



**Universidad
Continental**

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica

Tesis

**La aplicación de condensadores en el control
de pérdidas de motores trifásicos en la
Sociedad Minera Austria Duvaz SAC**

José Antonio Pomahuali Mangualaya

Huancayo, 2018

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electricista



Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/peru/)

ASESOR:

Ing. Pedro Gurmendi Párraga

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente al Superintendente de Mantenimiento Mina de la Unidad Económica Activa de la empresa Sociedad Minera Austria Duvaz SAC por brindar acceso y facilidad para la obtención de datos de los respectivos motores así como la evaluación de los mismos.

Asimismo agradezco a mi Asesor por guiarme en la elaboración de esta investigación y a mi alma máter por los conocimientos brindados.

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mi esposa
por su apoyo incondicional.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	xii
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	1
1.1. Planteamiento y formulación del problema	1
1.1.1. Planteamiento del problema	1
1.1.2. Formulación del problema.....	3
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Justificación e importancia	4
1.4. Hipótesis y descripción de las variables.....	4
1.4.1. Hipótesis general	4
1.4.2. Hipótesis específicas	5
1.4.3. Variables	5
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes del problema.....	7
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	7

2.1.2.	Antecedentes nacionales	11
2.2.	Bases teóricas.....	14
2.2.1.	Uso de Condensadores	14
2.2.2.	Factor potencia	17
2.2.3.	Efectos de la Aplicación de Condensadores.....	18
2.2.4.	Corrección del factor de potencia	20
2.2.5.	Motores de inducción trifásico.....	23
2.2.6.	Aplicación de condensadores en el control de pérdidas de potencia.....	38
CAPÍTULO III METODOLOGÍA		43
3.1.	Método, y alcance de la investigación.....	43
3.1.1.	Método de la investigación.....	43
3.1.2.	Alcance de la investigación	43
3.2.	Diseño de la investigación.....	43
3.3.	Población y muestra.....	44
3.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	44
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN		45
4.1.	Resultados del tratamiento y análisis de la información.....	45
4.2.	Análisis estadístico de los resultados.....	60
4.3.	Prueba de Hipótesis	65
4.4.	Discusión de resultados	65
CONCLUSIONES		68
RECOMENDACIONES.....		69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		70
ANEXOS.....		73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1.1 variable independiente y dependiente.....	6
Tabla N° 2.1 Valores de reactancia del estator y rotor.....	38
Tabla N°4.1 Características de los motores.....	46
Tabla 4.2 Factor de potencia inicial.....	47
Tabla 1.3 Cálculo de la Potencia Reactiva inicial Promedio (Q1).....	48
Tabla 4.4 Calculo de Potencia reactiva promedio de compensación.....	49
Tabla 4.5 Factor de potencia después de la compensación reactiva.....	50
Tabla N° 4.6 Valores de resistencias de los motores.....	55
Tabla N° 4.7 Análisis de corriente.....	56
Tabla N° 4.8 Pérdidas de potencia activa de los motores.....	57
Tabla N° 4.9 Reducción de pérdidas de energía reactiva.....	58
Tabla N° 4.10 Reducción de pérdidas de energía reactiva.....	59
Tabla N° 4.11 Pérdidas de potencia en kW.....	61
Tabla N° 4.12 Estadísticos Descriptivos.....	61
Tabla N° 4.13 Medias de los valores de pérdidas de potencia.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1. Condensador de placas paralelas.....	15
Figura N° 2.2 Triángulo para corrección de factor de potencia.....	21
Figura N° 2.3 Circuito equivalente del motor de inducción.....	24
Figura N° 2.4 Circuito equivalente del rotor.....	25
Figura N° 2.5 Circuito del rotor.....	26
Figura N° 2.6 Circuito equivalente de la máquina de inducción.....	26
Figura N° 2.7 Diagrama de flujo de potencia del motor.....	28
Figura N° 2.8 a) prueba del motor y b) Circuito equivalente.....	30
Figura N° 2.9 Prueba DC para determinar la resistencia del estator.....	34
Figura N° 2.10 Prueba de rotor bloqueado.....	36
Figura N° 2.11 Porcentaje de reducción de corriente.....	40
Figura N° 2.12 Pérdidas óhmicas en un conductor eléctrico x metros.....	41
Figura N° 2.13 Porcentaje de reducción de pérdidas en un conductor.....	42
Figura N°3.1. Ficha de observación.....	44
Figura N°4.1. EasyLogic- DM600.....	47
Figura N°4.2. Corrección factor de potencia mediante condensadores...	48
Figura N°4.3. EasyLogic- DM600.....	50
Figura N°4.4. Diagrama unifilar.....	51
Figura N°4.5. Diagrama de cargas.....	52
Figura N°4.6. Prueba de corriente continua.....	54
Figura N°4.7. Prueba de rotor bloqueado.....	54
Figura N°4.8. Reducción de consumo de energía reactiva (S/ y KVAR)..	58
Figura N°4.9 Gráfico de dispersión Pérdidas Antes de Aplicar Compensación Reactiva.....	62

Figura N°4.10 Gráfico de dispersión Pérdidas Después de Aplicar compensación Reactiva.....	63
Figura N°4.11 Gráfico de medias.....	63
Figura N°4.12 Gráficos de Barras.....	64
Figura N°4.13 Gráficos de cajas o bigotes.....	64

RESUMEN

En la presente investigación se determinó el efecto de la aplicación de condensadores en el control de pérdidas de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC, evaluando diversos aspectos relacionados al estator y rotor. Para el desarrollo de esta investigación resultó necesario desarrollar un diseño experimental, pues se observó las pérdidas generadas sin (evaluación previa) y con (evaluación posterior) la implementación de los condensadores a un total de 38 motores trifásicos dentro de la Unidad Económica Activa Morococha. Los resultados señalan que se encontró que los motores no venían trabajando eficientemente, pues su factor de potencia se encontró $FP = \cos\phi = 0,75$ promedio, un valor muy por debajo del nivel de eficiencia para un funcionamiento adecuado. La aplicación de condensadores fue diseñado para alcanzar un factor de potencia igual a 0,95, es así que se logró reducir las pérdidas de potencia activa de 961.86 kW a 605.71 kW. Asimismo se redujo la corriente en 21%; mientras que la variación de las pérdidas se situó en un 37.7% por debajo de lo inicial, después de la corrección de pérdidas con condensadores. Se concluye que el uso de condensadores reduce significativamente las pérdidas de motores trifásicos ahorrando un total de 147,249 KVAR - mes y más de S/ 7.0 mil mensuales en la facturación.

Palabras clave: condensadores, motor trifásico, energía, factor de potencia.

ABSTRACT

In the present investigation the effect of the application of capacitors in the loss control of three-phase motors was determined in the Austrian Duvaz SAC Mining Society, evaluating various aspects related to the stator and rotor. For the development of this research it was necessary to develop an experimental design, since it was observed the losses generated without (previous evaluation) and with (subsequent evaluation) the implementation of the capacitors to a total of 38 three-phase motors within the Morococha Active Economic Unit. The results indicate that it was found that the motors did not come working efficiently, since their power factor was found at $FP = \cos\phi = 0.75$ average, a value well below the efficiency level for proper operation. The application of capacitors was designed to achieve a power factor equal to 0.95, so it was possible to reduce the losses of active power from 961.86 kW to 605.71 kW. Also the current was reduced by 21%; while the variation of losses was 37.7% below the initial, after the correction of losses with capacitors. It is concluded that the use of capacitors significantly reduces the losses of three phase motors, saving a total of 147,249 KVAR - month and more than S / 7.0 thousand monthly in billing.

Keywords: capacitors, three-phase motor, power, power factor.

INTRODUCCIÓN

Hablar de una adecuada forma de mantener las máquinas en buen estado y una adecuada potencia de trabajo, implica saber en qué condiciones externas e internas se encuentran, en la parte interna los circuitos, los dispositivos o elementos que se puedan implantar son en muchos casos de utilidad pero la parte que tiene que realizar dicho trabajo es la externa, esta parte del trabajo llega a realizar la empresa o como es este el caso la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC, quien a través del uso de los condensadores, trataron de minimizar algunos problemas en tema de factor de potencia, para la mejora del mismo y la corrección de dichas falencias, dado que en cualquier ambiente electrónico se hace de manera adecuada la aplicación de tales dispositivos se pueden alcanzar todos los objetivos, en tal sentido la realización del trabajo de investigación se compone de las siguientes partes:

Capítulo I: Trata sobre el planteamiento del problema, la formulación del problema general y específico, los objetivos, la justificación, hipótesis y la definición de variables, terminando con la operacionalización de variables.

Capítulo II: Se realizaron los antecedentes tanto internacionales y nacionales, por la envergadura del tema, también se redactó las bases teóricas dando mucha relevancia a las variables de estudio para una mejor comprensión del tema.

Capítulo III: Se explica la metodología utilizada para la realización del trabajo de investigación, dejando entender el método, alcance, diseño de investigación, la población y muestra. Finaliza con las técnicas e instrumentos que se utilizaron para la buena recolección y procesamiento de la información.

Capítulo IV: Se detalla los resultados obtenidos de la investigación respecto al efecto de la aplicación de los condensadores para controlar las pérdidas generadas por los motores trifásicos.

Finalmente se concluye que los condensadores tienen un gran efecto en el control de las pérdidas generadas por los motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.

EL AUTOR.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Planteamiento del problema

Un capacitor es un componente que tiene como finalidad almacenar pequeñas cantidades de energía para expulsarlas paulatinamente cuando se le requiera, sus usos son múltiples y se derivan en tipos por su composición: mica, papel, aluminio, etc., sirve mucho al momento de regular el factor de potencia en los aparatos electrónicos, se fabrican en diversas capacidades y cumplen tareas específicas, con una adecuada implementación y exacta administración se puede lograr dar mejor potencia a las maquinarias alargando su vida útil sin generar gastos adicionales. [1].

A medida que la capacidad de las maquinarias se va incrementando es necesario incrementar la potencia, por ello la aplicación de condensadores son una fuente inagotable de opciones para la mejora de ahorro en energía y costos involucrados en el desgaste de la máquina y por qué no en la elevada facturación del uso eléctrico.

El ahorro energético dentro del sector industrial y minero implica ser un tema importante para las empresas, no solo debido a que se requiere una operatividad de calidad y pertinente de las instalaciones y los equipos, sino también porque permite minimizar los costos de operación aumentando de esta manera las utilidades de las empresas. Asimismo, se ha encontrado que cerca del 50% de la energía eléctrica consumida a nivel mundial se realiza mediante motores de inducción trifásicos, toda vez que representa la

principal fuerza motriz en las industrias, principalmente la minera. Frente a ello, el sector minero del Perú no es ajeno a lo mencionado por lo que usan motores de inducción trifásica en labores de extracción de minerales. Para el desarrollo de esta investigación se ha encontrado que la Sociedad Minera Austria Duvaz (ubicada en el distrito minero de Morococha, La Oroya) emplea métodos de explotación mecánica para la producción de minerales (cobre, plomo, zinc y plata), haciendo uso de motores trifásicos para el funcionamiento de los diversos equipos [2].

En vista de la importancia de los motores de inducción trifásica, actualmente se están fabricando motores de mayor eficiencia, y por otra parte, la adaptación de las normas dispuestas por organismos de regulación energética, tales como el Instituto de Ingenieros Electrónicos y Electricistas (IEEE, por sus siglas en inglés), y la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA, por sus siglas en inglés), quienes sugieren prácticas adecuadas a tomar en cuenta para ajustar los valores de los factores (alimentadores del motor, factor de potencia, eficiencias, y tensión de utilización) y alcanzar resultados esperados en el sistema de potencia permitiendo una reducción del consumo de energía eléctrica.

Pese a que actualmente se cuenta con tecnologías aptas para optimizar el trabajo mecánico de los motores, implementarlas implica un elevado costo de inversión, prefiriéndose mantener los motores existentes. Éste viene a ser el caso de la Sociedad Minera Austria Duvaz, la cual cuenta con motores trifásicos que generan pérdidas y estos a su vez implican que la empresa facture S/ 15 mil soles mensualmente, aproximadamente, siendo un alto costo que efectúa la empresa minera. Entre otros métodos, se ha visto por conveniente aplicar los bancos de condensadores, los cuales colaboran en dar potencia al motor, cuyo valor es crítico porque determina la cantidad de potencia que se puede transformar en trabajo mecánico [3]. En base a lo establecido se formula el siguiente problema: ¿Cuál es el efecto de la aplicación de condensadores en el control de pérdidas de motores trifásicos de la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC?

1.1.2. Formulación del problema

A. Problema general

¿Cuál es el efecto de la aplicación de condensadores en el control pérdidas de potencia activa de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC?

B. Problemas específicos

- ¿Cuál es el uso de los condensadores en el control de pérdidas en el estator de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC?
- ¿Cuál es el efecto del uso de los condensadores en el control de pérdidas en vacío de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC?
- ¿Cuál es la eficiencia y facturación por el uso de los condensadores en el control de pérdidas de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar el efecto de la aplicación de condensadores en el control de pérdidas potencia activa de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar el efecto del uso de los condensadores en el control de pérdidas en vacío de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.
- Determinar el efecto del uso de los condensadores en el control de pérdidas en el estator de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.

- Analizar la facturación por el uso de los condensadores en el control de pérdidas de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.

1.3. Justificación e importancia

El uso de los condensadores es importante en la industria minera, porque reduce pérdidas y los motores trifásicos se vuelven más eficientes.

La buena aplicación de condensadores, busca el mejor rendimiento de las maquinarias, teniendo resultados de manera ascendente, ya que primordialmente se corrige el factor de potencia en el equipo, esto genera un mejor funcionamiento de la planta, y por consiguiente la labor que se realiza no tendrá demasiados contratiempos, provocando que la empresa tenga mayores ingresos y menos pérdidas. El cual tiene una repercusión global a nivel de toda la empresa.

La investigación desarrollada tiene una justificación práctica, toda vez que se empleó el método de aplicación de condensadores para reducir pérdidas dentro de la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC. Asimismo, la investigación será importante dado que se los resultados darán muestra de la efectividad del empleo de condensadores (condensadores) en los motores de inducción trifásica.

1.4. Hipótesis y descripción de las variables

1.4.1. Hipótesis general

Si se determina el efecto de la aplicación de condensadores mediante el análisis de compensación reactiva entonces se controlará las pérdidas de potencia activa de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.

1.4.2. Hipótesis específicas

- El uso de los condensadores reduce significativamente las pérdidas en el estator de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.
- El uso de los condensadores reduce significativamente las pérdidas en vacío de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.
- La eficiencia y facturación por el uso de los condensadores es significativo en el control de pérdidas de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.

1.4.3. Variables

A. Variable independiente: Uso de Condensadores

Los condensadores o también conocidos por “capacitor”, esto debido a su nombre proveniente del nombre equivalente a inglés. Este es un dispositivo que puede encapsular energía, generalmente se compone por dos placas metálicas que no se llegan a tocar, en medio se observa una sustancia dieléctrica, que es una sustancia que hace una mala conducción de la electricidad lo cual origina que una diferencia de voltios en ambas placas. Su uso atraviesa un sin número de cosas, desde maquinas o aparatos eléctricos típicos en casa hasta maquinarias industriales cuya función depende de la potencia de fuerza, tal es el caso de la industria minera [4].

B. Variable dependiente: Control de pérdidas

El control de pérdidas, refiere a las pérdidas en los motores que tienen en la parte interna debido a varios factores, entre las comunes se encuentran: Las pérdidas en relación a la carga, que son ubicadas en el bobinado del estator y el rotor su unidad de medida es el watts [4].

Tabla N° 1.1

Variable independiente y dependiente

Variables	Dimensiones	Indicadores
Variable Independiente Uso de condensadores	Condensadores tubulares con regleta de conexión para motores trifásicos	Compensación de potencia reactiva en KVAR
Variable Dependiente Control de pérdidas	<ul style="list-style-type: none">• Pérdidas en el estator• Pérdidas en el rotor	Potencia activa (KW)

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Henríquez, y otros (2015) realizaron el estudio del impacto de la aplicación de condensadores para poder reducir las pérdidas en funcionamiento, en motores trifásicos de inducción del tipo jaula de ardilla. La investigación concluyó en que particularmente la fuerza de salida del motor, mantiene un punto óptimo económico entre la disminución de las pérdidas óhmicas y la capacidad del banco surge la necesidad de lograr la reducción encontrándose en un factor de potencia de alrededor de 0.975. Además, en base al incremento del factor de potencia por encima de dicho valor, las pérdidas se reducen considerablemente, generando más ahorro de energía. Si la capacidad del banco se incrementa, dando un aumento a la inversión para conseguir los elementos que lo constituyen: el interruptor, contactor y condensadores; en el mismo margen de potencia que puede entregar el motor se debería disminuir si la instalación eléctrica tiene un desbalance de tensión mayor al 2% según IEEE STD 739 [5].

Espinosa, y otros (2015) estudiaron las leyes, normas aplicables y reglamentos, para el desarrollo e implementación de un análisis técnico para realizar un ahorro de energía en motores de corriente alterna de inducción tipo jaula de ardilla, para mejorar la eficiencia del sistema industrial. Concluyendo, en base al análisis económico, que un beneficio se realiza al seleccionar adecuadamente el motor, además se tendría una disminución y

ahorro del pago de energía eléctrica, presentando un incentivo para lograr la recuperación de la inversión [6].

Mayor (2014) aplicó el método de medición de la eficiencia en un motor de inducción alimentado por variador de velocidad. Llegando a la conclusión de que la eficiencia del motor de inducción logra ser reducida por las pérdidas adicionales del producto de los armónicos de alimentación del variador de velocidad. Viendo otro punto la utilización del variador de velocidad comercial con frecuencia de cambio no mayor a 16 kHz ocasiona una mayor pérdida en el motor de inducción y amenora su eficiencia en un 2.7%. Además, la eficiencia del motor de inducción de potencia baja alimentados por variador de velocidad conserva la conducta semejante a la eficiencia del motor de inducción alimentado por una fuente sinusoidal pura, pero con valores de eficiencia inferiores en su rango de operación por las pérdidas adicionales ocasionados por el producto de los armónicos de alimentación del variador de velocidad [7].

Martínez y Ramírez (2000) realizaron un experimento de control óptimo V/f para motores de inducción. Concluyendo en que el método para seleccionar curvas V/f en busca de la eficiencia en un accionamiento para bombas y ventiladores; en base a la sencillez del método es fácil configurar los accionamientos industriales. Además, del logro del ahorro de energía hasta de 12 vatios, optimizando el factor de potencia hasta de 10 puntos porcentuales. Esta investigación logró demostrar que el uso y consumo de energía de un motor de inducción, se traduce en un ahorro de energía en relación al valor de consumo, además, de ser más confiable y eficiente [8].

Velásquez (2016), en su tesis: "Análisis e implementación de un banco de condensadores para la mejora del factor de potencia en una industria de reciclaje de plásticos", para la obtención de del título de Ingeniero en Electricidad especialización electrónica y automatización industrial de la Escuela Superior Politécnica Del Litoral. Expuso su objetivo general la implementación de un banco de condensadores para mejorar el factor potencia. Sus objetivos específicos fueron: la reducción de costos por un

bajo factor de potencia, minimizar la pérdida de energía, reducir el sobredimensionamiento y los armónicos mediante los nuevos procesos. La investigación fue de tipo experimental. Sus resultados arrojaron que se pudo efectuar el ahorro económico en un 6.8% de pago por penalizaciones por un bajo factor de potencia, también se logró la mejora del factor potencia debido a la implementación de un banco de condensadores. Se concluyó que debido a que las industrias manejan equipos de gran capacidad, estos con el paso del tiempo van disminuyendo su potencia por lo que es necesario el uso de un reactivo que aumente el factor potencia y de esta manera poder aumentar el factor potencia con la instalación de un banco de condensadores, también el ahorro de energía eléctrica es muy importante en la industria, sin embargo es necesario implementar una cantidad exacta de reactivos, con la finalidad de darle más potencia y evitar el excesivo consumo de energía [9].

Chico (1987), realizó su tesis "Protección del banco de condensadores en subestación", previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, con especialización en sistemas eléctricos de potencia. El objetivo general fue realizar un análisis de los principios que se resaltan para la protección de los bancos de condensadores en las subestaciones. Los resultados resaltantes, establecieron que una adecuada protección de los bancos de condensadores ameritaba en primera línea a el uso de fusibles individuales que por su costo logra ser el método de protección más económico existente; también el disyuntor que opera un banco de condensadores está expuesto a grandes esfuerzos, esto debido a la energía utilizada, por lo que se necesita unos disyuntores de mayor potencia y robustez. Las conclusiones fueron que se necesita el uso de fusibles de mayor potencia para el trabajo de los bancos de condensadores, también se da las pautas para un mejor manejo del sistema de protección de desbalance y la respectiva calibración a fin de que su labor sea óptima [10].

Acosta (2015), realizo la tesis: "Instalación de motores, tablero de control y banco de condensadores para envasadora automática de GLP", para la obtención del título de Ingeniero en Electricidad, con especialización

en electrónica y automatización industrial de la Escuela superior Politécnica del Litoral, en la ciudad de Guayaquil, Ecuador. Como objetivo de investigación fue la instalación de unos bancos de condensadores para mejorar la potencia. Los resultados que existen fallas en el término del ensamblaje de la nueva máquina, por los elementos de protección sus resultados fueron favorables, puesto que emitieron un riesgo bajo sobre calentamiento, evitándose posibles incendios o explosiones. En los bancos de condensadores se mejoró el factor potencia en un 0.96%. En conclusiones generales se pudo reducir el límite de penalización por baja potencia que era un 10.2%, se incrementó la producción producto de la instalación de las dos nuevas envasadoras [11].

Llumiyinga (2012), en su trabajo de investigación: “Diseño de un banco de condensadores para la corrección del factor potencia”, previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, de la Universidad Técnica Salesiana sede Quito, de la ciudad de Quito, Ecuador. Con su objetivo general fue diseñar un banco de condensadores para corregir el factor potencia basándose en un estudio técnico y económico. Y sus objetivos específicos: el estudio y análisis del método usado para el diseño del banco de condensadores, determinar los beneficios que se lograría si se supera el límite mínimo de bajo factor potencia, en los términos técnico y económico. La investigación fue de metodología deductiva y analítica. Se llegó a las conclusiones: se puede llegar a corregir el factor potencia de un 0.86 a 0.98, debido a la liberación de carga al transformador, uno de los principales beneficios al corregir el factor potencia serán los beneficios económicos, ya que la empresa paga anualmente 194.31 dólares [12].

Gómez (2009), en su tesis: “Compensación de potencia reactiva”, para acceder al título de Ingeniero Electricista, del Instituto Politécnico Nacional, de México. El objetivo general de su trabajo fue: Efectuar una metodología que posibilite la implementación de bancos de condensadores para la compensación de potencia reactiva. Su metodología se basó en un nivel de investigación preexperimental, de tipo cualitativo. Los resultados obtenidos fueron: se realizó la compensación de potencia la cual

genero un ahorro mensual de 8,9% en la factura mensual de energía eléctrica, en otro aspecto las reducciones con el uso del método de simulator power world fueron imprecisos, manteniendo la carga de los buses 5,6,7 en un 17%,9%,12% respectivamente. Las conclusiones especificadas fueron: en base a los resultados se tiene que si no se hace la compensación de potencia adecuada se estará efectuando un recargo de 20% más de cuando se efectuó la compensación de potencia necesaria, por otro lado la aplicación del banco de condensadores asegura una reducción de pérdida de energía en un 27,6% en promedio, en el mismo sentido la capacidad del alimentador se intensifica en un 27.5% por lo que es efectivo la implementación de estos banco de condensadores [13].

2.1.2. Antecedentes nacionales

Torres (2017), en su tesis: “Localización óptima de condensadores en redes de distribución para mejorar la eficiencia energética del sistema eléctrico Chungar – Volcán”, para la obtención del grado de Magister en Tecnología Energética, de la Universidad Nacional del Centro del Perú, en la ciudad de Huancayo. Con el objetivo general mejorar la eficiencia eléctrica bajo la optimización de lugares y la implementación de bancos de condensadores. Objetivo específico fue: la mejora del factor potencia y la minimización de pérdidas, la reducción al mínimo de la inversión total en condensadores y la reducción al mínimo de la desviación media del perfil de tensiones en barras de sistemas. El tipo de investigación fue la tecnológica de nivel aplicativo, y con un diseño de investigación experimental. Los resultados expuestos fueron: se tiene valores p de significancia mayores que 0.05. Concluyendo que las muestras de factores de potencia se distribuyen de forma normal en cada caso de estudio, se logró una reducción de 2.62% de pérdidas técnicas en potencia activa, el balance de energía indica que las pérdidas se reducen hasta el 9.8% para el sistema, fue óptima el resultado del perfil de tensiones que solo varían entre 96 y 103% del voltaje nominal (V_n) en todas las barras. La conclusión fue: se pudo dar un óptimo lugar y se implementó correctamente los condensadores, en cuanto al máximo factor de potencia se obtuvo con el método propuesto, los datos fueron validados

con el test de Kolmogorov (estadística menor a 0.05) indicando que los datos son normales, lográndose mejorar el factor de potencia, hasta 91.9% en barras de 50KV y 93.4 en barras de 22.9 KV [14].

Gómez (2013), en su tesis: "Diseño e implementación de un variador de velocidad de bajo costo para un motor trifásico de inducción de 4hp", para la obtención del título de Ingeniero Electrónico, de la universidad Pontificia Católica del Perú. Su objetivo general fue: Diseñar un variador de velocidad para un motor de inducción trifásico de bajo costo con el uso de materiales disponibles en el ámbito nacional. Como objetivos específicos tuvo: Desarrollo de la protección eléctrica del motor, optimización de recursos y la búsqueda de menores costos de implementación. El nivel de investigación es experimental. Y como resultados se desprenden que se puede hacer un variador de velocidad con un menor costo que del mercado internacional, ahorrando un 40% de un variador de las mismas características, en cuanto a las circunstancias en las que se use un ciclo convertidor, se tiene que tomar en cuenta el bajo factor de potencia que cuenta. Las conclusiones a las que se llegaron fueron: Variador debe de estar en una zona adecuada con mucha ventilación para evitar que se sobrecalienten y para mantener la seguridad de las instalaciones se necesita hacer uso de una llave termomagnética [15].

Huacasi y otros (2016), elaboraron la tesis: "Localización óptima de bancos de condensadores en sistemas de distribución radial mediante la aplicación del método de sensibilidades lineales", para a la obtención del título de Ingeniero Electricista, de la Universidad de San Antonio de Abad del Cusco. Manifestó su objetivo general fue la reducción de pérdidas de potencia a causa del efecto Joule y la corrección del factor potencia de la carga. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, de nivel descriptivo – explicativo, y un diseño cuasi experimental. Los resultados fueron: Al hacer la instalación de bancos de condensadores de 700, 800 y 900 KVAR, y la implementación de los bancos de condensadores fue todo un éxito pues se dio una reducción de un - 4.9% y 0.25 MW, con la cual es satisfecha el criterio técnico. La conclusión efectuada, fue: los alimentadores DO06, DO07 y DO09 presentan mayores consumos de potencia reactiva con valores 1.5,

1.3 y 1.9 KVAR, los cuales, son necesarias la implementación de bancos de condensadores, en el lugar óptimo según las especificaciones técnicas realizadas [16].

Vargas (2017), realizó la tesis: "Implementación de un banco de condensadores para el aumento del factor potencia", para la obtención del título de Ingeniero Industrial, de la Universidad Privada del norte, en la ciudad de Lima. En su objetivo general propuso el diseño de un banco de condensadores para la corrección del factor potencia basada en un estudio técnico económico. Se utilizó el tipo de investigación experimental, método cuantitativo, de nivel explicativo – experimental, con un diseño transversal. Los resultados expuestos fueron: Después de la implementación de los bancos de condensadores, desde el periodo de estudio 2015 hasta el periodo final de estudio 2017 se dio una facturación de S/.34000.00 soles, los cuales tuvieron una reducción aproximadamente de S/ 500.00 soles mensuales, se dedujo que el banco de condensadores genera una reducción en el mantenimiento de S/ 1500.00 soles anuales. En las conclusiones se obtuvo que, a raíz de la implementación del banco de condensadores, se logró una reducción de un 30% en el consumo de energía eléctrica, la implementación del banco de condensadores redujo la sobrefacturación por energía reactiva, pues antes de dicha implementación se efectuaba un bajo factor de potencia [17].

Calderón y otros (2015), manifestaron en su tesis: "Metodología de estudio del diagrama de carga para el mejoramiento del factor de potencia de la planta frigorífica", para la obtención del título de Ingeniero en Energía, de la Universidad Nacional del Santa, Nuevo Chimbote, en el que presentaron su objetivo general: La aplicación de una metodología para el estudio del diagrama de carga en la Planta frigorífica. Con sus objetivos específicos fueron en su mayoría la determinación de los puntos críticos de la instalación del diagrama de carga, de igual manera determinar el diagrama típico que usa la empresa, y por último la determinación del factor potencia en función al diagrama utilizado. El método cuantitativo y analítico fue usado para realizar el trabajo, así como el método sintético y deductivo, el tipo fue

el explicativo con un diseño pre-experimental. Los resultados a los que se llegó fueron: la continuidad cíclica que se emplea en las cámaras frigoríficas haciendo una labor continua de solo una unidad, efectuando su labor por 5 horas en promedio, conectando el compresor 1 hora por operación, pero debido a la elevada temperatura en verano, se hace la activación de los termostatos juntamente con los compresores para continuar con las labores [18].

Calcina (2016) determinó la optimización del funcionamiento del motor de inducción mediante un variador de frecuencia para un adecuado ahorro de energía eléctrica. Concluyendo que mediante el control por variador de frecuencia se optimizó el funcionamiento de un motor de inducción logrando un adecuado ahorro de energía en el laboratorio de la FIM- UNCP. Además, al bajar la corriente en el arranque mediante el variador de frecuencia dio pase a establecer una diferencia entre el consumo de energía en un arranque estrella triángulo y un arranque controlado por variador de frecuencia, con ello se puede dar una gran ventaja representa una ventaja para la industria, primero en el ahorro en el consumo de energía, disminución en el consumo de energía eléctrica del motor, prolongación la vida útil de los equipos y las máquinas, incremento en la precisión de control en el sistema motor eléctrico, disminución de los costos de mantenimiento y reparación del sistema de motores de inducción y la reducción de la fatiga mecánica [19].

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Uso de Condensadores

Los condensadores, son los dispositivos electrónicos pasivos. Su composición está estructurada por dos placas conductoras y un material dieléctrico.

Estas placas conductoras se conectan a las terminales de este elemento pasivo y en medio de las placas se inyecta un material dieléctrico o aislante. En cierta manera las placas almacenan carga eléctrica o energía, esta carga se mantiene hasta que se conecte una carga en el capacitor [20].

En otros conceptos un condensador es un componente electrónico que al igual que los resistores es uno de los más utilizados en el ámbito de la electricidad y electrónica, su uso generalmente se da para acondicionar las señales y la protección de los circuitos integrados, también su uso se emplea en los sistemas de potencia para el factor potencia [21].

A. Capacidad de un condensador

La capacidad de un condensador es denominada a la cantidad de energía que cada condensador puede almacenar dentro, midiéndose con una mayor o menor cantidad de electricidad. Esta capacidad depende de la composición del condensador y la tensión aplicada entre sus armaduras [22].

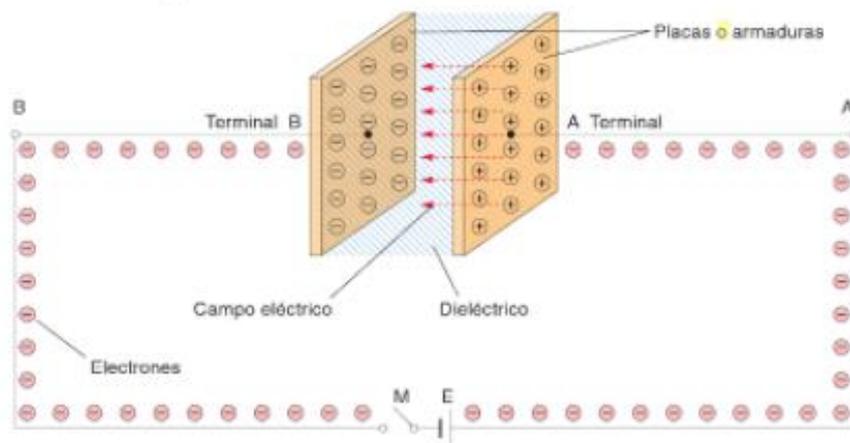


Figura N° 2.1. Condensador de placas paralelas

Nota: Adaptación de libro Electrotecnia, Santamaria y otros (2009)

B. Tipos de condensadores

La gran cantidad de tipos de condensadores es en función al uso que se le dará, pero por lo general, entre los más comunes están: electrolítico, cerámico, poliéster y tantalio. Estos son los de mayor uso en el mercado de la electrónica para distintas aplicaciones. La diferencia se basa principalmente en su composición. Todos, sin embargo, tienen una estructura interna basada en dos placas conductoras [20].

i. **Condensadores de papel impregnado**

Su uso fue muy común en el pasado a los receptores de radio, se componían en una hojilla de aluminio cubierta en un rollo de papel y a su vez se cubría con cera o aceite. La capacidad la que llegaba era hasta algunos μF y la tensión máxima se sitúa en el centenar de voltios. Estas versiones hechas a base de papel impregnado con aceite pueden llegar a tener tensiones de hasta 5.000 V y su uso se sitúa mayormente en el arranque de los motores eléctricos, en el control de potencia, entre otras aplicaciones [21].

ii. **Condensadores de papel metalizado**

“Variante del condensador de papel en la que la hoja metálica se ha sustituido por película muy delgada de metal depositado sobre el papel; si la película se perfora, allí se quema” [23].

iii. **Condensadores de plástico**

Este tipo de condensador usa como dieléctrico una capa delgada de plástico. Entre los que se cuentan: el poliestireno, polipropileno, teflón, poliéster, etc. Claro que de toda esta gama el que tiene más aceptación y mayor uso es el poliéster por su fácil manejo se puede hacer la admisibilidad de la metalización produciéndose un condensador muy pequeño y por lo cual tiene un bajo costo, accesible para cualquier público [21].

iv. **Condensadores cerámicos**

Este tipo de capacitor usa la cerámica como dieléctrico, este material fue uno de los primeros en usarse para la fabricación de condensadores y hasta la actualidad se ha extendido mundialmente su fabricación. Entre sus variedades más fabricadas está el capacitor multi capa y los condensadores cerámicos de disco, el primero tiene un uso en casi toda gama de la electrónica, su uso va creciendo por millones año tras año por su tamaño diminuto y su fácil manejo en todo tipo de artefactos [24].

v. **Condensadores de mica**

Estos tipos de condensadores se estructuran por capas de hojas de mica y aluminio ordenados en forma alternada con una protección de plástico moldeado. Su costo es algo alto, se mantiene por su baja corriente de fuga (corriente que pierden los condensadores y que hacen que este pierda su carga con el tiempo) y alta estabilidad [25].

2.2.2. Factor potencia

En argumentos entendibles, el factor de potencia es el que mide la eficiencia del consumo eléctrico, a la hora de convertirlo en potencia útil, como luz, calor o movimiento mecánico. Hablando de manera técnica, es la ratio de potencia activa o útil medida en kilovatios (kW) respecto a la potencia aparente total (potencia activa y reactiva) medida en kilovoltio-amperios [26].

$$\text{Factor de Potencia} = \text{KW} / \text{KVA}$$

En definitiva, la gran mayoría de equipos electromecánicos que están compuestos por bobinas, tales como motores y transformadores necesitan para su funcionamiento de capacidad una corriente reactiva para poder generar campos magnéticos necesarios para su operación. Esta corriente se encarga de producir un desfase entre la onda de tensión y la onda de corriente, en caso de no existir la corriente reactiva la tensión y la corriente estarían en fase y el factor de potencia sería la unidad. El desfase entre las ondas de tensión y corriente, producido por la corriente reactiva se anula con el uso de condensadores de potencia, lo que hace que el funcionamiento del sistema sea más eficaz y, por lo tanto, requiera menos corriente lo que técnicamente se denomina compensación.

El factor potencia indica la manera de como se está aprovechando la energía eléctrica, esta medición toma valores de entre 0 y 1, es decir, que si el valor se acerca más a cero, el aprovechamiento de la energía es mala o pésima, mientras que si su índice indica un acercamiento al valor uno, quiere decir que se está dando una buena optimización de la energía [27].

De esta misma manera Renzetti (2008), también explica con una breve comparación entre artefactos que son generadores de calor o energía lumínica, los que pueden ser, planchas, estufas, focos, etc., son los que utilizan la electricidad de manera óptima en la que el factor potencia toma un valor de 1 (100% de energía activa). Prosiguiendo con la explicación también existe otra clasificación de artefactos que usan la electricidad convirtiéndola en energía mecánica, provocando una fuerza en su trabajo, en estos casos se encuentran las lavadoras, ventiladores, o todo aquel artefacto que posee un motor para su correcto funcionamiento, la energía activa es la que da la fuerza de trabajo para el artefacto mientras que la reactiva promueve el funcionamiento del aparato. En estos casos el factor potencia toma el valor de uno (1) [27].

2.2.3. Efectos de la Aplicación de Condensadores

Renzetti (2008), manifiesta que un inconveniente en el factor potencia se origina cuando el uso de la energía reactiva es mayor a la energía activa, provocando un flujo demasiado de energía eléctrica en la potencia reactiva provocando pérdidas de energía en otras instalaciones: Estas sobrecargas pueden llegar a provocar daños por saturación de electricidad, se elevan las pérdidas debido al calentamiento que se provoca, se da un aumento de la potencia aparente, causando una elevación en la potencia activa, generando gastos a la empresa [27].

El consumo extremo de energía reactiva se puede compensar con la implementación de condensadores o condensadores, estos dispositivos pueden regular la energía reactiva del artefacto al hacer la instalación correcta y usando el valor adecuado, funciona de manera eficaz y permite ahorros de energía considerables para cualquier empresa [27].

La aplicación se puede dar de dos tipos:

A. Banco fijo de Condensadores

Un banco fijo de capacitores o condensadores es una estructura que contiene dos o más condensadores. En caso que en una empresa o en cualquier instalación eléctrica se detectan un diagnóstico de bajo factor potencia se hace el uso de los bancos de condensadores fijos. Estos bancos de condensadores fijos son la solución a la regulación del bajo factor potencia y se acostumbra usar en la compensaciones de motores o máquinas, a esto se le conoce como compensaciones locales. También se aplican en compensaciones generales, por ejemplo, de subestaciones [28].

Una de las ventajas de este tipo de banco de condensadores es que las instalaciones generalmente tienen una vida útil larga, son seguros puesto que tienen medidas de seguridad contra descargas o cortocircuitos, su mantenimiento es simple no necesita de expertos en la materia para solucionar algún problema, son durables debido a que sus instalaciones están hechas de para proteger a los condensadores de cualquier mala maniobra [28].

B. Banco Automático De Condensadores

Los bancos automáticos de condensadores son usados para la corrección del factor potencia considerados confiables y económicos. Sucede que el factor de potencia varía, los bancos automáticos de condensadores mejoran su rendimiento, en las instalaciones enteras y en partes específicas. Estos bancos automáticos de condensadores supervisan constantemente las variaciones del factor potencia, y en caso ocurra una variación elevada o muy baja, estas entran en acción corrigiendo el problema estabilizando la potencia, dando una regulación de la intensidad de energía [28]. A menudo las acciones que toma un banco automático de condensadores son:

- Eliminar o disminuir las variaciones derivadas del factor de potencia.

- Reducir las pérdidas en el sistema eléctrico debido al calentamiento.
- Garantizar una mejor regulación de la tensión.
- Liberar la capacidad del sistema.

2.2.4. Corrección del factor de potencia

Para corregir el factor de potencia de una instalación, se requiere conocer la siguiente información sobre la operación actual:

- Potencia activa de la instalación , P
- Factor de potencia de la instalación, fp_1

Con estos datos se obtienen los demás componentes del triángulo de potencias de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$S_1 = \frac{P}{fp_1} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P^2} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(fp_1) \dots\dots\dots (2.3)$$

En la figura se muestra el triángulo de potencias, cuyos catetos son la potencia activa P y la potencia reactiva Q_1 ; la hipotenusa es la potencia aparente S_1 y el ángulo de la impedancia es φ_1 .

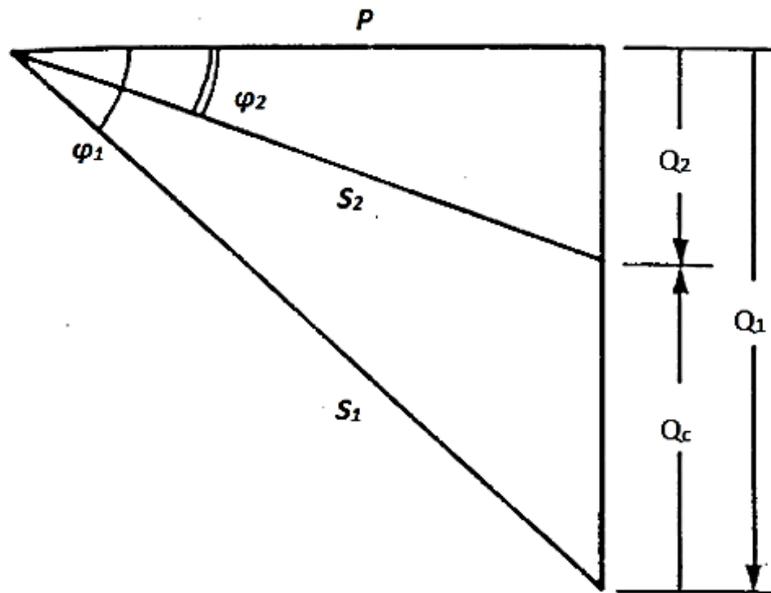


Figura N° 2.2 Triángulo para corrección de factor de potencia
Fuente: elaboración propia

Para hacer la corrección del factor de potencia, es necesario conocer el factor de potencia 1 deseado para la instalación del factor de potencia 2.

Como se muestra en la figura 2.2, observamos dos triángulos sobrepuestos; el mayor representa las condiciones actuales de operación de la instalación eléctrica, formado por los lados P, Q_1, S_1 , mientras que el triángulo menor representa las condiciones en las que operará el sistema una vez que se haya alcanzado el factor de potencia deseado. Este triángulo está formado por los lados. Q_2, S_2 .

La potencia reactiva Q_2 es la que la instalación absorberá del suministro eléctrico una vez que se haya corregido el factor de potencia. Se requiere entonces que el propio usuario aporte una potencia reactiva de corrección Q_c .

Observando la figura, se tiene que Q_c es:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \dots \dots \dots (2.4)$$

En ambos triángulos la potencia reactiva se relaciona con el ángulo y con la potencia activa por las expresiones:

$$Q_1 = P \tan(\varphi_1) \dots \dots \dots (2.5)$$

$$Q_2 = P \tan(\varphi_2) \dots \dots \dots (2.6)$$

Sustituyendo estas relaciones para obtener la potencia reactiva de corrección, se tiene:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P (\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2)) \dots \dots \dots (2.7)$$

La ecuación anterior proporciona el valor de la potencia reactiva que necesita suministrar el dispositivo de corrección para llegar al factor de potencia deseado. Si se requiere compensar para factor de potencia unitario, entonces la ecuación se transforma en:

$$Q_c = P \tan(\varphi_1) \dots \dots \dots (2.8)$$

También el valor de la potencia reactiva de compensación se puede determinar como:

$$Q_c = 3 X_c I_c^2 = 3 X_c \left(\frac{V_c}{X_c}\right)^2 \dots \dots \dots (2.9)$$

Para hallar el valor del condensador a utilizar se tienen que emplear las siguientes formula:

$$C = \frac{1}{\omega X_c} = \frac{Q_c}{3 \omega V_c^2} \dots \dots \dots (2.10)$$

Para el caso de conexión del banco de condensadores en estrella $V_c = V_L / \sqrt{3}$

$$C_Y = \frac{Q_c}{\omega V_L^2} \dots \dots \dots (2.11)$$

Para el caso de conexión del banco de condensadores en delta: $V_c = V_L$.

$$C_\Delta = \frac{Q_c}{3 \omega V_L^2} = \frac{C_Y}{3} \dots \dots \dots (2.12)$$

2.2.5. Motores de inducción trifásico

En este tipo de máquina el bobinado del estator está recorrido por un sistema equilibrado de corrientes que da lugar, en virtud del Teorema de Ferraris, a un campo magnético giratorio cuya velocidad es la conocida como velocidad de sincronismo. Cuando esta velocidad se mide en r.p.m. se la denomina n_1 y se calcula a partir de la frecuencia f_1 de las corrientes del estator mediante este cociente.

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \dots\dots\dots (2.13)$$

Como el rotor gira a una velocidad diferente de la del campo magnético del estator, sus bobinas están sometidas a la acción de un flujo magnético variable y se inducen f.e.m. de rotación en ellas. El devanado del rotor está en cortocircuito, luego esta f.e.m. produce la circulación de corrientes en el rotor que, al interactuar con el campo magnético del estator, originan un par en el eje de la máquina. Por la Ley de Lenz, este par mecánico intentará reducir las variaciones de flujo magnético en el devanado del rotor y, por lo tanto, tratará de hacerlo girar a la misma velocidad que el campo magnético giratorio (ya que las variaciones de flujo en las bobinas del rotor son debidas al movimiento relativo del campo giratorio con respecto al rotor), pero sin conseguirlo nunca, ya que entonces no habría corrientes en el rotor ni, por consiguiente, par en el eje de la máquina.

La velocidad de estas máquinas es, pues, ligeramente distinta de la de sincronismo, de ahí su nombre de asíncronas. Por otra parte, las corrientes que circulan por el rotor aparecen por inducción electromagnética, de ahí su otro nombre de máquinas de inducción.

Cuando la máquina actúa como motor, su funcionamiento más habitual, la velocidad del rotor es inferior a la de sincronismo y se genera un par motor. Para que esta máquina actúe como generador es preciso moverla con una máquina motriz externa de forma que su velocidad supere a la de sincronismo. En este caso aparece un par de frenado en su eje.

Se denomina deslizamiento s a la siguiente relación

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \dots \dots \dots (2.14)$$

Dónde:

n_1 es la velocidad de sincronismo medida en r.p.m.

n es la velocidad de giro del rotor medida en r.p.m.

A. Circuito equivalente

El circuito equivalente de un motor de inducción es muy similar al de un transformador, debido a la acción de transformación que ocurre al inducirse corrientes en el rotor, desde el estator.

En la figura se muestra un circuito equivalente transformador, por fase, de un motor de inducción. La resistencia del estator es R_1 y la reactancia de dispersión es X_1 . E_1 es el voltaje primario del estator, acoplado al secundario E_R mediante un transformador ideal con relación de vueltas a_{eff} . El voltaje E_R producido en el rotor ocasiona un flujo de corriente en el rotor. R_C es el componente de pérdidas en el núcleo y jX_M se refiere a la reactancia de magnetización, R_R y jX_R son las impedancias del rotor. Asimismo, I_1 constituye la corriente de línea, I_M la corriente de magnetización. I_R es el flujo de corriente en el rotor e I_2 es la corriente rotórica.

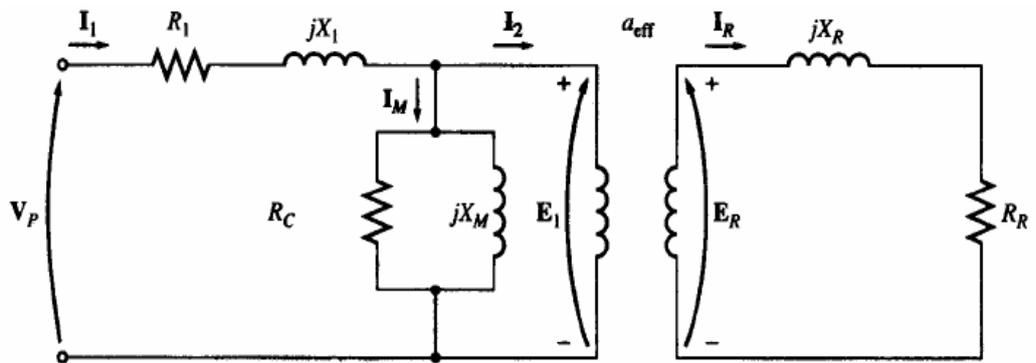


Figura N° 2.3 Circuito equivalente del motor de inducción

Fuente: elaboración propia

Cuanto mayor sea el movimiento relativo entre los campos magnéticos del rotor y del estator, mayor será el voltaje resultante en el rotor y la frecuencia del rotor. El mayor movimiento relativo ocurre cuando el rotor se encuentra estacionario, condición llamada de rotor detenido o de rotor bloqueado, de modo que en esta condición se inducen el máximo voltaje y la máxima frecuencia del rotor. El mínimo voltaje (0 V) y la mínima frecuencia (0 Hz) ocurren cuando el motor se mueve con la misma velocidad que el campo magnético del estator, caso en que no hay movimiento relativo. El voltaje y la frecuencia del rotor son directamente proporcionales al deslizamiento del rotor, por lo que el voltaje y la frecuencia inducidos para cualquier deslizamiento son:

$$E_R = sE_{R0} \dots\dots\dots(2.15)$$

$$f_R = s f_e \dots\dots\dots (2.16)$$

$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R \dots\dots\dots(2.17)$$

$$X_R = 2\pi s f_e L_R = s(2\pi f_e L_R) = sX_{R0} \dots\dots\dots(2.18)$$

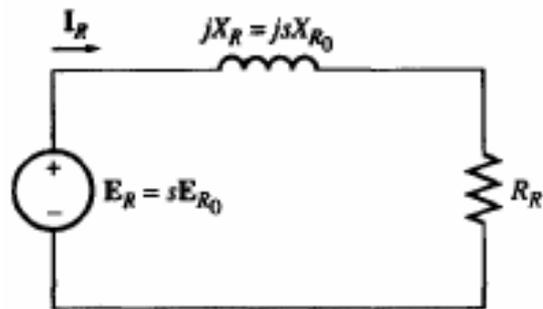


Figura N° 2.4 Circuito equivalente del rotor

Fuente: Chapman (2000)

Entonces

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jsX_{R0}} \dots\dots\dots (2.20)$$

$$I_R = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}} \dots\dots\dots(2.21)$$

$$Z_{Req} = \frac{R_R}{s} + jX_{R0} \dots\dots\dots (2.22)$$

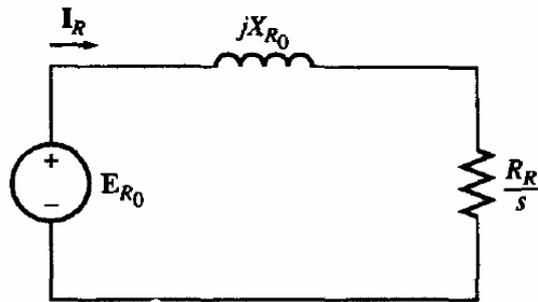


Figura N° 2.5 Circuito del rotor
Fuente: Chapman (2000)

Circuito equivalente final es:

$$E_1 = E_R = a_{eff} \cdot E_{R0} \dots\dots\dots (2.23)$$

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{eff}} \dots\dots\dots (2.24)$$

$$Z_2 = a_{eff}^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \dots\dots\dots (2.25)$$

$$R_2 = a_{eff}^2 R_R \dots\dots\dots (2.26)$$

$$X_2 = a_{eff}^2 X_{R0} \dots\dots\dots (2.27)$$

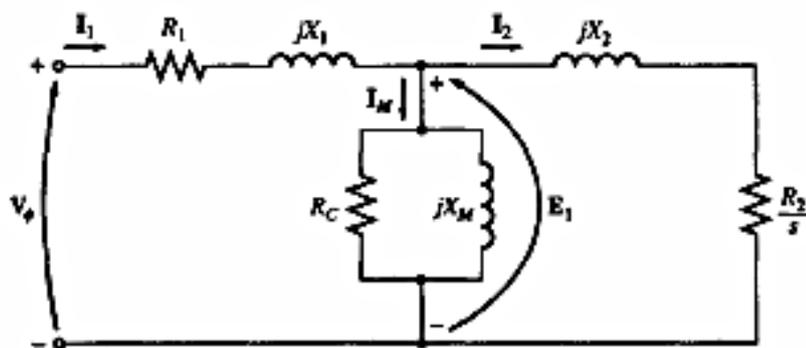


Figura N° 2.6 Circuito equivalente de la máquina de inducción
Fuente: Chapman (2000)

B. PÉRDIDAS Y DIAGRAMA DE FLUJO DE POTENCIA

Un motor de inducción se puede describir básicamente como un transformador rotante. Su entrada es un sistema trifásico de voltajes y corrientes. En un transformador normal, la salida es potencia eléctrica desde los devanados secundarios. Los devanados secundarios de un motor de inducción (el rotor) están cortocircuitados de tal forma que no existe salida eléctrica de los motores normales de inducción sino mecánica. La relación entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica de salida se muestra en el flujo de potencia.

La potencia de entrada al motor de inducción P_{in} se presenta en forma de voltajes y corrientes eléctricas trifásicas. Las primeras pérdidas encontradas en la máquina son I^2R en los devanados del estator (pérdidas en el cobre del estator P_{SCL}). Luego, alguna cantidad de potencia se pierde por histéresis y por corrientes parásitas en el estator (P_{nucleo}). La potencia remanente en este punto se transfiere al rotor de la máquina a través del entrehierro situado entre el rotor y el estator. Esta potencia es llamada potencia en el entrehierro P_{AG} de la máquina. Después que la potencia ha sido transferida al rotor, algo de ella se disipa como pérdidas I^2R (pérdidas en el cobre del rotor P_{RCL}) y la restante se convierte de potencia eléctrica en mecánica (P_{CONV}). Por último, las pérdidas por rozamiento propio y por rozamiento con el aire ($P_{F\&W}$) y las pérdidas misceláneas se restan. La potencia restante es la de salida del motor P_{out} .

Las pérdidas en el núcleo no siempre aparecen en un diagrama de flujo de potencia. Debido a la naturaleza de las pérdidas en el núcleo, el lugar en el que sean tenidas en cuenta dentro de esta máquina es un tanto arbitrario. Las pérdidas en el núcleo de un motor de inducción corresponden en parte al circuito del estator y en parte al circuito del rotor. Puesto que un motor de inducción opera normalmente a una velocidad cercana a la velocidad sincrónica, el

movimiento relativo de los campos magnéticos sobre la superficie del rotor es muy lento y las pérdidas en el núcleo del rotor son muy pequeñas comparadas con las pérdidas en el núcleo del estator. Puesto que la fracción más grande de las pérdidas en el núcleo proviene del circuito del estator, todas las pérdidas en el núcleo se agrupan en ese punto del diagrama. Estas pérdidas se representan en el circuito equivalente del motor de inducción por una resistencia R_C (o la conductancia G_C). Si las pérdidas en el núcleo están dadas por un número (X watts), en lugar de estar dadas como un elemento del circuito, se agrupan con frecuencia en conjunto con las pérdidas mecánicas y se restan en el punto del diagrama donde se localizan las pérdidas mecánicas.

Cuanto mayor sea la velocidad de un motor de inducción, mayor es su rozamiento propio y con el aire, así como mayores las pérdidas misceláneas. Por otra parte, cuanto mayor sea la velocidad del motor (hasta n_{sinc}), menores serán sus pérdidas en el núcleo. En consecuencia, a veces estas tres clases de pérdidas se agrupan y se denominan pérdidas rotacionales. Con frecuencia las pérdidas rotacionales completas de un motor se consideran constantes frente a la velocidad variable debido a que las pérdidas compuestas cambian en dirección opuesta al cambio de velocidad.

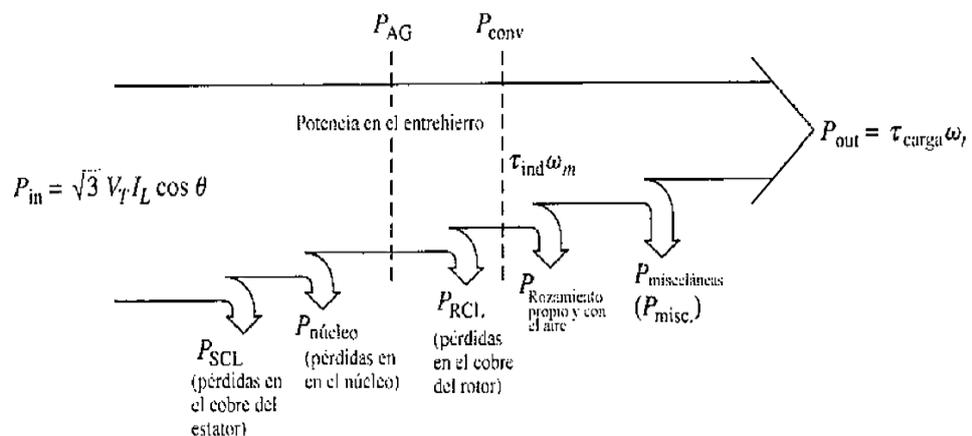


Figura N° 2.7 Diagrama de flujo de potencia del motor

Fuente: Chapman (2000)

Del diagrama de flujo se sabe:

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{núcleo} \dots\dots\dots (2.28)$$

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \dots\dots\dots (2.29)$$

$$P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_{misc} \dots\dots\dots (2.30)$$

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \dots\dots\dots (2.31)$$

$$P_{núcleo} = 3E_1^2 G_C \dots\dots\dots (2.32)$$

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \dots\dots\dots (2.33)$$

$$P_{RCL} = 3I_R^2 R_R = 3I_2^2 R_2 \dots\dots\dots (2.34)$$

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \dots\dots\dots (2.35)$$

$$P_{conv} = 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s}\right) \dots\dots\dots (2.36)$$

$$P_{AG} = \frac{P_{RCL}}{s} \dots\dots\dots (2.37)$$

$$P_{conv} = (1 - s) P_{AG} \dots\dots\dots (2.38)$$

C. Determinación de los parámetros del circuito equivalente.

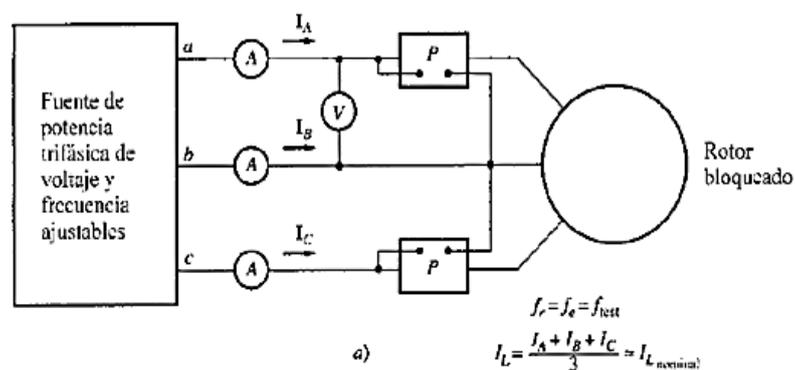
El circuito equivalente de un motor de inducción es una herramienta muy útil para determinar la respuesta del motor a los cambios de carga. Sin embargo, sí se va a utilizar un modelo para una máquina real, es necesario determinar qué valores se utilizarán en el modelo. ¿Cómo pueden determinarse R_1 , R_2 , X_1 , X_2 y X_M para un motor real?

Estos conjuntos de información se pueden hallar conformando una serie de pruebas en el motor de inducción, análogas a las pruebas de cortocircuito y de circuito abierto realizadas en un transformador. Las pruebas deben llevarse a cabo bajo condiciones perfectamente controladas puesto que las resistencias varían con la temperatura, y la resistencia del rotor varía también con su frecuencia. Los detalles precisos de cómo debe realizarse cada prueba en los motores de inducción para alcanzar resultados exactos, están descritos en la

norma 112 de la IEEE. Aunque los detalles de las pruebas son muy complicados, los conceptos que están detrás de ellos son relativamente claros.

- **Prueba de vacío**

En un motor de inducción, la prueba de vacío mide las pérdidas rotacionales del motor y suministra información sobre su corriente de magnetización. El circuito para esta prueba se muestra en la figura a. Los vatímetros, un voltímetro y tres amperímetros se conectan al motor de inducción al cual se le permite girar libremente. La única carga puesta sobre el motor es su rozamiento propio y el rozamiento con el aire, de modo que P es consumida en el motor por las pérdidas mecánicas y el deslizamiento del motor es muy pequeño (posiblemente cerca de 0.001 o menos). En la figura b se muestra el circuito equivalente de este motor. Con este pequeño deslizamiento, la resistencia correspondiente a su potencia convertida, $R_2(\frac{1-s}{s})$, es mucho mayor que la resistencia correspondiente a las pérdidas en el cobre del rotor R_2 , y mucho mayor que la reactancia del rotor X_2 . En este caso, el circuito equivalente se reduce aproximadamente al último de los circuitos mostrados en la figura b. Allí, la resistencia de salida está en paralelo con la reactancia de magnetización X_M y la resistencia de pérdidas en el núcleo, R_c .



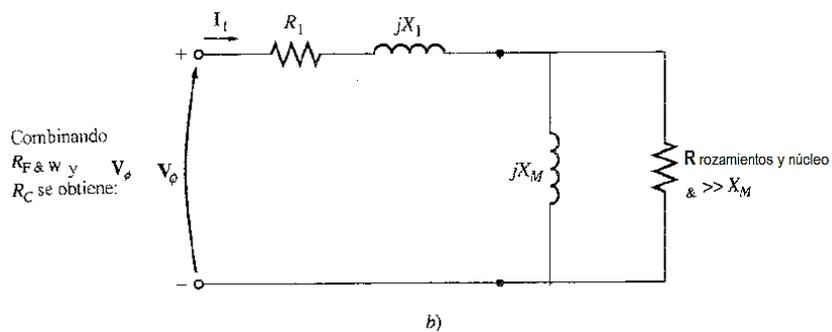
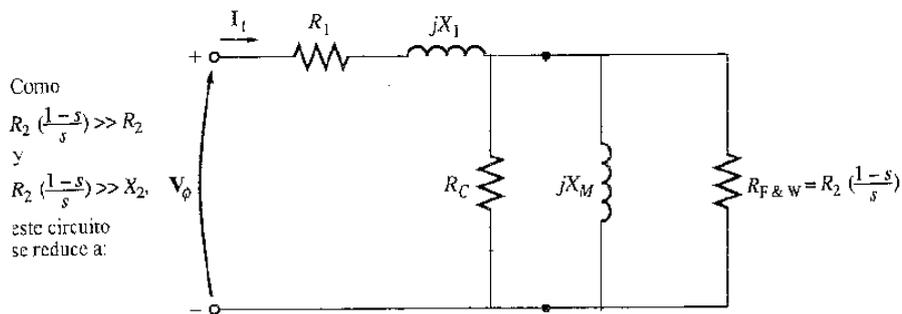
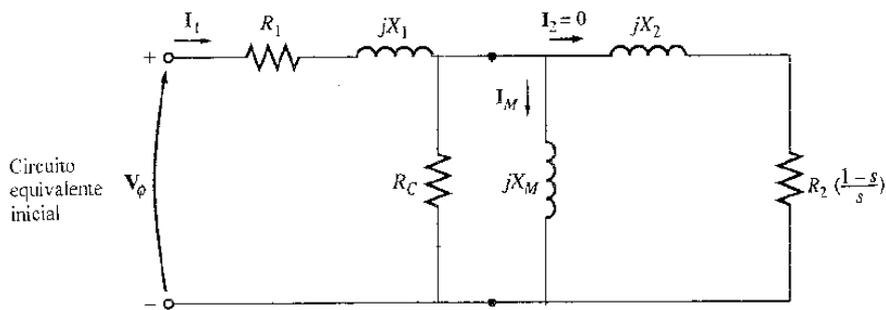


Figura b

Figura N° 2.8 a) prueba del motor y b) Circuito equivalente
 Fuente: Chapman (2000)

En este motor, en condiciones de vacío, la potencia de entrada medida por los vatímetros debe ser igual a las pérdidas en el motor. Las pérdidas en el cobre del rotor son despreciables debido a que la corriente I_2 , es *extremadamente* pequeña [debido a la gran resistencia de la carga $R_2\left(\frac{1-s}{s}\right)$, y por tanto puede ser despreciada. Las pérdidas en el cobre del estator están dadas por:

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \dots\dots\dots (2.39)$$

Por consiguiente, la potencia de entrada debe ser igual a:

$$P_{in} = P_{SCL} + P_{núcleo} + P_{F\&W} + P_{misc} \dots\dots\dots(2.40)$$

$$P_{in} = 3I_1^2 R_1 + P_{rot} \dots\dots\dots (2.41)$$

Donde P_{rot} son las pérdidas rotacionales del motor:

$$P_{rot} = P_{núcleo} + P_{F\&W} + P_{misc} \dots\dots\dots (2.42)$$

Entonces, dada la potencia de entrada al motor, se pueden determinar las pérdidas rotacionales de la máquina.

El circuito equivalente que describe la operación del motor en esta condición contiene las resistencias R_c y $R_2(\frac{1-s}{s})$, en paralelo con la reactancia de magnetización X_M . La corriente necesaria para establecer el campo magnético es muy grande en un motor de inducción debido a la alta reluctancia de su entrehierro, de modo que la reactancia X_M será mucho menor que las resistencias en paralelo con ella, y el factor de potencia total de entrada será muy pequeño. Con esa gran corriente en atraso, la mayoría de la caída de voltaje se producirá a través de las componentes inductivas del circuito. La impedancia de entrada equivalente es entonces aproximadamente

$$|Z_{eq}| = \frac{V_\phi}{I_{1,nl}} \approx X_1 + X_M \dots\dots\dots(2.43)$$

Y si X_1 se puede encontrar de alguna otra forma, la impedancia de magnetización X_M será conocida para el motor.

- **Prueba DC para determinar la resistencia del estator**

La resistencia del rotor R_2 juega un papel crítico en la operación de un motor de inducción. Entre otras cosas, determina la forma de la curva par velocidad al establecer la velocidad a la cual ocurre el par máximo. Para determinar la resistencia total del circuito del motor, se

puede aplicar al motor una prueba estándar, llamada *prueba de rotor bloqueado*, sin embargo, esta prueba determina sólo la resistencia *total*. Para encontrar la resistencia aproximada del rotor R_2 es necesario conocer R_1 de modo que ésta se pueda restar de la total.

Existe una prueba para R_1 que básicamente, se aplica un voltaje dc a los devanados del estator del motor de inducción. Puesto que la corriente es dc, no hay voltaje inducido en el circuito del rotor y en éste no fluye corriente resultante. Así mismo, la reactancia a corriente directa del motor es cero. Entonces, la única cantidad que limita el flujo de corriente en el motor es la resistencia del estator, y por tanto, ésta puede ser determinada.

El circuito básico para la prueba aparece en la figura 7-53. Esta figura muestra una fuente de potencia de conectada a dos de los tres terminales de un motor de inducción conectado en Y. Para realizar la prueba, se ajusta la corriente del estator al valor nominal y se mide el voltaje en los terminales. La corriente en los devanados del estator se ajusta al valor nominal para que los devanados se calienten a la misma temperatura que tendrían durante la operación normal (recuérdese que la resistencia del devanado es función de la temperatura).

En la figura 2.9, la corriente fluye a través de dos de los devanados, de modo que la resistencia total en el camino de la corriente es $2R_1$ entonces:

$$2R_1 = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \dots\dots\dots(2.44)$$

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \dots\dots\dots(2.45)$$

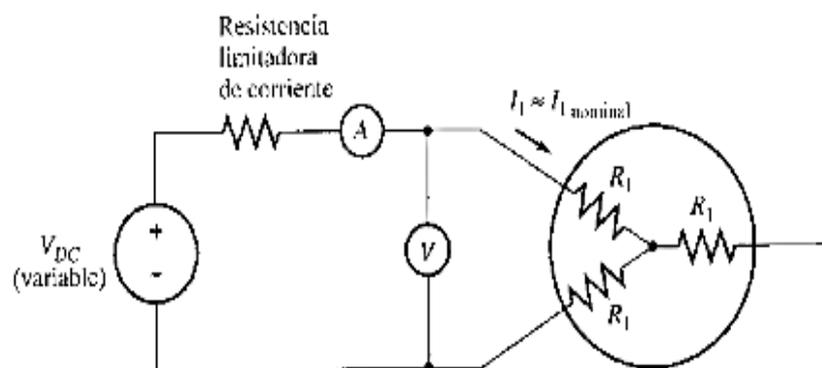


Figura N° 2.9 Prueba DC para determinar la resistencia del estator
Fuente: Chapman (2000)

Conociendo este valor de R_1 se pueden determinar las pérdidas en el cobre del estator en vacío; las pérdidas rotacionales se pueden deducir de la diferencia entre la potencia de entrada en vacío y las pérdidas en el cobre del estator.

El valor de R_1 calculado de esta forma no es muy preciso puesto que se desprecia el efecto pelicular que ocurre cuando se aplica voltaje ac a los devanados. En la norma 112 de la IEEE se encuentran más detalles relacionados con la corrección por temperatura y efecto pelicular.

- **Prueba de rotor bloqueado**

La tercera prueba que se puede realizar en un motor de inducción para determinar los parámetros de circuito se llama *prueba de rotor bloqueado* o algunas veces *prueba de rotor enclavado*. Durante esta prueba que corresponde a la de cortocircuito del transformador, se bloquea o enclava el rotor de tal forma que *no se pueda mover*, se aplica voltaje al motor y se miden el voltaje, la corriente y la potencia resultantes.

La figura N° 2.10 - a muestra las conexiones para realizar la prueba de rotor bloqueado. Para llevar a cabo la prueba de rotor bloqueado, se aplica un voltaje ac al estator y se ajusta el flujo de corriente al valor aproximado de plena carga. Cuando la corriente está en su valor de plena carga, se miden el voltaje, la corriente y la potencia resultante que fluyen hacia el motor.

En la figura N° 2.10 - b se muestra el circuito equivalente para esta prueba. Nótese que como el rotor se encuentra quieto, el deslizamiento es $s = 1$ y, por tanto, la resistencia del rotor $\frac{R_2}{s}$ es justamente igual a R_2 , (un valor muy pequeño). Puesto que R_2 , y X_2 , son tan pequeños, casi toda la corriente de entrada fluirá a través de ellas en lugar de hacerlo a través de la reactancia de magnetización X_M , que es mucho mayor. En estas condiciones, el circuito parece la combinación serie de R_1, X_1, R_2, X_2 ,

Sin embargo, esta prueba presenta un problema. En operación normal, la frecuencia del estator es la frecuencia de la línea del sistema de potencia (50 o 60 Hz). En condiciones de arranque, el rotor también está a la frecuencia de la línea. Sin embargo, en condiciones de operación normal, el deslizamiento de la mayoría de los motores es tan sólo de 2 ó 4% y la frecuencia resultante en el rotor está en un rango de 1 a 3 Hz, lo cual crea un problema en cuanto que la frecuencia de la línea no representa las condiciones de operación normal del rotor. Puesto que la resistencia efectiva del rotor es una función de la frecuencia para motores de diseño clases B y C, la frecuencia incorrecta del rotor puede llevar a obtener resultados falsos en la prueba. En una situación típica se utiliza una frecuencia de 25% o menos de la frecuencia nominal. Aunque esta aproximación es aceptable para rotores de resistencia constante (diseños clases A y D), no es aplicable cuando se trata de encontrar la resistencia normal de rotor en un rotor de resistencia variable. Debido a estos y otros

problemas similares, se debe tener mucho cuidado al realizar las mediciones durante estas pruebas.

Después que se han fijado el voltaje y la frecuencia para las pruebas, el flujo de corriente en el motor se ajusta con rapidez cerca del valor nominal y se miden la potencia, el voltaje y la corriente de entrada, antes que el rotor se caliente demasiado. La potencia de entrada al motor está dada por

$$P = \sqrt{3} V_T I_L \cos\theta \quad (\dots\dots\dots 2.46)$$

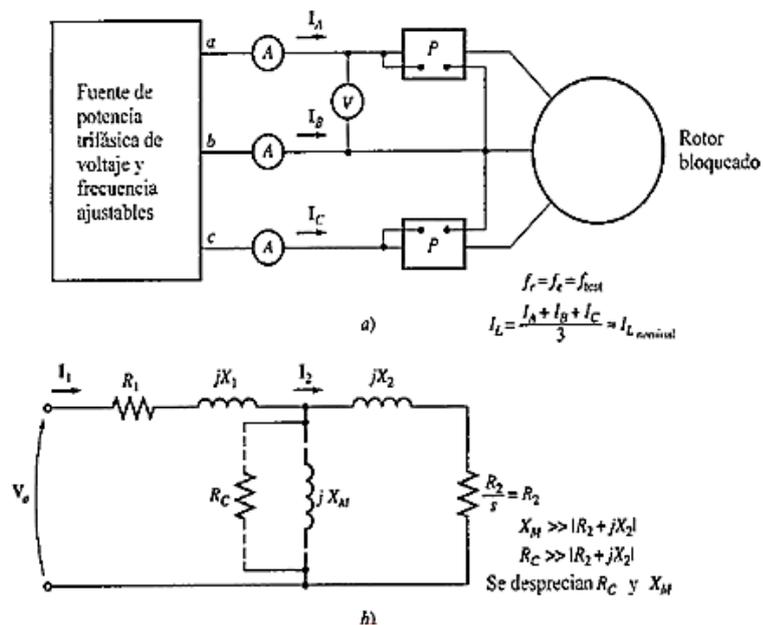


Figura N° 2.10 Prueba de rotor bloqueado para un motor de inducción: A) Circuito de prueba; b) Circuito equivalente del motor.

Fuente: Chapman (2000)

De modo que el factor de potencia de rotor bloqueado se puede encontrar como

$$FP = \cos\theta = \frac{P_{in}}{\sqrt{3} V_T I_L} \quad (\dots\dots\dots 2.47)$$

Y el ángulo de impedancia θ es justamente igual al coseno inverso de PF.

La magnitud de la impedancia total en el circuito del motor es

$$|Z_{LR}| = \frac{V_\phi}{I_1} = \frac{V_\phi}{\sqrt{3} I_L} \dots\dots\dots(2.48)$$

y el ángulo de la impedancia total es θ , En consecuencia,

$$|Z_{LR}| = R_{LR} + jX_{LR} \dots\dots\dots(2.49)$$

$$= |Z_{LR}| \cos\theta + j|Z_{LR}| \sin\theta \dots\dots\dots (2.50)$$

La resistencia de rotor bloqueado R_{LR} es igual a

$$R_{LR} = R_1 + R_2 \dots\dots\dots(2.51)$$

Mientras que la reactancia de rotor bloqueado X'_{RL} es igual a

$$X'_{RL} = X'_1 + X'_2 \dots\dots\dots(2.52)$$

Donde X'_1 y X'_2 , son las reactancias del estator y del rotor a la frecuencia de prueba, respectivamente.

La resistencia del rotor R_2 se puede encontrar a partir de

$$R_2 = R_{LR} - R_1 \dots\dots\dots(2.53)$$

Donde R_1 se determinó de la prueba dc. La reactancia total del rotor referida al estator también se puede encontrar. Puesto que la reactancia es directamente proporcional a la frecuencia, la reactancia equivalente total a la frecuencia de operación normal se puede encontrar como

$$X_{LR} = \frac{f_{nominal}}{f_{test}} X'_{RL} = X_1 + X_2 \dots\dots\dots(2.54)$$

Por desgracia, no hay una forma sencilla de separar las contribuciones de las reactancias recíprocas del rotor y estator. Durante años, la experiencia ha demostrado que las reactancias del rotor y del estator son proporcionales en motores de ciertos tipos de diseño. En la práctica corriente, no hay problema real al analizar X_{LR} puesto que la reactancia es la suma de $X_1 + X_2$ en todas las ecuaciones del par.

“Reglas prácticas” para dividir las reactancias del circuito del rotor y del estator.

Tabla N° 2.1

Valores de reactancia del estator y rotor.

	X_1 y X_2 como funciones de X_{LR}	
Diseño del rotor	X_1	X_2
Rotor devanado	$0.5 X_{LR}$	$0.5 X_{LR}$
Diseño A	$0.5 X_{LR}$	$0.5 X_{LR}$
Diseño B	$0.4 X_{LR}$	$0.6 X_{LR}$
Diseño C	$0.3 X_{LR}$	$0.7 X_{LR}$
Diseño D	$0.5 X_{LR}$	$0.5 X_{LR}$

Fuente: Chapman (2000)

2.2.6. Aplicación de condensadores en el control de pérdidas de potencia

A. Reducción de corrientes después de realizar la corrección del factor de potencia

Cuando se realiza la corrección del factor de potencia desde la potencia reactiva Q_1 a Q_2 el factor de potencia aumenta, y esto ocasionará una disminución de la corriente en los alimentadores.

Cabe destacar que si la corriente disminuye las pérdidas óhmicas y la caída de tensión disminuirán ya que son directamente proporcionales.

La corriente del alimentador para la potencia reactiva inicial se determina:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} V_L f p_1} \dots\dots\dots(2.55)$$

Ahora bien, cuando se ha realizado la corrección del factor de potencia, la corriente en el alimentador se calcula de la siguiente manera:

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} V_L f p_2} \dots\dots\dots(2.56)$$

Y considerando que la potencia activa y la tensión entre las líneas son constantes, al hacer la corrección del factor de potencia, la corriente en el alimentador se calcula así:

$$I_2 = \frac{f p_1}{f p_2} I_1 \dots\dots\dots(2.57)$$

Ahora, si se quiere conocer el porcentaje de reducción de corriente, se tiene entonces:

$$\%_{re} = \frac{I_1 - I_2}{I_1} * 100 \dots\dots\dots(2.58)$$

Sustituyendo

$$\%_{re} = \left(1 - \frac{f p_1}{f p_2}\right) * 100 \dots\dots\dots(2.59)$$

Este porcentaje expresa la reducción de corriente en el alimentador, después de haber realizado la corrección del factor de potencia. En el gráfico se muestran las curvas del porcentaje de reducción de corriente para distintos valores del factor de potencia

actual (fp_1) y los distintos valores deseados del factor de potencia (fp_2).

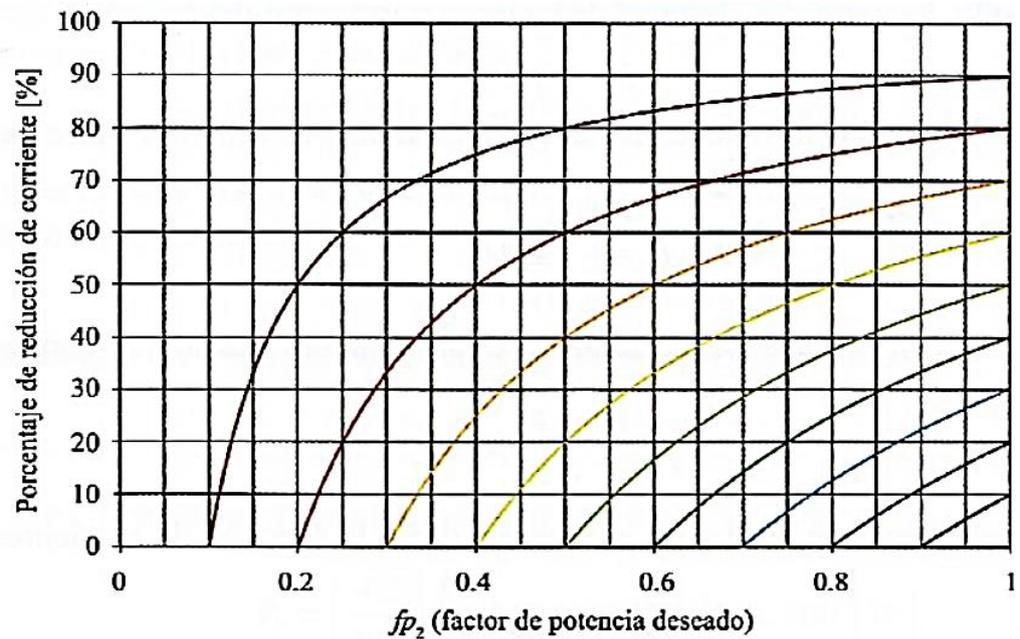


Figura N° 2.11 Porcentaje de reducción de corriente

Fuente: Elaboración propia

B. Reducción de pérdidas óhmicas conductor y motor

Las pérdidas óhmicas en un conductor eléctrico dependen de la resistencia del conductor y del cuadrado de la corriente que lo atraviesa; entre más potencia activa es transmitida más alto es el factor de potencia y más baja es la corriente, al aumentar el factor de potencia disminuyen las pérdidas en los conductores ubicados aguas arriba del punto en el que se llevara a cabo la corrección.

Las perdidas óhmicas se analizaran para una distancia de x m a partir del transformador hasta el motor, tal como se muestra en la siguiente figura.

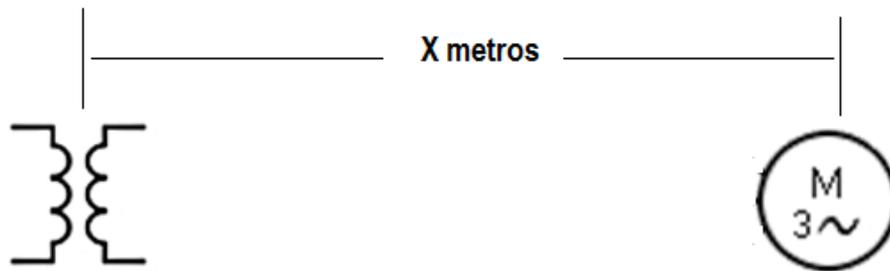


Figura N° 2.12 Pérdidas óhmicas en un conductor eléctrico de x metros
Fuente: Elaboración propia

Las pérdidas antes de hacer la corrección del factor de potencia se expresan así:

$$P_{conductor\ 1} = I_1^2 R \dots\dots\dots (2.60)$$

Del mismo modo, las pérdidas después de hacer la corrección del factor de potencia:

$$P_{conductor\ 2} = I_2^2 R \dots\dots\dots (2.61)$$

Y ahora considerando invariable la resistencia del conductor, la relación entre pérdidas se calcula:

$$P_{conductor\ 2} = \left(\frac{I_2}{I_1}\right) P_{conductor\ 1} \dots\dots\dots (2.62)$$

El porcentaje de disminución de pérdidas en el conductor cuando se corrige el factor de potencia, se calcula:

El porcentaje de disminución de pérdidas en el conductor cuando se corrige el factor de potencia, se calcula:

$$\%_{rp} = \left(\frac{P_{conductor\ 1} - P_{conductor\ 2}}{P_{conductor\ 1}}\right) * 100 \dots\dots\dots (2.63)$$

$$\%_{rp} = \left(1 - \left(\frac{fp_1}{fp_2}\right)^2\right) * 100 \dots\dots\dots (2.64)$$

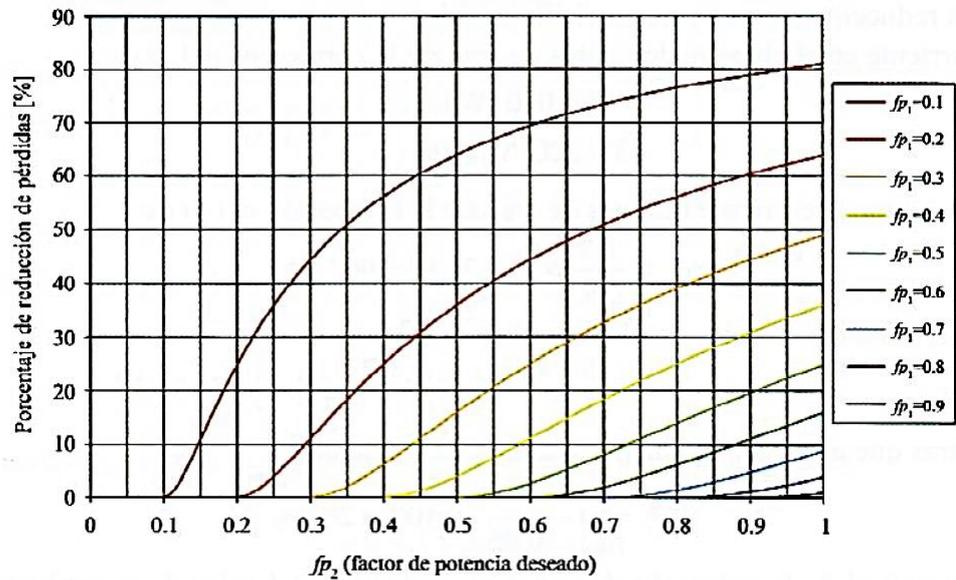


Figura N° 2.13 Porcentaje de reducción de pérdidas en un conductor
Fuente: Elaboración propia

Las pérdidas óhmicas en el motor se analizarán en las resistencias de los devanados del rotor y estator. Siendo I_2 la corriente luego de la corrección del factor de potencia las formulas a emplear serán los siguientes:

$$\text{Pérdidas en el cobre del estator } P_{SCL} = 3I_1^2 R_{estator} \dots (2.65)$$

$$\text{Pérdidas en el cobre del rotor } P_{RCL} = 3I_2^2 R_R \dots (2.66)$$

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1. Método, y alcance de la investigación

3.1.1. Método de la investigación

El método que se aplicó en la investigación fue el experimental con aplicación dentro de la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC, por lo que según Hernández y otros (2014), una investigación de tipo experimental es la manipulación de las variables para el análisis de los resultados, debido a que se aplicaron los condensadores para visualizar la reducción de pérdidas y controlar adecuadamente las condiciones de los motores trifásicos [29].

3.1.2. Alcance de la investigación

Asimismo, la investigación tuvo un alcance descriptivo-explicativo, tal como lo indican Hernández, y otros (2014). Es descriptivo para evaluar la situación actual del funcionamiento de los motores trifásicos, analizando y controlando las pérdidas generadas, y observando los costos que estos producen. Y explicativo, debido al haber realizado la implementación de los condensadores se generó resultados alentadores en el nivel de pérdidas (factor de potencia), eficiencia y facturación de energía [29].

3.2. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación que se empleó fue el descriptivo comparativo porque se recoge la información actualizada de varias muestras sobre un mismo objeto de investigación y lo caracteriza sobre la base de una comparación.

$$M_1 \rightarrow O_1 \dots\dots\dots (3.1)$$

$$M_2 \rightarrow O_2 \dots \dots \dots (3.2)$$

$$O_1 = \approx \neq O_2 \dots \dots \dots (3.3)$$

Dónde:

M_1 y M_2 Son muestras del estudio (Pérdida de potencia activa)

O_1 y O_2 Son observaciones de la muestra (Pérdida de potencia activa) para obtener información relevante y tomar decisiones.

3.3. Población y muestra

La población viene a ser las pérdidas de potencia de los 38 motores de la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.

$$\eta = 38$$

La muestra es la pérdida de potencia de cinco tipos de motores.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se aplicó como técnicas test (pre – post), a fin de aplicarlos a las muestras establecidas en la presente investigación.

El instrumento fue una ficha de observación respecto a las pérdidas, utilizados para la recopilación de información. Asimismo se empleó un analizador de factor de potencia para determinar el estado del motor trifásico dentro de la UEA Morococha.

Marca	Cat.	Número de motor	HP	V	P (kW)	Hz	I1	F.P.I = Cos(φ1)	R1 ohmios	R2 ohmios	PSCL	PRCL	ΣPÉRDIDAS 1 kW
Motores Trifásico EQP III	Tipo I												
Motores Weg W22	Tipo II												
Motores Weg W22	Tipo III												

Figura N°3.1. Ficha de observación
Fuente: elaboración propia

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información

La Sociedad Minera Austria Duvaz SAC es una compañía con 111 años de vigencia cuyos capitales son 100% peruanos buscando el desarrollo del país.

Actualmente cuenta con una Unidad Económica Activa (UEA) que se encuentra en el distrito de Morococha, La Oroya y su oficina central se ubica en la ciudad de Lima (San Isidro). La modalidad de extracción es de socavón, de tal manera que la empresa es socialmente responsable que desde el inicio de sus operaciones se ha preocupado por el bienestar de los colaboradores y de la comunidad en la que realizan sus tareas de extracción mineral.

Dentro de la Unidad Económica Activa de la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC ubicada en Morococha se han encontrado un total de 38 motores trifásicos los cuales sirven para la operatividad de la planta de extracción.

Tabla N°4.1**Características de los motores**

Marca	Categoría	Cantidad	HP	V	Potencia (kW)	Hz
Motores Trifásico EQP III	Tipo I	4	400	460	298.4	60
Motores Weg W22	Tipo II	6	200	460	150	60
Motores Weg W22	Tipo III	8	100	460	74.6	60
Motores Removex AB	Tipo IV	12	75	460	55.95	60
Motores Flygth	Tipo V	8	58	460	43.27	60

Fuente: Sociedad Minera Austria Duvaz SAC (2018)

Entre los motores analizados se puede observar que existen de diversos tamaños dependiendo de los caballos de fuerza (HP). El 11% de los motores son de tipo I, es decir con 400 HP; el 16% de los mismos tiene una fuerza de 200 HP (tipo II); el 21% tienen una fuerza de 100 HP (tipo III); mientras que los motores con una fuerza de 75 HP (tipo IV) representan el 36% del total; y finalmente los motores de tipo V (58 HP) representan el 21% de los motores contabilizados.

Asimismo dependiendo de la categoría del motor es preciso señalar que la potencia varía. Dentro de la UEA Morococha se ha encontrado que los motores alcanzan una potencia que va desde los 43.27 kW, en motores de tipo V, hasta los 298.4 kW, en motores trifásicos de tipo I. Todos los motores usan un voltaje de 460 V.

Evaluando el factor de potencia mediante un medidor multifuncional EasyLogic-DM6000 de la firma Schneider, se encontró que en general los diversos motores tenían un factor de potencia promedio ($\text{Cos}\phi$) de 0.758

(Tabla N°4.2), mediante el cual se estimó la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la potencia aparente (S), esta última viene a ser la suma vectorial de las potencias anteriores.



Figura N°4.1. EasyLogic- DM600
Fuente: Sociedad Minera Austria Duvaz SAC (2018)

Tabla 4.2

Factor de potencia inicial

Marca	Categoría	Número de motor	HP	F.P. Inicial = $\text{Cos}(\varphi_1)$	Marca	Categoría	Número de motor	HP	F.P. Inicial = $\text{Cos}(\varphi_1)$
Motores Trifásico EQP III	Tipo I	1	400	0.75	Motores Removex AB	Tipo IV	2	75	0.73
	Tipo I	2	400	0.74		Tipo IV	3	75	0.72
	Tipo I	3	400	0.76		Tipo IV	4	75	0.72
	Tipo I	4	400	0.75		Tipo IV	5	75	0.75
Motores Weg W22	Tipo II	1	200	0.75	Motores Removex AB	Tipo IV	6	75	0.73
	Tipo II	2	200	0.76		Tipo IV	7	75	0.74
	Tipo II	3	200	0.72		Tipo IV	8	75	0.76
	Tipo II	4	200	0.76		Tipo IV	9	75	0.73
	Tipo II	5	200	0.77		Tipo IV	10	75	0.75
	Tipo II	6	200	0.75		Tipo IV	11	75	0.76
Motores Weg W22	Tipo III	1	100	0.74	Motores Flygth	Tipo V	12	75	0.76
	Tipo III	2	100	0.73		Tipo V	1	58	0.74
	Tipo III	3	100	0.73		Tipo V	2	58	0.74
	Tipo III	4	100	0.77		Tipo V	3	58	0.77
	Tipo III	5	100	0.75		Tipo V	4	58	0.72
	Tipo III	6	100	0.74		Tipo V	5	58	0.72
	Tipo III	7	100	0.72		Tipo V	6	58	0.75
	Tipo III	8	100	0.77		Tipo V	7	58	0.76
Motores Removex AB	Tipo IV	1	75	0.76		Tipo V	8	58	0.75

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.3

Cálculo de la Potencia Reactiva inicial Promedio (Q1)

Motor	F.P. Inicial = $\text{Cos}(\phi_1)$	Potencia Activa (P (kW))	Potencia Reactiva antes de la corrección (Q1 (kVAR))	Potencia Aparente (S (kVA))
Tipo I	0.75	298.40	263.16	397.87
Tipo II	0.75	150.00	132.29	200.00
Tipo III	0.75	74.60	65.79	99.47
Tipo IV	0.75	55.95	49.34	74.60
Tipo V	0.75	43.27	38.16	57.69

Fuente: Sociedad Minera Austria Duvaz SAC (2018)

De acuerdo a los valores críticos, para que un motor sea eficiente el factor de potencia debe ser mayor al 90% ($\text{Cos}\phi \geq 0.9$) de manera que se ha encontrado que los motores están funcionando en un estado deficiente, generando mayores consumos de energía y mayores pérdidas de potencia.

Dado que se determinó que los motores venían funcionando en un estado deficiente, con un bajo factor de potencia, se aplicó compensación reactiva para incrementar el factor a 0.95. Para ello se empleó el esquema vectorial como se observa en la Figura 4.2.

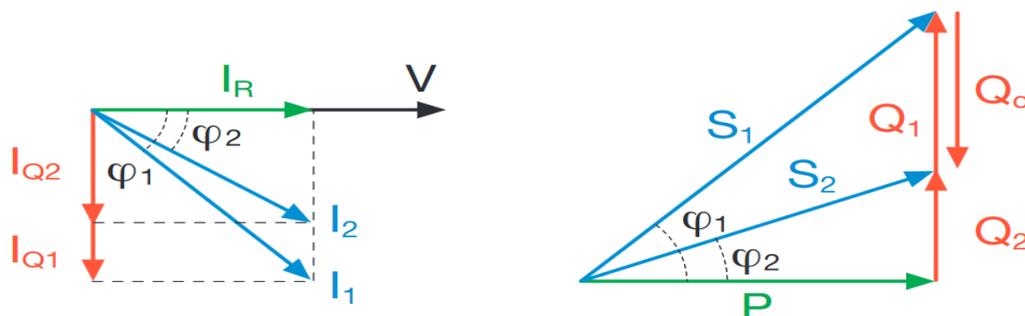


Figura N°4.2. Corrección de factor de potencia mediante condensadores.

Fuente: Tomado de Henríquez, y otros (2015)

Para determinar la potencia reactiva de compensación se empleó las siguientes formulas:

$$\phi_1 = \cos^{-1}(fp_1) \dots\dots\dots(4.1)$$

$$\phi_2 = \cos^{-1}(fp_2) \dots\dots\dots(4.2)$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P_{util}(\tan\phi_1 - \tan\phi_2) \dots\dots\dots(4.3)$$

En la tabla 4.4 se muestra el cálculo de potencia reactiva promedio de compensación que se aplicó a los 38 motores para mejorar el factor de potencia a 0.95.

Tabla 4.4
Calculo de Potencia reactiva promedio de compensación

Motor	F.P. Inicial = $\cos\phi_1$	F.P. Óptimo = $\cos\phi_2$ Aplicando condensadores	Potencia activa (kW)	Potencia Reactiva antes de la corrección (Q_1 (KVAR))	Potencia Reactiva después de la corrección (Q_2 (KVAR))	Potencia Reactiva de compensación ($Q_c=Q_1-Q_2$ (KVAR))
Tipo I	0.75	0.95	298.4	263.16	98.08	165.08
Tipo II	0.75	0.95	150	132.29	49.30	82.98
Tipo III	0.75	0.95	74.6	65.79	24.52	41.27
Tipo IV	0.75	0.95	55.95	49.34	18.39	30.95
Tipo V	0.75	0.95	43.27	38.16	14.22	23.94

Fuente: Tomado de Henríquez, y otros (2015)

Luego de aplicar la compensación de potencia reactiva se mejoró el factor de potencia como se muestra en la siguiente tabla.

La conexión de banco de condensadores se muestra en las figuras 4.4 y 4.5

Tabla 4.5

Factor de potencia después de la compensación reactiva.

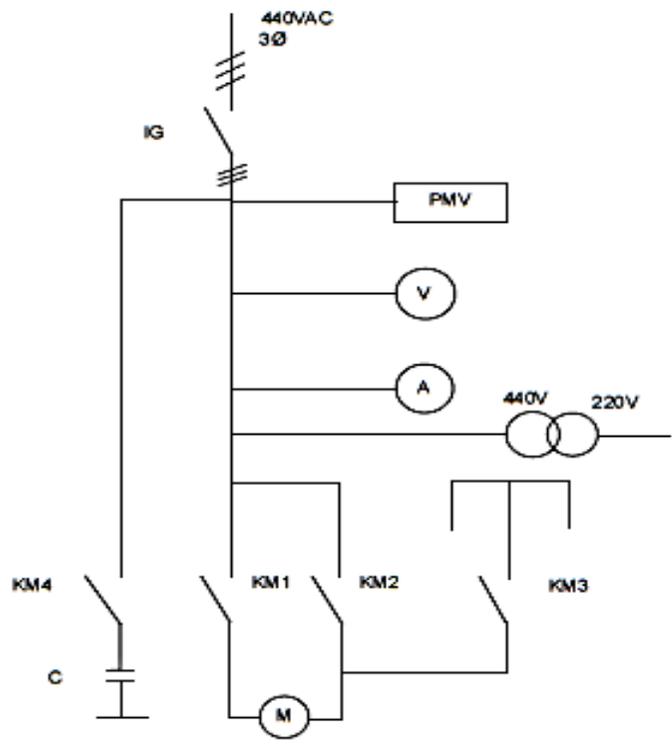
Marca	Categoría	Número de motor	HP	F.P. Inicial = Cos(φ 1)	Marca	Categoría	Número de motor	HP	F.P. Inicial = Cos(φ 1)
Motores Trifásico EQP III	Tipo I	1	400	0.95	Motores Removex AB	Tipo IV	2	75	0.96
	Tipo I	2	400	0.92		Tipo IV	3	75	0.95
	Tipo I	3	400	0.96		Tipo IV	4	75	0.95
	Tipo I	4	400	0.93		Tipo IV	5	75	0.94
Motores Weg W22	Tipo II	1	200	0.94	Motores Removex AB	Tipo IV	6	75	0.94
	Tipo II	2	200	0.95		Tipo IV	7	75	0.93
	Tipo II	3	200	0.96		Tipo IV	8	75	0.93
	Tipo II	4	200	0.97		Tipo IV	9	75	0.95
	Tipo II	5	200	0.95		Tipo IV	10	75	0.96
	Tipo II	6	200	0.95		Tipo IV	11	75	0.96
Motores Weg W22	Tipo III	1	100	0.94	Motores Flygth	Tipo V	1	58	0.94
	Tipo III	2	100	0.96		Tipo V	2	58	0.93
	Tipo III	3	100	0.96		Tipo V	3	58	0.95
	Tipo III	4	100	0.94		Tipo V	4	58	0.92
	Tipo III	5	100	0.95		Tipo V	5	58	0.93
	Tipo III	6	100	0.95		Tipo V	6	58	0.94
	Tipo III	7	100	0.92		Tipo V	7	58	0.96
	Tipo III	8	100	0.94		Tipo V	8	58	0.95
Motores Removex AB	Tipo IV	1	75	0.95		Tipo V	8	58	0.95

Fuente: Elaboración propia

La mejora del factor de potencia se puede observar en el medidor multifuncional EasyLogic-DM6000.



Figura N°4.3. EasyLogic- DM600
Fuente: Sociedad Minera Austria Duvaz SAC (2018)



LEYENDA

- IG INTERRUPTOR GENERAL
- KM1 CONTACTOR PRINCIPAL
- KM2 CONTACTOR TRIANGULO
- KM3 CONTACTOR ESTRELLA
- KM4 CONTACTOR DEL CONDENSADOR
-  TRANSFORMADOR DE CONTROL
- V VOLTIMETRO
- A AMPERIMETRO
- C CONDENSADOR
- ONL CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDO
- PMV RELE DE MAX. Y MIN AUSENC. Y SEC DE FASE

Figura N°4.4. Diagrama unifilar
Fuente: Sociedad Minera Austria Duvaz SAC (2018)

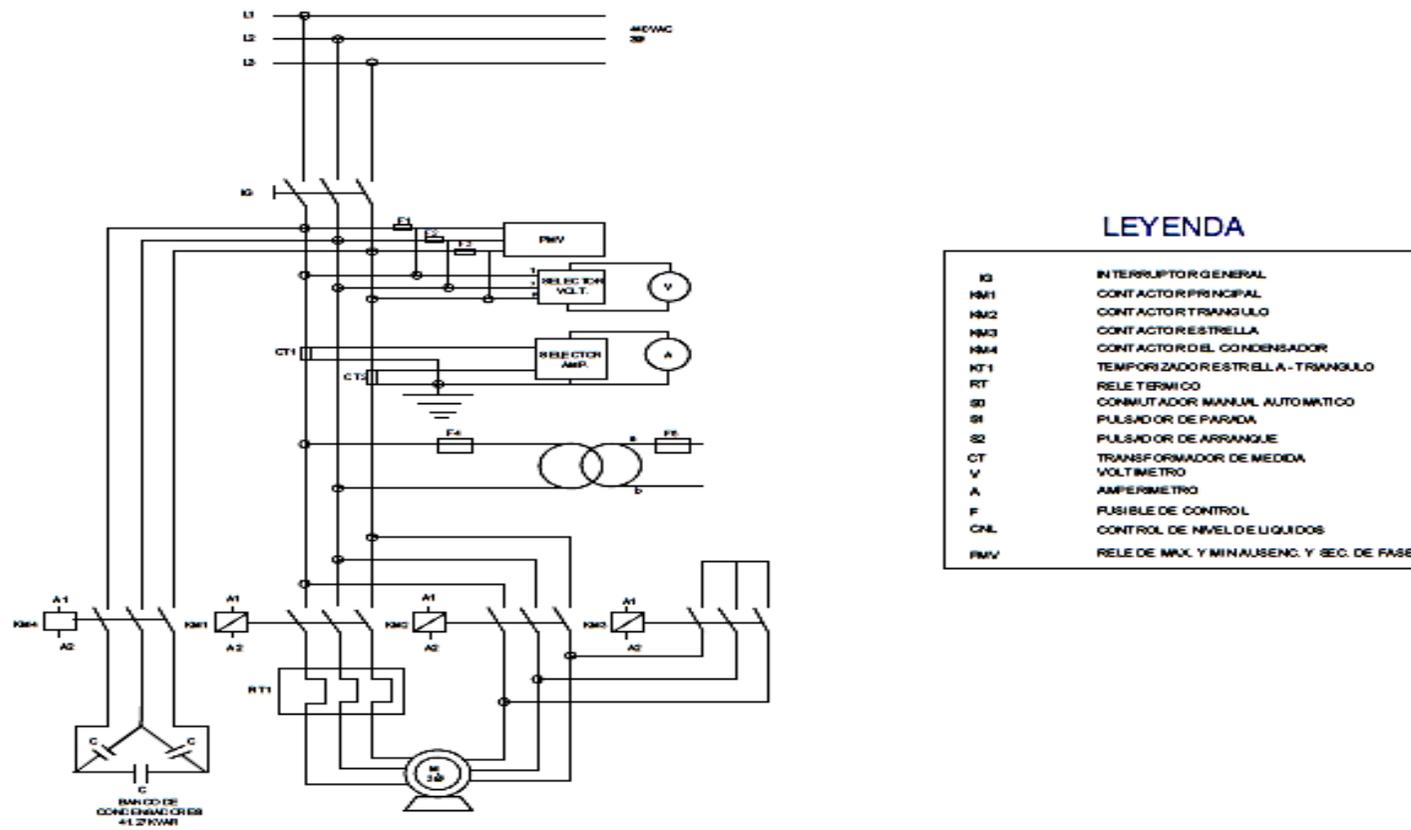


Figura N°4.5. Diagrama de cargas
Fuente: Sociedad Minera Austria Duvaz SAC (2018)

Para determinar el efecto de la aplicación de condensadores en el control de pérdidas potencia activa se analizó mediante el flujo de potencia.

Según el circuito del motor de inducción las pérdidas de potencia activa se pueden determinar de la suma de:

- Pérdidas en el cobre del estator P_{SCL}
- Pérdidas en el núcleo P_n
- Pérdidas en el cobre del rotor P_{RCL}
- Pérdidas por rozamiento propio y por rozamiento con el aire ($P_{F\&W}$)
- Pérdidas misceláneas

Como las pérdidas en el núcleo, por rozamiento y misceláneas son menores en comparación al resto y como se están trabajando con motores casi nuevos no se tomó en cuenta en la investigación.

Las fórmulas que se emplearon para determinar las pérdidas en el rotor y estator antes y después de la compensación son las siguientes:

Antes

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \dots\dots\dots (4.4)$$

$$P_{RCL} = 3I_1^2 R_2 \dots\dots\dots (4.5)$$

Después

$$P_{SCL} = 3I_2^2 R_1 \dots\dots\dots (4.6)$$

$$P_{RCL} = 3I_2^2 R_2 \dots\dots\dots (4.7)$$

Para determinar el valor de las resistencias del estator (R_1) y rotor (R_2) se realizaron pruebas a los motores.

La prueba que se empleó fue de corriente directa para hallar la resistencia del estator como se muestra en la figura 4.6, el cual consistió en

ingresar una tensión en continua y medir la corriente. Aplicando la siguiente formula se obtiene R_1

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \dots\dots\dots (4.8)$$

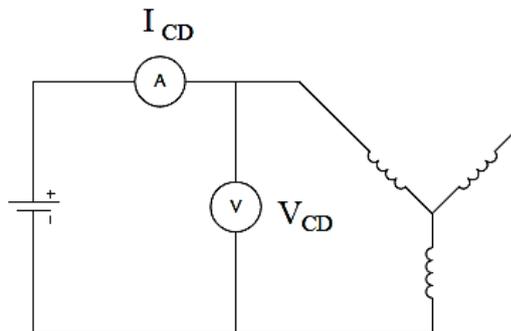


Figura N°4.6. Prueba de corriente continúa
Fuente: Elaboración propia

Para determinar la resistencia del rotor se aplicó la prueba del rotor bloqueado el cual consiste en incrementar la tensión de entrada del motor enclavando el eje del motor hasta que el motor alcance la corriente nominal o plena carga como se muestra en la figura 4.7. Para obtener R_2 se aplica las siguientes formulas:

Como la resistencia del rotor bloqueado es $R_{LR} = R_1 + R_2$, como sabemos el valor de R_1 , entonces $R_2 = R_{LR} - R_1$

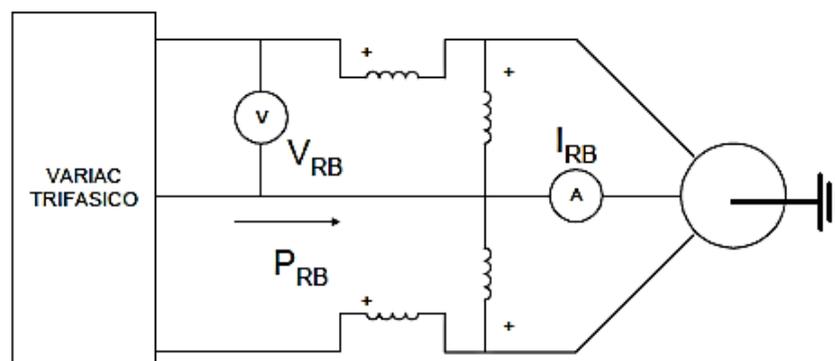


Figura N°4.7. Prueba de rotor bloqueado
Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos después de las pruebas son las siguientes.

Tabla N° 4.6

Valores de resistencias de los motores

CALCULO DE PARAMETROS DE LOS MOTORES DE INDUCCION				CALCULO DE PARAMETROS DE LOS MOTORES DE INDUCCION			
Marca	Categoría	R1 ohmios	R2 ohmios	Marca	Categoría	R1 ohmios	R2 ohmios
Motores Trifásico EQP III	Tipo I	0.12	0.08	Motores Removex AB	Tipo IV	0.19	0.083
	Tipo I	0.11	0.067		Tipo IV	0.2	0.18
	Tipo I	0.09	0.075		Tipo IV	0.3	0.12
	Tipo I	0.13	0.05		Tipo IV	0.54	0.06
Motores Weg W22	Tipo II	0.09	0.083		Tipo IV	0.32	0.05
	Tipo II	0.085	0.07		Tipo IV	0.12	0.081
	Tipo II	0.07	0.064		Tipo IV	0.16	0.43
	Tipo II	0.123	0.08		Tipo IV	0.07	0.075
	Tipo II	0.115	0.108		Tipo IV	0.08	0.051
	Tipo II	0.116	0.09		Tipo IV	0.05	0.06
Motores Weg W22	Tipo III	0.07	0.06		Tipo IV	0.23	0.067
	Tipo III	0.135	0.15	Motores Flygth	Tipo V	0.115	0.112
	Tipo III	0.14	0.13		Tipo V	0.13	0.082
	Tipo III	0.113	0.093		Tipo V	0.124	0.12
	Tipo III	0.056	0.05		Tipo V	0.098	0.1
	Tipo III	0.116	0.12		Tipo V	0.32	0.23
	Tipo III	0.113	0.11		Tipo V	0.23	0.21
	Tipo III	0.087	0.112		Tipo V	0.17	0.11
Motores Removex AB	Tipo IV	0.093	0.05		Tipo V	0.22	0.025

Fuente: Elaboración propia

En la investigación también se analizó la reducción de corriente después de realizar la compensación, para lo cual se empleó las siguientes formulas:

Antes

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} V_L f p_1} \dots\dots\dots(4.9)$$

Después

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} V_L f p_2} \dots\dots\dots(4.10)$$

Los resultados obtenidos fueron los siguientes

Tabla N° 4.7
Análisis de corriente

REDUCCIÓN DE CORRIENTES				REDUCCIÓN DE CORRIENTES				
Marca	Categoría	I1	I2	Marca	Categoría	I1	I2	
Motores Trifásico EQP III	Tipo I	499.37	394.24	Motores Removex AB	Tipo IV	96.20	73.15	
	Tipo I	506.11	407.09		Tipo IV	97.53	73.92	
	Tipo I	492.80	390.13		Tipo IV	97.53	73.92	
	Tipo I	499.37	402.71		Tipo IV	93.63	74.71	
Motores Weg W22	Tipo II	251.02	200.28		Tipo IV	96.20	74.71	
	Tipo II	247.72	198.18		Tipo IV	94.90	75.51	
	Tipo II	261.48	196.11		Tipo IV	92.40	75.51	
	Tipo II	247.72	194.09		Tipo IV	96.20	73.92	
	Tipo II	244.50	198.18		Tipo IV	93.63	73.15	
	Tipo II	251.02	198.18		Tipo IV	92.40	73.15	
Motores Weg W22	Tipo III	126.53	99.61		Tipo IV	92.40	74.71	
	Tipo III	128.26	97.53		Motores Flygth	Tipo V	73.39	57.78
	Tipo III	128.26	97.53			Tipo V	73.39	58.40
	Tipo III	121.60	99.61			Tipo V	70.53	57.17
	Tipo III	124.84	98.56			Tipo V	75.43	59.03
	Tipo III	126.53	98.56			Tipo V	75.43	58.40
	Tipo III	130.04	101.77			Tipo V	72.41	57.78
	Tipo III	121.60	99.61			Tipo V	71.46	56.57
Motores Removex AB	Tipo IV	92.40	73.92			Tipo V	72.41	57.17

Fuente: Elaboración propia

Luego de obtener los datos de resistencia y corriente en los motores de inducción se obtuvieron las pérdidas de potencia activa y se compró el efecto de la aplicación de condensadores en el control de pérdidas.

Los resultados obtenidos de toda la investigación fueron:

Tabla N° 4.8

Pérdidas de potencia activa de los motores

Marca	Categoría	ΣΠÉRDIDAS 1 kW	ΣΠÉRDIDAS 2 kW	Marca	Categoría	ΣΠÉRDIDAS 1 kW	ΣΠÉRDIDAS 2 kW
Motores Trifásico EQP III	Tipo I	149.62	93.25	Motores Removex AB	Tipo IV	7.58	4.38
	Tipo I	136.02	88.00		Tipo IV	10.84	6.23
	Tipo I	120.21	75.34		Tipo IV	11.99	6.88
	Tipo I	134.66	87.58		Tipo IV	15.78	10.05
Motores Weg W22	Tipo II	32.70	20.82		Tipo IV	10.27	6.19
	Tipo II	28.53	18.26		Tipo IV	5.43	3.44
	Tipo II	27.49	15.46		Tipo IV	15.11	10.09
	Tipo II	37.37	22.94		Tipo IV	4.03	2.38
	Tipo II	39.99	26.27		Tipo IV	3.45	2.10
	Tipo II	38.94	24.27		Tipo IV	2.82	1.77
Motores Weg W22	Tipo III	6.24	3.87		Tipo IV	7.61	4.97
	Tipo III	14.07	8.13	Motores Flygth	Tipo V	3.67	2.27
	Tipo III	13.33	7.71		Tipo V	3.43	2.17
	Tipo III	9.14	6.13		Tipo V	3.64	2.39
	Tipo III	4.96	3.09		Tipo V	3.38	2.07
	Tipo III	11.33	6.88		Tipo V	9.39	5.63
	Tipo III	11.31	6.93		Tipo V	6.92	4.41
	Tipo III	8.83	5.92		Tipo V	4.29	2.69
Motores Removex AB	Tipo IV	3.66	2.34		Tipo V	3.85	2.40

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.8 se puede notar claramente el efecto de la aplicación de condensadores para reducir las pérdidas de potencia activa en los 38 motores.

El análisis de control de pérdidas también incide en reducción de consumo de energía reactiva como se ve en la figura 4.8

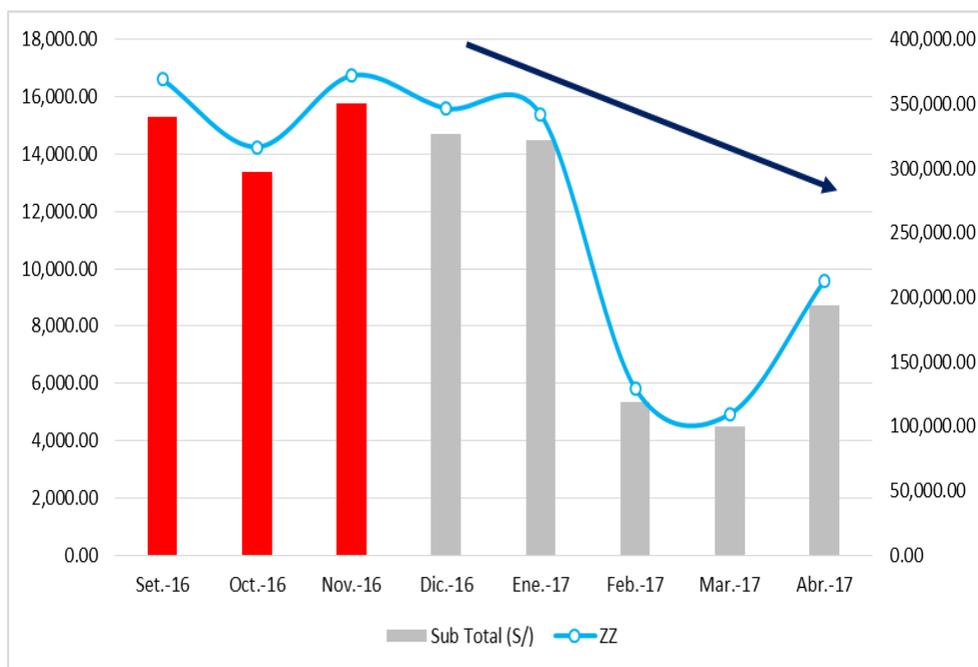


Figura N°4.8. Reducción de consumo de energía reactiva (S/ y KVAR).

Fuente: Tomado de Henríquez, y otros (2015)

Según la Tabla 4.9 se puede notar que el factor de potencia incrementado, reduce notablemente también el consumo de energía reactiva.

Tabla N° 4.9

Reducción de pérdidas de energía reactiva

Motor	P (kW)	Energía Activa (KW-mes)	Energía Reactiva Antes (KVAR-mes)	Energía Reactiva Después (KVAR-mes)	Reducción de Energía Reactiva (KVAR-mes)
Tipo I	298.40	214,848.00	189,478.13	118,861.00	70,617.12
Tipo II	150.00	108,000.00	95,247.05	59,749.16	35,497.88
Tipo III	74.60	53,712.00	47,369.53	29,715.25	17,654.28
Tipo IV	55.95	40,284.00	35,527.15	22,286.44	13,240.71
Tipo V	43.27	31,154.40	27,475.60	17,235.64	10,239.96
Total		447,998.40	395,097.45	247,847.50	147,249.95

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 4.10

Reducción de pérdidas de energía reactiva

Mes	Valor Unitario (S/)	Ahorro por Uso de Compensadores (S/ inc IGV)
Set-16	0.0415	0.00
Oct-16	0.0423	0.00
Nov-16	0.0424	0.00
Dic-16	0.0424	7,367.21
Ene-17	0.0424	7,367.21
Feb-17	0.0412	7,158.70
Mar-17	0.0410	7,123.95
Abr-17	0.0410	7,123.95

Fuente: Elaboración propia

Las tablas anteriores demuestran que existe una reducción de la pérdida de energía activa y reactiva, además los cálculos muestran que durante los meses de setiembre a noviembre de 2016 no hubo ahorro monetario, dado que no se emplearon condensadores, mientras que a partir de diciembre se observa un ahorro de 147,249 KVAR-mes y más de S/ 7.0 mil.

Asimismo, se redujo la corriente en 21%; mientras que la variación de las pérdidas se situó en un 37.7% por debajo de lo inicial después de la corrección de pérdidas con condensadores.

Se ha visto conveniente establecer que:

- El uso de los condensadores reduce significativamente las pérdidas en el estator de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC (segunda hipótesis específica).

- El uso de los condensadores reduce significativamente las pérdidas en vacío de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC (tercera hipótesis específica).
- El uso de los condensadores reduce significativamente las pérdidas en el núcleo de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC (cuarta hipótesis específica).

4.2. Análisis estadístico de los resultados

En la tabla siguiente se muestra la reducción de pérdidas de potencia activa luego de aplicar los condensadores.

Tabla N° 4.11

Pérdidas de potencia en kW

Número de motor	ΣΠÉΡΔΙΔΑΣ 1 kW	ΣΠÉΡΔΙΔΑΣ 2 kW
1	149.62	93.25
2	136.02	88.00
3	120.21	75.34
4	134.66	87.58
5	32.70	20.82
6	28.53	18.26
7	27.49	15.46
8	37.37	22.94
9	39.99	26.27
10	38.94	24.27
11	6.24	3.87
12	14.07	8.13
13	13.33	7.71
14	9.14	6.13
15	4.96	3.09
16	11.33	6.88
17	11.31	6.93
18	8.83	5.92

Número de motor	ΣΠÉΡΔΙΔΑΣ 1 kW	ΣΠÉΡΔΙΔΑΣ 2 kW
19	3.66	2.34
20	7.58	4.38
21	10.84	6.23
22	11.99	6.88
23	15.78	10.05
24	10.27	6.19
25	5.43	3.44
26	15.11	10.09
27	4.03	2.38
28	3.45	2.10
29	2.82	1.77
30	7.61	4.97
31	3.67	2.27
32	3.43	2.17
33	3.64	2.39
34	3.38	2.07
35	9.39	5.63
36	6.92	4.41
37	4.29	2.69
38	3.85	2.40

Fuente: Elaboración propia.

Los estadísticos descriptivos son los siguientes:

Tabla N° 4.12

Estadísticos Descriptivos

Descriptivos

PERD_TOTALES		Estadístico	Error estándar	
PERDIDAS_TOTALES_k W	PERDIDAS_1	Media	25,3126	
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	12,2553	
		Límite superior	38,3700	
	Media recortada al 5%	19,9994		
	Mediana	9,8300		
	Varianza	1578,087		
	Desviación estándar	39,72514		
	Mínimo	2,82		
	Máximo	149,62		
	Rango	146,80		
	Rango intercuartil	23,53		
	Asimetría	2,400	,383	
	Curtosis	4,611	,750	
	PERDIDAS_2	Media	15,9395	4,10966
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	7,6125	
		Límite superior	24,2664	
	Media recortada al 5%	12,5619		
Mediana	6,1600			
Varianza	641,795			
Desviación estándar	25,33368			
Mínimo	1,77			
Máximo	93,25			
Rango	91,48			
Rango intercuartil	13,54			
Asimetría	2,406	,383		
Curtosis	4,616	,750		

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que el promedio de pérdidas de potencia antes de aplicar condensadores y después es respectivamente es de 25.31 y 15.94 kW. Se observa claramente la reducción de pérdidas después de realizar la compensación de potencia reactiva.

En el grafico Q-Q se muestra la dispersión de los datos esto es debido a que las pérdidas de potencia dependen de la resistencia del estator y del rotor y estos son diferentes para cada tipo de motor. También se muestra que no existe mucha dispersión de los datos debido a que no pasan los índices de los residuales 3 y -3 dados por Montgomery D. (2002).

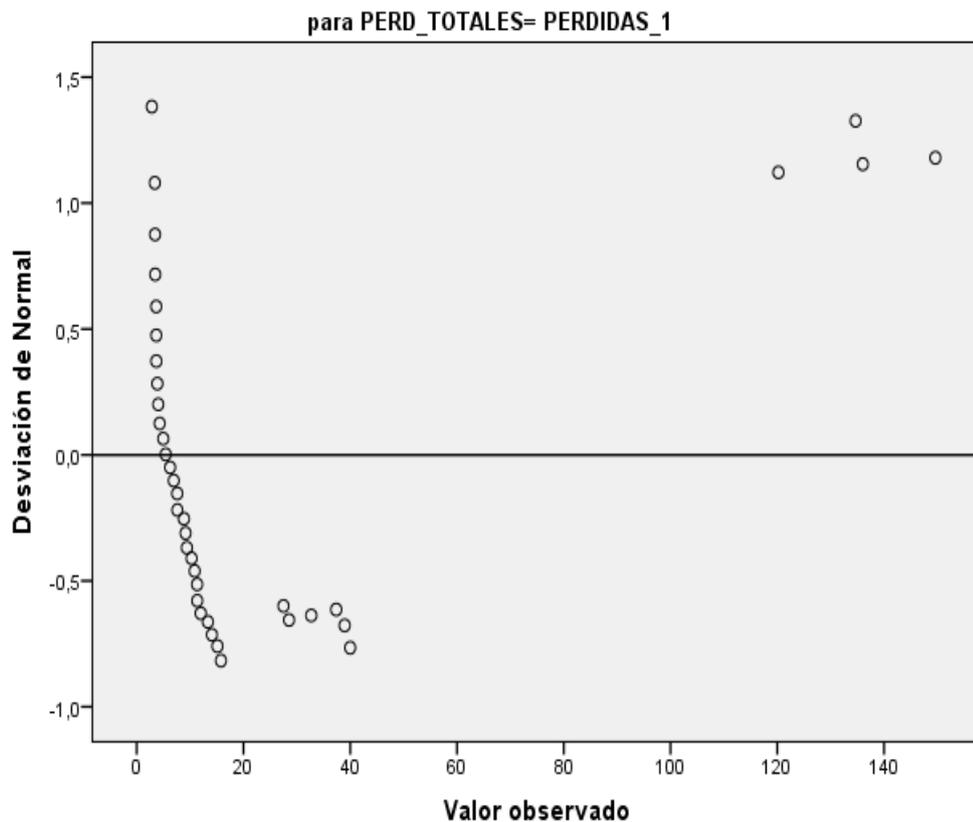


Figura N°4.9 Gráfico de dispersión Pérdidas de Potencia Antes de Aplicar Compensación Reactiva

Fuente: Elaboración propia

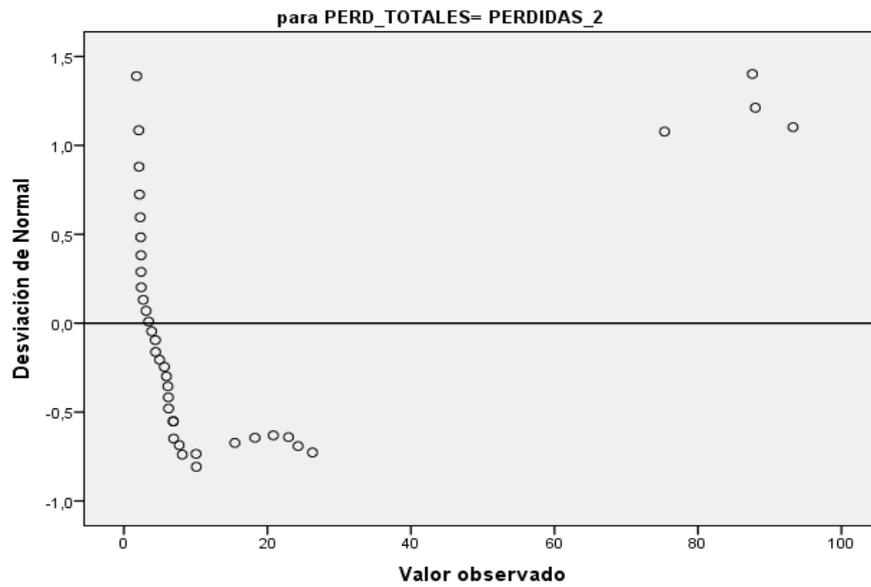


Figura N°4.10 Gráfico de dispersión Pérdidas de Potencia Después de Aplicar Compensación Reactiva
Fuente: Elaboración propia

Con el grafico de medias se puede observar la reducción de pérdidas de potencia.

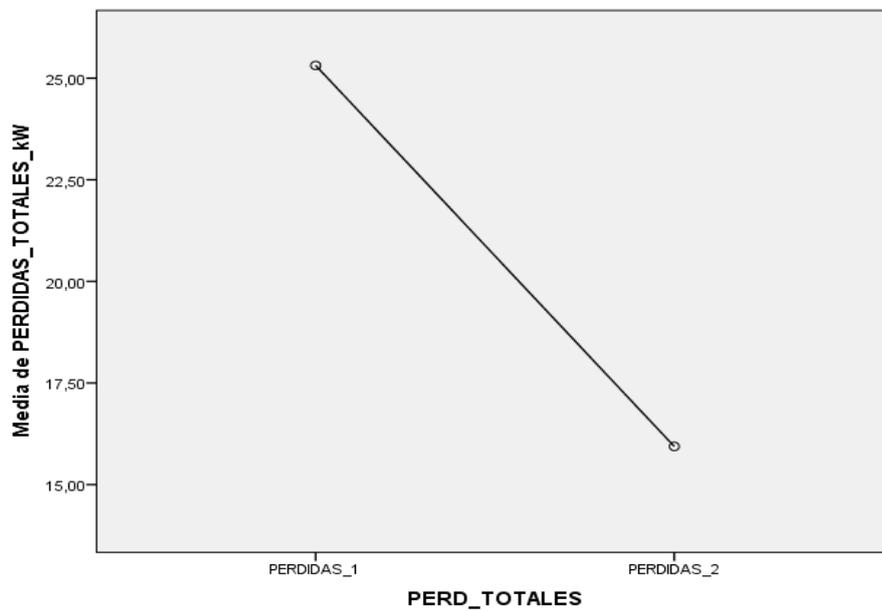


Figura N°4.11 Gráfico de medias
Fuente: Elaboración propia

El grafico de barras muestra la diferencia la reducción de pérdidas de potencia en proporción a las alturas.

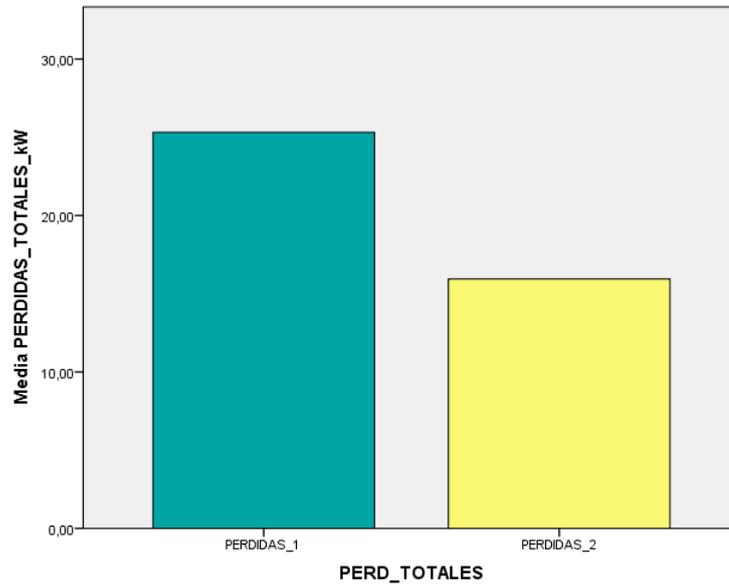


Figura N°4.12 Gráficos de Barras

Fuente: Elaboración propia

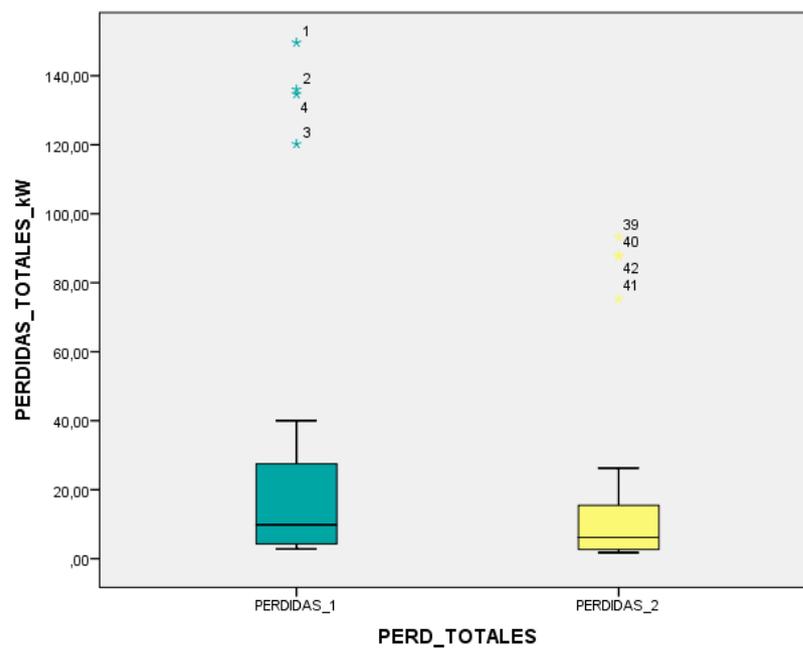


Figura N°4.13 Gráficos de cajas o bigotes

Fuente: Elaboración propia

4.3. Prueba de Hipótesis

La hipótesis alterna y nula planteada es la siguiente:

H₀: Si no se determina el efecto de la aplicación de condensadores mediante el análisis de compensación reactiva entonces no se controlará las pérdidas de potencia activa de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.

H₁: Si se determina el efecto de la aplicación de condensadores mediante el análisis de compensación reactiva entonces se controlará las pérdidas de potencia activa de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.

Una forma de validar la hipótesis es a través de las medias de los datos, es decir:

$$H_0 = u_1 = u_2 \dots\dots\dots (4.11)$$

$$H_1 = u_1 \neq u_2 \dots\dots\dots (4.12)$$

Tabla N° 4.13
Medias de los valores de pérdidas de potencia

PERD_TOTALES	Media	N
PERDIDAS_1	25,3126	38
PERDIDAS_2	15,9395	38
Total	20,6261	76

Fuente: Elaboración propia

Observando la tabla 4.3 se concluye que las medias son diferentes por lo cual aceptamos la hipótesis alterna y rechazamos a la hipótesis nula.

4.4. Discusión de resultados

Los resultados demuestran que el uso de capacitores permite que se reduzcan pérdidas generadas por los motores trifásicos. Estos resultados son de esperarse dado que Henríquez, y otros (2015) concluyeron que particularmente la fuerza de salida del motor, mantiene un punto óptimo

económico entre la disminución de las pérdidas óhmicas y la capacidad del banco y que un incremento del factor de potencia por encima de dicho valor, permite que las pérdidas se reduzcan considerablemente, generando más ahorro de energía. Además Velásquez (2016), señaló que uso de un reactivo que aumente el factor potencia mediante la instalación de un banco de condensadores, genera un ahorro de energía eléctrica muy importante en la industria, sin embargo es necesario implementar una cantidad exacta de reactivos, con la finalidad de darle más potencia y evitar el excesivo consumo de energía. Finalmente, Vargas (2017) después de la implementación de los bancos de condensadores redujo aproximadamente en S/ 500.00 soles mensuales el consumo de energía. Además se logró una reducción de un 30% en el consumo de energía eléctrica, pues antes de dicha implementación se efectuaba un bajo factor de potencia [17].

El condensador o también denominado capacitor opera de manera permanente durante el funcionamiento del motor y su importancia básica está relacionada con su función en el circuito de conexión eléctrica del motor, aislar al bobinado de arranque, bloqueando la fuerza contra electromotriz que se induce en él. Esta función es la que permite a los equipos de aire acondicionado suplir el relé para desconectar el bobinado de arranque. El capacitor de marcha solo deja pasar la corriente durante el tiempo que se demora en cargarse y dejar de conducir. Aislado de esta manera el devanado de arranque; esto hace que, conectando en el borne de salida al bobinado de arranque, haga las veces de un relé.

Cuando se utiliza asociado a un relé y a un capacitor de arranque, su propósito es el de mejorar el funcionamiento del compresor y controlar la fuerza contra electromotriz y bajar la reactiva (energía entre los receptores y la fuente, provoca pérdidas en los conductores, caídas de tensión en los mismos, y un consumo de energía suplementario que no es aprovechable directamente por los dispositivos; estando generalmente asociada a los campos magnéticos internos de los motores y transformadores. Se mide en KVAR. Como esta energía provoca sobrecarga en las líneas

transformadoras y generadoras, sin producir un trabajo útil, es necesario neutralizarla o compensarla).

La selección de un capacitor de marcha, debe estar ajustada a cada motor para garantizar un funcionamiento adecuado; una variación inadecuada por encima o por debajo de la capacitancia en microfaradios de un capacitor de marcha, producirá una variación comprometedora en el amperaje lo cual va ocasionar un recalentamiento del motor y un mayor consumo.

Un funcionamiento errático del capacitor de marcha, es causa de un mal funcionamiento y posterior daño en un motor. El voltaje especificado en los capacitores, no se relaciona con el voltaje en línea, este voltaje corresponde a un mayor voltaje que el de suministro, y corresponde a la suma eléctrica de los voltajes inducidos en el bobinado de arranque y el voltaje inducido por el rotor en su giro en el bobinado de marcha. Instalar un capacitor con una capacidad en voltios menor al especificado, puede producir su daño y afectar al motor. Un capacitor con un voltaje superior no afecta en nada su funcionamiento, ni pone en riesgo el motor. [30].

CONCLUSIONES

- Se logró determinar el efecto de la aplicación de condensadores mediante el análisis de compensación reactiva controlando las pérdidas de potencia activa de motores trifásicos se redujo de 961.86 KW a 605.71 KW.
- La aplicación de condensadores permitió mejorar y controlar las pérdidas generadas por los motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC. Esto debido a que previo a la implementación de los condensadores se estimó que el factor de potencia en los motores se encontró en $\text{Cos}\phi=0,75$ sin embargo, el uso de los capacitores incrementó el factor de potencia a 0.95 con lo que se redujo las pérdidas notablemente, reduciéndose las pérdidas en un 37.7%.
- El uso de los condensadores mejoró la eficiencia de los motores alcanzando un nivel eficiente de consumo energético. Logrando reducir la facturación mensual por exceso de energía reactiva de S/. 15,317.57 a S/. 4,489.79 alcanzando un ahorro monetario por encima de los S/ 7.0 mil.
- El efecto del uso de los condensadores permitió que se redujeran las pérdidas en el estator de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC. Este rango de pérdidas varió entre 2.4 y 16.5 KVAR según el tipo de motor.
- El uso de los condensadores generó una reducción de pérdidas en vacío de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC. El rango de pérdidas disminuyó entre 7.2 y 49.5 KVAR según tipo de motor.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer una comparación de diversos métodos de análisis de compensación reactiva para el control de pérdidas de potencia activa en motores trifásicos.
- Se recomienda que en las instalaciones futuras de motores trifásicos se apliquen condensadores de acuerdo a la potencia del motor para mejorar y controlar las pérdidas.
- Es recomendable tener en cuenta los criterios de energía reactiva que se generan en los motores trifásicos para los cálculos respectivos y alcanzar un nivel eficiente de consumo energético.
- Es recomendable tener en cuenta los criterios de energía reactiva que se consumen en el estator de los motores trifásicos para los cálculos respectivos.
- Se recomienda evaluar las pérdidas en vacío de los motores trifásicos para tener en cuenta y evaluar las pérdidas totales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[11]Acosta, D. (2015). *Instalación De Motores, Tablero De Control Y Banco De Condensadores Para Envasadora Automática De Glp En Planta Kingas*. 2015 : Escuela Superior Politécnica del Litoral.

[22]Alcalde, P. (2010). *Electrónica en General*. Madrid : Paraninfo S.A.

[24]Baterias de Condensadores. (2015).

www.BateriasdeCondensadores.com. *www.BateriasdeCondensadores.com*. [En línea] 28 de Abril de 2015.[Citado el: 30 de Abril de 2018.]

<http://www.bateriasdecondensadores.com/capacitor-ceramico-capacitores-ceramicos/>.

[19]Calcina, A. (2016). *Optimización del funcionamiento de un motor de inducción para el ahorro de energía eléctrica en el laboratorio UNCP*. Huancayo.

[18]Calderon, J. y Medina, E. (2015). *Metodología de estudio del diagrama de carga para el mejoramiento del factor de potencia de la planta frigorífica* . Nuevo Chimbote : Universidad Nacional del Santa.

[10]Chico, J.(1987). *Protección de Bancos de Condensadores en Subestación*. Quito - Ecuador : Escuela Politécnica Nacional.

[6]Espinosa, P., Martinez, R. y Torres, L. (2015). *Análisis técnico en el ahorro de energía eléctrica en motores de inducción de corriente alterna*. México.

[13]Gómez, E. (2009). *Compensación De Potencia Reactiva*. México : Instituto Politécnico Nacional.

[15]Gómez, J. (2013). *Diseño e implementación DE un variador de velocidad de bajo costo para un motor trifásico de inducción de 4hp* . Lima : Pontificia Universidad Católica del Perú.

[5]Henríquez, R., Olano, C. y Salguero, J. (2015). *Motores trifásicos de inducción, evaluación y control de pérdidas con aplicación de capacitores*. Salvador.

[29]Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. México : McGrawHill.

[16]Huacasi , J. y Choquecahuana, E. (2016). *Localización Óptima De Bancos De Capacitores En Sistemas De Distribución Radial Mediante La Aplicación Del Método De Sensibilidades Lineales.* Cusco : Universidad Nacional De San Antonio Abad Del Cusco.

[12]LlumiQuinga, F.(2012). *Diseño de un Banco de condensadores Para la Corrección del Factor Potencia.* Quito- Ecuador : Universidad Técnica Saieciana Sede Quito.

[8]Martínez, J. y Ramírez, J. (2000). *Control óptimo U/f para motores de inducción.* Universidad del Valle.

[7]Mayor, A. (2014). *Método de Medición de la Eficiencia en un Motor de Inducción Alimentado por Variador de Velocidad.* Bogotá.

[30]Powers, N. (2015). Arrow. Arrow. [En línea] 25 de Setiembre de 2015. [Citado el: 28 de Abril de 2018.] <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/capacitors-in-automotive-applications>.

[28]QuimiNet. (2012). www.QuimiNet.com. *www.QuimiNet.com*. [En línea] 06 de Arzo de 2012. [Citado el: 02 de Mayo de 2018.] <https://www.quiminet.com/articulos/los-bancos-de-capacitores-fijos-y-sus-ventajas-2701789.htm>.

[23]Real Academia Española. (2014). *Diccionario de la lengua española.* Madrid : RAE.

[27]Renzetti, M. (2008). <http://www.e29.com.mx>. *http://www.e29.com.mx*. [En línea] 2008. [Citado el: 02 de Mayo de 2018.] <http://www.e29.com.mx/pdf/FactordePotencia.pdf>.

[21]Santamaria, G. y Castejón, A. (2009). *Electrotecnia: Electricidad y Electrónica.* Madrid : Editex S.A.

[26]Scheiner Electric. (2018) s.f. <http://www.schneiderelectric.es>. *http://www.schneiderelectric.es*. [En línea] s.f. [Citado el: 30 de Abril de 2018.] <http://www.schneiderelectric.es/documents/local/productos->

servicios/distribucion_electrica/guia_instalaciones_electricas/capitulo-I-mejora-factor

[25]Scribd.(2018) <https://es.scribd.com/doc/246941389/Condensadores>.
[En Línea] [Citado el : 25 de mayo del 2018.]

[2] **Sociedad Minera Austria Duvaz SAC. (2017)**. Producción. [En línea] 16 de Enero de 2017. [Citado el: 25 de Febrero de 2018.] <http://austriaduvaz.pe/>.

[20]Torres, H.(2017). Hetpro. *Hetpro*. [En línea] 27 de Noviembre de 2017. [Citado el: 27 de Abril de 2018.] <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/capacitor/>.

[14]Torres, D. (2017). *Localización Óptima De Capacitores En Redes De Distribución Para Mejorar La Eficiencia Energética Del Sistema Eléctrico Chungar - Volcan*. Huancayo : Universidad Nacional Del Centro Del Perú.

[17]Vargas, I. (2017). *Implementacion de un banco de condensadores para aumentar el factor de potencia en la empresa fibraforte*. Lima : Universidad Privada del Norte.

[1] Vasquez, O. (2011). *Fisica General III*. s.l : UNASAM.

[9]Velásquez, P. (2016). *Análisis E Implementación De Un Banco De Condensadores Para La Mejora Del Factor De Potencia En Una Industria De Reciclaje De Plástico*. Guayaquil – Ecuador : Escuela Superior Politécnica Del Litoral.

ANEXOS

Anexo 1
Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA	MUESTRA	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
<p>Problema general: ¿Cuál es el efecto de la aplicación de condensadores en el control pérdidas de potencia activa de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC?</p> <p>Problemas específicos: ¿Cuál es el uso de los condensadores en el control de pérdidas en el estator de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC?</p> <p>¿Cuál es el efecto del uso de los condensadores en el control de pérdidas en vacío de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC?</p> <p>¿Cuál es la eficiencia y facturación por el uso de los condensadores en el control de pérdidas de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC?</p>	<p>Objetivo general: Determinar el efecto de la aplicación de condensadores en el control de pérdidas de motores trifásicos de la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.</p> <p>Objetivos específicos: Determinar el efecto del uso de los condensadores en el control de pérdidas en el estator de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.</p> <p>Determinar el efecto del uso de los condensadores en el control de pérdidas en vacío de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.</p> <p>Determinar la facturación por el uso de los condensadores en el control de pérdidas de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.</p>	<p>Hipótesis general: Si se determina el efecto de la aplicación de condensadores mediante el análisis de compensación reactiva entonces se controlará las pérdidas de potencia activa de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.</p> <p>Hipótesis específicas: El uso de los condensadores reduce significativamente el control de pérdidas en el estator de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC. El uso de los condensadores reduce significativamente las pérdidas en el estator de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC. La eficiencia y facturación por el uso de los condensadores es significativo en el control de pérdidas de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.</p>	<p>Variable independiente: Uso de Condensadores.</p> <p>Variable dependiente: Control de pérdidas</p>	<p>Tipo de Investigación: Aplicada</p> <p>Nivel de Investigación: Explicativo</p> <p>Diseño: Experimental</p> <p>$O_1 \rightarrow X \rightarrow O_2$</p>	<p>Población: $n = 38$ motores trifásicos</p> <p>Muestra: $n = 38$ motores trifásicos</p> <p>Muestreo: no probabilístico por conveniencia</p>	<p>Técnicas: Test (pre – post) a los motores</p> <p>Instrumentos: Protocolos de fabricación. Hojas de mediciones</p>

Anexo 2

Fotos de Motores

Foto 1: Motor trifásico 400 HP



Fuente: Sociedad Minera Austria Duvaz SAC (2018)

Foto 2: Motor trifásico 200 HP



Fuente: Sociedad Minera Austria Duvaz SAC (2018)

Foto 3: Motor trifásico 100 HP



Fuente: Sociedad Minera Austria Duvaz SAC (2018)

Foto 4: Instalación del condensador



Fuente: Sociedad Minera Austria Duvaz SAC (2018)

Foto 5: Aplicación de condensadores



Fuente: Sociedad Minera Austria Duvaz SAC (2018)

Foto 6: Condensadores empleados



Fuente: Sociedad Minera Austria Duvaz SAC (2018)

Foto 7: Condensadores empleados



Fuente: Sociedad Minera Austria Duvaz SAC (2018)

Foto 8: Condensador empleado



Fuente: Sociedad Minera Austria Duvaz SAC (2018)

Anexo 3

Diagrama Eléctrico General de Operaciones

Anexo 4

Diagrama arranque estrella triangulo más compensación circuito de fuerza

Anexo 5

Diagrama arranque estrella triangulo más compensación circuito de control