$$

Entonces:

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{\omega_{sinc} (R_{TH} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad 1.15$$

Donde:

$$V_{TH} \cong V_{\phi} \frac{X_m}{X_1 + X_m} \quad 1.16$$

$$R_{TH} \cong R_1 \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m} \right)^2 \quad 1.17$$

$$X_{TH} \cong X_1 \quad 1.18$$

Al observar la ecuación del Par inducido, se observa que este depende de V_{TH} y de ω_{sinc} los cuales son parámetros que dependen únicamente de la magnitud y la frecuencia de la tensión de suministro [6].

Bibliografía.

[1] Franzini J. B. & Finnemore E. J. (1999). Cap. 4 Principios Básicos del flujo del fluido. Mecánica de Fluidos con aplicaciones en ingeniería (pp 65-81). California, Estados Unidos: Ediciones McGraw-Hill.

[2] Streeter V. L. & Wylie E. B. & Bedford K. W. (2000). Cap. 4 Ecuaciones diferenciales básicas. Mecánica de Fluidos (pp 185-212). Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.

[3] Mott R. L. & Untener J. A. (2015). Cap 7 General Energy Equations. Applied Fluid Mechanics (pp 154-167). Boston, Estados Unidos: Global ed.

[4] Yunus Cengel y John Cimbala (2006)- Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones (Cap. 15 Turbomaquinaria) - Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana. Primera Edición.

[5] Steven J. Chapman (2012). Cap. 6. Motor de Inducción. Máquinas Eléctricas, Quinta Edición. México D. F., México: McGraw-Hill

[6] Steven J. Chapman (2012). Cap. 6. Motor de Inducción. Máquinas Eléctricas, Quinta Edición. México D. F., México: McGraw-Hill

CAPÍTULO II: Calidad de la energía eléctrica

2.1 Calidad de la energía eléctrica.

La energía eléctrica es la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos cuando se ponen en contacto por medio de un conductor eléctrico.

La red eléctrica suministra energía eléctrica a los dispositivos conectados a ella, los cuales producen alguna forma de trabajo. En la búsqueda por sacar el máximo rendimiento de los equipos de trabajo, es necesario notar que no todos los suministros de energía hacen rendir de la misma manera a un mismo equipo, esto se debe a diferentes características que hacen que la energía proveída sea más o menos aprovechada por los aparatos, dependiendo de su compatibilidad; esta situación hace que se vuelva necesario el estudio de la Calidad de la Energía Eléctrica.

La Norma IEEE 1159-2019 “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality” define la Calidad de la Energía como *“una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente eléctricas, en un tiempo dado y en una ubicación dada en el sistema de potencia”*. [1]

Esta “amplia variedad de fenómenos electromagnéticos” que menciona la norma quedan definidos en la misma en siete categorías: transitorios, variaciones de corta duración, variaciones de larga duración, desequilibrio de tensión, distorsión de la forma de onda, fluctuaciones de tensión y variaciones de frecuencia.

Cada uno de estos fenómenos influye, de manera directa en el rendimiento de los equipos. Por lo tanto, un análisis de la calidad de la energía suministrada a un sistema se traduce en decisiones que y modificaciones que terminarán aumentando la eficiencia de un equipo, sea cual sea, conectado a dicho suministro.

2.1.1 Parámetros.

Para garantizar la que la energía eléctrica sea aprovechada de la mejor manera por los equipos conectados a la red de distribución, es necesario conocer los parámetros que utiliza la Norma IEEE 1159-2019 en sus siete categorías, y así indicar si la energía es de calidad o no; además, a su vez, qué elemento es necesario corregir para mejorar el rendimiento de los equipos conectados a la red.

Considerada como un producto, de manera técnica, la energía eléctrica se puede parametrizar bajo los siguientes indicadores:

1. Frecuencia.
2. Factor de Potencia.
3. Variaciones de tensiones.
4. Desbalance de Tensiones.
5. Interrupciones.
6. Armónicos.

Diferentes entes y organismos internacionales se han encargado de hacer recomendaciones sobre estos parámetros con la intención de sacar el mayor provecho a la energía y salvaguardar la integridad del usuario y evitar el daño en los equipos. En El Salvador, el ente encargado de verificar

la calidad de la energía es la SIGET, por medio del documento “Normas de Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución”.

1 Frecuencia.

En corriente alterna (CA), la frecuencia es el número de veces que la onda sinusoidal de corriente alterna se repite en un segundo. Se mide en Hertz (Hz) y un Hertz es igual a un ciclo por segundo.

Para cualquier instante, en un sistema de potencia, la frecuencia del sistema depende del balance entre la carga y la capacidad de generación disponible. Se ha especificado el valor de 60 Hz como frecuencia nominal para la mayoría de países en el continente americano, incluyendo El Salvador. Por otro lado, la Unión Europea ha tomado la convención de utilizar 50 Hz en sus sistemas de distribución eléctrico.

Las variaciones de frecuencia se definen por el Std. IEEE 1159-1995 como la desviación de la frecuencia fundamental del sistema de potencia de su valor nominal especificado.

Normativas como la IEC 61000 [2] indican que la variación de frecuencia permitida en los sistemas de potencia no debe ser mayor al $\pm 1\%$ y el $\pm 2\%$, respectivamente. En El Salvador, el documento “Normas de Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución” no define tolerancias con respecto a este tema.

Cabe destacar que variaciones en la frecuencia mayores al 2 % de la frecuencia nominal normalmente derivan en fallas en el sistema de distribución o daños a los equipos conectados a la red eléctrica.

2 Factor de Potencia.

El factor de potencia es la relación entre la Potencia Activa (P), medida en Watts (W) y la Potencia Aparente (S), medida en Voltamperios (VA) y su cociente arroja como resultado un número que representa la capacidad de una carga de utilizar la potencia activa. La siguiente imagen representa dicha relación de manera gráfica:

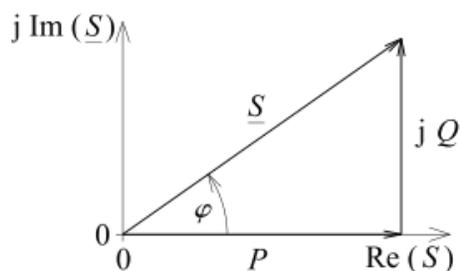


Figura 2. 1. Factor de Potencia.

El factor de potencia es diferente para cada usuario y depende de los tipos de cargas que el cliente tiene conectadas a la red. En el país, la SIGET penaliza a los usuarios con factor de potencia bajo de acuerdo a la siguiente tabla tomada del documento Términos y Condiciones, art. 53: [3]

| | |
|------------------|---|
| 0.75 < Fp < 0.90 | El cargo por energía será aumentado en 1% por cada centésima que el FP sea inferior a 0.90 |
| 0.6 < Fp < 0.75 | El cargo por energía será aumentado en 15% más el 2% por cada centésima que el FP sea inferior a 0.75 |
| FP < 0.6 | El distribuidor podrá suspender el suministro hasta tanto el usuario final adecúe sus instalaciones a fin de superar dicho valor límite |

Tabla 2. 1. Penalización por bajos valores de factores de potencia según SIGET [3]

3 Variaciones de Tensión.

Una variación es una perturbación estacionaria o cuasi-estacionaria la cual requiere una medición continua. Toda variación en el voltaje de referencia fuera de los límites establecidos puede causar daños en los equipos conectados al sistema eléctrico.

Existen dos tipos de variaciones; variación lenta y variación rápida.

Las variaciones lentas de voltaje son conocidas con el término regulación de voltaje, el cual se refiere al buen funcionamiento del equipo eléctrico conectado al sistema de potencia. El margen de variación, según ANSI C84.1 [4], generalmente es del $\pm 10\%$ del voltaje Nominal, esto, para solventar las variaciones de voltaje en el sistema eléctrico debido a la conexión o desconexión de equipos.

Las variaciones rápidas de amplitud o fluctuaciones, son variaciones sistemáticas de la forma de onda de tensión o puede ser una serie de cambios aleatorios de tensión de pequeñas dimensiones. Cualquier carga que presente variaciones considerables de corriente puede generar fluctuaciones de tensión. Lo más común es el parpadeo de las lámparas fluorescentes. [5]

Las fluctuaciones, son causadas por equipos que generan cambios repetitivos en la forma de onda y por equipos que varían continuamente el consumo de corriente. [6]

Las consecuencias que esto atrae son los cambios rápidos en la intensidad luminosa de dispositivos de iluminación (flickers) y en el control de rectificadores controlados por línea y en el frenado y aceleración de motores.

Según las **Normas de Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución** publicado por SIGET [3] proporciona rangos de niveles tensiones para los cuales las empresas distribuidoras deben de cumplir. El Indicador de Calidad para evaluar la tensión viene dado por la siguiente fórmula:

$$\Delta V_k(\%) = \frac{V_k - V_N}{V_N} * 100\%$$

2.1

Donde:

V_k : Valores eficaces de fase (RMS) instantáneos medidos en el punto de entrega

V_N : Tensión nominal del mismo punto.

Para la Normas de Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución [3] para media tensión, se tiene los siguientes límites:

Densidad de carga alta: $\pm 6\%$

Densidad de carga baja: $\pm 7\%$

Aislado: $\pm 8.5\%$

4 Desbalance de Tensión.

El desbalance de tensión es útil para saber cuán diferentes son las tensiones de un sistema trifásico entre sí. El desbalance de voltaje se expresa en porcentajes. Este fenómeno afecta principalmente a los equipos trifásicos que poseen motor, como aires acondicionados y bombas; incrementando su temperatura, reduciendo su vida útil y haciéndolos más susceptibles a fallas de otra naturaleza. Para que un sistema trifásico de tensiones se encuentre desbalanceado se tiene que cumplir estas condiciones:

- Las magnitudes de tensión de fase o de línea sean distintas
- Los ángulos de los fasores de las tensiones sean distintos en condiciones balanceadas.

El desequilibrio de la tensión viene a ser considerado como un problema de calidad en la energía. En un inicio las tensiones están normalmente equilibradas en nivel de generación y transmisión, pero las tensiones a nivel de distribución son las que sufren desbalances y esto debido a un sistema desigual de impedancias en la red y a la distribución de cargas monofásicas.

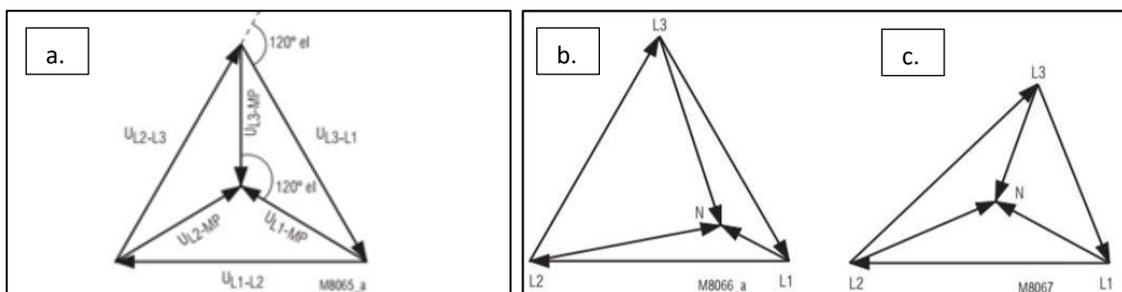


Figura 2. 2. Desbalance de tensión en magnitud y en fase. a-) Diagrama fasorial. b-) Tensiones asimétricas. c-) Ángulos de tensiones asimétricos.

Según la norma IEC 61000-4-30, el factor de desbalance de tensión (Voltage Unbalance Factor - VUF) se determina mediante la relación entre los módulos de las componentes de secuencia negativa y positiva de la misma [7]. A partir de esta definición, el grado de desbalance suele expresarse como un porcentaje que se calcula mediante:

$$VUF = \frac{V_2}{V_1} * 100 \quad 2.2$$

Donde:

V1: Tensión de secuencia positiva.

V2: Tensión de secuencia negativa.

Donde las componentes de secuencia positiva y negativa vienen dadas por:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix}$$

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

Las normas NEMA MG1 de motores eléctricos y generadores, recomiendan limitar el desequilibrio a un máximo de 1%. Cuando las tensiones entre fases (AB – BC y CA) están desequilibradas, la corriente aumenta rápidamente en devanados del motor, y si se permite que estén presentes de forma permanente, se dañará el motor irremediablemente [8].

Para el cálculo del desbalance NEMA MG1:

$$PVU = \frac{\text{MAX}\{|V_{ab} - V_{PROM}|, |V_{bc} - V_{PROM}|, |V_{ca} - V_{PROM}|\}}{V_{PROM}} * 100 \quad 2.3$$

Donde:

$$V_{ab} = V_a - V_b \quad 2.4$$

$$V_{bc} = V_b - V_c \quad 2.5$$

$$V_{ca} = V_c - V_a \quad 2.6$$

$$V_{PROM} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad 2.7$$

PVU= Máxima desviación de voltaje de línea.

La norma IEEE 1159-1995 [1] define el desbalance en un sistema trifásico como la máxima desviación de la tensión de una de las fases de la tensión promedio, dividido por la tensión promedio de las tres fases. El límite máximo admisible de desbalance es de un 3%.

$$\%Desbalance_{Fase} = \frac{\text{MAX}[|V_A - V_{PROM}|, |V_B - V_{PROM}|, |V_C - V_{PROM}|]}{V_{PROM}} \quad 2.8$$

Donde:

$$V_{PROM} = \frac{V_A + V_B + V_C}{3} \quad 2.9$$

5 Flicker.

DEFINICION SEGÚN ESTANDAR FLICKER

Indicadores de performance establecidos

- **SAIFI:** System Average Interruption Frequency Index, o Frecuencia Media de Interrupción por usuario en un periodo determinado.
- **SAIDI:** System Average Interruption Duration Index, o Tiempo Total Promedio de Interrupción por usuario en un periodo determinado.
- **FMIK:** Frecuencia Media de Interrupción por kVA nominal Instalado. En un periodo determinado, representa la cantidad de veces que el kVA promedio sufrió una interrupción de servicio.
- **TTIK:** Tiempo Total de Interrupción por kVA nominal Instalado. En un periodo determinado, representa el tiempo medio en que el kVA promedio no tuvo servicio

| Indicadores de Calidad de Servicio Técnico | Límites Normativos | Densidad de carga | |
|--|---------------------|-------------------|-------------|
| | | Alta | Baja(rural) |
| SAIFI (Frecuencia - Cliente) | 7/12 | 5.21 | 6.63 |
| SAIDI (Duración - Cliente) | 14/24 horas | 9.41 | 20.23 |
| FMIK (Frecuencia – kVA instalados) | 5/12 interrupciones | 3.4 | 6.32 |
| TTIK (Duración – kVA instalados) | 10/24 horas | 5.76 | 19.14 |

Tabla 2. 2. Límites normativos de los indicadores de calidad.

6 Armónicos.

Los armónicos pueden reducir la vida útil del equipo si un sistema está diseñado sin tener en cuenta los armónicos y si el equipo no está clasificado y aplicado adecuadamente. Por lo tanto, es útil medir y limitar los armónicos en los sistemas de energía eléctrica.

De acuerdo con IEEE 519-1992 [9], la distorsión de voltaje armónico en sistemas de potencia de 69 kV y menos está limitada al 5.0% de distorsión armónica total (THD) con cada armónico individual limitado al 3% con respecto a la fundamental.

IEEE 519

| <i>Límites de Distorsión Armónica en Voltaje en % del voltaje nominal</i> | | |
|---|--------------------------------|-------------------------------------|
| Nivel de tensión en la Acometida (V_n) | Distorsión armónica individual | Distorsión armónica total THD V_n |
| $V_n < 69$ kV | 3.0% | 5.0% |
| 69 kV $< V_n \leq 161$ kV | 1.5% | 2.5% |
| $V_n > 161$ kV | 1.0% | 1.5% |

Tabla 2. 3. IEEE Std 519-1992 Límites de voltajes armónicos.

$$THD_{Vn} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \quad 2.10$$

Donde:

V_h : Magnitud de la componente armónica individual.

h : Orden armónico

V_n : Voltaje nominal fundamental del sistema.

Por su parte, **SIGET** en su Norma de Calidad [3] proporciona los límites de distorsión los cuales son las siguientes:

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

Tabla 2. 4. Límites de distorsión armónica de tensión en redes de media y baja tensión.

Las tasas de distorsión individual (TDI) y distorsión armónica total (VDAT) se determinarán porcentualmente con respecto a la componente de voltaje de la frecuencia fundamental (60Hz) de la siguiente forma:

$$TDI = \frac{V_n}{V_1} * 100 \quad 2.11$$

$$VDAT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{25} V_n^2}}{V_1} * 100 \quad 2.12$$

Donde:

TDI: Tasa de distorsión individual.

VDAT: Tasa de distorsión armónica total.

V_n : Amplitud del voltaje de la armónica n.

V_1 : Amplitud del voltaje a la frecuencia fundamental (60Hz).

Para la normativa SIGET fija que no debe de superar el límite de distorsión de armónicos de tensión en un 8% del período de medición, de igual forma hay una diferencia en los límites individuales, ya que SIGET toma como límite máximo un 5% y la IEEE 519 toma un máximo del 3% con respecto a la fundamental.

SIGET en su normativa, menciona que es obligación de la distribuidora proporcionar una tensión sin distorsión y recaer sobre ellos el pago de compensaciones a usuarios afectados. Por su parte, IEEE

519-1992 reconoce la responsabilidad tanto del usuario como de la empresa distribuidora a la reducción de los problemas armónicos. Ya que, el usuario no debe de degradar el voltaje que es proporcionado a otros usuarios al requerir corrientes no lineales para su uso. Y, por parte de la distribuidora tiene la responsabilidad de proporcionar un voltaje sin distorsión.

Las mediciones para saber los límites de armónicos, están destinadas a aplicarse en el punto de acoplamiento común (PCC) entre el cliente y el servicio público.

Para definir los límites de distorsión de corriente, IEEE Std 519-1992 utiliza una relación de cortocircuito para establecer el tamaño de los clientes y la influencia potencial en la distorsión de voltaje del sistema. La relación de cortocircuito (I_{sc} / I_L) es la relación de la corriente de cortocircuito (I_{sc}) en el punto de acoplamiento común con el servicio público, a la carga máxima o corriente de demanda (I_L) del cliente.

La impedancia de un sistema se puede representar por la capacidad de cortocircuito de ese sistema, ya que la impedancia limitará la corriente que se alimentará a un cortocircuito. Por lo tanto, la capacidad de cortocircuito se puede usar para definir el tamaño y la influencia de un consumidor particular en un sistema de energía. Las relaciones más bajas o los sistemas de mayor impedancia tienen límites de distorsión de corriente más bajos para mantener la distorsión de voltaje a niveles razonables.

Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante que fluye es también baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el TDD que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma IEEE 519-1995.

Current Distortion Limits for General Distribution Systems
(120 V Through 69000 V)

| Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L | | | | | | |
|--|---|------------------|------------------|------------------|-------------|------|
| Individual Harmonic Order (Odd Harmonics) | | | | | | |
| I_{sc}/I_L | <11 | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h$ | TDD |
| <20* | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| 20<50 | 7.0 | 3.5 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 8.0 |
| 50<100 | 10.0 | 4.5 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 12.0 |
| 100<1000 | 12.0 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 15.0 |
| >1000 | 15.0 | 7.0 | 6.0 | 2.5 | 1.4 | 20.0 |
| Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above. | | | | | | |
| Current distortions that result in a dc offset, e.g. half-wave converters, are not allowed. | | | | | | |
| * All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L . | | | | | | |
| Where | | | | | | |
| I_{sc} | = maximum short-circuit current at PCC. | | | | | |
| I_L | = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC. | | | | | |
| TDD | = Total demand distortion (RSS), harmonic current distortion in % of maximum demand load current (15 or 30 min demand). | | | | | |
| PCC | = Point of common coupling. | | | | | |

Tabla 2. 5 IEEE 519-1992 Límites de corriente armónica.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} * 100\% \quad 2.13$$

TDD=Distorsión de demanda total.

Donde:

I_h =Magnitud de la armónica individual.

h= Orden armónico.

I_L = Demanda máxima de la corriente fundamental de carga.

Por su parte, SIGET da dos parámetros para la medición de corrientes armónicas:

- a) Cuando la potencia en la fase sea mayor o igual a 3.5kW, se utilizarán los siguientes indicadores:

$$DAITI = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{25} I_i^2}{I_1^2}} * 100 \quad 2.14$$

$$DAII = \frac{I_i}{I_1} * 100 \quad 2.15$$

Donde:

DATI: Distorsión armónica total de corriente.

DAII: Distorsión armónica individual de corriente.

I_i : Componente de la intensidad de corriente de la armónica de orden i.

I_1 : Componente de la intensidad de corriente de la frecuencia fundamental (60Hz).

- b) Cuando la potencia de la fase evaluada sea menor a 3.5KW, se utilizarán los indicadores I_i , que es la componente armónica de orden "i" de la corriente de carga.

Entonces, estos indicadores y los límites que se ubican en la Tabla 2.8, dependerán de la potencia registrada por fase en cada intervalo de la medición realizada, y no deberán de sobrepasar dichos límites.

| Orden de la armónica (n) | Potencia < 3.5 kW | Potencia ≥ 3.5 kW | |
|---|---|---|--------------|
| | Intensidad de la Componente Armónica (amperios) | Distorsión Armónica Individual de Corriente (%) | |
| Órdenes 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 |
| Órdenes 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 |
| Órdenes 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 |
| Distorsión Armónica Total de Corriente (%) | | -- | 20 |

Tabla 2. 6. Límites de distorsión armónica de corriente de carga de media y baja tensión.

Todas estas definiciones y parámetros permiten, tanto al cliente como la distribuidora, verificar con claridad la calidad de la energía suministrada, prevenir desperfectos en los equipos conectados a la red o problemas en la red misma y corregir o ajustar cualquier variación atípica en la calidad del suministro.

En la Tabla 2.9 se presenta de manera general, una comparación entre las regulaciones internacionales más aceptadas y las exigencias de la SIGET en el país con respecto a las normas de Calidad de la Energía:

| Parámetro | Regulaciones Internacionales | Norma de Calidad SIGET |
|-------------------------------|--|---|
| Frecuencia | ± 1 para el 99.5 % de la semana. [IEC 61000] | No Estipulado. |
| Factor de Potencia | Varía en función de cada país. | FP < 0.9 o inferior amerita una multa. FP < 0.6 Suspensión del servicio eléctrico. |
| Variaciones de Tensión | BT, MT: ±10% para 95% de la Semana. [ANSI C84.1] | Densidad de carga alta: ±6% Densidad de carga baja: ±7 Aislado: ±8.5% |

| | | |
|------------------------------|---|---|
| Desbalance de Tensión | Máximo de 1% para motores y generadores. [NEMA MG-1] Máximo de un 3%. [IEEE 1159 – 1995] | No Estipulado. |
| Flicker | PLT < 1 para el 95% de la semana. PST < 1 para el 95% de la semana. [EN 50160] | PST < 1.0 para el 95% de la segunda semana. |
| Armónicos | Tensión: THD= 5 % Corriente: TDD max= 20% | V DAT= 8 % DAITI= 20% |

Tabla 2.7. Comparación entre las regulaciones internacionales y las exigencias de la SIGET en el país.

Hablando de manera general sobre la calidad de la energía, la norma IEEE 1159, presenta los siguientes umbrales para la verificación de un servicio de calidad:

| | Categoría | Ajustes sugeridos | | Comentarios |
|--|---------------------|--------------------------|---------------|--|
| | | 120 V | 220 V* | |
| Umbrales de tensiones de fase conducidos | Hueco de tensión | 108 V | 198 V | 10 % por debajo de la tensión nominal |
| | “swell” | 126 V | 231 V | 5 % por sobre la tensión nominal |
| | Transitorio | 200 V | 400 V | Aproximadamente el doble de la tensión de fase nominal |
| | Ruido | 1,5 V | 2,5 V | Aproximadamente el 1 % de la tensión de fase nominal |
| | Armónicas | 5 % THD | 5 % THD | Nivel de distorsión armónica que puede afectar a la carga |
| | Frecuencia | +/- Hz | +/- Hz | - |
| | Desbalance de fases | 2 % | 2 % | Desbalance de fases mayores al 2 % pueden afectar al equipamiento (los motores de inducción deben reducir su potencia nominal) |

Tabla 2. 8. Umbrales Permitidos de Tensiones de Fase.

2.2 Flujo de potencia, conjunto motor-bomba

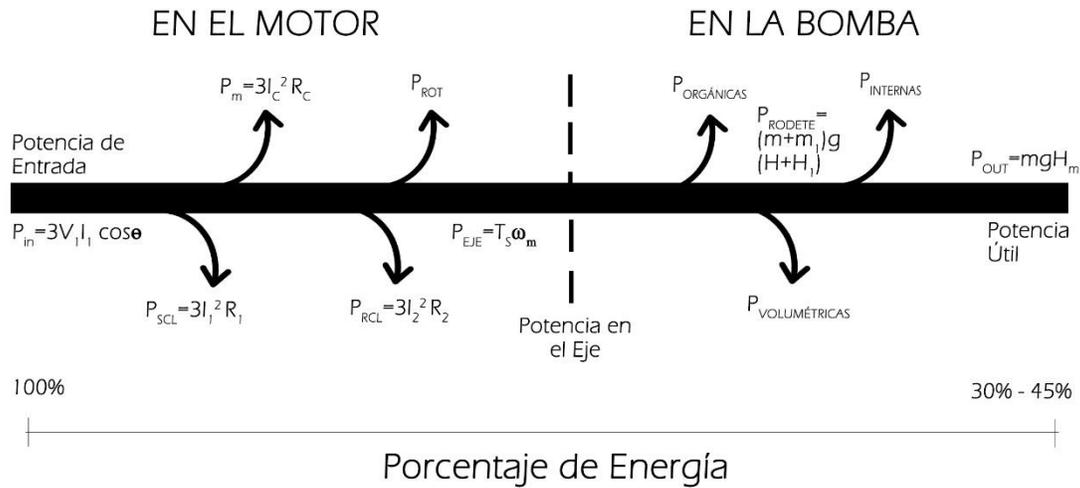


Figura 2. 3. Diagrama de Flujo de Potencia de un conjunto Motor-Bomba.

Como se observa en la imagen, en un principio la potencia que entra al motor equivale a:

$$P_{in} = 3V_1 I_1 \cos\theta \quad 2.16$$

Se ignoran las pérdidas en los cables de conexión desde el transformador hasta el motor debido a que son mínimas. Luego de obtener la potencia de entrada, las pérdidas en el motor se van definiendo en función del cuadrado de la corriente y la impedancia óhmica que se opone a esta. Se dan pérdidas en forma de calor tanto en el estator como en el rotor del motor; todo esto va disminuyendo la potencia del motor y, por tanto, la eficiencia de este se ve afectada. También cabe indicar que la potencia en el eje del motor (potencia de salida) viene dada por:

$$P_{OUT} = T_s \omega_m = P_{in} - P_{SCL} - P_m - P_{RCL} - P_{ROT} \cong \eta P_{in} \quad 2.17$$

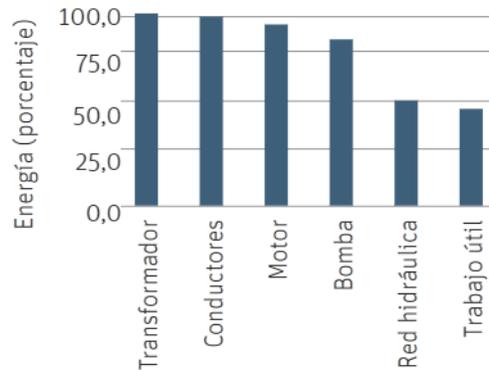
Donde η (Eficiencia) es un valor dado por el fabricante y depende de la calidad y tipo de motor. Suelen ser valores entre el 85% y el 96%.

Con la potencia en el eje se puede conocer la velocidad de giro del eje y el par desarrollado por este. En teoría, debería transmitirse toda la potencia desarrollada en el eje del motor hacia el eje de la bomba; pero, debido a problemas como imperfecciones en la alineación de los ejes, pérdidas rotacionales, desgaste o rozamiento de las piezas, entre otros, hay pérdidas significativas en la transmisión de potencia del motor a la bomba; existen pérdidas que se definen como pérdidas orgánicas y pérdidas volumétricas propias del funcionamiento de la bomba que disminuyen aún más la potencia entregada al fluido. Es más, la eficiencia de las bombas hidráulicas en promedio es menor al 50%, lo que hace que gran cantidad de la energía que entra al motor no llegue finalmente al fluido.

Al hablar específicamente de la bomba, la eficiencia global a la que opera ésta se calcula entonces como el cociente entre la potencia manométrica de salida (Potencia Útil, P_f) y la potencia mecánica suministrada por el eje del motor (P_{eje}). Es decir:

$$\eta_T = \frac{\text{Potencia Útil}}{\text{Potencia en el Eje}} = \frac{Q\rho gH_t}{T\omega} \quad 2.18$$

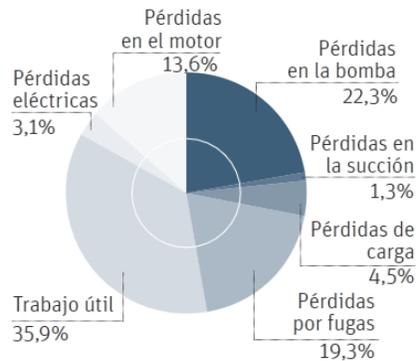
Por otra parte, el gráfico a continuación presenta los valores típicos de trabajo útil y pérdidas para un sistema de bombeo; expresando el porcentaje de la potencia que entra en cada uno de los elementos del sistema:



Gráfica 2. 1 Valores típicos de trabajo útil y pérdidas para un sistema de bombeo

Como se puede observar claramente, las mayores pérdidas de energía se presentan durante la transformación de energía mecánica en hidráulica, es decir, en la bomba. Además, gracias a este gráfico, es posible comprender dónde se da el problema de bajo rendimiento de los sistemas de bombeo, con un rango de eficiencia de 30% al 50% como valores normales.

De hecho, en el gráfico circular siguiente se observa la distribución de las pérdidas de energía en un sistema real:



Gráfica 2. 2. Pérdidas de energía en un sistema real.

Del gráfico se puede observar que:

- El porcentaje de energía útil para el bombeo de agua es, a penas, del 36%.

- Las pérdidas en el motor son del 13.6%, lo cual deja un motor con una eficiencia del 86%. Esto es un valor muy bajo para un motor de eficiencia Premium.
- Las pérdidas por fugas pueden llegar a ser muy considerables, en este caso, del 19.3%. esto, si bien no tiene relación directa con el tratamiento de eficiencia del sistema, puede ser solucionado con un correcto mantenimiento de las tuberías.

2.3 Eficiencia en motores de inducción

Se debe aclarar, que existen varias definiciones de eficiencia, ayudando a comprender mejor la selección y funcionamiento de los motores eléctricos. Entre las definiciones están:

- I. La **eficiencia** de cualquier máquina, incluyendo un motor eléctrico, es su salida de energía dividida por el total de la energía de entrada.

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ de\ Salida}{Potencia\ de\ Entrada} = \frac{Potencia\ de\ Salida}{Potencia\ de\ Salida + Pérdidas} \quad 2.19$$

- II. **Eficiencia nominal:** La eficiencia nominal es un número asignado a un rango de eficiencias en el que cae la eficiencia de un motor en particular. Entonces la eficiencia que marca la placa de identificación puede exagerar o subestimar la eficiencia real del motor. La eficiencia nominal representa la "eficiencia promedio" para una gran población de motores del mismo diseño. Por lo tanto, los valores promedio esperados y nominales no deben aceptarse como valor garantizado.
- III. **Eficiencia mínima:** La eficiencia mínima es una eficiencia estadística basada en la curva de distribución de frecuencia normal de los resultados de las pruebas de eficiencia del motor. La eficiencia mínima de un motor se puede calcular a partir de la eficiencia nominal de la siguiente manera:

$$EFF_{mín} = \frac{1}{\frac{1.2}{EFF_{nom}} - 0.2} \quad 2.20$$

- IV. **Eficiencia garantizada:** Es el valor establecido por el fabricante del motor para su debida clasificación.
- V. **Eficiencia calculada:** Es el valor de diseño de ingeniería.

NEMA especifica niveles de eficiencia para motores de inducción polifásicos de jaula de ardilla que se clasifican como de bajo consumo. La eficiencia nominal a plena carga debe ser igual o superior a los valores mostrados en la siguiente tabla:

Table 5-11—Full-load efficiencies of energy-efficient motors

| hp | 2-pole | | 4-pole | | 6-pole | | 8-pole | |
|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Nominal efficiency | Minimum efficiency |
| Open motors: | | | | | | | | |
| 1.0 | — | — | 82.5 | 80.0 | 80.0 | 77.0 | 74.0 | 70.0 |
| 1.5 | 82.5 | 80.0 | 84.0 | 81.5 | 84.0 | 81.5 | 75.5 | 72.0 |
| 2.0 | 84.0 | 81.5 | 84.0 | 81.5 | 85.5 | 82.5 | 85.5 | 82.5 |
| 3.0 | 84.0 | 81.5 | 86.5 | 84.0 | 86.5 | 84.0 | 86.5 | 84.0 |
| 5.0 | 85.5 | 82.5 | 87.5 | 85.5 | 87.5 | 85.5 | 87.5 | 85.5 |
| 7.5 | 87.5 | 85.5 | 88.5 | 86.5 | 88.5 | 86.5 | 88.5 | 86.5 |
| 10.0 | 88.5 | 86.5 | 89.5 | 87.5 | 90.2 | 88.5 | 89.5 | 87.5 |
| 15.0 | 89.5 | 87.5 | 91.0 | 89.5 | 90.2 | 88.5 | 89.5 | 87.5 |
| 20.0 | 90.2 | 88.5 | 91.0 | 89.5 | 91.0 | 89.5 | 90.2 | 88.5 |
| 25.0 | 91.0 | 89.5 | 91.7 | 90.2 | 91.7 | 90.2 | 90.2 | 88.5 |
| 30.0 | 91.0 | 89.5 | 92.4 | 91.0 | 92.4 | 91.0 | 91.0 | 89.5 |
| 40.0 | 91.7 | 90.2 | 93.0 | 91.7 | 93.0 | 91.7 | 91.0 | 89.5 |
| 50.0 | 92.4 | 91.0 | 93.0 | 91.7 | 93.0 | 91.7 | 91.7 | 90.2 |
| 60.0 | 93.0 | 91.7 | 93.6 | 92.4 | 93.6 | 92.4 | 92.4 | 91.0 |
| 75.0 | 93.0 | 91.7 | 94.1 | 93.0 | 93.6 | 92.4 | 93.6 | 92.4 |
| 100.0 | 93.0 | 91.7 | 94.1 | 93.0 | 94.1 | 93.0 | 93.6 | 92.4 |
| 125.0 | 93.6 | 92.4 | 94.5 | 93.6 | 94.1 | 93.0 | 93.6 | 92.4 |
| 150.0 | 93.6 | 92.4 | 95.0 | 94.1 | 94.5 | 93.6 | 93.6 | 92.4 |
| 200.0 | 94.5 | 93.6 | 95.0 | 94.1 | 94.5 | 93.6 | 93.6 | 92.4 |
| 250.0 | 94.5 | 93.6 | 95.4 | 94.5 | 95.4 | 94.5 | 94.5 | 93.6 |
| 300.0 | 95.0 | 94.1 | 95.4 | 94.5 | 95.4 | 94.5 | — | — |
| 350.0 | 95.0 | 94.1 | 95.4 | 94.5 | 95.4 | 94.5 | — | — |
| 400.0 | 95.4 | 94.5 | 95.4 | 94.5 | — | — | — | — |
| 450.0 | 95.8 | 95.0 | 95.8 | 95.0 | — | — | — | — |
| 500.0 | 95.8 | 95.0 | 95.8 | 95.0 | — | — | — | — |

Tabla 2. 9. Eficiencias a plena carga en la energía eficiente de motores

A pesar de que NEMA no incluye la palabra “garantizado”, la interpretación aceptada de la definición “eficiencia mínima” siempre ha sido que cualquier motor individual de ese diseño particular debe alcanzar ese nivel de eficiencia. El valor “nominal” es reconocido como un promedio. Algunos motores lo alcanzan; algunos lo superan; otros pueden no alcanzarlo. Pero el “mínimo” debe ser alcanzado por cada unidad.

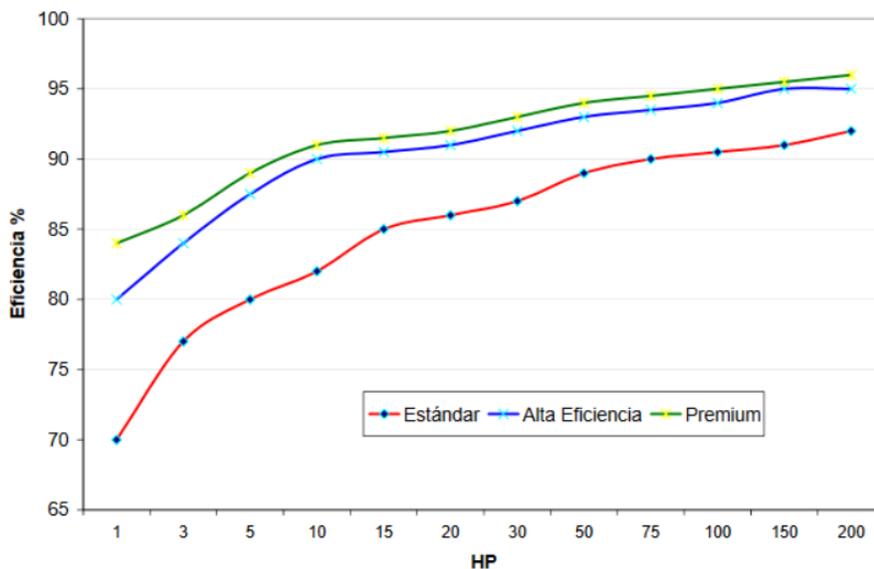
Por ello, los fabricantes de motores están haciendo innovaciones tecnológicas con el propósito de disminuir las pérdidas lo máximo posible, siendo cada vez motores más eficientes. Logrando con un diseño mejorado, empleando materiales de alta calidad y un mejor proceso de fabricación. Conforme a su eficiencia pueden considerarse tres géneros de motores eléctricos:

2.3.1 Motores de Eficiencia Estándar (IE1): No consideran la eficiencia como la principal cualidad, más bien privilegian la funcionalidad y precio, prácticamente los motores con más de 15 años podrían considerarse de eficiencia estándar.

2.3.2 Motores de Alta Eficiencia (IE2): Los motores de alta eficiencia poseen generalmente un menor deslizamiento (mayor velocidad de operación) que los motores de eficiencia estándar, debido a los cambios que se producen en los parámetros del motor. Son normalmente más robustos

y mejor contruidos que los motores estándar, lo que traduce en menores gastos en mantenimiento y mayor tiempo de vida.

2.3.3 Motores de Eficiencia Premium (IE3): La eficiencia Premium como estándar ayuda a los motores a generar energía de una forma más limpia, con menores desperdicios. Al ser contruidos bajo estos estándares de calidad y mejores componentes, requieren menor mantenimiento y reparaciones durante su vida útil.



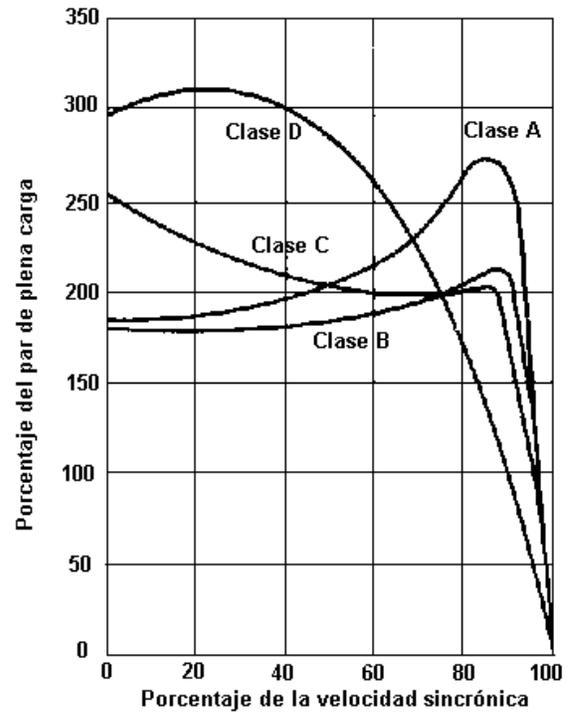
Gráfica 2. 3. Gráficas de eficiencias en los motores (IE1, IE2 IE3).

2.3.4 Motores de Inducción Clase B

En su gran mayoría, se utilizan motores de inducción jaula de ardilla clase B en aplicaciones de servicio de bombeo de agua potable. La figura 6 muestra la comparación de la característica Par – Velocidad de las diferentes clases de motores.

Los motores clase B son de propósito general; tienen baja corriente de arranque y bajo deslizamiento (menor al 4%) y su par máximo puede ser mayor o igual al 200% del par de carga nominal.

La siguiente tabla muestra las eficiencias de motores según NEMA para diferentes potencias:



Gráfica 2. 4. Característica Par vs Velocidad para diferentes clases de motores

| hp | Nominal efficiency Range | Average nominal efficiency |
|-----|--------------------------|----------------------------|
| 1 | 68 – 78 | 73 |
| 1.5 | 68 – 80 | 75 |
| 2 | 72 – 81 | 77 |
| 3 | 74 – 83 | 80 |
| 5 | 78 – 85 | 82 |
| 7.5 | 80 – 87 | 84 |
| 10 | 81 – 88 | 85 |
| 15 | 83 – 89 | 86 |
| 20 | 84 – 89 | 87.5 |
| 25 | 85 – 90 | 88 |
| 30 | 86 – 90.5 | 88.5 |
| 40 | 87 – 91.5 | 89.5 |
| 50 | 88 – 92 | 90 |
| 60 | 88.5 – 92 | 90.5 |
| 75 | 89.5 – 92.5 | 91 |
| 100 | 90 – 93 | 91.5 |
| 125 | 90.5 – 93 | 92 |
| 150 | 91 – 93.5 | 92.5 |
| 200 | 91.5 – 94 | 93 |
| 250 | 91.5 – 94.5 | 93.5 |

Tabla 2. 10. Eficiencias para motores de inducción trifásicos, clasificación B, de acuerdo a NEMA [2]

2.4 Eficiencia en bombas

Cuando un líquido fluye a través de una bomba, solo parte de la energía comunicada por el eje del impulsor es transferida al fluido. Existe fricción en los cojinetes y juntas, no todo el líquido que atraviesa la bomba recibe de manera efectiva la acción del impulsor y existe una pérdida de energía importante debido a la fricción del fluido. El rendimiento de una bomba es bastante sensible a las condiciones bajo las cuales esté operando.

El Caudal (Q), la carga hidráulica (H) y la potencia de salida de la bomba (P) están relacionados con el número de revoluciones de la bomba; y este depende de la potencia en su eje que, a su vez, depende del motor.

El diagrama de flujo de potencia de la bomba que se observa en la siguiente figura describe las pérdidas que se van dando durante su funcionamiento normal:

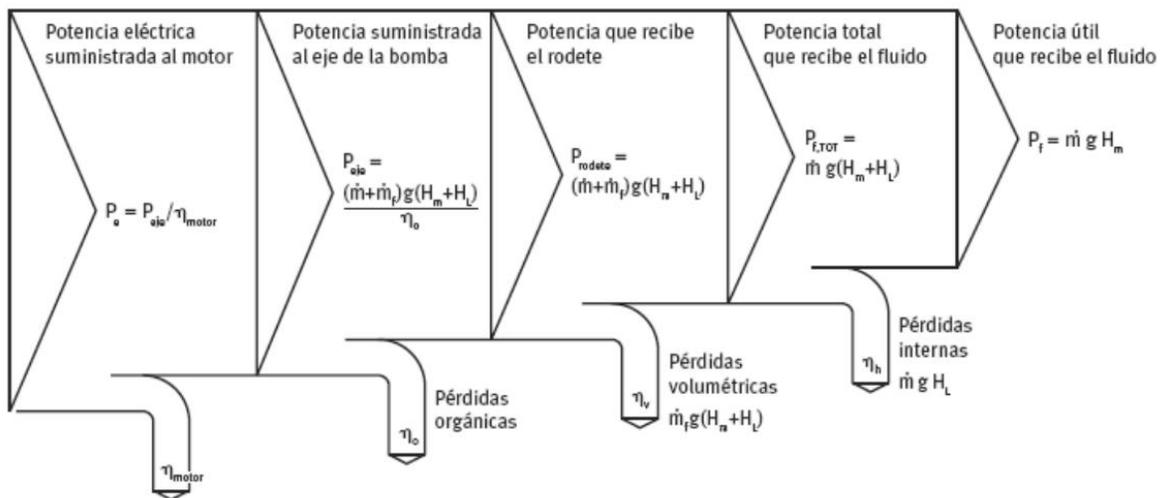


Figura 2. 4. Diagrama de Flujo de Potencia de una Bomba

Del diagrama se obtiene lo siguiente:

Rendimiento del motor: el cual se obtiene de la relación entre la potencia eléctrica suministrada al motor y la potencia en su eje.

Rendimiento Orgánico: Toma en cuenta las pérdidas de energía por un mal alineamiento entre el eje del motor y el de la bomba, además las que se dan por el rozamiento entre el eje de la bomba y los cojinetes y demás piezas. Todo esto hace que la potencia que se necesita suministrar en el eje de la bomba sea mayor.

Rendimiento Volumétrico: El rendimiento volumétrico toma en cuenta, en forma de pérdidas de energía, todas las fugas que se dan debido a la presión del fluido y a defectos en las uniones. A medida que aumenta la presión, las fugas también aumentan, y por lo tanto el rendimiento volumétrico disminuye.

Rendimiento hidráulico o manométrico: Suelen estar asociadas a pérdidas por rozamiento del fluido, y cambios de dirección [10]

Entonces, se obtiene:

$$\eta_T = \eta_{Motor} \cdot \eta_o \cdot \eta_v \cdot \eta_h \quad 2.21$$

Donde:

η_T : Rendimiento del conjunto motor-bomba.

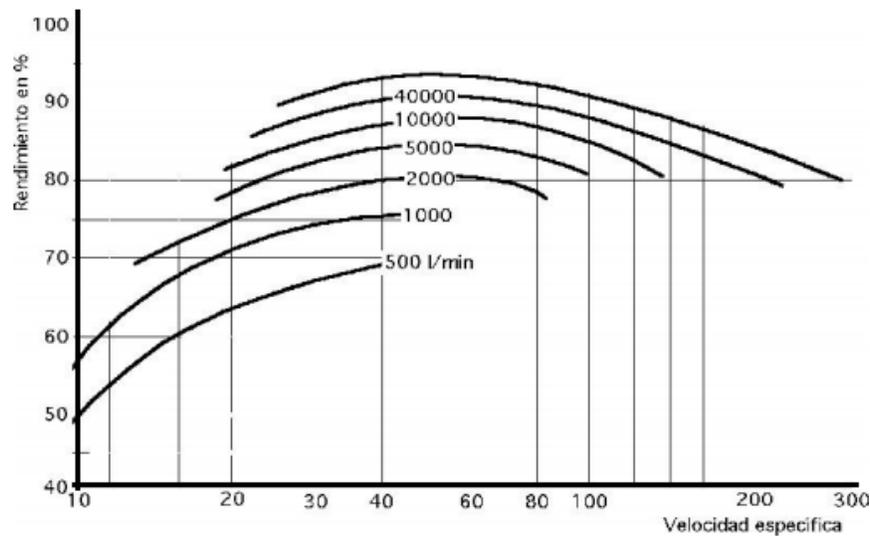
η_{MOTOR} : Rendimiento de placa del motor.

η_o : Rendimiento Orgánico.

η_v : Rendimiento Volumétrico.

η_h : Rendimiento Hidráulico.

Las bombas pueden –y deben- ser ajustadas para trabajar a una velocidad específica. Al crecer la velocidad específica el rendimiento mejora hasta un cierto valor de la misma, por encima del cual, pérdidas superiores de difusión y deficiencia en el guiado del líquido le hacen disminuir de nuevo, aunque de manera más suave.



Gráfica 2. 5. Relación entre el rendimiento de diversas bombas centrífugas y su velocidad específica

La eficiencia de la bomba, se traza en función del caudal a una velocidad de giro constante, esta información es brindada por el fabricante. La eficiencia de una bomba es la relación entre la potencia hidráulica agregada por la bomba al fluido y la potencia eléctrica consumida por el motor.

El rendimiento η de una bomba viene dado por:

$$\eta = \frac{\text{potencia suministrada al fluido}}{\text{potencia en el eje (al freno)}} = \frac{\gamma Q h}{T \omega} \quad 2.22$$

Donde γ , Q y h se definen de la forma habitual; T es el par ejercido por el motor sobre el eje de la bomba y ω el régimen de giro del eje en radianes por segundo.

Entonces, la eficiencia de una bomba es la relación entre la potencia hidráulica agregada a la bomba por el fluido y la potencia eléctrica consumida por el motor.

De modo que la eficiencia de la bomba se define de la siguiente manera:

$$\eta_{bomba} = \frac{\rho g Q H}{potencia\ demandada\ por\ la\ bomba \times 1000 \frac{W}{kW}} \quad 2.23$$

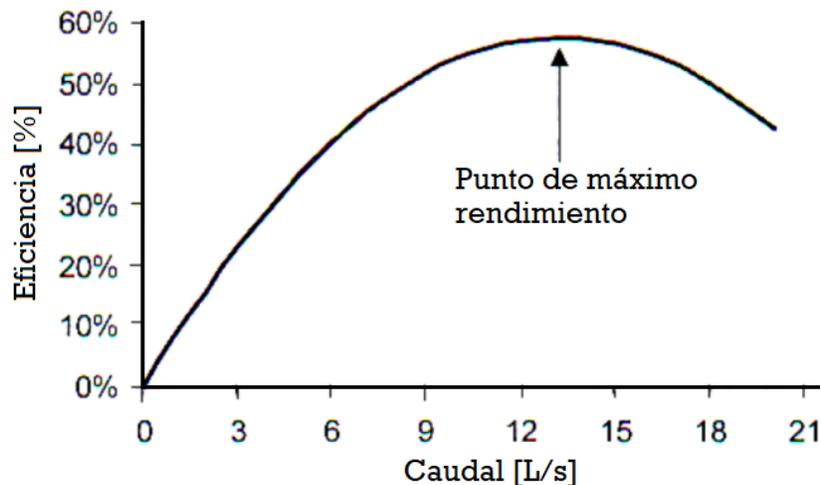
Donde:

Q: Caudal $\left[\frac{L}{s}\right]$ o $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

H: Carga total [m]

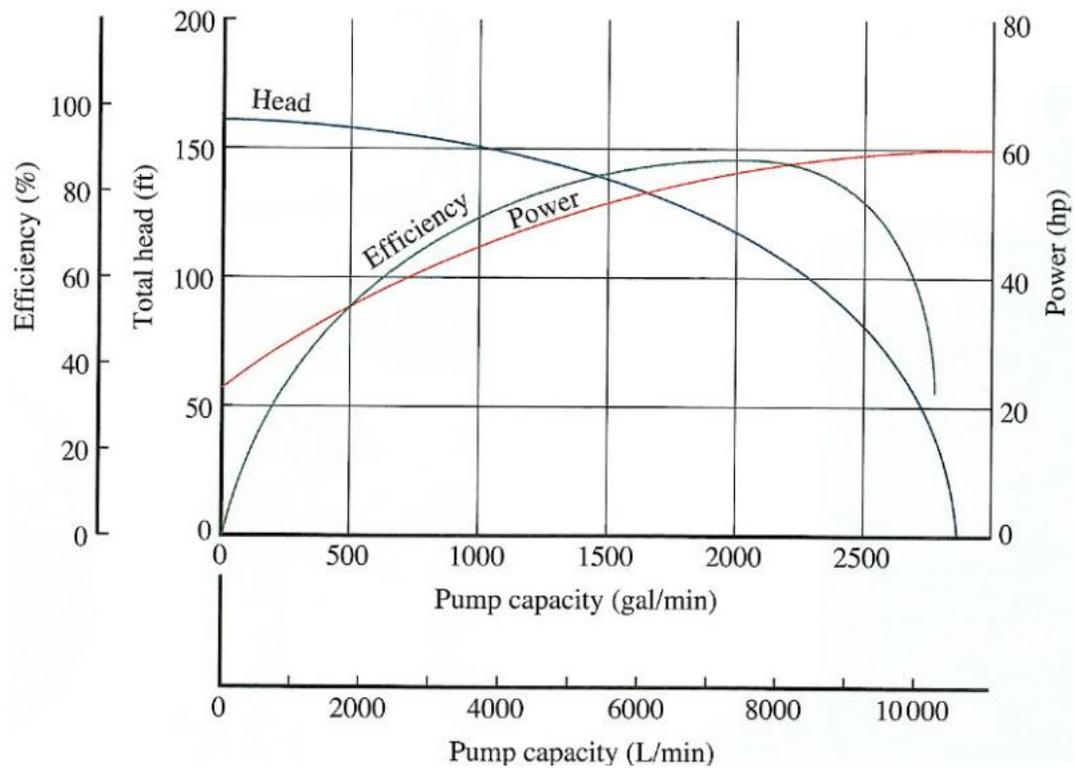
ρ : Densidad del fluido $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

g: Aceleración gravitacional $\left[\frac{m}{s^2}\right]$



Gráfica 2. 6. Punto de máximo rendimiento o PMR

Para operar con éxito una bomba, son importantes la eficiencia y la potencia requeridas. La siguiente figura presenta una medición más completa del rendimiento de una bomba, en la que se superpone las curvas de carga, eficiencia y potencia, y se grafica estas tres versus la capacidad. La operación normal debe estar cercana al pico de la curva de eficiencia, con eficiencias que por lo común están en el rango de 60 a 80% para bombas centrífugas.



Gráfica 2. 7. Curvas de rendimiento de una bomba centrifuga.

Bibliografía.

- [1] IEEE Std 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE New York, USA.
- [2] International Electrotechnical Commission (IEC), Electromagnetic Compatibility (EMC) IEC Stand.61000-4-15, Ed. 1.1 + Addendum, ENERO 2003.
- [3] SIGET. Acuerdo 192-E-2004. Normas Salvadoreñas de Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución.
- [4] Electric Power Systems and Equipment— Voltage Ratings (60 Hertz), ANSI Standard Publication no. ANSI C84.1-1995
- [5] Signal Processing of Power Quality Disturbances, Math H. Bollen – Secc 2.4
- [6] Mediciones Electrónicas: Calidad de la energía. ICYTE (Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica) Universidad Nacional de Mar del Plata.
- [7] M. Afkousi-Paqaleh, A. Abbaspour-Tehrani Fard, M. Rashidinejad, and K. Y. Lee, “Optimal placement and sizing of distributed resources for congestion management considering cost/benefit analysis,” *IEEE PES Gen. Meet. PES 2010*, pp. 1–7, 2010.
- [8] NEMA, Standard Publications No. MG1-1993. Motors and Generators, Published by National Electrical Manufacturers Association, Washington (1993), Part 21 pp. 9 - 10 and Part 30 pp. 1- 2.
- [9] IEEE STD 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System, 2014.
- [10] IDEA, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Manual Para el diseño de de una red hidráulica de climatización, Tema 6: Bombas Centrífugas.

CAPÍTULO III: Factores asociados a la eficiencia del motor

3.1 Factores asociados a la eficiencia del motor

3.1.1 Relación entre Energía y variaciones en el Torque del motor.

Para entender mejor las variaciones de la potencia y cómo estas afectan al sistema, es necesario ver el diagrama de pérdidas del motor, y cómo se distribuyen:

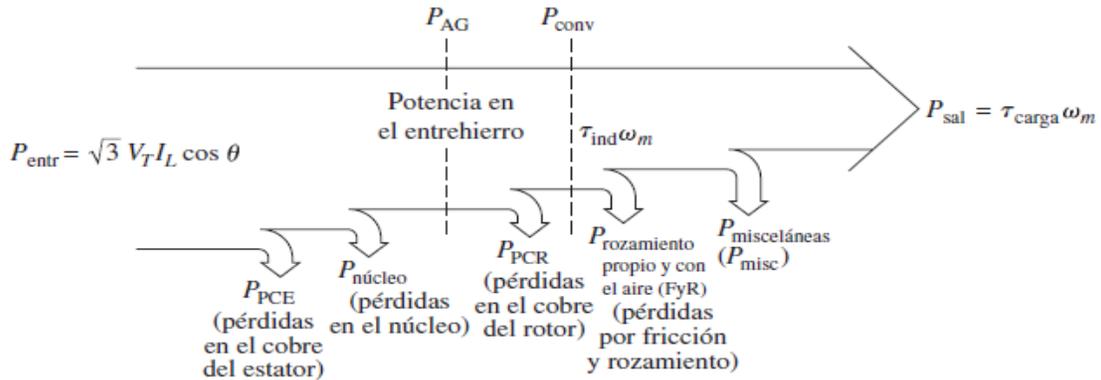
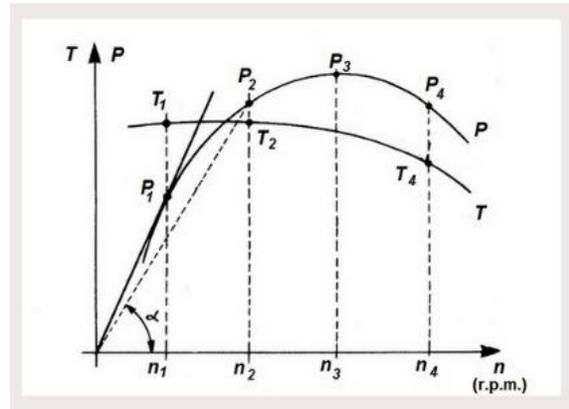
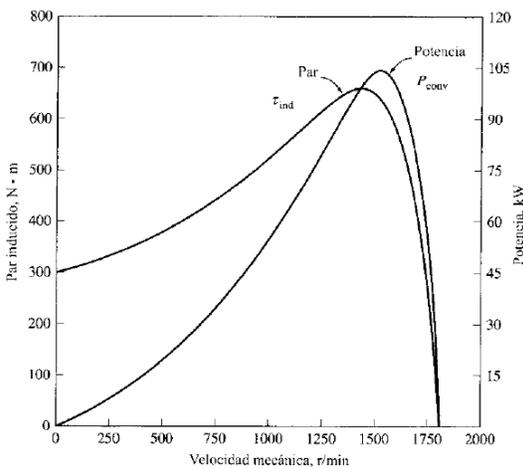


Figura 3. 1 Diagrama de pérdidas en motores eléctricos

Manteniendo las pérdidas en valores mínimos es lógico tener un rendimiento alto en el motor, obteniendo una potencia de salida (P_{out}) elevada. Es de aclarar que en el punto donde la P_{out} es máximo, el torque generado no sería el máximo; ya que, el torque inducido como el de carga, dependen tanto de la potencia como de la velocidad angular y el deslizamiento. Podemos ver estas relaciones en las siguientes figuras:



Gráfica 3. 1. Variación del par y velocidad al aumentar la potencia.

Las modificaciones que se obtienen al variar la potencia son:

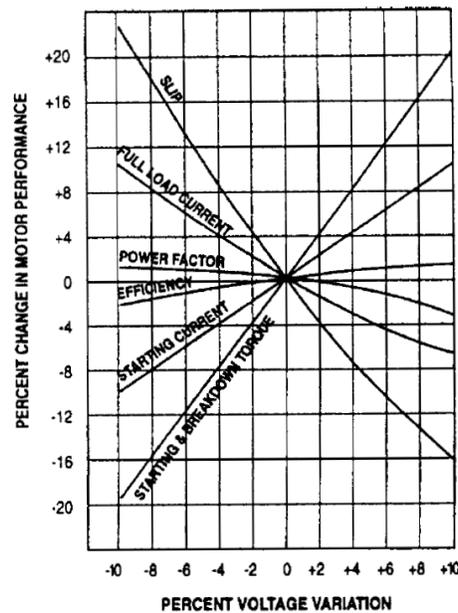
- Variación en el torque inducido.
- Variaciones en la velocidad mecánica.

Para variar la potencia tendremos que recurrir a la ecuación de potencia de entrada:

$$P_{in} = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos \varphi \quad 3.1$$

Entonces, para lograr cambios en la potencia, se necesita aplicar cambios en la tensión y en la corriente. Pero es de tener cuidado sobre todo con la corriente, ya que al incrementarse generará saturación en el núcleo y calentamiento en el motor, aumentando las pérdidas en el entrehierro.

Teniendo en cuenta esto, el libro de Bronce (IEEE, 1995) nos recomienda que, si en dado caso se trabajara en valores distintos a los valores nominales de la tensión, estos se mantengan en un $\pm 10\%$ del valor nominal de la tensión. Ya que, trae distintos efectos con respecto al debido funcionamiento del motor como se ve en la gráfica 3.2.



Gráfica 3. 2. Porcentaje de variación de parámetros al cambiar la tensión nominal

En la tabla 3.1, cuantifica los cambios de los parámetros de un motor de inducción para variaciones de la tensión de operación.

| Característica | Proporcional | Variación de Voltaje | |
|----------------------------------|---------------------|----------------------|----------------|
| | | 90% placa | 110% placa |
| Torque de arranque | Voltaje al cuadrado | -19% | +21% |
| Porcentaje de deslizamiento | $(1/voltaje)^2$ | +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 | Varia con el diseño | +5 a +10% | -5 a -10% |
| Corriente Sin Carga | Varia con el diseño | -10 a -30% | +10 a +30% |
| Aumento de la Temperatura | Varia con el diseño | +10 a +15% | -10% a -15% |
| Eficiencia a plena carga | Varia con el diseño | -1 a -3% | +1 a +3% |
| Factor de Potencia a Plena Carga | Varia con el diseño | +3 a +7% | -2 a -7% |
| Ruido Magnético | Varia con el diseño | Ligera Disminución | Ligero Aumento |

Tabla 3. 1 Cuantificación de datos del gráfico 3.2.

Las tensiones aplicadas a motor por encima de su valor de placa producen un aumento en el par del motor, mayor corriente de arranque, y una disminución del factor de potencia. Al incrementar el par de arranque aumentarán las fuerzas de aceleración en los acoplamientos y el equipo accionado.

En la ecuación del par en eje del motor, podemos observar mejor los efectos que puede traer el incremento de la tensión:

$$\tau_{ind} = \frac{3V^2 * \frac{R_2}{S}}{w_{sinc} * \left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S} \right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \quad 3.2$$

Esta expresión indica que:

1. Cuando la máquina funciona a tensión y frecuencia constantes, el par solo varía en función del deslizamiento y velocidad del giro del rotor.
2. La velocidad, para una misma potencia, siempre es menor para tensiones más bajas pues el par es proporcional al producto del cuadrado de la tensión por el deslizamiento y si baja la tensión tiene que subir el deslizamiento y disminuir, por tanto, la velocidad. Lo contrario ocurre con tensiones más altas.

En general, las tensiones ligeramente por encima del valor de placa del motor tienen menos distorsiones en el rendimiento del motor que tensiones ligeramente por debajo de su valor de placa.

3.2 Variaciones de la velocidad debido a problemas en la calidad de energía.

3.2.1 Límites de Distorsión Armónica.

Los armónicos pueden reducir la vida útil del equipo si un sistema está diseñado sin tener en cuenta estas perturbaciones. Por lo tanto, es útil medir y limitar los armónicos en los sistemas de energía eléctrica.

De acuerdo con IEEE 519-1992, la distorsión de voltaje armónico en sistemas de potencia de 69 kV y menos está limitada al 5.0% de distorsión armónica total (THD) con cada armónico individual limitado al 3% con respecto a la fundamental.

Entonces, sabiendo los parámetros requeridos por las normativas, tanto nacionales como internacionales, NEMA MG1-1993[B164] menciona que en presencia de armónicos los motores tendrán una reducción en su potencia en base a la siguiente fórmula:

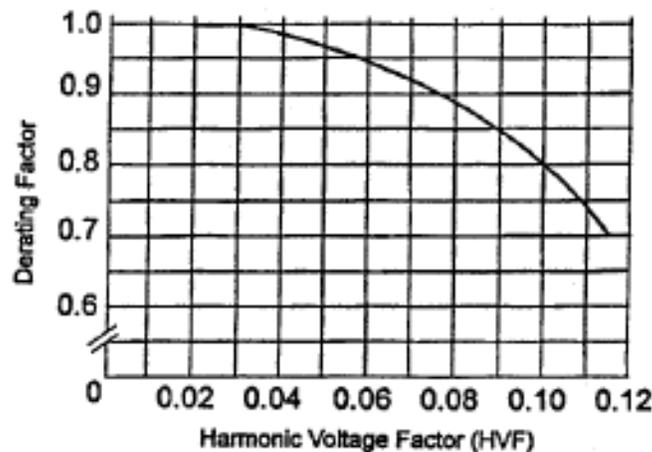
$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{(V_n)^2}{n}} \quad 3.3$$

Donde:

n: Orden de la armónica incluyendo las divisibles entre 3

V_n : Es la magnitud por unidad de la tensión a la n ésima armónica de frecuencia

Entonces, NEMA MG1-1993 [B164] dice que la potencia nominal del motor tendrá una reducción indicada por el factor HVF de la fórmula anterior. Entonces al ajustar el motor y tomar en cuenta dicha reducción traerá consigo la reducción de posibles daños en el motor. La gráfica 3.3 muestra el porcentaje de reducción que tendrá el motor de acuerdo al valor obtenido en HVF.



Gráfica 3. 3. Gráfica del Factor de reducción.

3.2.2 Efectos del Desbalance de Tensiones en Motores de Inducción.

En un sistema trifásico equilibrado, las tensiones de fase deberían ser iguales o prácticamente iguales. El desbalance de un sistema trifásico, es una condición en la que las tres fases presentan diferencias en el módulo y/o desplazamiento angular entre fases, distinto de 120 grados eléctricos. La variable trifásica indicada de manera genérica puede ser indistintamente, la tensión fase-neutro, la tensión de línea o la corriente de un sistema trifásico. Degrada el rendimiento y reduce la vida útil de los motores trifásicos.

El desbalance puede ser estimado como la máxima desviación entre las tres fases del promedio de voltaje (o corrientes) trifásico, dividido por el promedio del voltaje (o corriente) trifásico, expresado en porcentaje. Esta relación se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{Desbalance Porcentual de Tensión} = \frac{\text{Desviación Máxima } (V_A, V_B, V_C)}{\text{Promedio } (V_A, V_B, V_C)} \quad 3.4$$

Donde V_A, V_B, V_C son las tensiones de línea a neutro del sistema de alimentación del motor.

Este porcentaje de desbalance debe mantenerse lo más cercano a 0%, de ser posible, ya que mientras mayor sea dicho porcentaje, mayor también es el peligro de daño al equipo conectado a la red.

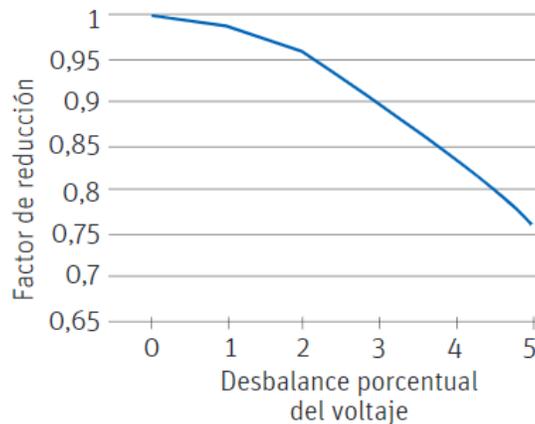
En el caso específico de los motores de inducción, la norma NEMA-MG1 [1] recomienda limitar el desequilibrio de tensión a un máximo de 1%. Desbalances mayores a esto pueden causar daños irreparables en el equipo o pérdidas considerables en la eficiencia de éste.

En El Salvador, el desbalance de tensiones, si bien es mencionado como un parámetro que define la Energía como un producto, no es considerado dentro de la reglamentación para la calidad de esta; no hay límites que permitan regular el desbalance en distribución.

¿Cómo afecta el desbalance de tensiones la operación y el correcto funcionamiento del motor?

1. Debido a la simetría en su estructura magnética, al aplicarse tensiones desequilibradas, el motor produce corrientes desiguales en sus fases; las cuales producen en cada fase campos magnéticos de diferente magnitud, dando como resultante en el entrehierro, dos campos giratorios: un flujo magnético giratorio en el sentido de giro del rotor y un flujo magnético que gira en dirección contraria a la rotación del rotor, produciendo así corrientes de línea desequilibradas en el motor.
2. Aumento considerable en las pérdidas en forma de calor debido al aumento de las corrientes que pasan por los bobinados. Esto también puede causar daños en el aislamiento debido a las altas temperaturas.
3. Dado que el deslizamiento está asociado con las pérdidas en el rotor, el deslizamiento será mayor y esto reducirá la velocidad del motor a plena carga.
4. Disminución del torque efectivo; esto debido a que la componente de secuencia negativa que se da en esta fenómeno crea un torque tipo freno en el motor.

Hablando específicamente de la eficiencia del motor, al trabajar con un suministro que provee energía desbalanceada, el siguiente gráfico deja clara la importancia de mantener un desbalance de tensiones al mínimo posible:



Gráfica 3. 4. Relación entre Reducción de Potencia y Desbalance de Tensiones.

Como se puede observar, para un desbalance del 1% la eficiencia del motor se vería reducida en 2-3%, lo cual es aceptable. Para un desbalance de tensiones del 2%, el motor operaría a un 95% de su eficiencia. Para un desbalance de tensiones de suministro del 3%, el 10% de la energía se estaría perdiendo; lo cual es muy significativo.

Efectos sobre otras características de operación:

- El torque de arranque y el torque máximo disminuyen cuando el voltaje es desbalanceado, por lo tanto, si el desbalance de voltaje es severo es probable que el torque del motor ya no sea adecuado para la aplicación.
- La velocidad a plena carga disminuye levemente si el motor es alimentado con voltaje desbalanceado ya que un deslizamiento mayor está asociado con el incremento de pérdidas en el rotor.
- La corriente de rotor bloqueado tendrá un desbalance similar al desbalance de tensión, pero los KVA de rotor bloqueado se incrementarán levemente.
- Cuando el motor está operando con una carga normal, el porcentaje de desbalance de corrientes causado será aproximadamente de 6 a 10 veces el porcentaje del desbalance de voltaje.
- Vibraciones fundamentalmente a una frecuencia igual al doble de la frecuencia nominal.

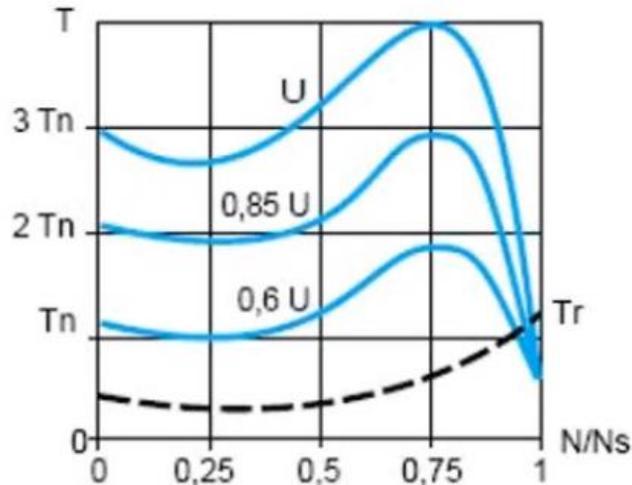
3.2.3 Variación de tensión

La velocidad de sincronismo no se modifica, pero en un motor cargado una disminución de la tensión provoca un ligero aumento en el deslizamiento y dado que éste está asociado con las pérdidas en el rotor, el deslizamiento será mayor y esto reducirá la velocidad del motor a plena carga. Por lo tanto, menor será la eficiencia de éste.

Es importante mencionar que los motores asíncronos se pueden quemar si se le alimenta a menor tensión de la nominal.

Consecuencias de la variación de tensión.

- Disminución del par motor.
- El par depende del cuadrado del voltaje a una frecuencia fija. Una reducción del 50% en el voltaje ocasiona que el par disminuya al 25%.



Gráfica 3.5. Curva par

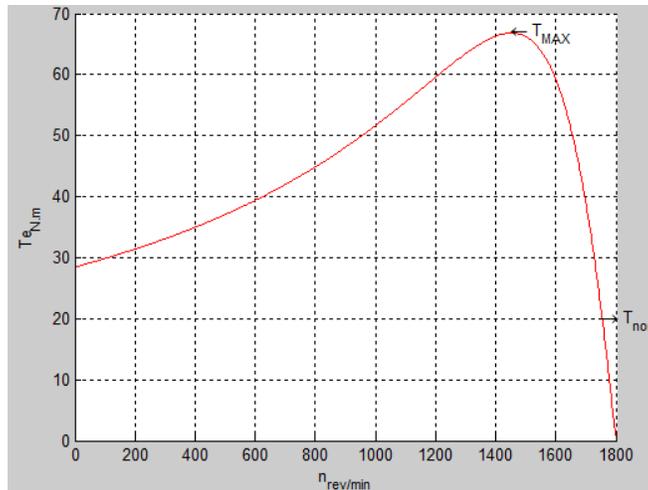
El objetivo principal de un motor es mantener un par. Al sacrificar el torque o par por cambiar velocidad no se aprovecha la potencia para la cual está construido dicho motor.

Corriente de arranque: la corriente de arranque varía en función de la tensión de alimentación, y, un incremento gradual de voltaje previene picos instantáneos de arranque.

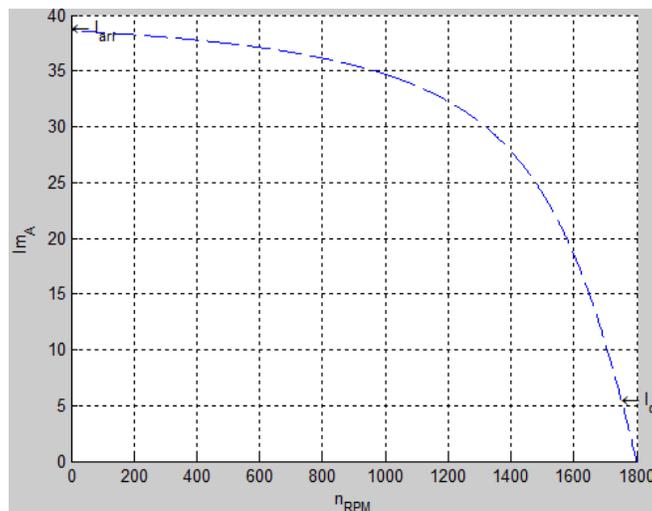
La corriente de funcionamiento: la corriente absorbida aumenta mucho y se produce un calentamiento anormal de la máquina debido a la saturación del circuito magnético del estator. La variación de tensión no funciona en estado de región permanente.

El par que da un motor y la intensidad que consume están relacionados con la tensión de manera directa. Por lo tanto, al variar la tensión solo se puede disminuir, porque al aumentar la tensión, el motor puede quemarse. Cuando se disminuye la tensión, la curva del par disminuye al igual que la curva de intensidad.

Con fines explicativos, las siguientes curvas se obtuvieron a partir de Matlab, para un motor de 5HP, 60 Hz, 1800 rev/min a 440 V. Se puede observar el comportamiento del motor según su par-velocidad, y la intensidad con la que éste opera. [A3.1]



Gráfica 3.6. Curva par-velocidad para un motor de 4 polos



Gráfica 3.3. Curva Intensidad.

Reducción leve en la tensión.

Para el motor del ejemplo, si se reduce la tensión, la curva par disminuye al igual que la curva de intensidad. La aceleración que se produce no es tan brusca, es menor, por lo tanto, el motor pasa más tiempo consumiendo las intensidades elevadas. Se tarda más tiempo en llegar a la velocidad final. La intensidad de arranque es menor, por ende, su consumo no es muy elevado.

Es decir, aunque el motor da menos par, éste puede con la carga y se sitúa cerca de la velocidad nominal. La intensidad disminuye o es similar a la nominal.

Más reducción en la tensión.

Cuando se reduce aún más la tensión, existen momentos en que el motor apenas podrá acelerar, ya que la curva del par motor es solo un poco mayor que el de la carga, por lo que disminuye aún más su velocidad.

Con esta nueva velocidad, más lenta, el motor se quedaría más tiempo consumiendo una intensidad elevada. Es cierto que la curva de intensidad disminuiría, pero como la velocidad se situaría lejos de la nominal, la intensidad para esta nueva velocidad es muy elevada.

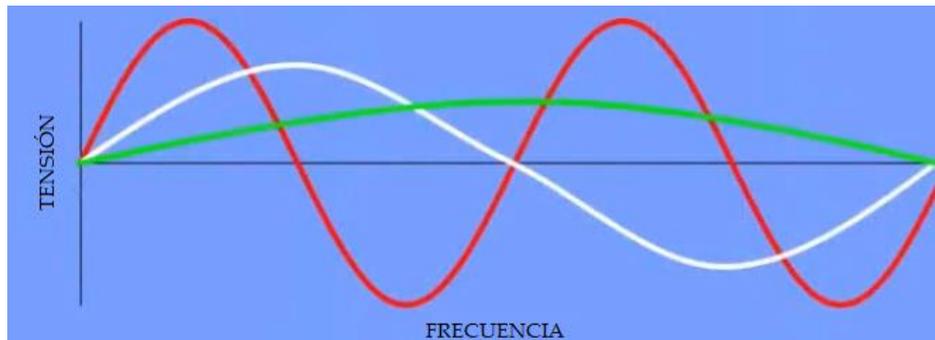
Es decir, como el motor da menos par, éste no podrá con la carga y se situará lejos de la velocidad nominal. Aunque la curva de intensidad disminuye, por la velocidad reducida la intensidad será elevada, por lo tanto, mayor será el consumo.

3.2.4 Control de velocidad mediante el cambio de la frecuencia

La frecuencia funciona porque se varía la velocidad sincrónica del campo magnético, dentro del motor y de esta forma, al variar el campo magnético gira el rotor. Éste, el rotor, va atrasado, es decir, siempre estará debajo de la velocidad sincrónica.

La velocidad de los motores asíncronos es proporcional a la frecuencia. En otras palabras, al cambiar la frecuencia eléctrica aplicada al estator de un motor de inducción, la velocidad de rotación de sus campos magnéticos n_{sinc} cambiará en proporción directa al cambio de frecuencia eléctrica, y el punto de vacío sobre la curva característica par-velocidad cambiará con ella.

Al disminuir la frecuencia, se deberá disminuir linealmente el voltaje aplicado a los terminales del estator. De lo contrario, se saturará el acero del núcleo del motor de inducción y fluirán corrientes de magnetización excesivas en la máquina.



Gráfica 3. 8. Curva roja, frecuencia alta, tensión alta. Curva verde, menor tensión a una frecuencia menor

Se debe reducir proporcionalmente la tensión para evitar sobrecalentamiento del motor por exceso de consumo.

En el motor, la frecuencia es mayor cuando el rotor gira de forma inversa debido al aumento del par eléctrico. Por ello el valor de la resistencia rotórica aumenta cuando el rotor trabaja de forma inversa y la reactancia rotórica disminuye.

3.2.5 Relación de potencia, velocidad y voltaje

La potencia máxima nominal del motor debe ser disminuida linealmente con la reducción de frecuencia para evitar el sobrecalentamiento del circuito del estator. La potencia suministrada al motor viene dada por:

$$P = \sqrt{3}V_L I_L \cos \theta \quad 3.5$$

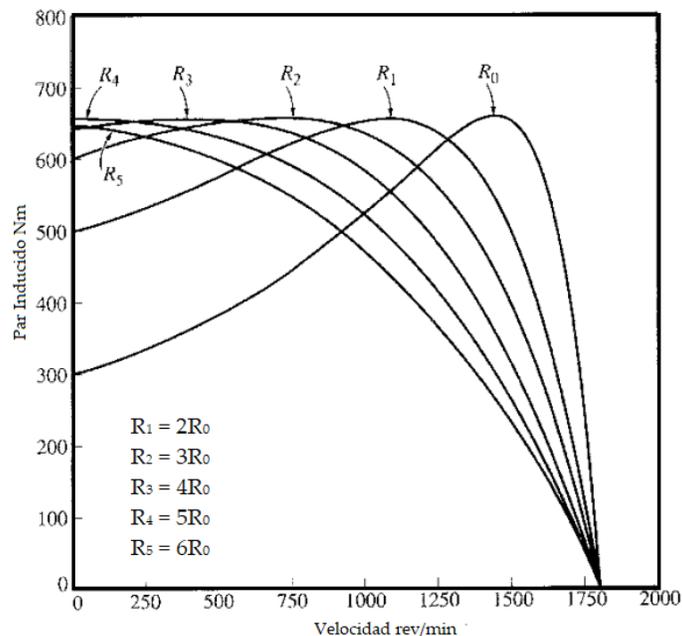
Si se disminuye el voltaje V_L , la potencia máxima P también debe disminuirse de lo contrario, la corriente que fluye en el motor llegará a ser excesiva y el motor se sobrecalentará.

Es decir, existe una relación directamente proporcional entre la variación de la frecuencia y la potencia máxima, así como la variación del voltaje también con $P_{\text{máx}}$. Cuando la frecuencia eléctrica aplicada al motor excede la frecuencia nominal del motor, el voltaje del estator es mantenido constante en el valor nominal.

3.2.6 Variación en la resistencia (Deslizamiento)

Al cambiar la resistencia del rotor variará la velocidad de operación del motor. Pero, la inserción de resistencias extras en el circuito del rotor de un motor de inducción, reduce bastante la eficiencia de la máquina, debido a que existen grandes pérdidas a causa del efecto Joule en el reóstato de regulación, que es similar al de arranque, pero diseñado para trabajar en régimen continuo. Este método se utiliza solo durante periodos cortos debido a los problemas de eficiencia que produce.

La siguiente figura muestra las curvas par-velocidad resultantes al cambiar las resistencias del rotor.



Gráfica 3. 9. Control de Velocidad mediante variación de la resistencia del rotor de un motor de inducción de rotor devanado. Figura obtenida del libro Maquinas eléctricas de Stephen J. Chapman. [2]

3.3 Análisis de motores desbalanceados por el método de Componentes Simétricas.

Un sistema equilibrado puede fácilmente analizarse por medio de su equivalente monofásico. Por otro lado, un sistema, como un motor con desbalances de tensiones en sus fases presenta una complicación mayor en su análisis.

Para el análisis de estos circuitos, Charles Legeyt Fortescue [3] presentó en 1918 su trabajo, con el cual se puede descomponer un sistema desequilibrado en varios sistemas equilibrados; la idea básica del método es considerar que todo circuito trifásico desequilibrado puede ser expresado como la suma o composición de tres sistemas simétricos, los cuales son mucho más sencillos de resolver que el problema inicial. Este método es especialmente útil en el análisis del rendimiento de maquinaria eléctrica cuando trabaja con sistemas de tensiones desbalanceados.

- Sistema de secuencia directa o positiva, con la misma secuencia de fases que el inicial (ABC).
- Sistema de secuencia inversa o negativa, con la secuencia de fases contraria a la original (ACB).
- Sistema de secuencia homopolar, tres fasores monofásicos con la misma magnitud y fase.

I_1 Corrientes positivas; reales

$$I_N = 3I_0 \quad 3.6$$

I_2 Corrientes negativas.

Las corrientes negativas son producidas por los generadores y transformadores, alternando alguna fase (Introducen pequeños voltajes).

A partir de tres corrientes desbalanceadas I_a, I_b, I_c se obtiene nueve corrientes simétricas:

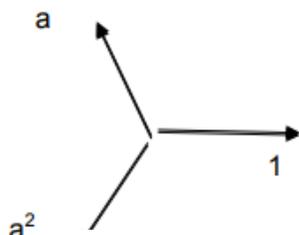
$$I_{a1} \quad I_{a2} \quad I_{a0}$$

$$I_{b1} \quad I_{b2} \quad I_{b0}$$

$$I_{c1} \quad I_{c2} \quad I_{c0}$$

Donde, las corrientes positivas y negativas se encuentran balanceadas y las corrientes homopolares son las que se conducen por tierra, y también a través del cable de guarda y cable mensajero.

Operador "a"



$$a = 1 \angle 120^\circ = \cos 120 + j \sin 120 = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120} \quad 3.7$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = \cos 240 + j \sin 240 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j240} \quad 3.8$$

$$a^3 = 1 \angle 360^\circ = \cos 360 + j \sin 360 = 1 + j0 \quad 3.9$$

Figura 3. 2. Diagrama correspondiente al operador "a"

Sumando las tres cantidades:

$$a + a^2 + a^3 = a(1 + a + a^2) = 0 \quad 3.10$$

$$1 + a + a^2 = 0 \quad 3.11$$

Las componentes simétricas se aplican en el análisis de sistemas eléctricos que operan en forma desbalanceada.

- Por falla de una fase a tierra.
- Dos fases a tierra (2LG)
- Falla entre fases
- Una fase rota

Pero, ¿en qué consiste el método de las componentes simétricas?

En el mundo real; en sistemas desequilibrados, tales como corrientes, voltajes e impedancias. El % de desbalance tolerables en voltajes se encuentra entre el 2% y 3%.

En el método teórico; consiste en los sistemas de secuencia positiva, negativa y de secuencia cero. Para implementar una fuente de secuencia positiva basta una fuente trifásica de CA a 60 Hz, así como también, colocar un banco de transformadores, un generador trifásico a 60 Hz y manejar la corriente de línea. Pero, ¿es una fuente de voltaje de secuencia positiva una planta fotovoltaica de 10MVA? La respuesta es sí, porque es trifásica y está operando a 60 Hz. Para implementar una fuente de secuencia negativa, solo se invierte las fases.

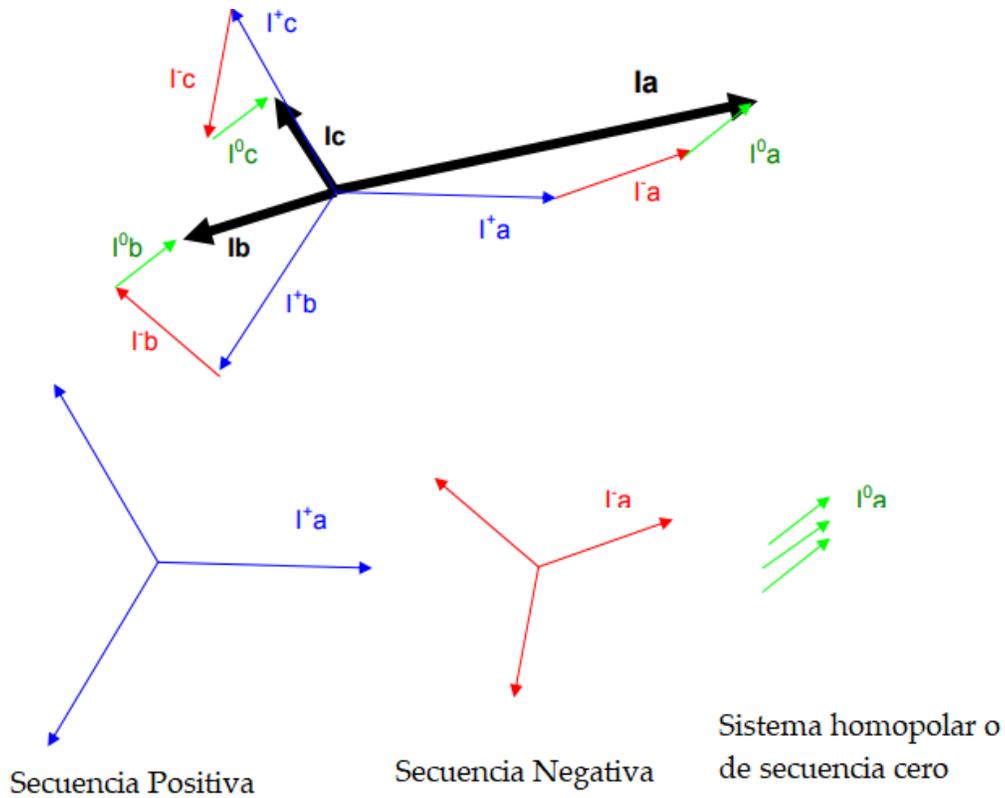


Figura 3. 3. Diagrama fasorial correspondiente a cada una de las secuencias

Secuencia positiva:

$$I_{a1} + I_{b1} + I_{c1} = 0$$

$$|I_{a1}| = |I_{b1}| = |I_{c1}| = |I_1|$$

$$I_{b1} = a^2 I_{a1}$$

$$I_{c1} = a I_{a1}$$

Secuencia negativa:

$$I_{a2} + I_{b2} + I_{c2} = 0 \quad 3.12$$

$$|I_{a2}| = |I_{b2}| = |I_{c2}| = |I_2| \quad 3.13$$

$$I_{b2} = a I_{a2} \quad 3.14$$

$$I_{c2} = a^2 I_{a2} \quad 3.15$$

Secuencia cero u homopolar:

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = I_0 \quad 3.16$$

$$|I_{a0}| = |I_{b0}| = |I_{c0}| = |I_0| \quad 3.17$$

$$I_{a0} + I_{b0} + I_{c0} = 3I_0 = 3I_{a0} \quad 3.18$$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0}$$

$$I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0}$$

Tomando como referencia la corriente en la fase "a" las corrientes para las fases b y c quedan: \longrightarrow

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_c = a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0}$$

A partir de lo anterior, resolviendo sustituciones utilizando el operador "a" y despejando para la fase "a", se obtiene:

$$I_{a0} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \quad 3.19$$

$$I_{a1} = \frac{I_a + a I_b + a^2 I_c}{3} \quad 3.20$$

$$I_{a2} = \frac{I_a + a^2 I_b + a I_c}{3} \quad 3.21$$

- $I_N = 3I_0$
- Corrientes de secuencia negativa operan durante fallas o no linealidades en la máquina
- En condiciones normales y estacionarias las corrientes de secuencia negativa y cero deben ser nulas o muy bajas.

3.3.1 Método de las componentes simétricas en sistemas desbalanceados

Entrando directamente a cómo todo esto afecta la eficiencia del motor; tomando en cuenta que, en un motor desbalanceado, se presentan tanto, secuencia positiva y secuencia negativa; tomando en cuenta que la secuencia cero no influyen en la potencia en el entrehierro. El diagrama de potencia del motor puede representarse con la figura 3.4:

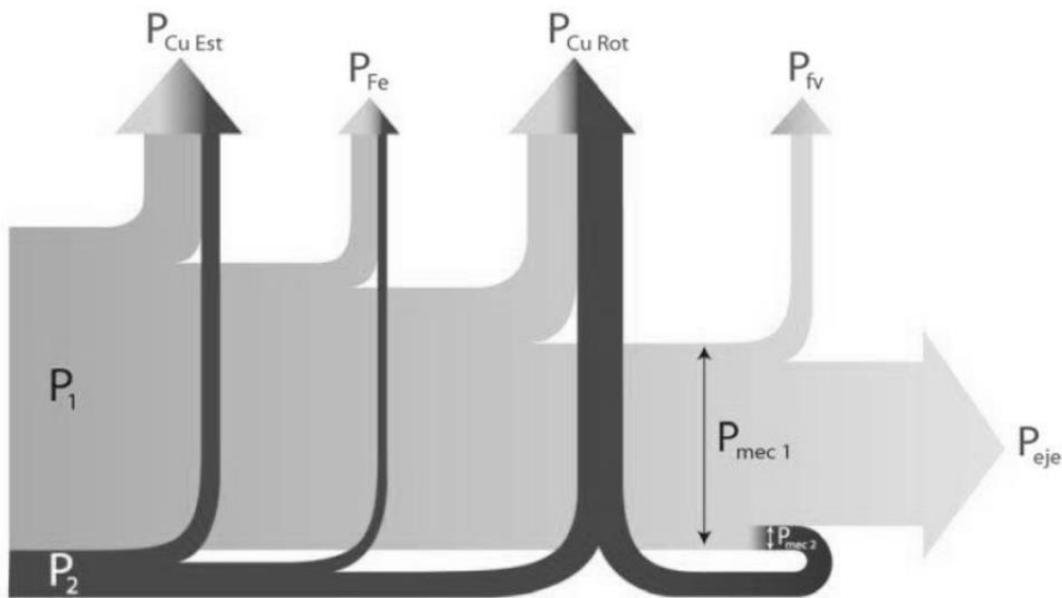


Figura 3. 4. Flujo de Potencia de un motor con desbalance de tensión. [3]

Siendo P_1 correspondiente a la potencia generada por la secuencia positiva y P_2 la correspondiente a la secuencia negativa. Como se observa, la secuencia negativa no aporta nada a la potencia en el eje y es toda “potencia perdida” en el entrehierro y en el cobre. Por lo tanto, en sistemas desbalanceados, lo deseable es que la potencia negativa sea lo menos posible; o, dicho de otra manera, que el desbalance sea mínimo. [3]

Teniendo en cuenta lo anterior, para calcular las pérdidas de un motor cuando trabaja con un sistema desequilibrado de tensión y calcular el rendimiento de las máquinas que trabajan con sistemas desequilibrados asimétricos, se necesita antes, encontrar dos valores específicos muy importantes, la *impedancia equivalente* del circuito y la *corriente* que circula por ella.

Cálculo de Impedancia Equivalente en Secuencia Positiva y Negativa.

En la siguiente figura se observa el circuito equivalente tanto para la secuencia positiva como para la secuencia negativa. Estos circuitos serán útiles para calcular la impedancia equivalente de cada una de las secuencias:

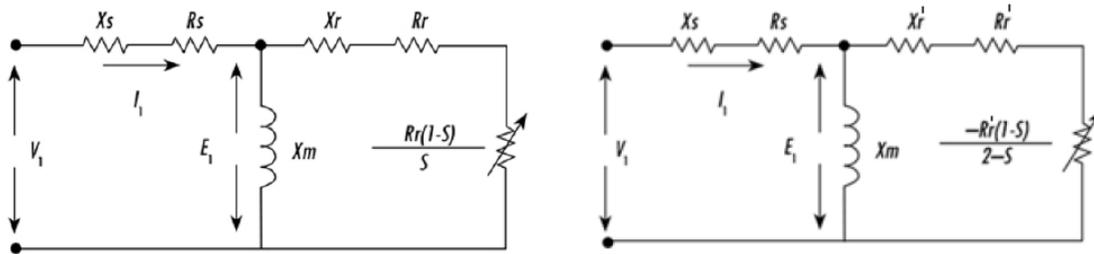


Figura 3. 5. Circuito Equivalente para Secuencia Positiva (izquierda) y Secuencia Negativa (derecha).

Cabe aclarar que los valores de resistencias y reactancias son datos propios de cada motor. De la imagen se puede observar que en la parte del estator los valores se mantienen en ambas secuencias; mientras que en la parte del rotor hay una diferencia en los parámetros X_r y R_r para secuencia positiva y negativa (para la secuencia negativa este cambio está representado por X'_r y R'_r). Estos valores se relacionan por las siguientes ecuaciones:

$$R'_r = R_r \sqrt{2} \quad 3.22$$

$$X'_r = \frac{X_r}{\sqrt{2}} \quad 3.23$$

Teniendo estos valores, es posible, por medio de las siguientes ecuaciones, obtener los valores de Impedancia equivalente, tanto para secuencia positiva como para secuencia negativa:

$$Z_1 = (R_s + jX_s) + \frac{1}{\frac{1}{jX_M} + \frac{1}{jX_r + \frac{R_r}{s}}} \quad 3.24$$

$$Z_2 = (R_s + jX_s) + \frac{1}{\frac{1}{jX_M} + \frac{1}{jX'_r + \frac{R'_r}{2-s}}} \quad 3.25$$

Donde:

- ✓ R_s es el valor de la resistencia estatórica cuando la máquina está trabajando en secuencia positiva.
- ✓ R_r es el valor de la resistencia rotórica cuando la máquina está trabajando en secuencia positiva.
- ✓ X_m es la reactancia de la rama de magnetización.
- ✓ X_s es el valor de la reactancia estatórica cuando la máquina está trabajando en secuencia positiva.
- ✓ X_r es el valor de la reactancia rotórica cuando la máquina está trabajando en secuencia positiva.
- ✓ S es el deslizamiento al que está trabajando el motor.
- ✓ R_r' es el valor de la resistencia rotórica cuando la máquina está trabajando en secuencia negativa.
- ✓ X_r' es el valor de la reactancia rotórica cuando la máquina está trabajando en secuencia negativa.

Cálculo de la Corriente

Habiendo obtenido las impedancias equivalentes de las secuencias positiva y negativa, es fácil calcular la corriente para cada caso:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1} \quad 3.26$$

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_2} \quad 3.27$$

Donde:

- ✓ U_1 es la tensión de fase de la secuencia directa.
- ✓ U_2 es la tensión de fase de la secuencia inversa.
- ✓ I_1 es la corriente de la secuencia directa.
- ✓ I_2 es la corriente de la secuencia inversa.

3.3.2 Pérdidas en funcionamiento desequilibrado y rendimiento

Como es conocido, en el estator se producen pérdidas. Estas se pueden separar en pérdidas en la máquina en secuencia directa e inversa, y, usando los circuitos equivalentes de la figura 3.3 se obtienen las ecuaciones para las pérdidas en secuencia directa e inversa:

$$P_{1s} = 3R_s I_1^2 \quad 3.28$$

$$P_{2s} = 3R_s I_2^2 \quad 3.29$$

Además, las pérdidas en el núcleo se pueden o no tomar en cuenta, dependiendo del análisis que se desea hacer. Para secuencia positiva y negativa, se obtienen de la siguiente forma:

$$P_{fe1} = 3 \frac{\varepsilon_1^2}{R_C} \quad 3.30$$

$$P_{fe2} = 3 \frac{\varepsilon_2^2}{R_C} \quad 3.31$$

Donde la Fuerza Electromotriz de secuencia negativa y positiva se obtiene de las siguientes relaciones:

$$\varepsilon_1 = U_1 - Z_s I_1 \quad 3.32$$

$$\varepsilon_2 = U_2 - Z_s I_2 \quad 3.33$$

Teniendo ya estas pérdidas, es fácil ahora encontrar la potencia en el entrehierro (de igual manera, para secuencia positiva y negativa):

$$P_{ag1} = P_1 - P_{1s} - P_{fe1} \quad 3.34$$

$$P_{ag2} = P_2 - P_{2s} - P_{fe2} \quad 3.35$$

Donde P_1 y P_2 son las potencias de entrada en secuencia positiva y negativa.

A partir de la potencia en el entrehierro se pueden encontrar, tanto las pérdidas en el rotor como la potencia mecánica de salida del rotor; ambas dependiendo del deslizamiento S . Las pérdidas en el rotor se obtienen por:

$$P_{1r} = S * P_{ag1} \quad 3.36$$

$$P_{2r} = (2 - S)P_{ag2} \quad 3.37$$

Mientras que la potencia mecánica viene dada por:

$$P_{mec1} = (1 - S)P_{ag1} = 3R_r \left(\frac{1 - S}{S} \right) I_1^2 \quad 3.38$$

$$P_{mec2} = (2 - S - 1)P_{ag2} = 3R'_r \left(\frac{S - 1}{2 - S} \right) I_2^2 \quad 3.39$$

De esto, se procede a explicar la potencia en el eje, primeramente, en secuencia positiva; tomando en cuenta las pérdidas mecánicas por fricción y ventilación, que es un valor constante dado por el fabricante del motor:

$$P_{eje1} = 3R_r \left(\frac{1 - S}{S} \right) I_1^2 - P_{fv} \quad 3.40$$

Ahora, recordando que la potencia utilizada por el motor en secuencia negativa es potencia malgastada y se toman como pérdidas (ver figura 3.3); al sumar la P_{mec2} a la P_{eje1} para obtener la potencia en el eje total, la mencionada P_{mec2} toma un valor negativo (debido a que el valor estándar de S está siempre entre 0.01 y 0.05) y por lo tanto, estaría disminuyendo el valor de la potencia de salida total de la máquina, disipándose en forma de pérdidas en el cobre del circuito equivalente de secuencia inversa. Esto es:

$$P_{eje} = 3R_r \left(\frac{1-S}{S} \right) I_1^2 + 3R'_r \left(\frac{S-1}{2-S} \right) I_2^2 - P_{fv} \quad 3.41$$

Este valor negativo de la potencia mecánica generada por la secuencia inversa, se puede interpretar como la potencia que el motor gasta en vencer el par producido por el flujo magnético de secuencia negativa, que al girar de forma contraria al giro en funcionamiento normal, se opone al movimiento del rotor, por lo que produce un aumento de pérdidas respecto al funcionamiento de motor con un sistema equilibrado, ya que cuando el sistema es simétrico, no existe secuencia inversa, por lo que se reducen las pérdidas.

La eficiencia del motor, al trabajar con un sistema de tensiones desequilibrado se define como:

$$\eta = \frac{P_{eje}}{P_1 + P_2} = \frac{P_{eje}}{P_{eje} + P_{perd\Gamma}} = \frac{P_{Sec+} - P_{Sec-} - P_{rot}}{P_1 + P_2} \quad 3.42$$

Bibliografía.

[1] NEMA, Standard Publications No. MG1-1993. Motors and Generators, Published by National Electrical Manufacturers Association, Washington (1993), Part 21 pp. 9 - 10 and Part 30 pp. 1- 2.

[2] Stephen J. Chapman (2000)- Máquinas Eléctricas (Cap. 7 Motores de inducción) - Mc Gram Hill - Tercera Edición.

[3] “Efectos de desequilibrio de tensión en máquinas de inducción” - Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales. Dpto. Ingeniería Eléctrica Escuela Técnica Superior de Ingeniería - Universidad de Sevilla – 2018.

CAPITULO IV: Factores asociados a la eficiencia de la bomba

Para entrar en contexto al uso de las leyes de semejanza, se explica a continuación la teoría de modelos. Las leyes de semejanza hablan de la relación de alturas y caudales, potencia y pares.

Condiciones de semejanza:

- Semejanza dinámica; semejanza concebida en función de la variación de la velocidad.
- Semejanza geométrica; semejanza concebida en función del tamaño.

4.1 Teoría de modelos

- El modelo ha de ser geoméricamente semejante al prototipo [1]

Una de las características favorables en los estudios con modelos es que exista semejanza geométrica, ésta es, donde el modelo y su prototipo son idénticos en forma, pero diferentes solamente en "tamaño". Un factor importante es que las configuraciones de flujo sean geoméricamente semejantes

Por eso, es evidente que si no se cumple esta condición la comparación de resultados entre el modelo y el prototipo es imposible. Por tanto, las longitudes L (escala lineal), superficies A , y volúmenes τ homólogos del prototipo (p) y del modelo (m) han de verificar las siguientes relaciones: [2]

$$\frac{L_p}{L_m} = \lambda; \quad \frac{A_p}{A_m} = \lambda^2; \quad \frac{\tau_p}{\tau_m} = \lambda^3 \quad 4.1$$

Donde λ es la escala del prototipo con relación al modelo

- El modelo ha de ser dinámicamente semejante al prototipo

Las líneas de corriente deben ser semejantes, para ello es necesario que las velocidades, aceleraciones, fuerzas etc., se hallen también en relaciones bien determinadas.

4.2 Leyes de semejanza y curvas características

Las leyes de semejanza permiten predecir el comportamiento de un prototipo de bomba a partir del estudio de un modelo a escala. Además, permiten predecir el comportamiento de una máquina dada bajo condiciones de operación distintas a las del estudio. [3]

Son 6 leyes de semejanza de las bombas hidráulicas. (Claudio Mataix)

Las tres primeras leyes se refieren a la misma bomba ($D'/D'' = 1$: se designa con 'y' las dos bombas que en este caso son una misma, pero funcionando en condiciones distintas) y expresan:

"Variación de las características de una misma bomba o de bombas iguales cuando varía el número de revoluciones".

Primera ley: *Los caudales son directamente proporcionales a los números de revoluciones:*

$$\frac{Q'}{Q''} = \frac{n'}{n''} \quad 4.2$$

$Q = Ar$; donde r es la componente de la velocidad normal a cualquier sección A de la bomba.

Además, cualquier velocidad será proporcional a n , supuesto que u es proporcional a n también. En efecto, $u = \frac{\pi D}{60} n = Cn$ (C constante). Ahora bien, en condiciones de igual rendimiento, sobre todo, de óptimo rendimiento, los triángulos de velocidad han de ser semejantes (condiciones isógonas), lo que exige que todas las velocidades sean proporcionales a n .

El caudal es proporcional a una sección y a una velocidad; la sección no varía, al no variar el tamaño de la bomba, luego el caudal es proporcional a la velocidad. De igual manera, todas las velocidades son proporcionales al número de revoluciones; luego los caudales son directamente proporcionales a los números de revoluciones.

Segunda ley: *Las alturas útiles son directamente proporcionales a los cuadrados de los números de las revoluciones*

$$\frac{H'}{H''} = \left(\frac{n'}{n''}\right)^2 \quad 4.3$$

$$H = \eta_h H_u = \eta_h \frac{u_2 C_{2u}}{g} \quad 4.4$$

$$\eta'_h = \eta''_h ; \text{ además, } v = Cn \quad 4.5$$

Tercera ley: *Las potencias útiles son directamente proporcionales a los cubos de los números de revoluciones:*

$$\frac{P'}{P''} = \left(\frac{n'}{n''}\right)^3 \quad 4.6$$

Para la deducción: $P = Q\rho gH$

Variación de las características de dos bombas geoméricamente semejantes con el tamaño, si se mantiene constante el número de revoluciones.

Cuarta ley: *Los caudales son directamente proporcionales al cubo de la relación de diámetros:*

$$\frac{Q'}{Q''} = \left(\frac{D'}{D''}\right)^3 \quad 4.7$$

Quinta ley: *Las alturas útiles son directamente proporcionales al cuadrado de la relación de diámetros:*

$$\frac{H'}{H''} = \left(\frac{D'}{D''}\right)^2 \quad 4.8$$

Sexta ley: *Las potencias útiles son directamente proporcionales a la quinta potencia de la relación de diámetros*

$$\frac{P'}{P''} = \left(\frac{D'}{D''}\right)^5 \quad 4.9$$

Estas leyes se pueden fundir dos a dos, haciendo que varíe primero el diámetro y luego el número de revoluciones, obteniéndose las fórmulas siguientes

$$\frac{Q'}{Q''} = \left(\frac{n'}{n''}\right) \left(\frac{D'}{D''}\right)^3 \quad 4.10$$

$$\frac{H'}{H''} = \left(\frac{n'}{n''}\right)^2 \left(\frac{D'}{D''}\right)^2 \quad 4.11$$

$$\frac{P'}{P''} = \left(\frac{n'}{n''}\right)^3 \left(\frac{D'}{D''}\right)^5 \quad 4.12$$

Eliminando el término D'/D'' entre las dos últimas ecuaciones anteriores (4.11 y 4.12), despejando en primer lugar en la segunda ecuación D'/D''

$$\frac{D'}{D''} = \left(\frac{H'}{H''}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{n''}{n'} \quad 4.13$$

E introduciendo después este valor

$$\frac{P'}{P''} = \left(\frac{H'}{H''}\right)^{\frac{5}{2}} \left(\frac{n''}{n'}\right)^2 \quad 4.14$$

Agrupando términos que tienen ' y los que tienen '' se obtiene:

$$n'^2 (P') H'^{-\frac{5}{2}} = n''^2 (P'') H''^{-\frac{5}{2}} \quad 4.15$$

Y extrayendo la raíz cuadrada de ambos miembros:

$$n' \left(P'^{\frac{1}{2}}\right) H'^{-\frac{5}{4}} = n'' \left(P''^{\frac{1}{2}}\right) H''^{-\frac{5}{4}} \quad 4.16$$

La anterior ecuación fue deducida por eliminación de la relación de diámetros, por lo tanto, queda patente que el producto $nP^{1/2}H$ es idéntico para todas las bombas geoméricamente semejantes. Este producto se llama: **NUMERO ESPECIFICO DE REVOLUCIONES**

$$n_s = nP^{1/2}H^{-5/4} \quad 4.17$$

Número específico de revoluciones en función de la potencia

Unidades: n - rpm
 P - CV
 H - m

De lo anterior se deduce que

Todas las bombas geométricas semejantes tienen el mismo número específico de revoluciones.

$$P = Q\rho gH \text{ (W)} = Q\rho H \frac{kpm}{s} = \frac{Q\rho H}{75} \text{ (CV)} \quad 4.18$$

Entonces:

$$n_s = \sqrt{\frac{\rho}{75}} n Q^{1/2} H^{-3/4} \quad 4.19$$

El n_s de una bomba suele definirse para el agua de la siguiente manera:

$$\sqrt{\frac{\rho}{75}} = \sqrt{\frac{1.000}{75}} = 3.65 \quad 4.20$$

De manera que:

$$n_s = 3.65 n Q^{1/2} H^{-3/4} \quad 4.21$$

Número específico de revoluciones de una bomba en función del caudal

Es evidente que los valores de n_s obtenidos por las ecuaciones (4.17) o (4.21) son iguales. Las unidades en que se expresa las variables de la ecuación (4.21) son las siguientes:

$$\begin{array}{l} n - \text{rpm} \\ Q - \text{m}^3/\text{s} \\ H - \text{m} \end{array}$$

4.3 Aplicación de las leyes de semejanza

(A partir de un estudio de la universidad politécnica de Valencia, España) [4]

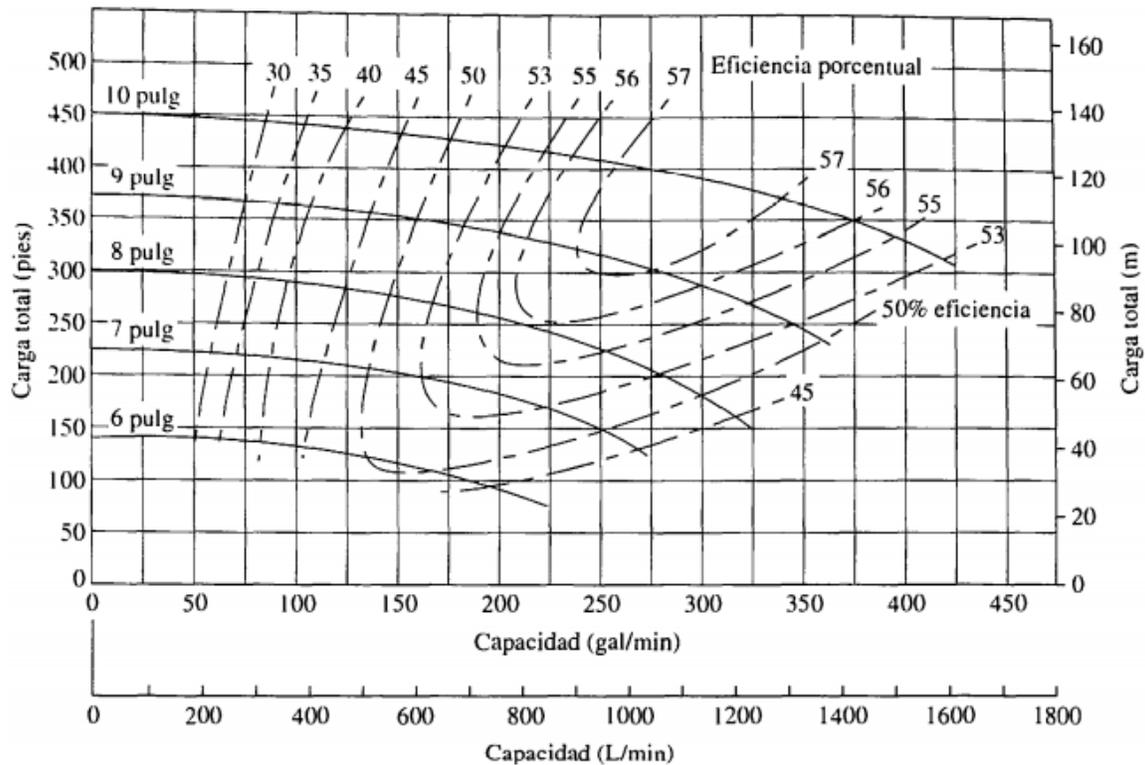
Las leyes de semejanza, sirven para conocer cómo funcionan las bombas en otras condiciones, por lo tanto, lo que se pretende es determinar cuáles son las curvas de respuesta de una máquina cuando cambian alguna de esas condiciones, las más utilizadas en las instalaciones reales son: el cambio de velocidad de giro, el cambio de tamaño o la posibilidad de parametrizar el comportamiento de grupos de bombas a través de diagramas universales y condiciones adimensionales.

Una segunda aplicación que se puede encontrar es el recorte del rodete, tal es la magnitud de importancia del diámetro del rodete que si se corta el diámetro exterior y se hace más estrecho la máquina cumplirá con ciertas condiciones de semejanza. Entonces, este recorte consiste en el torneado del diámetro exterior D_2 , con el objetivo de rebajar ligeramente la curva característica de la bomba para ajustarla a un punto de funcionamiento concreto. En este caso, todos los parámetros de la bomba se mantienen constantes (incluso ancho y ángulo de salida de los álabes) excepto el diámetro exterior del rodete, que pasa a ser D'_2 .

Entonces, en la práctica, según se aleje de las condiciones originales, el rendimiento no se mantendrá constante a lo largo de las parábolas de isorrendimiento, sino que se cerrarán dando origen a curvas en forma de elipses llamadas colinas de isorrendimiento. Esto es debido a la dificultad de mantener la condición de semejanza dinámica y a las pérdidas que no dependen del número de Reynolds.

“Al restringir el tamaño del diámetro del rodete da como resultado, menos altura, pero también, menos rendimiento proporcionado”.

Por lo tanto, al conocer esto el fabricante, proporciona máquinas con un rodete de diámetro nominal y otras con el diámetro ligeramente más pequeño, las cuales tienen menos prestaciones. Debido a esto, dentro de sus catálogos, el fabricante encuentra una gran versatilidad para presentar bombas con diversos recortes de rodete dentro del mismo cuerpo de bomba, las cuales proporcionan diversos puntos de funcionamiento y, es una ayuda para seleccionar la máquina adecuada.



Gráfica 4. 1. Ilustración del rendimiento de una bomba para diámetros diferentes rodetes, con su eficiencia. Obtenida del libro Mecánica de los fluidos 6ta Edición. Robert L. Mott

En la gráfica 4.1 se pueden apreciar las llamadas colinas de isorrendimiento que proporciona el fabricante.

Entonces, se concluye que, la aplicación de las leyes de semejanza indica cómo se comportarán las máquinas en otras condiciones, esto es importante en las estaciones de bombeo en dos aspectos fundamentales:

- En la regulación; en virtud del cambio de velocidad
- En la selección; en virtud del recorte de rodete.

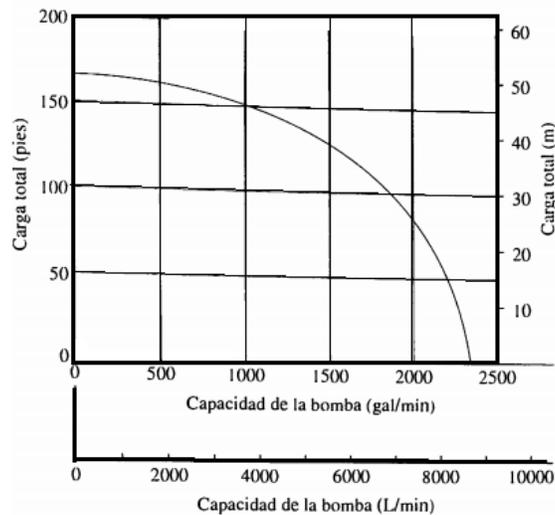
Ya que el objetivo de las leyes de semejanza es siempre encontrar el máximo rendimiento de las máquinas para que toda la energía que se proporciona, sea transformada en presión y altura, propias para la instalación y puede ser utilizada en operación o en selección.

4.4 Eficiencia de la bomba centrífuga

La eficiencia de una bomba es, la relación entre la potencia hidráulica agregada a la bomba por el fluido y la potencia eléctrica consumida por el motor.

Para la adecuada selección de la bomba es necesario conocer sus curvas características. Es por eso que, los fabricantes, mediante bancos especiales para pruebas, desarrollan las curvas para cada tipo de bomba producida, es decir, se grafica la carga, fuerza y eficiencia contra la variación de flujo a una determinada velocidad como se detallará en los gráficos siguientes. Se debe entregar de igual manera la curva límite de elevación en la curva NPSH - capacidad.

- **Flujo volumétrico o caudal (Q):** Es el volumen de líquido que maneja una bomba por unidad de tiempo en las condiciones de operación.
- **Carga dinámica total (H):** Es la suma algebraica de las cargas totales de succión y se determina con la siguiente ecuación.
- **Eficiencia de la bomba (η_b):** Es la razón de la potencia hidráulica en la descarga de la bomba (P_s) entre la potencia mecánica suministrada a la flecha de la bomba (P_{eb}).
- **Potencia Hidráulica (P):** Es la potencia cedida por la bomba al fluido expresada habitualmente en C.V. (caballos de vapor).



Gráfica 4. 2. Curva de Carga total vs Capacidad. Imagen tomada del libro de Mott.

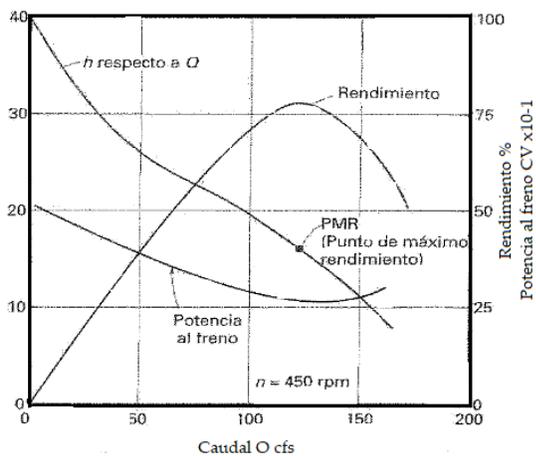
No es adecuado para bombas centrífugas cuyo consumo de potencia crezca al disminuir el caudal.

4.5 Características del funcionamiento de las bombas a velocidad constante (aplicación a ingeniería)

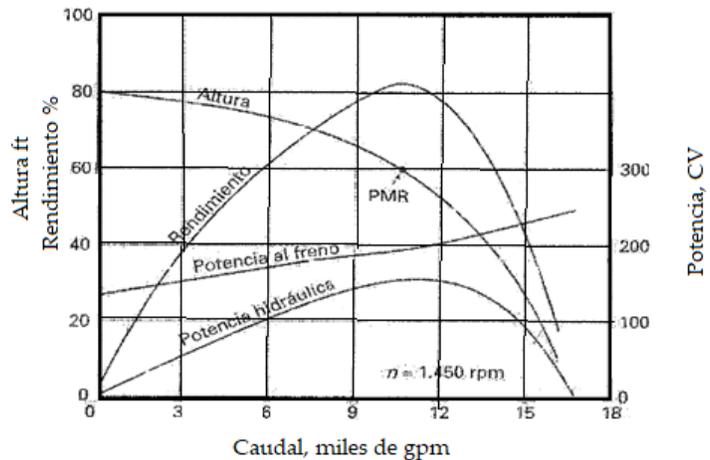
El rendimiento de una bomba varía considerablemente dependiendo de las condiciones bajo las cuales esté operando, como se describió en la sección anterior.

Aun cuando algunas bombas centrífugas son accionadas por motores de velocidad variable, la forma más frecuente de operación de las bombas es a velocidad constante.

A continuación, se podrá observar la curva característica de las bombas (altura respecto a caudal) y otras curvas de funcionamiento para una bomba centrífuga, la boba indicada tiene un caudal normal de 10.500 gpm cuando está desarrollando su altura normal que es de 60 ft y trabaja a 1.450 rpm. El caudal *normal* corresponde al **punto de máximo rendimiento o PMR**. Estas curvas son determinadas normalmente por los fabricantes de bombas mediante ensayos de laboratorio [5].



Gráfica 4. 3. Curvas características de una bomba de flujo axial típica.



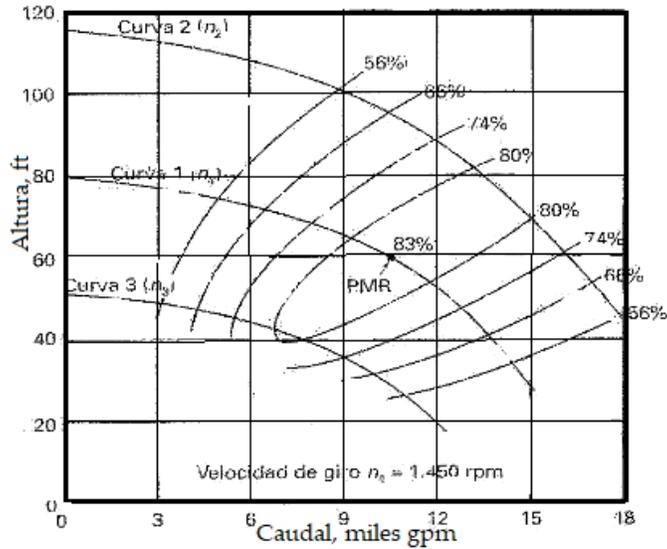
Gráfica 4. 4. Curvas características de una bomba centrífuga de flujo mixta típica

Ambas gráficas muestran notables diferencias entre las características de las dos bombas. Se puede observar que, el rendimiento de ambas cae con bastante rapidez cuando el caudal excede el punto óptimo, esto es especialmente valido en el caso de las bombas de flujo axial.

4.6 Características de funcionamiento con velocidades y tamaños distintos

La elección de una bomba para condiciones determinadas dependerá de la velocidad de giro del motor que la acciona. Si la curva característica de una bomba para una velocidad de giro dada es conocida, la relación entre la altura y el caudal para velocidades de giro distintas puede deducirse aproximadamente con las ecuaciones de las leyes de semejanza.

En la siguiente gráfica, tomada del libro “Mecánica de fluidos con aplicación en ingeniería” [5], suponen la curva característica de una bomba (curva 1) cuando está operando a n_1 rpm. Las curvas características para diferentes velocidades de operación como n_2 y n_3 pueden deducirse aproximadamente trasladando puntos de la curva1 a los correspondientes de las curvas2 y 3 respectivamente. De igual manera, utilizando las ecuaciones de las leyes de semejanza. También, se ha superpuesto líneas de igual rendimiento basadas en datos de ensayos, observando que, el rendimiento disminuye bastante rápidamente cuando se alejan del PMR.

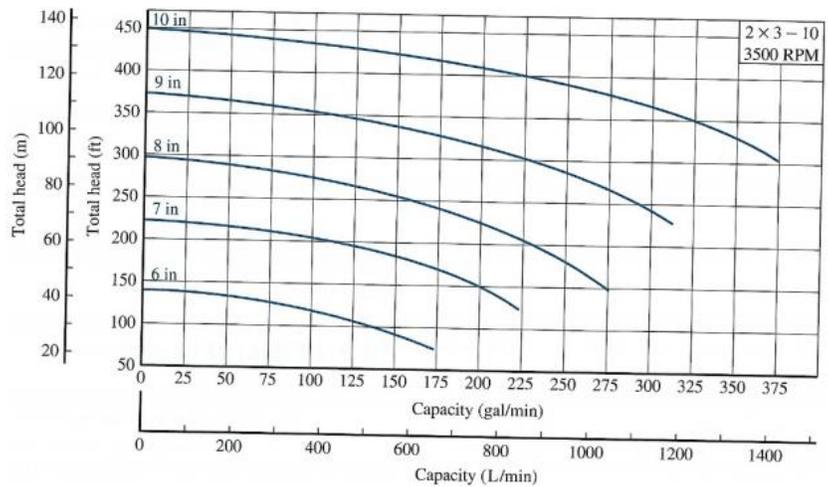


Gráfica 4. 2. Curvas características de funcionamiento de una bomba de flujo mixto típica a varias velocidades de rotación con líneas de rendimiento.

A continuación, se detallarán diferentes curvas características de funcionamiento de una bomba.

4.6.1 Efecto del tamaño del impulsor

En la gráfica 4.6, se muestra cómo varía el rendimiento de una bomba dada conforme cambia el tamaño del impulsor. La bomba centrífuga de 2 x 3 -10 tiene una conexión de descarga de 2 pulgadas, otra de succión de 3 pulgadas y una carcasa en la que cabe un impulsor de 10 pulgadas de diámetro o menos, se presenta las curvas de capacidad versus carga para cinco tamaños distintos de impulsor, en la misma carcasa. La velocidad de operación es de 3500 rpm, que corresponde a la velocidad de carga completa de un motor eléctrico de dos polos. [6]

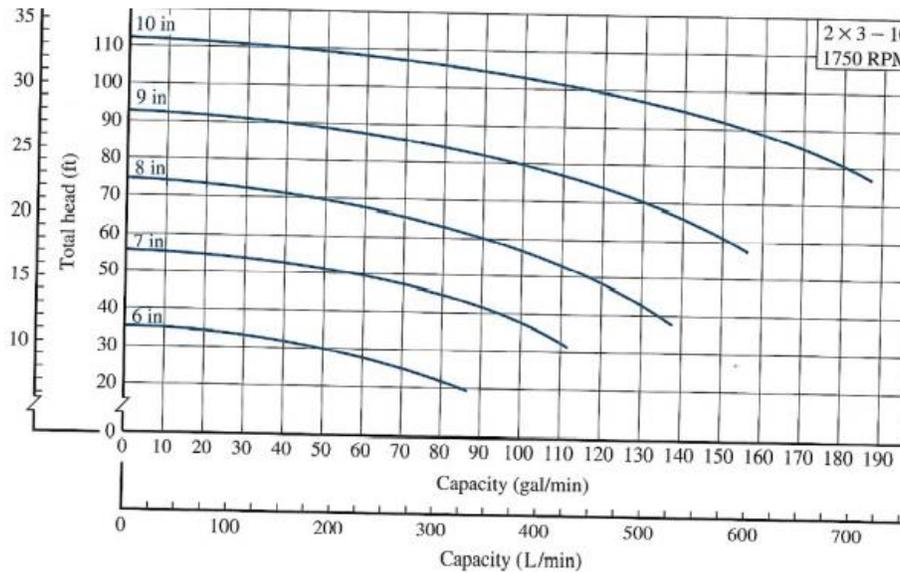


Gráfica 4. 6. Ilustración del rendimiento de una bomba para diámetros diferentes de impulsor.

4.6.2 Efecto de la velocidad

En la gráfica 4.7, se puede observar el rendimiento de la misma bomba 2x3-10 cuando opera a 1750 rpm (velocidad de un motor estándar de cuatro polos), en lugar de 3500 rpm. Si se duplica la velocidad, la capacidad de carga total incrementa en un factor de 4 (el cuadrado de la razón de la velocidad). Se concluye que, si se extrapola las curvas hacia abajo, al punto cero de carga total, en

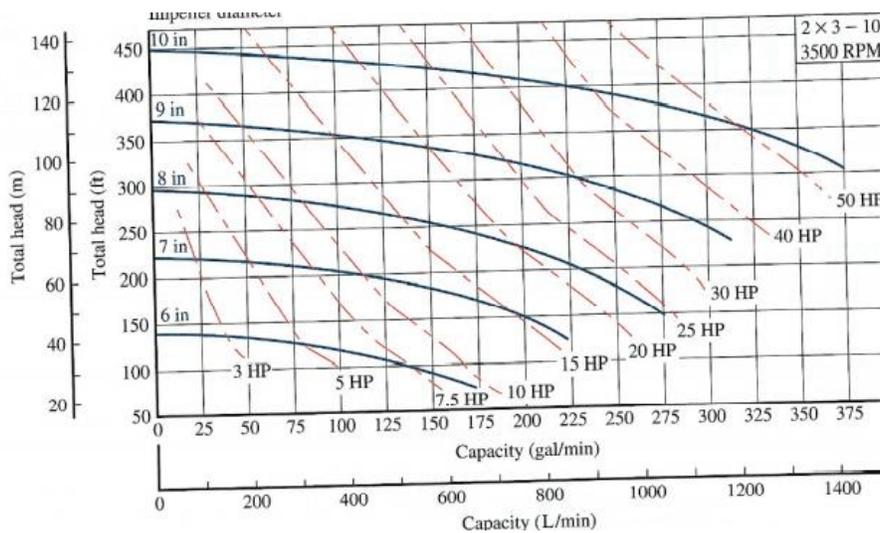
el que ocurre la capacidad máxima, se observa que la capacidad se duplica cuando la velocidad se duplica



Gráfica 4. 7. Rendimiento de una bomba centrífuga de 2x3-10 cuando opera a 1750 rpm

4.6.3 Potencia requerida

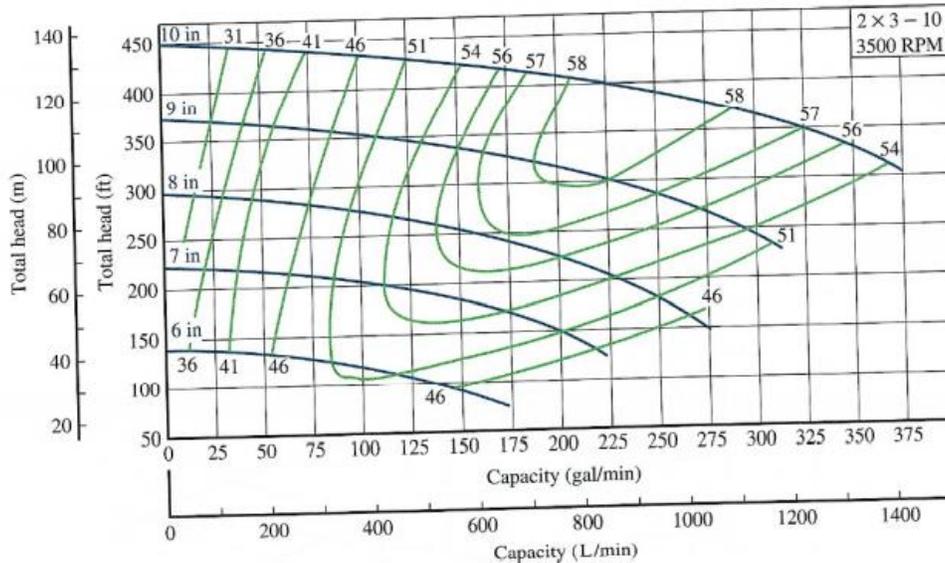
Siguiendo con la misma bomba, a la gráfica 4.8 se le han agregado las curvas que muestran las potencias que se requiere para impulsarla. Es decir, si la bomba, con un impulsor de 8 in enviara 215 gal/min contra una carga total de 250 ft de fluido, necesitará 23 HP. La misma bomba enviaría 280 gal/min a 200 ft y consumiría 26 HP



Gráfica 4. 8. Rendimiento de una bomba para diámetros diferentes del impulsor con la potencia requerida.

4.6.4 Eficiencia

A continuación, le agregamos las curvas de eficiencia constante. La eficiencia máxima para esta bomba es de 57%, aproximadamente. Es deseable operar una bomba cerca de su punto óptimo de eficiencia.



Gráfica 4. 9. Rendimiento de una bomba para diámetros diferentes del impulsor con la eficiencia.

4.6.5 Cavitación.

La cavitación es un fenómeno físico del cual se debe prestar atención, ya que trae consecuencias directas al rendimiento y puede generar daños en la bomba. La cavitación se produce cuando la presión del fluido disminuye, reduciéndose a su presión de vapor. Entonces, el fluido se ebulle dando lugar a formación de burbujas de vapor, las cuales se mueven, y al llegar a una región de alta presión estas colapsan de manera instantánea. Al colapsar las burbujas sobre una superficie, estas someten a grandes esfuerzos locales intensos, causando, a medida pasa el tiempo, daño por fatiga.

Normalmente la cavitación se origina a la entrada de las bombas, ya que en ese punto su presión es baja, dándose principalmente a lo largo de los lados convexos de los álabes, cerca de la zona de baja presión del impulsor, como se aprecia en la figura 4.1. El decrecimiento de la presión en el lado de succión de la bomba se puede dar por distintas razones, una de ellas es la velocidad a la cual el fluido avanza sobre el conducto, ya que a velocidades altas la temperatura aumenta, y gracias a la presión baja en esa zona, la temperatura no necesita elevarse al punto de ebullición para poder evaporizar el fluido, dando origen a la cavitación. Entonces, la protección contra la cavitación debe de empezar teniendo un buen diseño hidráulico del sistema, evitando en la medida de lo posible presiones bajas en el sistema.

La cavitación causa estos efectos indeseables:

- Disminuye la eficiencia.
- Erosión en el impulsor.
- Produce ruido y vibraciones.

- Daños en cojinetes, sellos, entre otros.

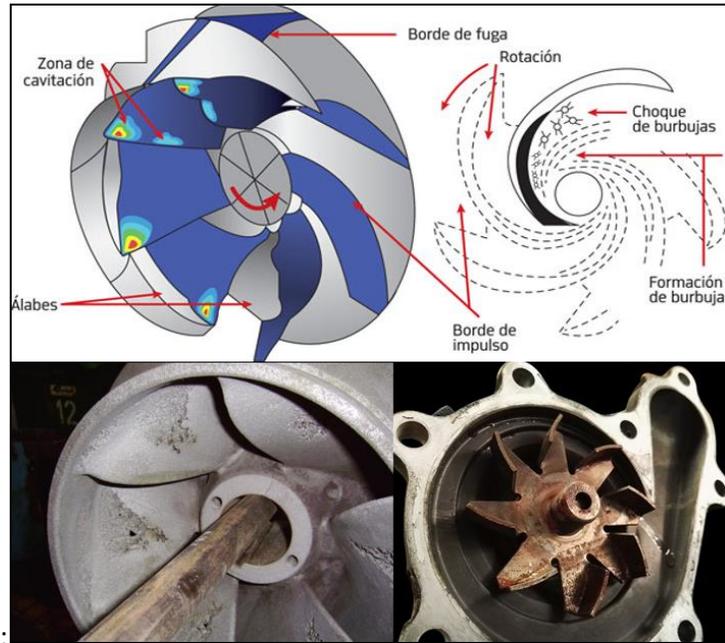


Figura 4. 1. Cavitación en la aspiración del impulsor.

Para caracterizar la susceptibilidad del sistema a la cavitación y especificar las condiciones de succión mínimas para una turbomáquina existe el parámetro **NPSH** (Altura neta de succión positiva), definido de la siguiente manera:

$$NPSH = \frac{p_{as} - p_v}{\gamma} + \frac{V_{as}^2}{2g} + Z_0 - h_{perd} \quad 4.22$$

Donde:

p_{as} : Presión en la entrada de la bomba.

V_{as} : Velocidad a la entrada de la bomba.

p_v : Presión de vapor

γ : Peso específico del fluido.

Z_0 : Altura manométrica

h_{perd} : Perdidas.

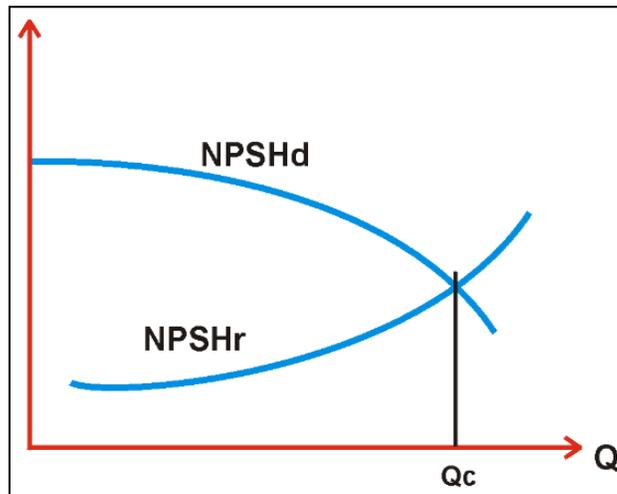
Este valor se logra calcular mediante los datos obtenidos en la instalación, donde el resultado será el $NPSH_d$ o altura neta de succión positiva disponible en el punto de succión de la bomba. Y mediante ensayos, el fabricante brinda información acerca del $NPSH_r$ requerido para cada modelo de bomba, en condición de su capacidad (caudal) y altura total.

El Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI) exige un margen mínimo de 10% para $NPSH_d$ sobre $NPSH_r$, expresado de la siguiente manera:

$$M = NPSH_d - NPSH_r$$

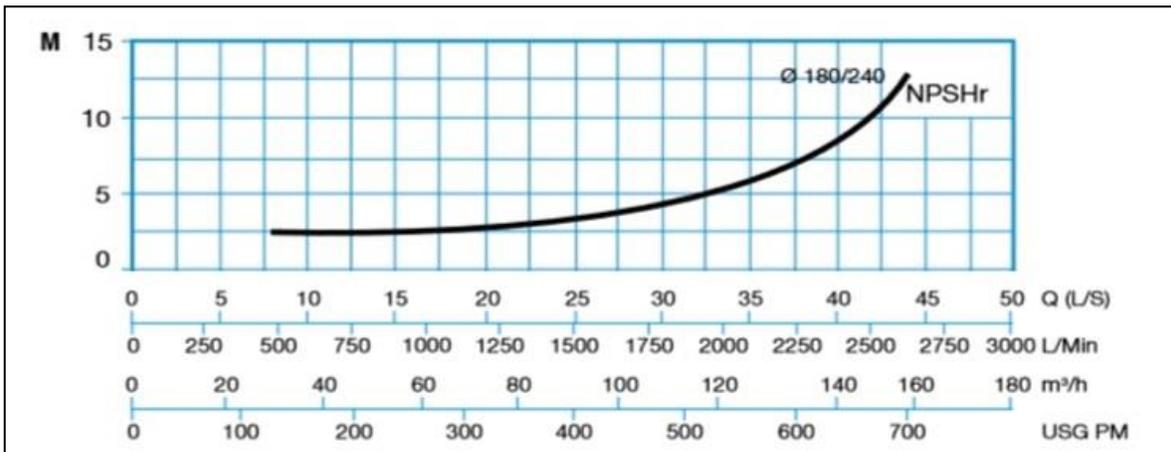
4.23

A partir de las expresiones de $NPSH_r$ y $NPSH_d$ se deduce que si aumenta el caudal de la bomba el $NPSH_d$ disminuye y el $NPSH_r$ aumenta, consecuentemente a partir de un determinado caudal se producirá cavitación, llegando a un punto donde se igualan los valores de los caudales. Entonces, la bomba debe de trabajar por debajo de ese punto de funcionamiento:

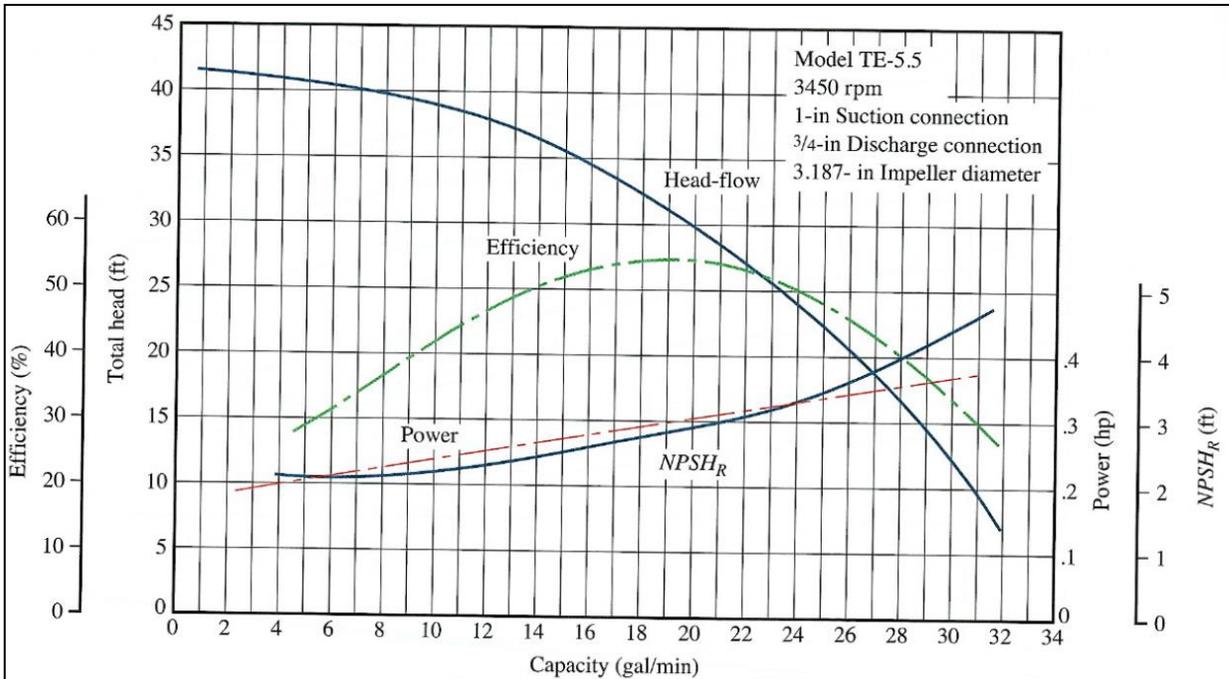


Gráfica 4. 5. Curvas de Altura neta de succión positiva requerida y disponible

El fabricante proporciona lo que son las curvas de NPSH requeridas, donde especifican las características de la bomba (velocidad, diámetro de aspiración, diámetro de expulsión). En la gráfica 4.11, se observa un ejemplo de curva $NPSH_r$, donde dependiendo del caudal que fluiría, así será el nivel de la altura requerido que tendría que alcanzar y superar el NPSH disponible del sistema.



Gráfica 4. 11. Curva $NPSH_r$.

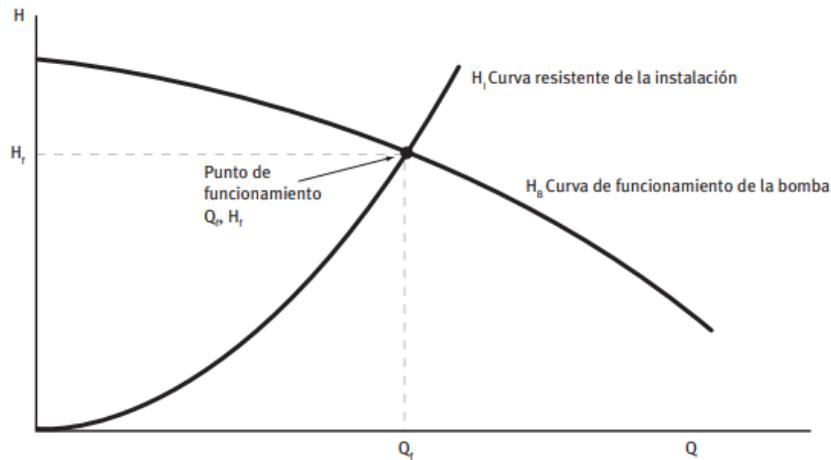


Gráfica 4. 12. Curvas de funcionamiento para bomba centrífuga modelo TE-5.5.

4.7 Punto de operación de la bomba

Para determinar el punto de operación de la bomba se busca la intersección de la curva característica de ella y la curva de instalación.

La curva característica de la bomba la provee el fabricante y depende de su Caudal y de la Carga total que debe superar esta para un número de revoluciones determinado. La curva de la instalación es una cuadrática que parte desde el origen que representa la pérdida de carga a vencer por la bomba para la situación de caudal nominal. Se trata de la suma de pérdidas de carga del tramo de tuberías más desfavorable, incluyendo accesorios.



Gráfica 4. 13. Punto de Operación de la Bomba.

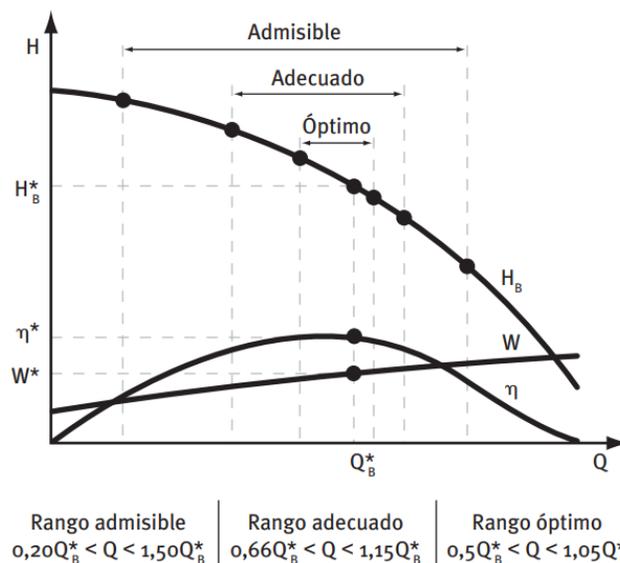
En la práctica, el punto de funcionamiento real de la instalación no coincidirá ni con el punto nominal de la bomba ni con el punto de funcionamiento nominal de la instalación, entonces se debe asegurar que:

- La bomba proporcione el caudal deseado, es decir, que se sitúe lo más próximo al punto nominal de la instalación.
- Se sitúe lo más próximo al punto de rendimiento máximo de la bomba, esto es, su punto nominal.

En general, siempre será preferible escoger la bomba para un caudal inferior al nominal, ya que lo habitual es sobreestimar las pérdidas de carga del circuito, De esta forma, una vez instalada la bomba, el punto de funcionamiento estará próximo al nominal. Convencionalmente los rangos de funcionamiento se definen como:

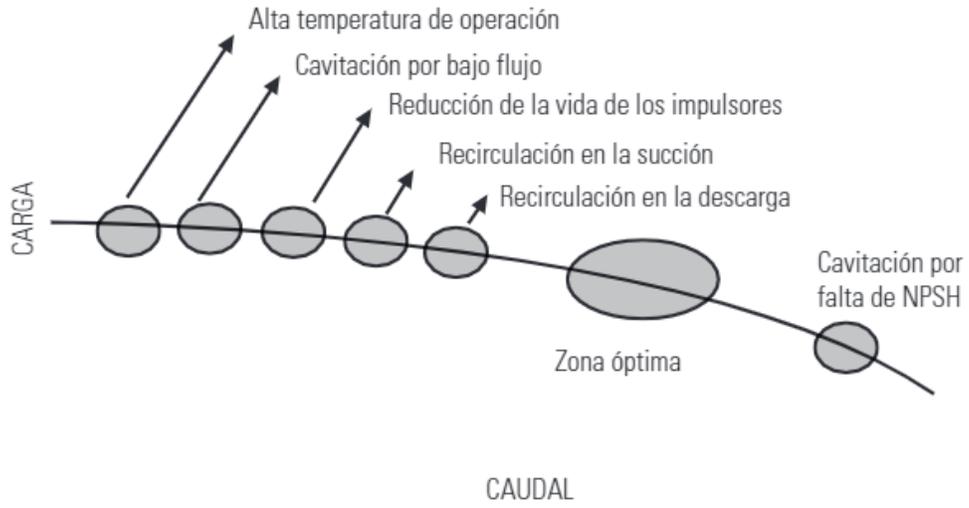
- **Rango admisible:** caudal entre el 20% y el 150% del nominal. Abajo del 20% la mayoría de la energía de la bomba se destina a pérdidas por choques en el rodete; el rendimiento de la bomba es muy bajo. A caudales elevados ($Q > 1,50Q^*$) el rendimiento de la bomba es también reducido, aunque el problema principal suele ser que aparece cavitación en el rodete de la bomba.
- **Rango adecuado:** caudal entre el 66% y el 115% del nominal.
- **Rango óptimo:** caudal entre el 85% y el 105% del nominal. En esta región el rendimiento es similar al rendimiento máximo de la bomba.

En la siguiente gráfica se observa la relación entre la Potencia (P), el rendimiento (η) y la carga total (H):



Gráfica 4. 14. Rangos de funcionamiento de una bomba.

La gráfica 4.15 resume los problemas de utilizar una bomba lejos de su punto óptimo de operación:



Gráfica 4. 15. Efectos del uso de una bomba fuera de su zona óptima de operación.

Bibliografía.

- [1] Claudio Mataix (1986). – Mecánica de Fluidos y maquinas hidráulicas – Cap 7. “La experimentación en mecánica de los fluidos” (pp. 168 - 174), segunda Edición.
- [2] Joseph B. Franzini & E John Finnemore (1999) - Mecánica de fluidos con aplicación en ingeniería – Cap 7 “Semejanza y análisis dimensional” Novena edición.
- [2] Claudio Mataix (1986). – Mecánica de Fluidos y maquinas hidráulicas – Cap 25. “Turbomaquinas hidráulicas: leyes de semejanza y curvas características” (pp. 532-536), segunda Edición.
- [3] Las leyes de semejanza en bombas hidráulicas. UPV, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [5] Joseph B. Franzini & E John Finnemore (1999)- Mecánica de fluidos con aplicación en ingeniería – Cap 15 “Maquinas Hidráulicas. Bombas” (pp. 417 - 441). Novena edición.
- [6] Mott R. L. (2006). Cap 13 “Selección y aplicación de bombas” (pp 401-410). Pearson Educación. Sexta Edición.

CAPÍTULO V: Aplicación de la Metodología

5.1 Manual de Auditoría Energética

La norma internacional ISO 50002:2014 es una herramienta que establece los principios y requisitos mínimos para el proceso de desarrollo de auditorías energéticas en cualquier organización. Su propósito principal es conducir a la identificación de oportunidades de mejora de la eficiencia energética en un sistema.

La norma ISO 50002:2014 propone un proceso de auditoría energética definido por etapas. Estas etapas son: planificación de auditoría eléctrica, reunión de apertura, recolección de datos, plan de medición, realización de la visita al sitio, análisis, informe de auditoría y reunión de cierre [1].

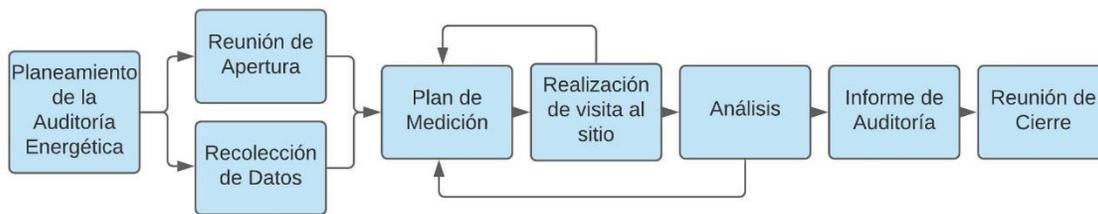


Figura 5. 1. Planeamiento de la auditoría energética

Si bien, ISO 50002:2014 establece principios y requisitos para implementar una auditoría energética, la norma no especifica cómo debe desarrollarse cada uno de estos requerimientos en la práctica. En el presente apartado se propone un procedimiento basado en esta norma, aplicado a motores eléctricos para sistemas de bombeo.

5.2 Etapas de la Auditoría Energética

5.2.1 Etapa 1: Planeamiento de la Auditoría Energética

En esta primera etapa se define el alcance, los límites y los objetivos de la auditoría. Además, se busca establecer y recopilar información preliminar. Se estructura de la siguiente manera:

- I. Se definen los roles del Auditor y la Organización, así como el ámbito de la auditoría.
 - a. La organización decide el ente que realizará la auditoría, si un representante de la misma organización (auditoría interna) o un consultor o grupo de consultores ajenos a esta (auditoría externa).
 - b. El perfil del auditor, en todo caso, debe ser el de un ingeniero o técnico electricista, mecánico o con una carrera afín con especialidad en sistemas eléctricos y mecánicos, específicamente funcionamiento y mantenimiento de motores.
- II. Al definir el alcance de la auditoría energética, auditor y organización deben considerar los tipos de sistema eléctrico y el equipo objeto de auditoría.
 - a. Debe inventariar minuciosamente el universo de estudio dentro de la auditoría.
 - b. El límite de la auditoría se debe ceñir al rendimiento energético de los sistemas motor-bomba a analizar y los procesos directamente relacionados con estos.

- c. Se definen los objetivos de la auditoría energética. Dependiendo de las circunstancias, estos pueden variar, pero, en todo momento, deben estar centrados en:
 - i. Realizar un diagnóstico energético de los sistemas motorizados previamente identificados.
 - ii. Precisar el potencial de eficiencia energética de los motores eléctricos.
 - iii. Identificar oportunidades de mejora en el desempeño y ahorro de energía de los motores.
- III. El auditor solicita información preliminar a la organización antes de comenzar la auditoría. Esta información debe ser:
 - a. Documentación correspondiente a los sistemas eléctricos, motores y bombas. Esto incluye planos físicos y eléctricos, manuales y hojas de datos de los equipos, registro de reparaciones y antigüedad de los equipos, etc.
 - b. Copia de auditorías previas, si fuera el caso.
 - c. Documentación del consumo de energía eléctrica del lugar para los últimos 2 años.
- IV. El auditor determina el período de tiempo necesario para realizar la auditoría.
- V. Auditor y Organización evalúan los reglamentos internos y externos a los que se sujeta la organización y analizan cómo estos afectan los alcances, los límites y los objetivos de la auditoría.
- VI. Auditor examina los planes y hábitos de ahorro energético practicados por la organización.
- VII. El auditor examina los planes de gestión medioambiental y requisitos de calidad de suministro de agua implementados por la organización y determina la incidencia de estos en el proceso.
- VIII. El auditor informa a la organización de instrumentación, equipos, personal y servicios necesarios para llevar a cabo la auditoría. Se define quién será el responsable de proveer todos estos recursos y se proporcionan los permisos de acceso y manipulación de los equipos durante el tiempo que dure la auditoría.

5.2.2 Etapa 2: Reunión de Apertura

En esta etapa, se busca un acuerdo entre auditor y organización en los siguientes aspectos:

- I. Se elige un representante de la organización que sirva como anfitrión y responsable general de la propiedad sometida a evaluación mientras dure la auditoría.
- II. Se identifica el personal de supervisión, operarios y de mantenimiento que manipulen los sistemas a evaluar.
- III. Se realiza una reunión de apertura para establecer responsabilidades. A esta reunión deben asistir:

- a. Director, gerente o representante de la empresa.
 - b. Jefe de personal.
 - c. Equipo Auditor.
 - d. Contador o director financiero de la empresa.
- IV. Se acuerdan los accesos a:
- a. Áreas donde están ubicados los motores y equipos de interés de la auditoría.
 - b. Áreas donde se encuentra la información de los sistemas eléctricos.
- V. El auditor y la Organización analizan el método de recolección de datos más conveniente para la auditoría.
- a. Se elige el método de medición adecuado.
 - b. Se describen los instrumentos a utilizar para las mediciones.
 - c. La organización menciona si existen entornos de trabajo en los que se necesiten equipos especiales resistentes a altas temperaturas, al agua, ruido eléctrico, entre otros.
 - d. Se define la precisión aceptada en las mediciones.

5.2.3 Etapa 3: Recopilación de Datos

En esta etapa se establecen los datos que se han de recopilar, así como su posterior clasificación y registro. Para esto se necesita que el equipo auditor ponga su enfoque en:

- I. Identificar de manera detallada los sistemas, procesos y equipos que consumen energía eléctrica y son de interés para la auditoría energética.
- II. Definir las características para la recopilación de los parámetros relacionados al consumo y al rendimiento energético de los sistemas motorizados.
- III. Definir las características para la recopilación de los parámetros relacionados a la calidad de la energía suministrada por la red eléctrica.
- IV. Recopilar un historial del rendimiento de los equipos y del consumo eléctrico de estos. Los datos a recopilar son:
 - a. Información del sistema de transmisión y acoplamientos mecánicos: Tipos y estados de acoples, engranajes, correas, etc.
 - b. Datos del motor: Información de placa, medición de variables eléctricas y mecánicas, historial de reparaciones del motor, entre otros. La medición de las variables, preferiblemente, debe hacerse en el sitio; es decir, sin desacoplar el motor del sistema de bombeo, pero de no ser posible, puede utilizarse un banco de ensayos con la instrumentación necesaria.

- c. Datos de la potencia eléctrica entregada al sistema de bombeo con el objetivo de conocer la calidad de suministro energético y encontrar puntos de mejora.
- V. Definir claramente la instrumentación y los métodos necesaria para recopilar los datos especificados en Etapa 3-IV. Para esto se puede optar por las opciones:
 - a. Utilizar amperímetros, voltímetros, multímetros, contadores de energía eléctrica, termómetros infrarrojos, tacómetros, entre otros instrumentos para las mediciones pertinentes.
 - b. Hacer uso de un equipo analizador de calidad eléctrica y variables mecánicas.
 - c. Usar un banco de pruebas de motores.
- VI. Solicitar información a la organización de planes futuros que se relacionen con el rendimiento energético tales como expansiones o contracciones planificadas, cambios en la disposición de los motores, reemplazos a los equipos motor-bomba o en el sistema eléctrico, etc.
- VII. Tener clara la condición del sistema de distribución eléctrica de la planta.

5.2.4 Etapa 4: Plan de medición

En esta etapa se determinan las acciones necesarias para llevar a cabo la recopilación de datos. Para esto, se toman las siguientes acciones:

- I. El equipo auditor define los puntos de medición en los sistemas motor bomba y los instrumentos a utilizar en cada caso.
- II. El equipo auditor define la cantidad de veces y la frecuencia con la que deben hacer las mediciones en cada punto. Se estima la precisión de las medidas y se toma en cuenta la incertidumbre de los instrumentos de medida utilizados.
- III. Las mediciones deben ser llevadas a cabo por expertos en los sistemas eléctricos y en motores, los cuales son parte del equipo auditor. Las mediciones deben ser supervisadas por el encargado de la auditoría.
- IV. Se debe verificar que los equipos de medición estén debidamente calibrados antes de su utilización.

5.2.5 Etapa 5: Realización de la visita.

En esta etapa el equipo auditor debe ejecutar el plan de medición especificado en la etapa anterior.

El equipo de auditores lleva a cabo operaciones directas en los sistemas de bombeo. En todo momento, el personal a cargo de los instrumentos y la recopilación de datos está compuesto de personas competentes en el área y tomando las medidas de seguridad necesarias.

5.2.6 Etapa 6: Análisis

Después de haber recolectado la información, el equipo auditor debe:

- I. Utilizar los métodos de cálculo apropiados para el análisis de la información recopilada y documentarlos debidamente en una memoria de cálculo, además de dejar registro de estimaciones o suposiciones hechas.
- II. Se debe tomar en cuenta la incertidumbre de las mediciones debido a los instrumentos y dar cuenta de cómo esto afecta al análisis.
- III. El equipo auditor debe realizar un desglose del consumo de energía de los diferentes equipos pertenecientes al sistema, definiendo cómo es que se distribuye el total de la potencia suministrada en dichos equipos.
- IV. El equipo auditor genera un registro histórico del rendimiento energético del sistema evaluado correspondiente a la facturación de los dos últimos años.
- V. El auditor propone oportunidades de mejora de la eficiencia energética en los sistemas evaluados centrados en:
 - a. Mejoras en la calidad del suministro energético al sistema.
 - b. Mejoras en la eficiencia del motor.
 - c. Mejoras en el acople mecánico o el sistema de transmisión.
- VI. El auditor propone oportunidades de mejora con respecto a las condiciones, el mantenimiento y la antigüedad del equipo; agregando en sus propuestas el tiempo estimado de recuperación de la inversión. Estas propuestas incluyen:
 - a. Sustitución por antigüedad cuando la reparación no es viable.
 - b. Sustitución de equipos obsoletos, es decir, cuando la tecnología utilizada no es la indicada y esto reduce en gran magnitud la eficiencia del sistema.
 - c. Adición de tecnologías que mejoren el rendimiento del sistema como controladores de velocidad, controles de arranque suave, etc.
 - d. Sugerencias con respecto al tipo y frecuencia de los controles y mantenimiento del sistema.
 - e. Mejoras en las instalaciones eléctricas: corrección de diámetro de conductores, sugerencias en el sistema de puesta a tierra, reorganización de los circuitos, utilización de las protecciones adecuadas, etc.
- VII. El auditor propone mejoras en los hábitos operativos, si aplica.
- VIII. El equipo auditor establece el costo-beneficio financiero de sus propuestas para la organización, presentando claramente el ahorro que significan sus propuestas a corto, mediano y largo plazo.
- IX. El equipo auditor deja constancia de las Ganancias No Energéticas. Estas ganancias no se ven reflejadas en la factura del consumo energético, pero pueden ser mejoras en la necesidad de mantenimiento, en la calidad del servicio o en la relación con el medio

ambiente. De ser posible, estos aspectos deben ser evaluados y presentados de forma cuantitativa.

5.2.7 Etapa 7: Informe de Auditoría.

El informe final de la auditoría deberá cumplir con los siguiente:

- I. Se debe detallar la información que identifique a la organización que solicita la auditoría y al auditor. Además, se deben incluir los objetivos, alcances y límites establecidos, así como la descripción de cada una de las etapas de la auditoría.
- II. Especificar las mediciones realizadas, así como los cálculos, simulaciones o estimaciones realizados.
- III. En su informe, el auditor debe usar lenguaje fácil de entender y expresar sus ideas de manera directa y concisa.
- IV. De priorizarse el uso de gráficos, tablas o imágenes para presentar datos o resultados.
- V. Las propuestas para la mejora en el rendimiento energético del sistema deben ser presentadas de manera clara y en orden de prioridad.
- VI. Se debe cerrar el informe con el apartado conclusiones y recomendaciones.

5.2.8 Etapa 8: Reunión de Cierre.

Durante la reunión final se debe cumplir con lo siguiente:

- I. Presentar el Informe de Auditoría e invitar a la Organizaciones a tomar decisiones.
- II. El auditor y su equipo deben ser capaces de explicar los resultados y responder de manera concisa las preguntas de los representantes de la organización.
- III. Auditor y Organización cierran de manera oficial la Auditoría Energética.

5.3 Ejemplo de aplicación

Auditoría energética enfocada en el desbalance de tensiones

Estación de bombeo: Facultad de Medicina, UES.

Equipo Auditor:

Alumnos egresados de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador. Integrantes:

- González Arévalo, Roberto José.
- Recinos Bolaños, Manuel Josué.
- Sigüenza Díaz, Karen Marcela.

Alcances de la Auditoría Energética

El propósito principal de la auditoría es ejemplificar el efecto del desbalance de tensión en la eficiencia de un equipo de bombeo. Para este fin, se toman como base los datos de placa y ficha técnica del conjunto motor-bomba ubicado frente al edificio de Medicina de la Universidad de El Salvador.

El estudio se ceñirá únicamente a detectar cómo el desbalance de tensión en la red eléctrica afecta el rendimiento del motor, así como también prever los posibles daños que pudieran afectar al equipo debido al desbalance.

Limitantes de la Auditoría

El estudio a realizarse es meramente académico, para ejemplificar los pasos a seguir para realizar una auditoría energética. Como convención, se tomó a bien utilizar los datos del conjunto motor-bomba tal como se muestran en sus datos de placa y ficha técnica. Además, el estudio se limita al efecto del desbalance de tensiones en el equipo de bombeo, sin tomar en cuenta otras perturbaciones a la calidad de la energía que podrían afectarlo.

Se supone que los materiales y equipo conectados al sistema de bombeo están en condiciones ideales de funcionamiento y no son tomados en cuenta como factores de cambio para este estudio.

Objetivos de la auditoría

- Realizar un diagnóstico de la cantidad de desbalance de tensiones en el sistema motor-bomba y su influencia en la eficiencia de este.
- Realizar recomendaciones que ayuden a optimizar la eficiencia del motor con base en el estudio a realizarse.

Ubicación del Equipo que se someterá a estudio

El sistema objeto de estudio se encuentra en las coordenadas 13.717006825359759, -89.20212746921666; esto es, en el campus de la Universidad de El Salvador, junto a la plaza Salvador Allende, en la Facultad de Medicina. Se adjunta mapa de su ubicación como referencia:

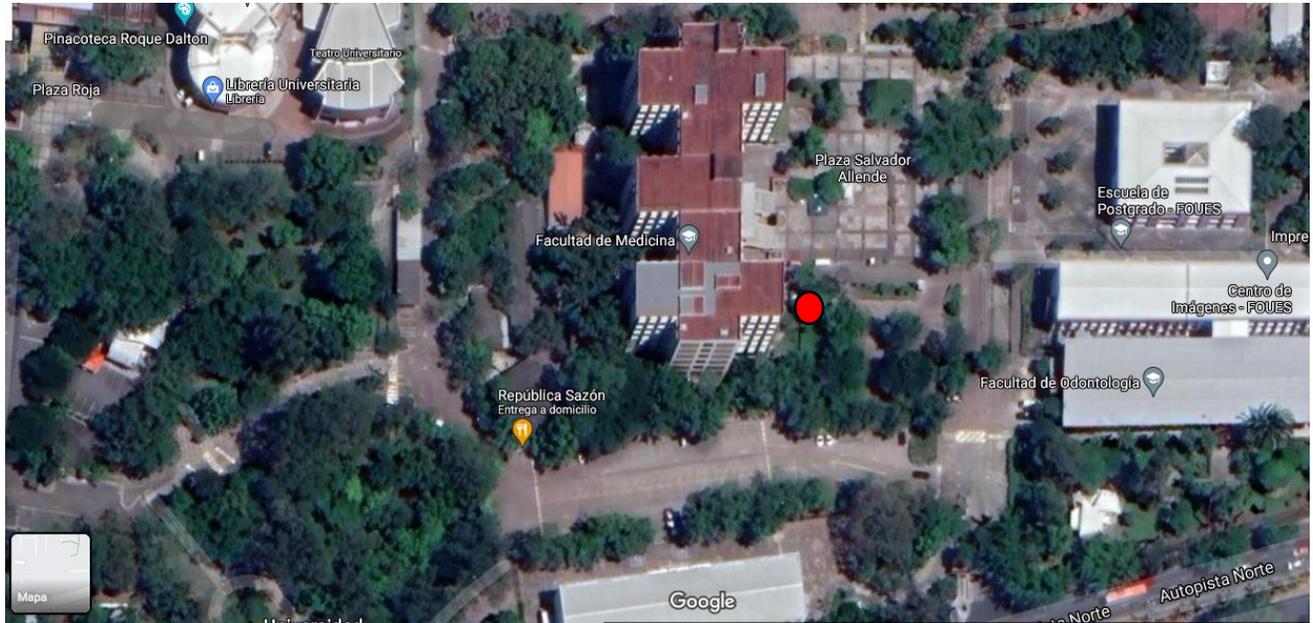


Figura 5. 2. Ubicación del Equipo que se someterá a estudio

Definición de Métodos de medición y cálculo

Se hace una visita al lugar para conocer el estado del sistema, así como sus características de placa. Se supone que el motor trabaja al 100% de su capacidad las 24 horas del día.

Con fines plenamente didácticos, se supone para el indicador de desbalance VUF un valor de 2.18%; esto es para observar claramente el efecto que el desbalance de tensiones tiene en la eficiencia del equipo y las diferentes afectaciones que puede causar.

En la etapa de cálculos, se opta por utilizar dos distintos métodos: el método gráfico y el método analítico por componentes simétricas. Después del desarrollo de ambos métodos se procede a una comparación de los resultados de ambos.

Medición y Definición de Parámetros

Los parámetros del sistema Motor-Bomba, objeto de estudio, son:

| | | |
|--------------------|------------------|--------------------|
| Motor de Inducción | Marca: US Motors | Modelo: DP24 |
| Trifásico | 4 Polos | Eficiencia: 95.4 % |
| 1780 RPM | 60 Hz | 100 HP |
| 460 V | Clase B | |

Tabla 5. 1. Parámetros del sistema Motor-Bomba

INFORMACION DE LA PLACA:

- Potencia de 100 HP.
- Funciona a 460 V.
- 2 pares de polos.
- 3 Fases.
- Velocidad de operación del motor: 1780 rpm a plena carga.

Prueba de vacío: 460V, 24 A, 60Hz, 3,200 W.

Rotor bloqueado: 460 V, 730 A, 60Hz, 146,000 W.

Rotor bloqueado: 29.4 V, 120 A, 15 Hz, 2,500 W.

$R_{DC} = 0.0576 \Omega$

Pérdidas rotacionales: $P_{ROT} = 904 \text{ W}$

Convenciones y suposiciones hechas debido a la falta de acceso al equipo por las condiciones del COVID-19:

- Tensiones de Fase:

$V_{AB} = 462 \angle 0^\circ$

$V_{CA} = 480 \angle 120^\circ$

$V_{BC} = 445 \angle 240^\circ$

- Carga del motor: 100%.
- Tiempo de Operación: 24 h/día.

Análisis

Como se mencionó en la etapa de Definición de Métodos de Medición y Cálculo, se ha optado por seguir dos caminos y hacer la comparativa entre ellos. A continuación, el análisis de cada uno:

Método Gráfico

Este método se basa en la cuantificación de parámetro de los efectos de los efectos del desbalance hacia el motor de inducción, tomando las gráficas proporcionadas por NEMA No. MG1-1993. e IEEE. Con este método se pretende encontrar tensión de secuencia negativa presente, el índice VUF, LVUR, el porcentaje de calentamiento del motor y el porcentaje de derating que sufrirá.

$$V_{AB} = 462 \angle 0^\circ \quad 5.1$$

$$V_{BC} = 480 \angle 240^\circ \quad 5.2$$

$$V_{CA} = 445 \angle 120^\circ \quad 5.3$$

Teniendo un conjunto de tensiones desequilibradas de línea, las tensiones de secuencia positiva y negativa vienen dadas por:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix}$$

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

Donde:

V_1 : Valor RMS de la componente de secuencia positiva del voltaje aplicado.

V_2 : Valor RMS de la componente de secuencia negativa del voltaje aplicado.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -0.5 + j0.866 & -0.5 - j0.866 \\ 1 & -0.5 - j0.866 & -0.5 + j0.866 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 462 \angle 0^\circ \\ 480 \angle 240^\circ \\ 445 \angle 120^\circ \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 462.33 \angle 0 \\ 10.10 \angle 90.91 \end{bmatrix}$$

- Factor VUF.

El VUF (Voltage Unbalance Factor): Es la relación de la componente de secuencia negativa entre la componente de secuencia positiva, medida a la frecuencia del sistema. Este factor viene dado en la norma IEC 61000-4-27.

El VUF viene dado por:

$$VUF = \frac{|V_2|}{|V_1|} = \frac{10.10}{462.33} * 100 \quad 5.4$$

$$VUF = 0.02200 * 100\% = 2.18\% \quad 5.5$$

El grado de desbalance presente sería del 2.18%, esto referido a las componentes simétricas.

- Factor LVUR.

LVUR: El desbalance de voltaje es definida por la Asociación Nacional Eléctrica de Fabricantes (NEMA) en el estándar MG 1-1993, como la relación entre la desviación máxima del voltaje promedio y el voltaje promedio de los tres voltajes.

LVUR: Porcentaje de desbalance de voltaje de línea, con sus siglas en inglés "Line voltage unbalance rate (LVUR)".

Encontrando el LVUR:

$$LVUR = \frac{\text{MAX}\{|V_{ab} - V_{PROM}|, |V_{bc} - V_{PROM}|, |V_{ca} - V_{PROM}|\}}{V_{PROM}} * 100 \quad 5.6$$

$$V_{PROM} = \frac{V_{AB} + V_{BC} + V_{CA}}{3} \quad 5.7$$

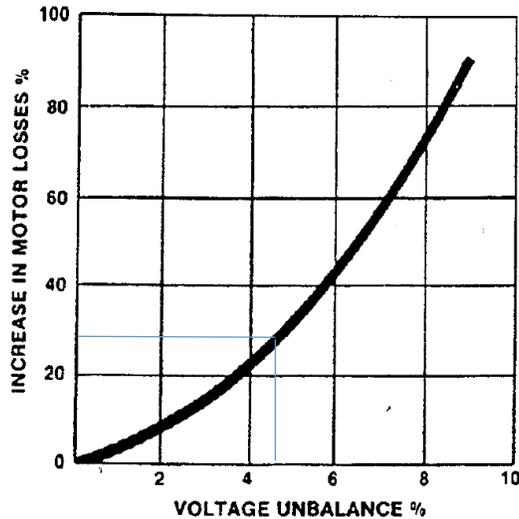
$$V_{PROM} = \frac{470 + 480 + 445}{3} = 465 \quad 5.8$$

$$LVUR = \frac{\text{MAX}\{|470 - 465|, |480 - 465|, |445 - 465|\}}{465} * 100 \quad 5.9$$

$$LVUR = \left| \frac{445 - 465}{465} \right| * 100 = 4.35\% \quad 5.10$$

- Pérdidas.

Para encontrar un valor del incremento de las pérdidas, la IEEE en el Libro de Bronce, proporciona la siguiente gráfica:



Gráfica 5. 1. Incremento de pérdidas según libro de Bronce.

Antes de poder aplicar la gráfica anterior, se debe encontrar las pérdidas que se tendrán en un sistema equilibrado, se supone que el motor trabaja bajo un sistema equilibrado de tensiones y a plena carga, tomando su eficiencia nominal de placa, la cual sería de 95.4%. Entonces, la bomba estaría demandando una potencia de salida del motor de:

$$P_{out} = 0.954 * 100HP = 95.4HP = 71.17kW \quad 5.11$$

$$P_{pérdidas} = 4.6 HP = 2.98kW \quad 5.12$$

Para un desbalance del 4.35% las pérdidas incrementarían en un 28%, teniendo un valor de:

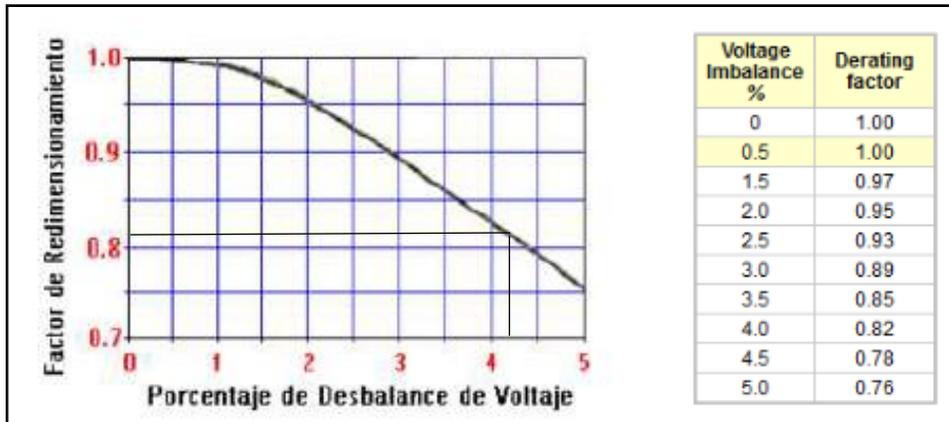
$$P_{pérdidas} = 0.28 * 95.4HP = 26.71 HP \quad 5.13$$

$$P_{pérdidas} = 26.71 + 4.6 = 31.31 HP = 23.36kW$$

Es necesario aclarar que la potencia resultante de salida será constante, ya que es la potencia que demanda la bomba. Entonces, al tener un sistema desbalanceado las pérdidas incrementarían, siendo necesario incrementar la potencia del motor; ya que se debe suplir la demanda constante de la bomba.

- Factor de redimensionamiento.

Para aplicar correctamente el factor de “derating” o “redimensionamiento” se utiliza la gráfica X. Al tener el porcentaje de redimensionamiento, este se le aplica a la potencia nominal del motor, esto con el objetivo de disminuir la posibilidad de daño del motor (Oqueña, 2012).



Gráfica 5. 2. Factor de redimensionamiento

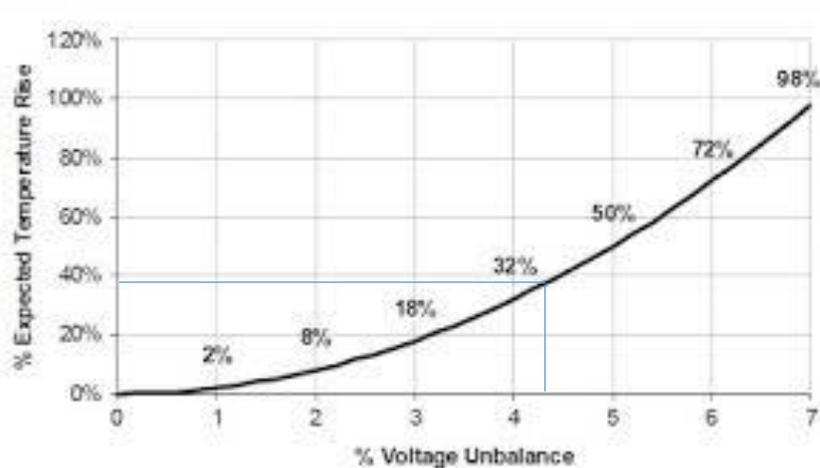
Tomando en este caso que el motor está trabajando a su potencia nominal, y con un desbalance del 4.35% tendríamos que aplicar una reducción del 19% de su potencia, para que nuestro motor no sufra deterioro ni reducción de su funcionamiento adecuado; se tiene que reducir su potencia de salida a un 81%. Si aumentan las pérdidas tanto en el rotor como en el estator, la potencia que demanda la máquina incrementa. Si la potencia de entrada incrementa, la eficiencia disminuye. Se puede expresar como:

$$\eta(\%) = \frac{P_{sal}}{P_{perdidas} + P_{sal}} \cdot 100 = \frac{77 \text{ HP}}{77 \text{ HP} + 31.31 \text{ HP}} * 100 = 71\% \quad 5.14$$

Entonces, en presencia de desbalance y aplicando el factor de redimensionamiento al motor, vemos la problemática que no se podría suplir la demanda de potencia de la bomba, la cual es de 95HP y solo se estaría proporcionando una potencia de 77 HP. Para poder suplir la demanda de la bomba se ve necesario sustituir el motor con uno de potencia nominal mayor, el cual al aplicar el factor de redimensionamiento pueda suplir la potencia demandada.

- **Calentamiento del motor**

Para encontrar el porcentaje de calentamiento se puede hacer de dos formas, de manera gráfica o de manera matemática. De manera gráfica sería la siguiente:



Gráfica 5. 3. Porcentaje de calentamiento de un motor de inducción.

Porcentaje de aumento de temperatura en el motor = 39%

Para encontrarlo de forma matemática, se tiene la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de calentamiento estimado} = 2 * LVUR^2 \quad 5.15$$

$$\text{Porcentaje de calentamiento estimado} = 2 * 4.35^2 = 38\% \quad 5.16$$

Un motor Clase B, y con aislamiento Clase F como es el caso del motor estudiado, tiene la capacidad de subir 80 °C por encima de los 40 °C de la temperatura máxima del ambiente, es decir, de llegar a los 120 °C sin dañar su aislamiento; incluso, se da un margen de 35 °C más en los que es posible operar el motor, pero no recomendable. Al superar este rango, el aislamiento del motor comienza a sufrir daños y se reduce la vida útil de este.

El porcentaje de calentamiento arrojado en el gráfico 5.3 se refiere a un 39 % agregado a los 80 °C de aumento de temperatura permitida. En otras palabras, en estas condiciones, el motor podría llegar hasta los 110 °C por encima de la temperatura ambiente.

Método Analítico

Utilizando modelos de circuitos equivalentes que tengan en cuenta las pérdidas que ocurren en la rama de magnetización y, a partir del equivalente Thévenin del circuito, se obtendrá la impedancia equivalente y los valores necesarios para estudiar los efectos del desequilibrio.

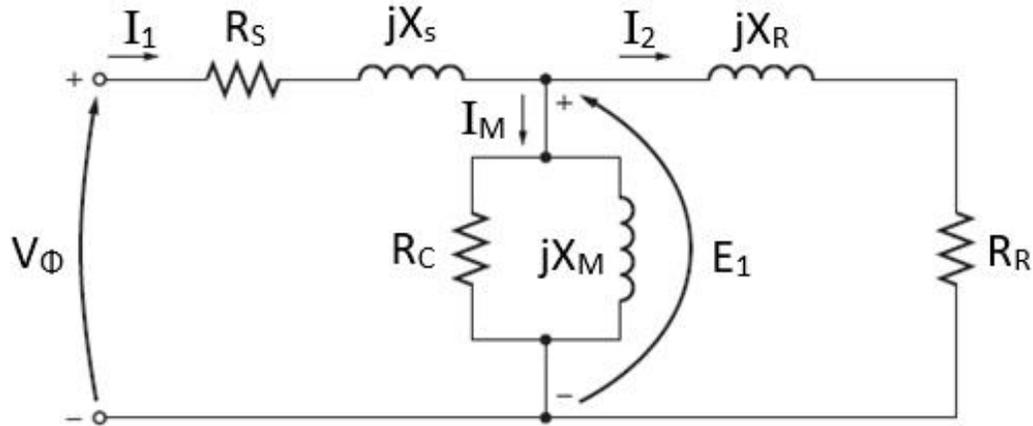


Figura 5. 3. Modelo de un motor de Inducción. Tomando en cuenta la resistencia de magnetización para secuencia positiva.

A partir de un motor de inducción trifásico (H100P2EC - 100 HP - TE - 1780 RPM) – Clase B [2]:

INFORMACION DE LA PLACA [3]:

- Potencia de 100 HP
- Funciona a 460 V
- 2 pares de polos
- Rendimiento del 95.4%
- 3 Fases
- Velocidad de operación del motor: 1780 rpm a plena carga.

Determinación de los parámetros

Los parámetros del circuito equivalente de la Figura 5.3 se determinan empleando tres pruebas estandarizadas que se describen a continuación. [4]

Prueba de vacío: 460V, 24 A, 60Hz, 3,200 W.

Rotor bloqueado: 460 V, 730 A, 60Hz, 146,000 W.

Rotor bloqueado: 29.4 V, 120 A, 15 Hz, 2,500 W.

$R_{DC} = 0.0576 \Omega$

Pérdidas rotacionales: $P_{ROT} = 904 \text{ W}$

$$r_{1dc} = \frac{R_{DC}}{2} = \frac{0.0576}{2} = 0.0288 \Omega \quad 5.17$$

Calculando velocidad síncrona:

$$\eta_s = \frac{120 f}{p} = \frac{120(60 \text{ Hz})}{4} \quad 5.18$$

$$\eta_s = 1800 \text{ rpm} \quad 5.19$$

A plena carga, el deslizamiento (s):

$$s = \frac{N_s - N_m}{N_s} = \frac{1800 - 1780}{1800} \quad 5.20$$

$$s = 1.11 \%$$

$$0 \leq s \leq 0.15 \text{ Intervalo normal.}$$

A partir de la prueba de rotor bloqueado a 60 Hz, se puede obtener los valores de reactancias para X_s y X_r , rotor y estator respectivamente.

$$V = \frac{460 \text{ V}}{\sqrt{3}} ; I = 730 \text{ A} \quad 5.21$$

$$P = \frac{146,000 \text{ W}}{3} = 48,667 \text{ W} \quad 5.22$$

$$Re_{60 \text{ Hz}} = \frac{P}{I^2} = \frac{48,667}{(730)^2} = 0.0913 \Omega \quad 5.23$$

$$Ze_{60 \text{ Hz}} = \frac{V_{60}}{I_{60}} = \frac{460/\sqrt{3} \text{ V}}{730 \text{ A}} = 0.3638 \Omega \quad 5.24$$

$$Xe_{60 \text{ Hz}} = \sqrt{Ze^2 - Re^2} = X_s + X_r = 0.35216 \Omega \quad 5.25$$

Para un motor de inducción Clase B, de acuerdo con las recomendaciones NEMA (National Electrical Manufacturers Association) [3]:

$$X_s = 0.4 X_e = 0.14086 \Omega \quad 5.26$$

$$X_r = 0.6 X_e = 0.2113 \Omega \quad 5.27$$

Continuando con la prueba de rotor bloqueado, ahora a 15 Hz se puede determinar el valor de las resistencias del estator y rotor.

$$V = 29.4 \text{ V} ; I = 120 \text{ A} \quad 5.28$$

$$P = \frac{2,500 \text{ W}}{3} = 833 \text{ W} \quad 5.29$$

$$Re_{15 \text{ Hz}} = \frac{P}{I^2} = \frac{833}{(120)^2} = 0.05787 \Omega \quad 5.30$$

Para calcular R_s se necesita de la prueba en dc, entonces:

$$R_s = r_{1ac} = r_{1dc} \frac{Re_{60Hz}}{Re_{15Hz}} = (0.0288) \frac{0.0913}{0.05787} \quad 5.31$$

$$R_s = r_{1ac} = 0.0454 \Omega \quad 5.32$$

R_r (r'_2) debe considerar la baja frecuencia del rotor.

$$R_r = r'_2 = Re_{15} - r_{1dc} = 0.05787 - 0.0288 \Omega \quad 5.33$$

$$R_r = r'_2 = 0.02907 \Omega \quad 5.34$$

A partir de la prueba de vacío o, ensayo sin carga, se puede obtener los valores de X_M y R_c .

Cuando no existe carga, el motor gira prácticamente a la velocidad síncrona, esto es: $n_s = n_m$. Por lo que en (5.19) $s = 0$. Así, R_2/s en la Figura 5.3 se hace muy grande (circuito abierto en la práctica).

Prueba de vacío: 460V, 24 A, 60Hz, 3,200 W.

$$P_o = 3I_1^2 R_s + P_c + P_{rot} \quad 5.35$$

$$P_c = P_o - 3I_1^2 R_s - P_{rot} \quad 5.36$$

$$P_{c3\phi} = 3,200 - 3(24)^2(0.0454) - 904 = 2,217.46 W \quad 5.36$$

$$P_{c1\phi} = \frac{2,217.46 W}{3} = 739.154 W \quad 5.36$$

$$R_c = \frac{V_o^2}{P_{c1\phi}} = \frac{(460/\sqrt{3})^2}{739.154} \quad 5.36$$

$$R_c = 95.42 \Omega \quad 5.36$$

$$\theta_o = \cos^{-1} \left(\frac{P_{o1\phi}}{V_o I_o} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{\frac{3,200}{3} W}{\frac{460}{\sqrt{3}} V (24 A)} \right) \quad 5.37$$

$$\theta_o = 80.37^\circ \text{ EN ATRASO}$$

Conociendo el desfase se puede calcular el valor de X_M . $R_c \gg X_M$

$$Z_o = \frac{V_o}{I_o} = \frac{460/\sqrt{3} V}{24 A} \quad 5.38$$

$$Z_o = 11.06 \Omega \quad 5.39$$

$$X_M = Z_o \sin \theta_o - X_1 = 11.06 \sin(80.36) - 0.1408 \quad 5.40$$

$$X_M = 10.77 \Omega \quad 5.41$$

$$R'_r = R_r \sqrt{2} \quad X'_r = \frac{X_r}{\sqrt{2}} \quad 5.42$$

$$R'_r = 0.2907\sqrt{2} = 0.04111 \Omega \quad X'_r = \frac{0.2113}{\sqrt{2}} = 0.1494 \Omega$$

RESUMEN DE RESULTADOS

| Tipo de impedancia | Valor en Ohms por cada fase |
|---|-----------------------------|
| R_s Resistencia del estator | 0.0454 Ω |
| X_s Reactancia del estator | 0.1408 Ω |
| X_M Reactancia de la rama de magnetización | 10.77 Ω |
| R_r Reactancia del rotor en secuencia positiva | 0.02907 Ω |
| R'_r Reactancia del rotor en secuencia negativa | 0.04111 Ω |
| X_r Reactancia del rotor en secuencia positiva | 0.2113 Ω |
| X'_r Reactancia del rotor en secuencia negativa | 0.1494 Ω |
| R_c Resistencia de la rama de magnetización | 95.42 Ω |

Tabla 5. 2. Resumen de valores de los parámetros del circuito equivalente

Análisis del Rendimiento del Motor en condiciones de desbalance:

En el siguiente diagrama se muestra que, de todas las potencias desarrolladas por la energía entregada al sistema (P_{abs}), solo la potencia mecánica en secuencia positiva (P_{sec+}) está a favor del movimiento del eje; mientras que la potencia mecánica desarrollada en secuencia negativa (P_{sec-}) precarga el sistema, se opone al movimiento del eje y, en términos de rendimiento, resta a la eficiencia del equipo. P_{Cu1} y P_{Cu2} son las pérdidas en el cobre que se dan debido a las corrientes para secuencia directa e inversa, respectivamente.

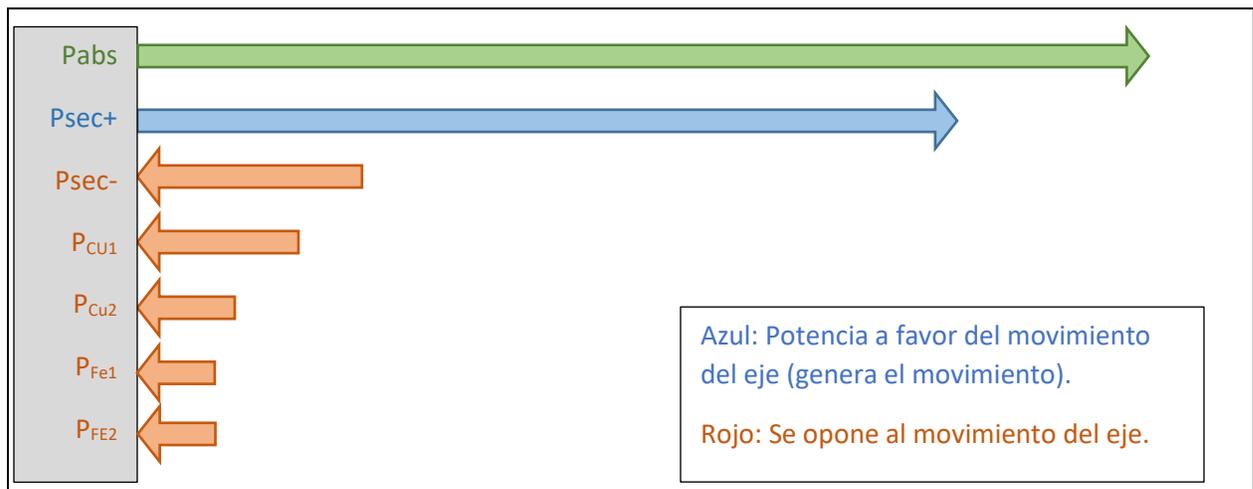


Figura 5. 4. Diagrama de flujo de potencia

Ahora se calcula las impedancias equivalentes de secuencia positiva y negativa, a partir de las impedancias de estator y rotor.

$$Z_1 = (R_s + jX_s) + \frac{1}{\frac{1}{jX_M} + \frac{1}{jX_r + \frac{R_r}{s}}} = (0.0454 + j0.1408) + \frac{1}{\frac{1}{j10.77} + \frac{1}{j0.2113 + \frac{0.02907}{0.01111}}} \quad 5.42$$

$$Z_1 = 2.4268 + j0.9155 \Omega = 2.56 \angle 20.67^\circ$$

$$Z_2 = (R_s + jX_s) + \frac{1}{\frac{1}{jX_M} + \frac{1}{jX_r + \frac{R_r'}{2-s}}} = (0.0454 + j0.1408) + \frac{1}{\frac{1}{j10.77} + \frac{1}{j0.1494 + \frac{0.04111}{2-0.0111}}} \quad 5.43$$

$$Z_2 = 0.0655 + j0.288 \Omega = 0.296 \angle 77.188^\circ$$

A partir de las tensiones de línea se procede a calcular el valor de VUF, grado de desbalance presente en el sistema.

$$V_{AB} = 462 \angle 0^\circ \quad 5.1$$

$$V_{BC} = 480 \angle 240^\circ \quad 5.2$$

$$V_{CA} = 445 \angle 120^\circ \quad 5.3$$

Teniendo un conjunto de tensiones desequilibradas de línea, las tensiones de secuencia positiva y negativa vienen dadas por:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix}$$

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

Donde:

V_1 : Valor RMS de la componente de secuencia positiva del voltaje aplicado.

V_2 : Valor RMS de la componente de secuencia negativa del voltaje aplicado.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -0.5 + j0.866 & -0.5 - j0.866 \\ 1 & -0.5 - j0.866 & -0.5 + j0.866 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 462 \angle 0^\circ \\ 480 \angle 240^\circ \\ 445 \angle 120^\circ \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 462.33 \angle 0 \\ 10.10 \angle 90.91 \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, el VUF (Voltage Unbalance Factor); es la relación de la componente de secuencia negativa entre la componente de secuencia positiva, medida a la frecuencia del sistema. Este factor viene dado en la norma IEC 61000-4-27.

El VUF viene dado por:

$$VUF = \frac{|V_2|}{|V_1|} = \frac{10.10}{462.33} * 100 \quad 5.4$$

$$VUF = 0.02200 * 100\% = 2.18\% \quad 5.5$$

El grado de desbalance presente sería del 2.18%, esto referido a las componentes simétricas.

De lo anterior se puede calcular el valor de las intensidades de secuencia:

$$I_1 = \frac{U_{1f}}{Z_{eq1}} = \frac{462.33 \angle 0^\circ / \sqrt{3}}{2.4268 + j0.9155} = 96.286 - j36.32 = 102.91 \angle -20.67^\circ A \quad 5.44$$

$$I_2 = \frac{U_{2f}}{Z_{eq2}} = \frac{10.10 \angle 90.91^\circ / \sqrt{3}}{0.0655 + j0.288} = 19.18 + j4.679 = 19.725 \angle 13.72^\circ A \quad 5.45$$

Por lo tanto, se procede a determinar el valor de las potencias de entrada y de las pérdidas de cada secuencia

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot |U_1| \cdot |I_1| \cos \varphi_I^V = \sqrt{3} (462.33)(102.91) \cos 20.67 = 77103.01 W \quad 5.46$$

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot |U_2| \cdot |I_2| \cos \varphi_I^V = \sqrt{3} (10.10)(19.725) \cos 77.19 = 76.51 W \quad 5.47$$

Calculando el valor de la fuerza electromotriz para obtener las pérdidas en el hierro.

$$\varepsilon_1 = U_1 - Z_s \cdot I_1 = 462.33 - (0.0454 + j0.1408)(96.286 - j36.32) \quad 5.48$$

$$\varepsilon_1 = 452.84 - j11.91 = 453 \angle -1.51^\circ V$$

$$\varepsilon_2 = U_2 - Z_s \cdot I_2 = 10.10 - (0.0454 + j0.1408)(19.18 + j4.68) \quad 5.49$$

$$\varepsilon_2 = 9.88 - j2.912 = 10.31 \angle -16.41^\circ V$$

Ahora, conocido el valor de la fuerza electromotriz, se puede calcular las pérdidas.

$$P_{fe1} = \frac{3 \cdot \varepsilon_1^2}{R_c} = \frac{3 \cdot \left(\frac{453}{\sqrt{3}}\right)^2}{95.424} = 2150.5 W \quad 5.50$$

$$P_{fe2} = \frac{3 \cdot \varepsilon_2^2}{R_c} = \frac{3 \cdot \left(\frac{10.31}{\sqrt{3}}\right)^2}{95.424} = 1.113 W \quad 5.51$$

A partir de lo anterior se procede a calcular el valor de las pérdidas Joule tanto en el estator como en el rotor para desarrollar las pérdidas en el entrehierro:

$$P_{js1} = 3 \cdot R_s \cdot I_1^2 = 3(0.0454)(102.91)^2 = 1443.95 W \quad 5.52$$

$$P_{ag1} = P_1 - P_{js1} - P_{fe1} = 77103.01 - 1443.95 - 2150.5 = 73508.62 W \quad 5.53$$

$$P_{jr1} = s \cdot P_{ag1} = 816.76 W \quad 5.54$$

$$P_{js2} = 3 \cdot R_s \cdot I_2^2 = 3(0.0454)(19.725)^2 = 53.0486 \text{ W} \quad 5.55$$

$$P_{ag2} = P_2 - P_{js2} - P_{fe2} = 76.51 - 53.0486 - 1.113 = 22.35 \text{ W} \quad 5.56$$

$$P_{jr2} = (2 - s) \cdot P_{ag2} = 44.45 \text{ W} \quad 5.57$$

Ahora es posible calcular las pérdidas totales de cada secuencia:

$$P_{tot1} = P_{js1} + P_{jr1} + P_{fe1} = 1443.95 \text{ W} + 816.76 \text{ W} + 2150.5 \text{ W} \quad 5.58$$

$$P_{tot1} = 4,411.14 \text{ W} = 4.411 \text{ kW}$$

$$P_{tot2} = P_{js2} + P_{jr2} + P_{fe2} = 53.0486 \text{ W} + 44.45 \text{ W} + 1.113 \text{ W} \quad 5.59$$

$$P_{tot2} = 98.61 \text{ W} = 0.0986 \text{ kW}$$

Mientras que el rendimiento del motor, cuando trabaja con un VUF del 2.18% se calcula de la siguiente manera.

Primero se define P_{out} y luego se divide entre la suma de las potencias de entrada (P_1 y P_2) para conocer la eficiencia:

$$P_{out} = P_{Sec+} - P_{Sec-} - P_{rot} \quad 5.60$$

$$P_{Sec+} = P_1 - P_{tot1} = 77103.01 - 4,411.14 = 72,691.87 \text{ W} = 72.692 \text{ kW} \quad 5.61$$

$$P_{Sec-} = P_2 - P_{tot2} = 76.51 + 98.61 = 175.12 \text{ W} = 0.175 \text{ kW} \quad 5.62$$

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 = \frac{P_{Sec+} - P_{Sec-} - P_{rot}}{P_1 + P_2} \cdot 100 = \frac{72.692 \text{ kW} - 0.175 \text{ kW} - 0.904 \text{ kW}}{77.103 \text{ kW} + 0.076 \text{ kW}} \quad 5.63$$

$$\eta = 92.79 \%$$

Cuando existe desbalance en la red, la eficiencia del motor cae debido a la existencia de secuencia negativa. La potencia de salida del motor a la carga con desbalance, el motor toma más potencia de la fuente, la toma por el incremento de pérdidas y por incremento de potencia de secuencia negativa, lo que produce en consecuencia la disminución del rendimiento.

El cálculo de la eficiencia del mismo motor en condiciones balanceadas será:

$$P_{Sec+} = 72.692 \text{ kW}$$

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 = \frac{P_{Sec+} - P_{rot}}{P_1} \cdot 100 = \frac{72.692 \text{ kW} - 0.904 \text{ kW}}{77.103 \text{ kW}} \quad 5.64$$

$$\eta = 93.1 \%$$

ANÁLISIS DE CARGO POR ENERGÍA:

Análisis del sistema con un desbalance de 2.18%:

En condiciones de desbalance, la potencia de entrada al motor se define como:

$$P_{ENTRADA} = 77.103 \text{ kW} + 0.076 \text{ kW} = 77.179 \text{ kW}$$

El motor trabaja 24 horas al día, por lo tanto, los kWh respectivos son:

$$KWh_{PUNTA} = 77.179 (6 \text{ horas}) = 463.08 \text{ kWh}$$

$$KWh_{VALLE} = 77.179 (6 \text{ horas}) = 463.08 \text{ kWh}$$

$$KWh_{RESTO} = 77.179 (12 \text{ horas}) = 926.15 \text{ kWh}$$

Entonces, el costo de operación del motor en condición desbalanceada es:

$$\$_{PUNTA} = 463.08 \text{ kWh} (0.170219 \$/\text{kWh}) = \$78.83$$

$$\$_{VALLE} = 463.08 \text{ kWh} (0.157490 \$/\text{kWh}) = \$72.93$$

$$\$_{RESTO} = 926.15 \text{ kWh} (0.140144 \$/\text{kWh}) = \$129.79$$

(se han utilizado los pliegos tarifarios correspondientes a baja tensión, demanda >50 kW vigentes a partir del 15 de octubre de 2021)

Costo de operación diario:

$$\$ = \$78.83 + \$72.93 + \$129.79 = \$281.55$$

Costo anual de operación del motor para un valor de VUF=2.18%:

$$\$ = \$281.55(365 \text{ días}) = \$102,765.75$$

Análisis del sistema balanceado

Ahora, se procede a calcular el costo anual de operación para un sistema balanceado. Para este caso, la potencia de entrada es:

$$P_{ENTRADA} = 77.103 \text{ kW}$$

De igual manera, el motor trabaja 24 horas al día, por lo tanto, los kWh respectivos son:

$$KWh_{PUNTA} = 77.103 (6 \text{ horas}) = 462.62 \text{ kWh}$$

$$KWh_{VALLE} = 77.103 (6 \text{ horas}) = 462.62 \text{ kWh}$$

$$KWh_{RESTO} = 77.103 (12 \text{ horas}) = 925.24 \text{ kWh}$$

El costo de operación del motor en condición balanceada es:

$$\$_{PUNTA} = 462.62 \text{ kWh} (0.170219 \$/\text{kWh}) = \$78.75$$

$$\$_{VALLE} = 462.62 \text{ kWh} (0.157490 \$/\text{kWh}) = \$72.86$$

$$\$_{RESTO} = 925.24 \text{ kWh} (0.140144 \$/\text{kWh}) = \$129.67$$

Costo de operación diario:

$$\$ = \$78.75 + \$72.86 + \$129.67 = \$281.28$$

Costo anual de operación del motor para un valor de VUF=0%:

$$\$ = \$281.28(365 \text{ días}) = \$102,667.2$$

En comparación, se puede observar que los costos anuales de operación del motor para ambos escenarios son:

| Sistema Balanceado | Sistema Desbalanceado |
|--------------------|-----------------------|
| \$102,667.2 | \$102,765.75 |

Tabla 5. 3. Comparación de costos anuales

Debido a la presencia de secuencia negativa se genera un aumento en los costos operación anuales de \$98.55

Informe de Auditoría:

En la comparativa de los dos métodos utilizados para la presente auditoría se obtuvieron:

- Eficiencia del 75 % para el motor en presencia de un desbalance de tensión del 4.35 %, con el método gráfico.
- Eficiencia del 92.79 % para el motor en presencia de un desbalance de tensión del 2.18%, con el método analítico.
- Porcentaje de aumento de temperatura del motor del 39%, debido a la presencia de desbalance de tensiones.
- Bajo las condiciones presentadas en la presente auditoría, el motor podría llegar hasta los 110 °C por encima de la temperatura ambiente. Esto provocaría daños irreparables en el aislamiento del equipo y una drástica reducción de su vida útil.
- Necesidad de redimensionamiento del motor cercano al 125% de su capacidad para suplir los 100 HP de la bomba.
- La diferencia por el cargo de energía entre el sistema balanceado y desbalanceado es de \$98.55 anualmente.
- En motores Premium, la eficiencia del motor no se ve afectada notablemente para un desbalance cercano al 2%.

Recomendaciones prácticas para mejorar el rendimiento del sistema:

- Verificar si es posible reducir la carga del sistema y su tiempo de operación, esto causaría una reducción en sus costos y también tiene cierto efecto en su eficiencia.
- Se recomienda reorganizar las cargas conectadas al sistema de distribución de la energía, de manera que el sistema esté más equilibrado. Esto no solo causará un efecto de mayor eficiencia en el equipo motor-bomba analizado, sino también en la eficiencia de todos los equipos conectados a la red eléctrica.
- Se recomienda considerar cambiar el motor por uno de una capacidad ligeramente mayor. En las condiciones actuales, es cuestión de tiempo para que el motor comience a presentar fallas debido al sobrecalentamiento sufrido por ya un largo periodo de tiempo.
- Para los sistemas de bombeo, el uso de controladores de velocidad o de frecuencia vienen a mejorar el funcionamiento del sistema, ya que estos regulan la velocidad de motores eléctricos para que la electricidad que llega al motor se ajuste a la demanda real de la aplicación, mejorando el ahorro de energía, actuando de manera rápida en presencia de desbalances y cambios en la potencia de salida [6].

Bibliografía

[1] ISO, International Organization for Standardization 50002:2014: Energy audits — Requirements with guidance for use.

[2] https://ecatalog.motorboss.com/catalog/motors/commercial-pumps/tefc-nema-tc-mounting/dp24?fbclid=IwAR0goscK9msTPXSmUfu13VZ2ZCxlOpZrV9CgO0bOnT2F_hhns6F8Mqs0ohw

[3] <http://apps.motorboss.com/submittals/NamePlate.asp?QueryType=2&ModelNumber=DP24&CatalogNumber=H100P2EC&OrderNumber=21761&LineNumber=&OrderType=MN&SourceTable=F3295&EffectivityDate=>

[4] <http://apps.motorboss.com/submittals/PerformanceData.asp?QueryType=2&ModelNumber=DP24&CatalogNumber=H100P2EC&OrderNumber=21761&LineNumber=&OrderType=MN&MotorType=CTE&FrameSize=405TC&SourceTable=F3295>

[5] Ismael Morera Alonso, Ingeniero Industrial, Identificación de Parámetros de Modelos de Motores de Inducción a Partir de Datos de Catálogo, 2010

[6] ABB (2021): *Qué es un variador de frecuencia: Definición, cómo funciona, características y ventajas*. Disponible en: <https://new.abb.com/drives/es/que-es-un-variador>

CONCLUSIONES

Finalizando con la investigación y el estudio desarrollado en el presente texto se concluye que:

- Normas internacionales han definido un límite de desbalance de tensiones para sistemas trifásicos cercano al 1 o 2%, siendo la más aceptada a nivel mundial la norma NEMA MG- 1 de motores eléctricos y generadores, que recomienda limitar el desequilibrio a un máximo de 1%. Por otro lado, el documento “Normas de Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución” de la SIGET -que es el documento que regula el servicio de distribución de la energía en el país-, no define en ningún momento un límite en el desbalance de las tensiones para un sistema trifásico; es decir, no hay ninguna ley que obligue a distribuidor ni a cliente a tomar acciones para corregir el desbalance de tensión. Esto es, además, altamente peligroso debido a que, si no hay ley que regule este aspecto, se vuelve más difícil establecer responsabilidades en caso de daños o fallas por un desbalance de tensión considerable.
- Con los datos arrojados en la auditoría, se observa que un desbalance del 2.18% no tiene un impacto considerable en la eficiencia del motor, ya que este se ve disminuido en menos del 1% debido a dicho desbalance. Esto es cierto para motores Premium, con lo cual contrasta a la norma NEMA MG-1 que sugiere que los motores no excedan el 1% de desbalance.
- Tanto de la teoría recopilada como del análisis hecho, se tiene que, cuando existe desbalance en la red, la eficiencia del motor cae debido a la existencia de secuencia negativa. La secuencia negativa no aporta nada a la potencia en el eje y es toda “potencia perdida” en el entrehierro y en el cobre, de hecho, se puede decir que “se opone” a la potencia en el eje; lo que produce en consecuencia la disminución del rendimiento.
- Un desbalance de tensiones en la energía suministrada al sistema motor-bomba genera un problema importante de sobrecalentamiento. Los datos obtenidos en el ejemplo desarrollado en el Capítulo V muestran que un desbalance cercano al 4.35 % provoca un calentamiento de 39 % por encima de la temperatura máxima de operación del motor, esto se traduce en unos 100 – 110 °C por encima de la temperatura ambiente en el punto más caliente del motor. Esto es causa de daños irreparables en el aislamiento del motor y, por ende, desemboca en la reducción de la vida útil de este; un motor el cual su vida útil es de 15 a 20 años, operando en estas condiciones, reduce su tiempo de utilidad fácilmente a menos de la mitad.
- De la auditoría energética presentada en el Capítulo V, también se observó que el desbalance de 2.18 % para un motor de 100 HP, supone un gasto anual de \$102,765.75 excediendo en \$98.55 al gasto anual en operación sin desbalance. Además del costo anual de operación diario se debe agregar que los costos aumentan por el descenso en la producción y el desgaste ocasionado por operar el equipo en condición de desbalance.
- Se utilizaron dos métodos para analizar cómo el desbalance de tensiones afecta el motor. El método gráfico arrojó un rendimiento del 71 % correspondiente a un desbalance de 4.35%, mientras que el método analítico arrojó un rendimiento del 92.79 % para un

desbalance de 2.18%. El método analítico utilizado es preferible sobre el método gráfico, esto debido a que el método analítico toma en cuenta las características y las pruebas dadas para cada motor en específico. El método gráfico es un acercamiento muy útil para tener una visión general de la situación que puede causar el desbalance de tensiones en el sistema.

RECOMENDACIONES

- Verificar si es posible reducir la carga del sistema y su tiempo de operación, esto causaría una reducción en sus costos y también tiene cierto efecto en su eficiencia.
- Se recomienda reorganizar las cargas conectadas al sistema de distribución de la energía, de manera que el sistema esté más equilibrado. Esto no solo causará un efecto de mayor eficiencia en el equipo motor-bomba analizado, sino también en la eficiencia de todos los equipos conectados a la red eléctrica.
- Se recomienda considerar cambiar el motor por uno de una capacidad ligeramente mayor. En las condiciones actuales, es cuestión de tiempo para que el motor comience a presentar fallas debido al sobrecalentamiento sufrido por ya un largo periodo de tiempo.
- Para los sistemas de bombeo, el uso de controladores de velocidad o de frecuencia vienen a mejorar el funcionamiento del sistema, ya que estos regulan la velocidad de motores eléctricos para que la electricidad que llega al motor se ajuste a la demanda real de la aplicación, mejorando el ahorro de energía, actuando de manera rápida en presencia de desbalances y cambios en la potencia de salida.
- Cambiar las celdas de bancos de condensadores viejos que posiblemente fallaron; ya que estos reactivos son causantes de desbalance.

GLOSARIO TÉCNICO

Bomba centrífuga. Transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio en la energía cinética y potencial que se necesiten.

Carga dinámica total (H): Es la suma algebraica de las cargas totales de succión y se determina con la siguiente ecuación.

Calidad de la Energía. Una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente eléctricas, en un tiempo dado y en una ubicación dada en el sistema de potencia.

Campos electromagnéticos. Es un campo físico, de tipo tensorial, producido por aquellos elementos cargados eléctricamente, que afecta a partículas con carga.

Cavitación. Se produce cuando la presión del fluido disminuye, reduciéndose a su presión de vapor, normalmente se origina a la entrada de las bombas.

Componentes simétricas. Se utiliza para simplificar el análisis de los sistemas de energía trifásicos desequilibrados, pues permite escribir de forma general un sistema polifásico desbalanceado (con n fases) como la suma de n sistemas equilibrados aplicando el principio de superposición.

Deslizamiento. Es la diferencia relativa entre la velocidad del campo magnético (velocidad de sincronismo) y la velocidad del rotor.

Eficiencia. Es la relación entre la potencia mecánica de salida y la potencia eléctrica de entrada.

Eficiencia de la bomba (η_b): Es la razón de la potencia hidráulica en la descarga de la bomba (P_s) entre la potencia mecánica suministrada a la flecha de la bomba (P_{eb}).

Eficiencia garantizada: Es el valor establecido por el fabricante del motor para su debida clasificación.

Eficiencia calculada: Es el valor de diseño de ingeniería.

Eficiencia mínima: La eficiencia mínima es una eficiencia estadística basada en la curva de distribución de frecuencia normal de los resultados de las pruebas de eficiencia del motor.

Eficiencia nominal: La eficiencia nominal es un número asignado a un rango de eficiencias en el que cae la eficiencia de un motor en particular.

Entrehierro. Al espacio de aire existente entre el estator y el rotor se le denomina entrehierro.

Energía eléctrica. Es la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos cuando se ponen en contacto por medio de un conductor eléctrico.

Estator. Es una parte fija de una máquina rotativa (motor).

Factor de derating o redimensionamiento. El fenómeno de pérdidas de potencia debido a factores característicos del entorno donde se instala sistema, tales como la temperatura y altitud.

Factor de potencia. Es la relación entre la Potencia Activa (P), medida en Watts (W) y la Potencia Aparente (S), medida en Voltamperios (VA) y su cociente arroja como resultado un número que representa la capacidad de una carga de utilizar la potencia activa.

Flujo volumétrico o caudal (Q): Es el volumen de líquido que maneja una bomba por unidad de tiempo en las condiciones de operación.

Frecuencia. Es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.

IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Electrónicos y Electricistas).

Impedancia. Resistencia aparente de un circuito dotado de capacidad y autoinducción al flujo de una corriente eléctrica alterna.

Interrupciones en el sistema eléctrico. Se define como una pérdida absoluta de la tensión durante cierto tiempo.

Leyes de semejanza. Sirven para conocer cómo funcionan las bombas en otras condiciones.

LVUR. Porcentaje de desbalance de voltaje de línea, con sus siglas en inglés "Line voltage unbalance rate (LVUR)".

NEC. Código eléctrico nacional.

NPSH. Este parámetro indica la incapacidad de la bomba de crear el vacío absoluto, o sea la incapacidad de todas las bombas centrífugas de aspirar a una altura igual o superior a 10,33 m (que corresponde generalmente al valor de la presión atmosférica al nivel del mar).

Norma NEMA. (National Electrical Manufacturers Association) es el responsable de los estándares industriales comunes usados en el campo de la electricidad. Entre otros, la NEMA ha establecido una amplia gama de estándares para encapsulados de equipos eléctricos.

Motor de inducción. Es una máquina que consta de dos partes principales: el rotor y el estator; en la que, al aplicar un conjunto trifásico de voltajes al estator, fluye de él un conjunto trifásico de corrientes.

Par de arranque. El par de arranque o a rotor bloqueado es el torque que el motor desarrolla cuando deja de estar parado.

Par Máximo. Es el máximo torque que desarrolla el motor, es usualmente expresado como un porcentaje del torque a plena carga.

Potencia Hidráulica (P): Es la potencia cedida por la bomba al fluido expresada habitualmente en C.V. (caballos de vapor).

Secuencia positiva negativa y cero. Físicamente, en un sistema trifásico, un conjunto de corrientes positivas producen un campo rotatorio normal, un conjunto de corrientes negativas producen un campo con rotación opuesta y la secuencia cero produce un campo que oscila pero no gira.

Variaciones de Tensión. Una variación es una perturbación estacionaria o cuasi-estacionaria la cual requiere una medición continua.

VUF. Factor de desbalance de tensión - Voltage Unbalance Factor.

ANEXOS

Anexos A3

CÓDIGO DE MATLAB PARA EJEMPLO

```
format long
Vmlf = 440/sqrt(3);
p = 4 ;
f = 60;
rs = 1.5;
rrp = 1.2;
xl = 6;
s = 0:0.001:1;
ns = 120*f/p;
nr = ns.*(1-s);
Im = Vmlf./sqrt((rs + rrp./s).^2 + xl^2);
Pcg = Im.^2.*(rrp./s);
Te = 3*9.55.*Pcg./ns;
%grafico
figure;
grid on;
hold on;
xlabel ('n_{rev/min}');
ylabel ('Te_{N.m}');
TvsNs = plot(nr,Te, 'r');
TvsNs.LineWidth = 2;
text (0,9.3*491,'\leftarrow T_{arr}');
text (1753,6.58*3,'\rightarrow T_{nom}');
text (1450,22.3*3,'\leftarrow T_{MAX}');
figure
grid on;
```

```
hold on;
xlabel ('n_{RPM}');
ylabel ('I_{m_{A}}');
ImvsNS = plot(nr,Im, 'b--');
ImvsNS.LineWidth = 2;
text (1753,5.289,'\leftarrow I_{op}');
text (0,38.61,'\leftarrow I_{arr}');
format short
```

Anexos A5

NAMEPLATE DATA

| | | | | | | | |
|--|-------------------|----------------------------|-------------------|--------------------------|------------|----------------|------|
| MODEL | DP24 | FR | H100P2EC | NAMEPLATE PART #: | 422087-007 | ENCL | TE |
| CATALOG NUMBER: | SHAFTE END BRG | | 8316-J/C3 - QTY 1 | TYPE | CTE | OPP END BRG | |
| PH | 3 | MAX AMB Asm. Pos. | 40 C | ID# | CONT | | |
| INSUL CLASS | F | | F1 | DUTY | CONT | | |
| HP | 100 | RPM | 1780 | HP | 100 | RPM | 1475 |
| VOLTS | 460 | 230 | | VOLTS | 380 | 180 | |
| FL AMPS | 113.0 | 225.0 | | FL AMPS | 137.0 | 274.0 | |
| SF AMPS | 128.0 | 259.0 | | SF AMPS | | | |
| SF | 1.15 | DESIGN | E | SF | 1.00 | DESIGN | # |
| NEMA NOM EFFICIENCY | 95.4 | NOM PF | 87.1 | NEMA NOM EFFICIENCY | 94.1 | NOM PF | 87.8 |
| GUARANTEED EFFICIENCY | 94.5 | MAX KVAR | 22.6 | GUARANTEED EFFICIENCY | 93.0 | MAX KVAR | 18.4 |
| HAZARDOUS LOCATION DATA (IF APPLICABLE): | | CLASS I | | CLASS I | | GROUP I | |
| DIVISION | | CLASS II | | CLASS II | | GROUP II | |
| TEMP CODE | | | | | | | |



| MODEL NO. | CATALOG NO. | PHASE | TYPE | FRAME |
|-------------------------------|-------------|--------|----------|--------|
| DP24 | H100P2EC | 3 | CTE | 405TC |
| ORDER NO. | 21761 | | LINE NO. | |
| MPI: | 128527 | 128528 | 128529 | 128530 |
| HP: | 100 | 100 | 100 | 100 |
| POLES: | 4 | 4 | 4 | 4 |
| VOLTS: | 480 | 230 | 380 | 190 |
| HZ: | 60 | 60 | 50 | 50 |
| SERVICE FACTOR: | 1.15 | 1.15 | 1 | 1 |
| EFFICIENCY (%): | | | | |
| S.F. | 95 | 95 | | |
| FULL | 95.4 | 95.4 | 94.3 | 94.3 |
| 3/4 | 95.6 | 95.6 | 95.3 | 95.3 |
| 1/2 | 95.1 | 95.1 | 95.5 | 95.5 |
| 1/4 | 92.2 | 92.2 | 93.8 | 93.8 |
| POWER FACTOR (%): | | | | |
| S.F. | 87.6 | 87.6 | | |
| FULL | 87.1 | 87.1 | 87.8 | 87.8 |
| 3/4 | 84.8 | 84.8 | 86.8 | 86.8 |
| 1/2 | 78.2 | 78.2 | 82.3 | 82.3 |
| 1/4 | 58.9 | 58.9 | 65.5 | 65.5 |
| NO LOAD | 4.9 | 4.9 | 4.4 | 4.4 |
| LOCKED ROTOR | 27.5 | 27.5 | 29 | 29 |
| AMPS: | | | | |
| S.F. | 129 | 259 | | |
| FULL | 113 | 225 | 137 | 274 |
| 3/4 | 87 | 173 | 103 | 205 |
| 1/2 | 63 | 126 | 72 | 144 |
| 1/4 | 43 | 86 | 46 | 92 |
| NO LOAD | 33.4 | 66.9 | 32.8 | 65.6 |
| LOCKED ROTOR | 716.9 | 1433.8 | 687 | 1375.1 |
| NEMA CODE LETTER | G | G | E | E |
| NEMA DESIGN LETTER | B | B | # | # |
| FULL LOAD RPM | 1780 | 1780 | 1475 | 1475 |
| NEMA NOMINAL / EFFICIENCY (%) | 95.4 | 95.4 | 94.3 | 94.3 |
| GUARANTEED EFFICIENCY (%) | 94.5 | 94.5 | 93 | 93 |
| MAX KVAR | 22.6 | 22.7 | 18.4 | 18.4 |
| AMBIENT (°C) | 40 | 40 | 40 | 40 |
| ALTITUDE (FASL) | 3300 | 3300 | 3300 | 3300 |
| SAFE STALL TIME-HOT (SEC) | 30 | 30 | 30 | 30 |
| SOUND PRESSURE (DBA @ 1M) | 71 | 71 | 67 | 67 |
| TORQUES: | | | | |
| BREAKDOWN(% F.L.) | 241 | 241 | 192 | 192 |
| LOCKED ROTOR(% F.L.) | 165 | 165 | 132 | 132 |
| FULL LOAD(LB-FT) | 294.7 | 294.7 | 355.9 | 355.9 |