



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

---

**División de Ingeniería Eléctrica**

**AHORRO DE ENERGÍA EN LA SELECCIÓN Y OPERACIÓN DE  
MOTORES ELÉCTRICOS: CASO DE ESTUDIO PLANTA QUÍMICA  
ENMEX.**

## **TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO**

**PRESENTAN:**

**AMADOR CABRERA RAYMUNDO  
GARCÍA SALAZAR ALFREDO  
MAYO RAMÍREZ LETZY MARIANA  
PINELO BOLAÑOS JESÚS  
REYES ROMERO JUAN CARLOS**

**PROFESOR ASESOR:**

**DR. GABRIEL LEÓN DE LOS SANTOS**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

---

## AGRADECIMIENTOS.

Cinco pilares tengo en mi vida. El más importante sin duda es mi madre, quien no solo me ha protegido y dado lo mejor de si, sino también me ha enseñado las mejores cosas de la vida... amar, reír, disfrutar. Te amo mamá, gracias por darme desde siempre la libertad de tomar mis propias decisiones y dejarme hacer las cosas a mi manera.

Padre, eres enojón pero admirable. Gracias por aguantar todos mis des\$%”&es y mis malas elecciones, por enseñarme que un Ingeniero es aquella persona que hace con un tornillo lo que otra hace con dos o más. ¡No te falle viejito!

Hermanitos, olvidando todos y cada uno de los moquetazos que ambos me propinaron en nuestra niñez... ¡Los amo! Ustedes, tal como cuento de Hansel y Gretel dejaron un camino marcado para mí. Yeya abrió brecha, Jonas tiro las migajas y yo seguí sus pasos hasta el punto que hoy nos encontramos. Y sí de algo estoy seguro,es que el logro que tenemos hoy será el primero, pues en cuanto uno comience a despuntar de nuevo los otros los seguiremos.

Abuelitos, tíos, primos, y por supuesto amigos. Por su apoyo, calidez y de una manera indirecta contribuir a definir la persona que hoy día soy, gracias. Canelo eres el mejor abuelo, pero definitivamente no de este mundo porque eres otro rollo. Nicholas y Nestor son mis padrinos, no son mágicos pero sí increíbles.

Mike, Almendra pequeña, Rambo, Chaos, Nenejo son mis mejores amigos. Ustedes hicieron de este viaje un verdadero huateque. Es algo increíble y genial contar con personas como ustedes, gracias.

Por supuesto a mis múltiples amores y ex-amores (sin nombres para no incomodar jajaja) que ya no les tocará disfrutar lo mejor de mí... Mis millones de pesos que ahora como Ingeniero percibiré, y todo por no aguantarme un poquito ¿ya ven? lero lero... ¡Ah! Y por favor ya quítenme el adjetivo de “inolvidable” jajaja.

Por mi raza hablará el espíritu... Vino mujeres y orgías... Chichis, nalgas y cueros... Son tatuajes de mi alma máter que llevaré por siempre y portaré con mucho orgullo. No hay nada mejor que ser hijo de la máxima casa de estudios... ¡La UNAM!

Al PAT (jajaja) y a todas las personas que han compartido algo importante conmigo y a las ya mencionadas; no solo no hubiera sino nada sin ustedes sino con toda la gente que estuvo alrededor en mi carrera, algunos siguen hasta hoy... GRACIAS TOTALES.

¡¡¡Gooooooooooya, gooooooooooya...!!!

Raymundo Amador Cabrera.

---

Gracias a Dios, por todo lo que me has dado, por acompañarme en este momento tan especial para mí y toda mi familia. Gracias por estar a mi lado todos los días de mi vida, en las buenas como en las malas, siempre estas conmigo.

Mi amada esposa Luz María, gracias por el apoyo que me has brindado, porque no olvido todo lo que has hecho por mí. Has sido también un ejemplo. Debemos esforzarnos y luchar para salir adelante. Que Dios te bendiga y te me cuide mucho. ¡Te amo con todo mi corazón mi estrellita!

A mi Papa Leoncio y a mi Mama, María de Jesús, por todo el apoyo, educación y valores inculcados. Muchas gracias a Dios y a ustedes por todo. Que Dios los bendiga y me los cuide mucho. ¡Gracias Papa y Mama, los quiero mucho!

Juan (QEPD) y Alberta (QEPD), Alfonso y María, gracias por los padres que formaron y educaron, así como el ejemplo que me han dado como matrimonio y seres humanos, donde he visto bondad y honestidad, así como fortaleza, para salir adelante. ¡Los quiero mucho abuelitos y no me olvido de ustedes, que Dios los bendiga!

Mi hermanita, cuantas cosas hemos vivido. Has sido ejemplo para mí. Gracias por todos los momentos tan especiales que Dios nos ha permitido vivir, y por las que vienen. Échale muchas ganas, te deseo lo mejor y no olvides que siempre cuentas conmigo y que Dios los bendiga a los 3 en esta nueva que van a comenzar, y saludos a ese nuevo ser que está formándose dentro de ti, ¡saludos bebe!

A mis suegros Javier y Susana, les agradezco el apoyo brindado y su hospitalidad. Son un buen matrimonio y también ejemplo de superación. Ambos trabajadores, para lograr un mejor bienestar de su familia y eso también lo he visto en mis cuñados, Javier, Oscar y Mauricio, así como en mi esposa Luz María. ¡Que Dios los bendiga, y sigan así, que los cuide mucho!

Mis padrinos, Felipa y Enrique, gracias por todos los momentos que han pasado a mi lado. Mi madrina y tía Felipa, por cuidarme y estar mucho tiempo conviviendo a mi lado. Padrino y Tío Enrique, por todo lo que me has enseñado y no te sientas mal, las cosas que no aprendí, no han sido culpa tuya.

A todos mis tíos y primos, que no terminaría de mencionar, pero de todos me acuerdo, gracias a todos por su apoyo, de diversas formas, pero a de todos me acuerdo. ¡Que Dios los cuide y sigan adelante, siempre superándose y agradecidos por todo lo que nos da!

Gracias Dr. Gabriel, por la paciencia tenida y por todo el apoyo brindado para la realización de este tema, surgieron varias situaciones, pero poco a poco fueron resolviéndose. Me dio gusto trabajar a su lado, ya había tenido oportunidad de estar en una clase impartida por usted y no tengo más palabras que decir, más que mi agradecimiento por dirigir nuestra tesis, por todo el apoyo que nos ha brindado. ¡Muchas gracias Dr. Gabriel León de los Santos!

Alfredo García Salazar.

---

El presente trabajo está dedicado a las personas que más quiero, a las que han contribuido a mi formación tanto académica como personal; y que sin duda representan lo más importante en mi vida.

Agradezco a Dios por darme la fuerza para enfrentar nuevos retos y sobre todo por la familia y amigos que tengo, pues ellos son el motor e impulso para emprender y cumplir mis metas.

También quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de formarme como profesionista en ella. Es un orgullo para mí ser ingeniera y nada más y nada menos que de la máxima casa de estudios.

A mi mamá Elena, por su amor, sus esfuerzos, sus sacrificios, su confianza y porque siempre ha creído en mí respetando mis decisiones (por muy incoherentes que parezcan); por enseñarme que lo único que vale la pena es vivir sin prisa, amar a la familia y a Dios, pues son ellos los únicos que nos pueden hacer felices. Te amo mucho mamita.

Agradezco profundamente a mi papá Francisco Mayo (Q.E.P.D), por ser una excelente persona en todos los sentidos, por enseñarme que el único camino para superarse y salir adelante es a través de la educación, por todo su amor, por consentirme, por sus consejos y sobre todo por apoyarme, pues a pesar de mis equivocaciones jamás dudó de mi capacidad para volverme a levantar. Es por eso que siempre ha sido mi inspiración en cada uno de mis proyectos. Todo él y la grandeza de su alma seguirá siempre conmigo. Aunque siento una profunda tristeza porque no podré compartir con él este momento tan especial y esperado. ¡Te amo por siempre y para siempre papá!

A mis hermanos: Iván, Ingrid y Laura, está demás el decirles que han sido el mejor ejemplo a seguir. Admiro su fortaleza y su manera de enfrentar situaciones adversas. Gracias “hermanuchos” porque siempre me han apoyado en absolutamente todo. Los amo aunque a veces se unan en mi contra y me envidien por ser la consentida jaja.

A mis sobrinos Emi y Meli, por enseñarme que siempre existen motivos para reírse a carcajadas y ser feliz. Ambos llegaron a darle luz a la familia. Los amo mucho aunque sean extremadamente traviosos y “malos” conmigo.

A mis amigos: La banda del bloque 6, especialmente a Kary (mi ami tolo-h), a Lalo, a Miguel (el intensito) y a Daniel (zurdo). De verdad agradezco su amistad incondicional, sin duda hemos pasado momentos inolvidables. Pero sobre todo gracias porque ustedes han estado a mi lado en instantes en que el mundo parece romperse y en realidad sólo mostraba otro camino. Los quiero mucho.

Por último quiero agradecer a alguien muy especial que llegó a cambiar mi vida por completo llenándola de luz y de amor. Gracias Omar por tu comprensión, tu apoyo y tus cuidados. Te amo.

Letzy Mariana Mayo Ramírez.

---

Este trabajo está dedicado a todas las personas que me dieron su apoyo y consejo en los momentos donde necesitaba sentir que vale la pena esforzarse.

A Dios por darme la vida, la fuerza y excelentes personas que me rodean a diario, así como también por obsequiarme a mis dos hijos que son la razón y generador de mí existir.

En especial a la persona que sentí y amé desde el primer momento, que con su sacrificio silencioso, desvelos, paciencia, dedicación, ejemplos diarios y consejos me han ayudado en este camino difícil de la vida, a ti Mamita Luz, muchas gracias Mamá.

Sandra, gracias por estar compartiendo junto conmigo los momentos más difíciles y felices de mi vida, junto con ello, agradecerte eternamente que me hayas dado a nuestros hijos que son la luz que me despierta por la mañana y la razón de querer seguir adelante. Te amo.

A mis hermanos Cesar, Alma, Luz Elena, muchas gracias, estoy y estaré siempre agradecido con Ustedes porque son los pilares y cimientos de la persona que soy ahora.

Yahel, Miguel y Gabriel, Ustedes son nuestra esperanza y fe, esperamos que nuestros ejemplos les sirvan para que crezcan siendo personas de bien y que a lo que se dediquen en un futuro lo hagan siempre con el mayor esfuerzo.

También quiero agradecer a la empresa WEG México S.A de C.V. en nombre del gerente del Área de Máquinas y Proyectos el Ing. Juvencio Zuñiga Ortiz por las facilidades que me otorgaron para poder realizar este trabajo.

Juan Carlos Reyes Romero.

---

## ÍNDICE.

**Agradecimientos**

**Índice**

**Índice de tablas**

**Índice de figuras**

**Índice de gráficas**

**Objetivos**

**Introducción**

<b>Capítulo 1. Antecedentes de los motores eléctricos.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción.....	1
1.2 Energía y medio ambiente.....	2
1.3 Eficiencia Energética.....	4
1.4 Programas para el ahorro de energía.....	5
1.5 Tarifas eléctricas y autoabastecimiento en México.....	6
1.6 Motor de inducción jaula de ardilla.....	11
1.7 Normas actuales aplicables a motores trifásicos de inducción jaula de ardilla.....	14
1.8 Conclusiones.....	15
<b>Capítulo 2. Selección y aplicación de motores eléctricos.....</b>	<b>17</b>
2.1 Introducción.....	17
2.2 Importancia de la correcta selección de motores eléctricos.....	18
2.3 Tipos de motores.....	18
2.4 Elementos para la selección de motores eléctricos trifásicos de inducción jaula de ardilla.....	20
2.4.1 Por Enclaustramiento.....	20
2.4.2 Por Índice de Protección.....	21
2.4.3 Por tipo de montaje.....	23

---

2.4.4	Por par de arranque.....	23
2.4.5	Diseños norma NEMA.....	25
2.4.6	Diseños norma IEC.....	25
2.5	Aplicación de motores eléctricos trifásicos de inducción jaula de ardilla.....	25
2.6	Aplicación de motores eléctricos por tipo de carga.....	26
2.6.1	Bombas.....	27
2.6.2	Compresores.....	27
2.6.3	Ventiladores.....	27
2.6.4	Molinos de piedra.....	27
2.6.5	Elevadores.....	27
2.7	Aplicación por par de arranque.....	28
2.8	Tipos de torques en los motores eléctricos según norma NEMA.....	28
2.9	Ahorro de energía en motores trifásicos de inducción jaula de ardilla.....	30
2.10	Tipo de Perdidas en motores trifásicos de corriente alterna.....	30
2.10.1	Perdidas por efecto Joule en estator.....	32
2.10.2	Perdidas por efecto Joule en rotor.....	32
2.10.3	Perdidas mecánicas.....	33
2.10.4	Perdidas indeterminadas o adicionales.....	33
2.11	Comparación de tipos de motores por eficiencia.....	33
2.11.1	Motor eficiencia alta.....	34
2.11.2	Motor eficiencia Premium.....	36
2.12	Ahorro de energía en el método de arranque.....	37
2.12.1	Arrancador a tensión plena.....	38
2.12.2	Soft Starter (Arrancador suave).....	38
2.12.3	Drive (Variador de velocidad).....	39
2.12.4	Arrancador a tensión reducida.....	40
2.12.5	Arrancador estrella triangulo.....	41
2.13	Corrección de factor de potencia.....	42
2.13.1	Bancos de capacitores.....	43
2.13.2	Bancos de capacitores automáticos.....	46
2.14	Resultado de ahorro de energía.....	46



---

2.15	Conclusiones.....	47
<b>Capítulo 3. Propuesta de sustitución de motores en la planta química</b>		
	<b>ENMEX.....</b>	<b>49</b>
3.1.	Introducción.....	49
3.2.	Descripción de la instalación.....	49
3.3.	Tipo y uso de los motores.....	51
3.4.	Consumo de energía eléctrica de motores actuales.....	52
3.5.	Costos de operación de motores actuales.....	62
3.6.	Estudio de tecnologías actuales en los motores eléctricos.....	66
3.7.	Marcas comerciales de motores eléctricos en el mercado mundial.....	68
3.8.	Propuesta de un Programa de ahorro de energía en la instalación.....	69
3.9.	Propuesta y cálculo de sustitución de motor eléctrico.....	73
3.10.	Costos de los nuevos motores.....	82
3.11.	Conclusiones.....	88
<b>Capítulo 4. Análisis de viabilidad y toma de decisiones.....</b>		
4.1.	Introducción.....	90
4.2.	Indicadores técnicos-económicos.....	91
4.3.	Afectaciones medioambientales.....	92
4.4.	Calculo del ahorro de la energía.....	94
4.5.	Estimación de la reducción de costos de operación.....	101
4.6.	Análisis financiero e Indicadores de toma de decisiones.....	110
4.7.	Ingresos adicionales.....	125
4.7.1	Ahorro en costos de mantenimiento.....	125
4.7.2	Emisiones anuales equivalentes de CO <sub>2</sub> evitadas.....	127
4.8.	Conclusiones.....	134
<b>Conclusiones.....</b>		<b>136</b>
<b>Nomenclatura.....</b>		<b>138</b>
<b>Anexos.....</b>		<b>140</b>
<b>Bibliografía.....</b>		<b>157</b>

---

## ÍNDICE DE TABLAS.

### Capítulo 1.

Tabla 1.5 Costo de kWh cobrado a la planta química ENMEX en 2011.....	7
Tabla 1.5.a Tarifa Eléctrica: Cargos por kWh en la región Central.....	7
Tabla 1.5.b Tarifa Eléctrica en región Central (de febrero a abril).....	7
Tabla 1.5.c Tarifa Eléctrica región Central (de abril a julio).....	8
Tabla 1.5.d Tarifa Eléctrica región Central (de agosto a octubre).....	8
Tabla 1.5.e Tarifa Eléctrica región Central (de octubre a enero).....	8
Tabla 1.5.f Factores de reducción en región Central.....	9
Tabla 1.7 Normas aplicables a la operación de motores.....	15

### Capítulo 2.

Tabla 2.4.2 Índices de protección IP.....	22
Tabla 2.11 Categorías de los tipos de eficiencia según la IEC 60034-30.....	34

### Capítulo 3.

Tabla 3.4 Datos de placa de motores instalados.....	56
Tabla 3.4.a Datos de lectura de motores instalados.....	58
Tabla 3.4.b. Consumos Eléctricos de motores instalados analizados.....	61
Tabla 3.5 Costo anual de Consumos Eléctricos de los motores instalados.....	65
Tabla 3.9 Datos de lectura de los motores con mayor consumo energético.....	73
Tabla 3.9.a Consumo Energético anual de motores que más energía consumen.....	74
Tabla 3.9.b Costo anual por consumo de motores que más energía consumen.....	76

---

Tabla 3.9.c Datos de placa de motores propuestos.....	78
Tabla 3.9.d Estimación de datos de campo de motores propuestos.....	79
Tabla 3.9.e Consumo de Energía Eléctrica de motores propuestos.....	81
Tabla 3.10 Costo por consumo de Energía Eléctrica de motores propuestos.....	83
Tabla 3.10.a Costo de inversión de motores propuestos.....	86
Tabla 3.10.b Costo de instalación de motores propuestos.....	88

#### **Capítulo 4.**

Tabla 4.4 Ahorros en consumo de energía en base.....	95
Tabla 4.4.a Ahorro anual en consumo de energía en intermedia.....	97
Tabla 4.4.b Ahorro anual en consumo de energía en punta.....	98
Tabla 4.4.c Ahorro anual en consumo total de energía.....	100
Tabla 4.5 Ahorro anual en costos por consumo de energía en base.....	103
Tabla 4.5.a Ahorro anual en costos por consumo de energía en intermedia.....	105
Tabla 4.5.b Ahorro anual en costo por consumo de energía en punta.....	106
Tabla 4.5.c Ahorro anual en costo por consumo total de energía.....	108
Tabla 4.5.d Ahorros en el reemplazo de motores.....	109
Tabla 4.6 Datos compresor 1 (instalado y nuevo).....	117
Tabla 4.6.a Resultado de ahorros.....	117
Tabla 4.6.b Supuestos de evaluación.....	117
Tabla 4.6.c Análisis de sensibilidad de compresor 1.....	118
Tabla 4.6.d Datos compresor 3 (instalado y nuevo).....	119
Tabla 4.6.e Resultado de ahorros.....	119
Tabla 4.6.f Supuestos de evaluación.....	119
Tabla 4.6.g Análisis de sensibilidad de compresor 3.....	120
Tabla 4.6.h Datos agitador 10 (instalado y nuevo).....	121
Tabla 4.6.i Resultado de ahorros.....	121
Tabla 4.6.j Supuestos de evaluación.....	121
Tabla 4.6.k Análisis de sensibilidad de agitador 10.....	122
Tabla 4.6.l Datos agitador 13 (instalado y nuevo).....	123

---

Tabla 4.6.m Resultado de ahorros.....	123
Tabla 4.6.n Supuestos de evaluación.....	123
Tabla 4.6.o Análisis de sensibilidad de agitador 13.....	124
Tabla 4.7.2 Contenidos energéticos en gas natural.....	128
Tabla 4.7.2.a Emisiones anuales de CO <sub>2</sub> equivalentes del compresor 1 (instalado).....	132
Tabla 4.7.2.b Emisiones anuales de CO <sub>2</sub> equivalentes del compresor 1 (nuevo) y ahorro de emisiones.....	133

## ÍNDICE DE FIGURAS.

### Capítulo 1.

Figura 1.5 Representación de los combustibles que generan energía eléctrica....	11
Figura 1.6 Principio de funcionamiento de motores eléctricos.....	12
Figura 1.6.a Componentes de un motor de inducción rotor jaula de ardilla.....	13

### Capítulo 2.

Figura 2.8 Curvas torque-velocidad de motores diseño NEMA.....	29
Figura 2.10 Pérdidas en el motor durante su funcionamiento.....	31
Figura 2.11.2 Comparativo de los diferentes tipos de eficiencia.....	37

## ÍNDICE DE GRÁFICAS.

### Capítulo 3.

Gráfica 3.4 Consumo anual de Energía Eléctrica de motores instalados.....	62
Gráfica 3.5 Costo por Consumo anual de Energía Eléctrica de motores instalados.....	66

---

Gráfica 3.9 Consumo Energético anual de motores que más energía consumen.....	74
Gráfica 3.9.a Costo por consumo anual de motores que más energía consumen.....	76
Gráfica 3.9.b Consumo anual de Energía Eléctrica de motores propuestos.....	81
Gráfica 3.10 Costo por consumo anual de Energía Eléctrica de motores propuestos.....	84

#### **Capítulo 4.**

Gráfica 4.4 Ahorros en consumo de energía en base.....	96
Gráfica 4.4.a Ahorro anual en consumo de energía en intermedia.....	97
Gráfica 4.4.b Ahorro anual en consumo de energía en punta.....	99
Gráfica 4.4.c Ahorro anual en consumo total de energía.....	100
Gráfica 4.5 Ahorro anual en costos por consumo de energía en base.....	103
Gráfica 4.5.a Ahorro anual en costos por consumo de energía en intermedia...	105
Gráfica 4.5.b Ahorro anual en costo por consumo de energía en punta.....	107
Gráfica 4.5.c Ahorro anual en costo por consumo total de energía.....	108
Gráfica 4.6 Flujo efectivo compresor 1.....	117
Gráfica 4.6.a Periodo de recuperación de la inversión por reemplazo del motor 1.....	118
Gráfica 4.6.b Flujo efectivo compresor 3.....	119
Gráfica 4.6.c Periodo de recuperación de la inversión por reemplazo del motor 3.....	120
Gráfica 4.6.d Flujo efectivo agitador 10.....	121
Gráfica 4.6.e Periodo de recuperación de la inversión por reemplazo del motor 10.....	122
Gráfica 4.6.f Flujo efectivo agitador 13.....	123
Gráfica 4.6.g Periodo de recuperación de la inversión por reemplazo del motor 13.....	124

---

## **OBJETIVO GENERAL.**

Realizar un estudio de factibilidad técnica-económica del potencial de ahorro de energía eléctrica en los motores de la **PLANTA QUÍMICA ENMEX**, con el fin de implementar una estrategia de uso eficiente de la energía, encaminada a incrementar la productividad y reducir los costos de energía eléctrica de las instalaciones, y con ello obtener un mayor aprovechamiento de los recursos energéticos y una disminución en el impacto ambiental que ocasionan los procesos productivos de los motores eléctricos.

## **OBJETIVOS ESPECIFICOS:**

- Dar una visión de las diferentes temáticas y conceptos involucrados en los procesos energéticos, que se desarrollan para poder generar los requerimientos que demanda la industria, así como la relación de estos con los recursos naturales, el cuidado del medio ambiente, el costo de la energía y la normatividad que regulan estos procesos, enfocados en el uso de los motores eléctricos.
- Conocer los conceptos y lineamientos que se deben seguir a fin de poder estudiar y caracterizar el uso de la energía eléctrica en los motores, así como los métodos y formas de evaluar y operar estos dispositivos.
- Conocer y caracterizar la instalación para determinar el potencial de uso y ahorro de energía, y con ello proponer estrategias de mejoramiento de los motores eléctricos, basado en el ahorro de energía con el apoyo de otros beneficios como reducción de costos de mantenimiento, etc.
- Hacer la evaluación de los beneficios técnicos de la propuesta de sustitución de motores mediante el aumento en la eficiencia, para después evaluar el ahorro económico, por medio de indicadores que permitan la toma de decisión para aprobar o no la ejecución del proyecto.

---

## INTRODUCCIÓN.

La necesidad de mantener un equilibrio entre energía, medio ambiente y economía, ha adquirido una nueva urgencia en el siglo XXI. Los combustibles fósiles, que han sido impulsores de la modernización de los procesos productivos desde la revolución industrial, se están agotando; además de que el uso de los mismos ha modificado la composición química de la atmósfera, contribuyendo de esta manera al cambio climático. (Prias, 2004).

Dada la urgencia de mitigar las consecuencias ambientales producidas por el uso y la explotación de los recursos fósiles, los países a nivel mundial están tomando acciones para frenar dichas consecuencias. El crecimiento esperado en la demanda de energía sigue una trayectoria insostenible y la eficiencia energética desempeñará un papel clave en la reducción de ese crecimiento.

Entre los principales desafíos que enfrenta la industria a nivel mundial se encuentran:

- La necesidad de incorporar tecnologías modernas que conlleven a una reducción significativa del costo operativo global.
- Presiones ambientales de tipo nacional e internacional para mitigar la generación de gases de efecto invernadero.
- Seguridad Energética, la cual empieza a ser cuestionada dado el panorama energético mundial actual, en el que es notorio el incremento en los costos de la misma.

En términos simples, una compañía debe producir más productos a un costo óptimo, mientras simultáneamente se asegura de que el producto final sea de gran calidad.

---

Los planes de acción involucrados dentro de esta perspectiva de competitividad incluyen: innovación y optimización de procesos y de la gestión de producción; así como, la extensión de vida de la planta.

El uso eficiente de la energía, es una opción estratégica para enfrentar los desafíos a los que se enfrenta la industria; ya que, no solo permite disminuir costos energéticos, mejorar la productividad y competitividad; sino también, reducir la contaminación atmosférica y las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de su actividad. Lo cual resulta económicamente rentable para quien la adopta. (FIDE, 2009).

Es indiscutible la importancia económica de la industria en el desarrollo de las naciones. Es por eso que la presencia del motor eléctrico es imprescindible, pues son los más empleados para la transformación de la energía. Además, de que combinan ventajas de la utilización de la energía eléctrica con bajo costo, facilidad de transporte, limpieza, simplicidad de comando y es de construcción simple y de gran versatilidad de adaptación a las cargas más diversas.

En el año 2011, el gobierno de la República Mexicana<sup>1</sup> decretó que para el área eléctrica se suministren equipos eléctricos que tengan un nivel de eficiencia elevado, donde se tengan menos pérdidas y con ello un ahorro de energía eléctrica para el bien del país y del medio ambiente en sus emisiones a la atmósfera producto de la transformación de la energía.

Es por eso, que el presente trabajo de tesis, el cual lleva por título: “Ahorro de energía en la selección y operación de motores eléctricos: caso de estudio planta química ENMEX”, propone implementar un programa de ahorro de energía por medio del reemplazo de motores eléctricos de mayor consumo, por unos más eficientes. Con el fin de lograr ese equilibrio entre energía, medio ambiente y economía.

---

<sup>1</sup> Secretaría de energía.



---

Para el desarrollo de este trabajo, como primer paso se describen los antecedentes de los motores eléctricos definiendo conceptos de energía, medio ambiente, eficiencia energética, programas para el ahorro de energía, principio de funcionamiento del motor de inducción jaula de ardilla, tarifas eléctricas y autoabastecimiento en México; así como, las normas actuales aplicables.

También se definen los elementos a considerar para una correcta selección de motores eléctricos. Además, se exponen las principales aplicaciones de los motores eléctricos de inducción jaula de ardilla, por tipo de carga y por par de arranque. Así como también los tipos de torques y el tipo de pérdidas de dichos motores.

Tomando en cuenta los conceptos anteriores, se realizará un levantamiento de datos de los motores de la planta química ENMEX, en la que se describirá la instalación, el tipo y uso de los motores y costos de operación de motores actuales.

Se hará una comparación de los tipos de motores por medio de eficiencia media y eficiencia premium. Y con el estudio de tecnologías actuales en los motores eléctricos, que comprenden marcas comerciales en el mercado actual, se elaborará una propuesta y cálculo para la sustitución de motores que representan un mayor consumo de energía. Así como un análisis de costo de inversión y operación de los nuevos motores.

Y en base a ello, se propondrá un programa de ahorro de energía, analizando la viabilidad con indicadores técnicos-ambientales, estimando la reducción de costos de operación y mantenimiento; haciendo un análisis económico para la toma de decisiones. Todo esto, para obtener un resultado de ahorro de energía.

---

## **CAPÍTULO 1.**

### **ANTECEDENTES DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS.**

#### **1.1 Introducción.**

Los motores eléctricos desempeñan un papel importante proporcionando potencia para distintos tipos de aplicaciones: domésticas, comerciales e industriales. Su enorme versatilidad y economía de operación hacen que prácticamente el motor eléctrico no pueda ser igualada por ninguna otra forma de potencia para el movimiento.

Se estima que los motores eléctricos se emplean en un 60 por ciento de las aplicaciones industriales, considerando las distintas variantes y aplicaciones que existen en la actualidad. (Cortés, 2002).

En aplicaciones domésticas, la utilización de los motores eléctricos alcanza también un alto grado; ya que, se observa su uso desde licuadoras, ventiladores, bombas de agua, aspiradoras, etc.

Desde el punto de vista de fuentes de generación de energía eléctrica, la mayor parte de la potencia eléctrica que se genera es en corriente alterna (Pérez Amador, 1994), por lo que la mayoría de las aplicaciones de los motores eléctricos es en corriente alterna (CA).

Después de la aportación de Thomas Alva Edison, al hacer útil mediante el alumbrado a la energía eléctrica, hecho que ha evolucionado la vida haciendo disponible este tipo de energía, se inició el desarrollo práctico de las distintas

---

formas de su utilización para el accionamiento de máquinas, haciendo de los motores eléctricos la fuente ideal de aplicación. (Pérez Amador, 1994).

En la actualidad, los motores eléctricos son considerados como elementos convertidores de energía y además de las múltiples aplicaciones que tiene, se visualiza un futuro de mayor utilización a medida que se desarrollan los dispositivos electrónicos de control. (Fitzgerald, 2004).

## **1.2 Energía y medio ambiente.**

En física, la energía se define como una propiedad asociada a los objetos y sustancias, y se manifiesta en la capacidad de las mismas para producir un trabajo (Serway & Faughn, 2001). Pero si se hace en la tecnología o economía, se refiere a un recurso natural que puede ser explotado.

Los tipos de energía se dividen en dos categorías, en energía renovable y en energía no renovable (Serway & Faughn, 2001):

- La energía renovable: Se obtiene de fuentes naturales e inagotables, por lo tanto, aunque se abuse de su uso no hay peligro de que desaparezcan. Dentro de este tipo de energía se tiene una nueva clasificación:
  - Energías no contaminantes: El sol, el viento, los ríos, mareas, etc.
  - Energías contaminantes: Se obtienen a partir de las energías de biomasa.
  
- La energía no renovable: Se encuentra en la naturaleza en cantidades limitadas, por lo que una vez que se agotan es imposible volver a producirlas.

---

Las energías que forman parte de este grupo son: los combustibles fósiles (carbón, petróleo y el gas natural) y los combustibles nucleares (uranio y plutonio).

La energía puede ser medida en las unidades del Sistema Internacional (SI), (Serway & Faughn, 2001):

- Caloría (cal): Es la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua de 14.5 a 15.5 grados centígrados (°C).
- Joule (J): Es igual a 0.24 calorías.
- Kilowatt hora (kWh): Usada habitualmente en electricidad. Se refiere a la energía que se consume cuando se abastece una potencia eléctrica de un kilowatt durante una hora.

La energía cumple un papel fundamental en la vida al servicio del hombre y en todo lo que lo rodea. Sin la energía no se dispondría de medios de transporte ni mercancías; y con ello tampoco de alimentos. Igualmente, las fábricas no podrían funcionar, debido a que las maquinarias realizan sus producciones gracias a ésta.

Por lo que se debe tener conciencia de lo que en realidad significa la energía en la sociedad. Así pues, el desarrollo de un país está supeditado al funcionamiento de la energía. Sin embargo, también se perjudica gravemente al medio ambiente; ya que, la producción, transporte y consumo de energía resulta perjudicial para éste.

De esta manera se tiene que evaluar el impacto ambiental que se ocasiona, siendo necesario desarrollar políticas de descontaminación, con el fin de evitar impactos negativos en la naturaleza.

---

Actualmente, la población está más consciente de que se tiene que conservar el buen estado de la naturaleza; y es por ello, que se elaboran planes y medidas para mantener limpio el medio ambiente.

### **1.3 Eficiencia Energética.**

La eficiencia energética consiste en usar la energía disponible de la mejor forma posible; es decir, emplear tecnología que requiere menos energía para realizar la misma función. (Campos Avella, 2004).

La industria es uno de los sectores de la sociedad más necesitados del ahorro de energía; ya que, su logro supone una mayor competitividad. Son grandes consumidoras de electricidad, y es por eso que buscan aplicar en sus procesos de producción diversas tecnologías para reducir al máximo el consumo de electricidad, para conseguir un menor gasto y una mayor productividad.

Así pues, iniciativas en el sentido de aumentar la eficiencia a través de motores eléctricos de alta eficiencia son significativas cuando se considera su representatividad en el consumo de energía global.

Actualmente, la certificación ISO 50001 define los requerimientos necesarios para el desarrollo, implementación, mantenimiento y mejora de los sistemas de gestión de la energía. Se ha diseñado para ayudar a las organizaciones en la mejora continua de la gestión de la energía en edificios comerciales e industriales, optimizando su utilización y reduciendo los costos de operación. (<http://www.aenor.es/actualidad/noticias>, 2010).

---

#### **1.4 Programas para el ahorro de energía.**

El FIDE (Fideicomiso para el Ahorro de Energía), es una institución gubernamental que se encarga de los programas para el ahorro de energía eléctrica en México. Es el encargado de dar soporte técnico a las medianas y grandes industrias para poder financiar económicamente el cambio de equipos eléctricos viejos por nuevos de mejores eficiencias energéticas. (<http://portal.fide.org.mx>, 2011).

Para ello el FIDE hace diagnósticos energéticos a las empresas que así lo requieran. El Diagnóstico Energético es un estudio mediante el cual se aplica un conjunto de técnicas para determinar en las instalaciones eléctricas de una empresa, las áreas de oportunidad de ahorro de energía eléctrica, comprobando su factibilidad técnica y rentabilidad económica, sin deteriorar la calidad de los servicios y productos que se fabrican. (<http://www.energia.inf.cu/iee-mep/diagno.htm>, 2001).

El FIDE promueve acciones que fomenten el ahorro de energía eléctrica, ofreciendo incentivos por la adquisición de productos de alta eficiencia energética. Las eficiencias mínimas permitidas para la fabricación y distribución de motores nuevos en México están marcadas en la Norma Oficial Mexicana NOM-016, y son equiparables a las existentes en el mercado de USA y Canadá. (<http://portal.fide.org.mx>, 2011).

Algunos de los beneficios de estos programas son: La reducción de costos por facturación eléctrica, tecnología de punta, la optimización y modernización de los procesos, el incremento de la productividad y la reducción de costos por mantenimiento, pues son el reflejo de contar con equipos de alta eficiencia en las instalaciones de las industrias.

---

## **1.5 Tarifas eléctricas y autoabastecimiento en México.**

Las tarifas eléctricas han evolucionado hasta el presente, dónde las industrias pueden analizar y seleccionar una de las 9 estructuras tarifarias aplicables en función de: La ubicación, el voltaje de suministro, la demanda contratada, el horario de uso y si el suministro es continuo o interrumpible; en 8 regiones tarifarias hasta cuatro temporadas de consumo en el año. (<http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas>, 2011).

Con el fin de reflejar los costos reales del servicio, las cuotas de las tarifas horarias consideran las diferencias regionales y estacionales; y propician una utilización más eficiente de las instalaciones eléctricas, permitiendo ventajas recíprocas para el cliente y el suministrador, así como beneficios para el país.

Las tarifas industriales son las más importantes dentro del Sector Eléctrico, debido al volumen de la energía eléctrica consumida. El número de clientes industriales es menos del 1% del total, mientras sus consumos representan casi el 60% de la energía vendida (Cortés, 2002). Así pues, uno de los factores económicos importantes en la industria es el estudio de cuánto se gasta en dinero en la operación de las máquinas rotativas.

La planta química ENMEX, factura en tarifa H-S (Tarifa horaria para servicio general en alta tensión, nivel subtransmisión). Cuyas cuotas aplicables en el año 2011 se desglosan a continuación:

De acuerdo con datos proporcionados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se aplican los cargos por la energía comprometida de punta, de intermedia y de base, correspondientes al lapso de permanencia determinados conforme a la disposición complementaria a las tarifas para suministro y venta de energía eléctrica número 10: "Metodología para el cálculo de los cargos de las tarifas para servicio general en alta tensión con cargos fijos".

Costo kWh en base [\$/kWh]	Costo kWh en intermedia [\$/kWh]	Costo kWh en punta [\$/kWh]
0.761	0.911	2.107

Tabla 1.5 Costo de kWh cobrado a la planta química ENMEX en 2011<sup>1</sup>.

En la tarifa eléctrica correspondiente a la región central, también se aplican los cargos por: demanda facturable, energía excedente de punta, energía excedente intermedia y energía excedente de base. Como se muestra a continuación:

Región	Cargo por kW de demanda facturable [\$]	Cargo por kWh de energía excedente de punta [\$]	Cargo por kWh de energía excedente intermedia [\$]	Cargo por kWh de energía excedente en base [\$]
Central	105	2.1416	1.2042	1.0237

Tabla 1.5.a Tarifa Eléctrica: Cargos por kWh en la región Central<sup>1</sup>.

Los periodos base, intermedia y punta, se definen en cada una de las regiones tarifarias para distintas temporadas del año. Para las regiones Central, Noreste, Norte y Sur:

- Del 1º de febrero al sábado anterior al primer domingo de abril.

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 19:00 22:00 - 24:00	19:00 - 22:00
Sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
Domingo y festivo	0:00 - 19:00 23:00 - 24:00	19:00 - 23:00	

Tabla 1.5.b Tarifa Eléctrica en región Central (de febrero a abril)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Elaboración de tablas propia con datos de (<http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas>, 2011).



- Del primer domingo de abril al 31 de julio.

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a viernes	1:00 - 6:00	0:00 - 1:00 6:00 - 20:00 22:00 - 24:00	20:00 - 22:00
Sábado	1:00 - 7:00	0:00 - 1:00 7:00 - 24:00	
Domingo y festivo	0:00 - 19:00	19:00 - 24:00	

Tabla 1.5.c Tarifa Eléctrica región Central (de abril a julio)<sup>1</sup>.

- Del 1º de agosto al sábado anterior al último domingo de octubre.

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 19:00 22:00 - 24:00	19:00 - 22:00
Sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
Domingo y festivo	0:00 - 19:00 23:00 - 24:00	19:00 - 23:00	

Tabla 1.5.d Tarifa Eléctrica región Central (de agosto a octubre)<sup>1</sup>.

- Del último domingo de octubre al 31 de enero.

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 18:00 22:00 - 24:00	18:00 - 22:00
Sábado	0:00 - 8:00	8:00 - 19:00 21:00 - 24:00	19:00 - 21:00
Domingo y festivo	0:00 - 18:00	18:00 - 24:00	

Tabla 1.5.e Tarifa Eléctrica región Central (de octubre a enero)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Elaboración de tablas propia con datos de (<http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas>, 2011).

La Demanda Facturable para la región Central se define como se establece a continuación:

$$DF = DP + FRI \times \max(DI - DP, 0) + FRB \times \max(DB - DPI, 0) \dots \dots \dots (1.5)$$

*Dónde:*

- DP: Demanda máxima medida en el periodo de punta.*
- DI: Demanda máxima medida en el periodo intermedio.*
- DB: Demanda máxima medida en el periodo de base.*
- DPI: Demanda máxima medida en el periodo de punta e intermedio.*
- Max: Es el máximo y si la diferencia de demandas es (-), ésta será igual a 0.*
- FRI y FRB: Factores de reducción. Su valor depende de la región tarifaria:*

Región	FRI	FRB
Central	0.2	0.1

**Tabla 1.5.f Factores de reducción en región Central.<sup>1</sup>**

Las tarifas industriales y comerciales para demandas arriba de 100 kW, dentro de las disposiciones generales establecidas por CFE, señalan que se debe procurar mantener un factor de potencia (FP) tan aproximado a 100% como sea posible.

En caso de que el factor de potencia durante cualquier periodo de facturación tenga un promedio menor de 90% atrasado, el cual es determinado por los métodos establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con datos de (<http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas>, 2011).

---

El suministrador tendrá derecho a cobrar al usuario la cantidad que resulte de aplicar al monto de la facturación el porcentaje de recargo que se determine según la fórmula que se señala.

En el caso de que el factor de potencia tenga un valor igual o superior de 90%, el suministrador tendrá la obligación de bonificar al usuario la cantidad que resulte de aplicar a la factura el porcentaje de bonificación según las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ de Recargo} = \left(\frac{3}{5}\right) \times \left[\left(\frac{90}{FP}\right) - 1\right] \times (100) \quad F.P. < 90\% \quad \dots\dots\dots (1.5.a)$$

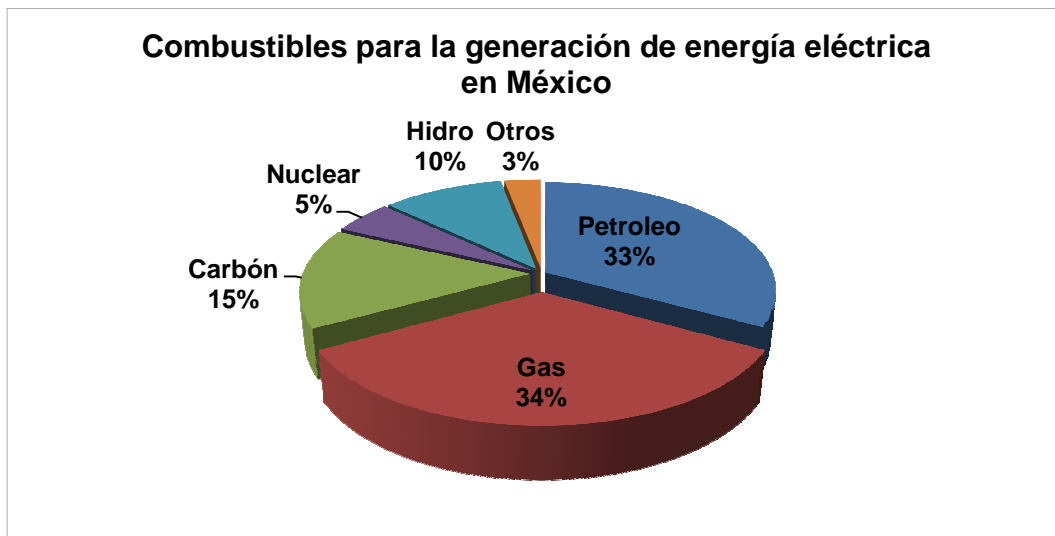
$$\% \text{ de Bonificación} = \left(\frac{1}{4}\right) \times \left[1 - \left(\frac{90}{FP}\right)\right] \times (100) \quad F.P. \geq 90\% \quad \dots (1.5.b)$$

*Dónde:*

*F.P. es el factor de potencia expresado en porcentaje.*

Con la adición de nuevas fuentes de generación al Sistema Interconectado Nacional y con tecnologías más eficientes, las tarifas eléctricas tenderán a ser competitivas en un mercado que cada vez ofrece más opciones de autoabastecimiento eléctrico.

El costo de la energía eléctrica está en función de la canasta de energéticos utilizados y en México se depende mucho de los combustibles fósiles (IIE, 2009). En la figura 1.5 se observa la generación de energía en nuestro país así como la diversidad que se tiene para generar la misma.



**Figura 1.5 Representación de los combustibles que generan energía eléctrica<sup>1</sup>.**

La generación con combustibles fósiles es del orden del 80 % del total y los combustibles han tenido entre 2001 y 2005 un incremento de 160 % en el gas y 134 % en el combustible; sin embargo, el impacto en los precios de la electricidad ha sido menor a la mitad de esos aumentos, ya que se pudieron absorber por la diversificación del tipo de energéticos utilizados y las mejoras operativas. (IIE, 2009).

### **1.6 Motor de inducción jaula de ardilla.**

El motor eléctrico permite la transformación de energía eléctrica en energía mecánica, esto se logra mediante la rotación de un campo magnético alrededor de una espira o bobinado que toma diferentes formas. Algunos de los motores eléctricos son reversibles, pueden transformar energía mecánica en energía eléctrica funcionando como generadores. (Chapman, 1998).

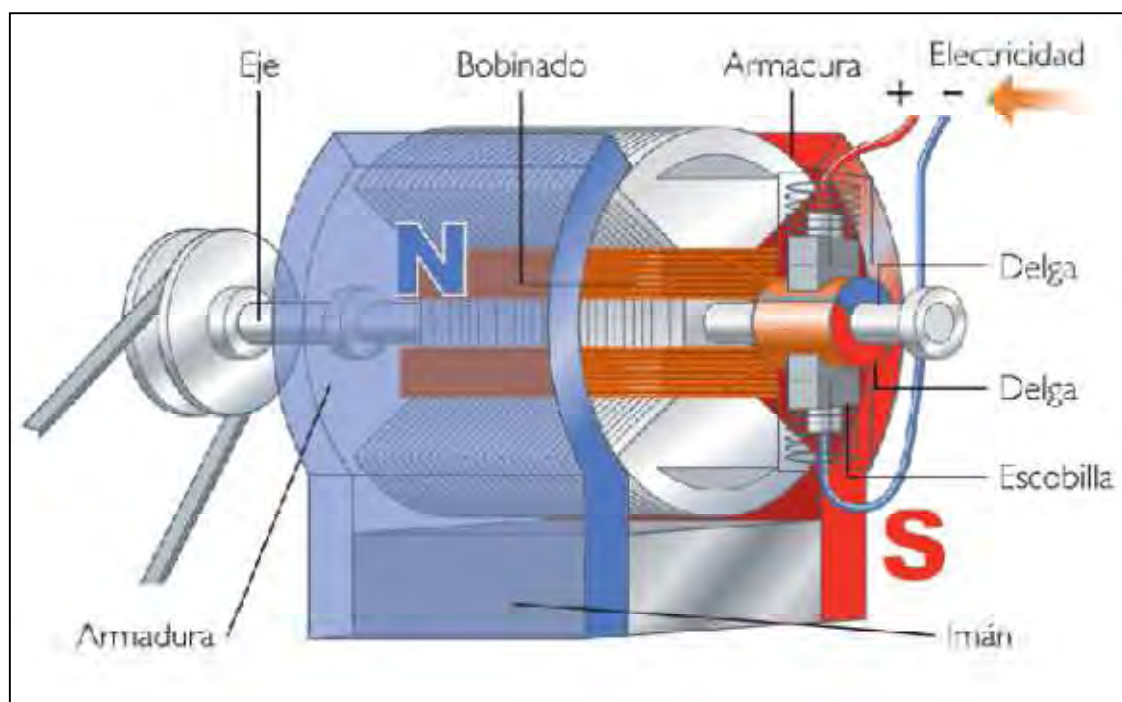
<sup>1</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con datos de (IIE, 2009).

---

El principio de funcionamiento (Domínguez Flores, 1998), establece que si un conductor por el que circula una corriente eléctrica se encuentra dentro de la acción de un campo magnético, éste tiende a desplazarse perpendicularmente a las líneas de acción del campo magnético.

El conductor tiende a funcionar como un electroimán debido a la corriente eléctrica que circula por el mismo adquiriendo de esta manera propiedades magnéticas, que provocan, debido a la interacción con los polos ubicados en el estator, el movimiento circular que se observa en el rotor del motor.

Así pues, partiendo del hecho de que cuando pasa corriente por un conductor produce un campo magnético; además de que, si se pone dentro de la acción de un campo magnético potente, el producto de la interacción de ambos campos magnéticos hace que el conductor tienda a desplazarse, produciendo así la energía mecánica. Dicha energía es comunicada al exterior mediante un dispositivo llamado flecha (ver figura 1.6).



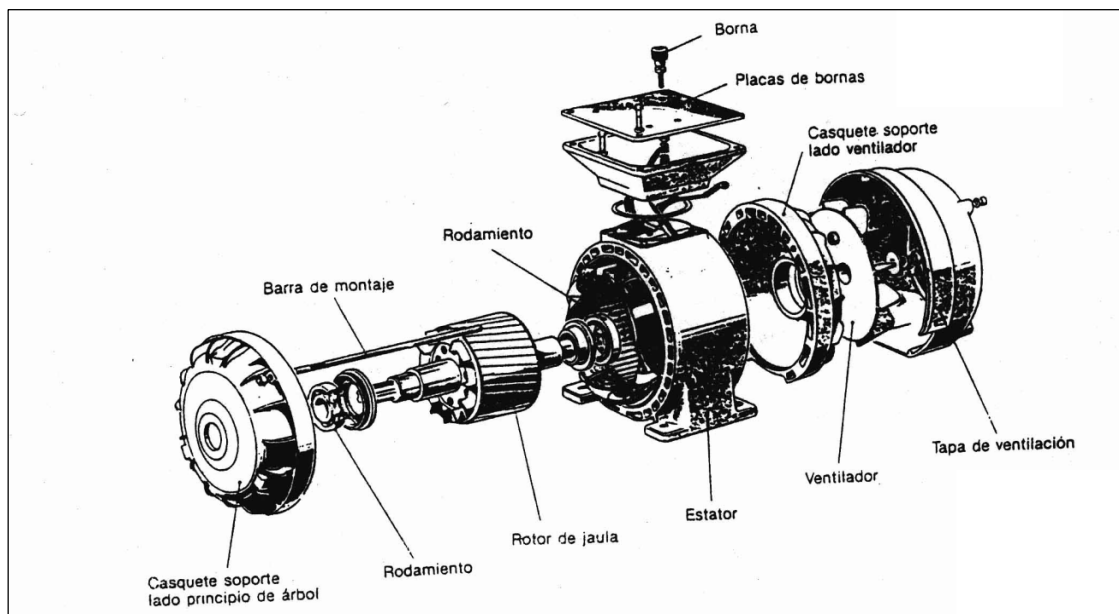
**Figura 1.6 Principio de funcionamiento de motores eléctricos** (Tecnoficio, 1998).

---

En la industria, es común encontrar cualquier tipo de motor, ya sea de corriente directa (CD) como de corriente alterna (CA).

En este amplio campo de aplicaciones, existen los motores de inducción rotor jaula de ardilla. Son llamados así por su forma constructiva del rotor, que es un cilindro montado en un eje. Internamente contiene barras conductoras longitudinales de aluminio o de cobre con surcos y conectados juntos en ambos extremos poniendo en cortocircuito los anillos que forman la jaula.

La figura 1.6.a ilustra los componentes de un motor de inducción rotor jaula de ardilla.



**Figura 1.6.a Componentes de un motor de inducción rotor jaula de ardilla (Cortés, 2002).**

El motor de inducción de jaula de ardilla, opera normalmente con una velocidad constante que varía ligeramente con la carga mecánica aplicada al eje. Debido a su simplicidad y robustez es un motor muy utilizado, siendo adecuado para casi todos los tipos de máquinas accionadas y encontradas en la práctica. (Cortés, 2002).

---

## **1.7 Normas actuales aplicables a motores trifásicos de inducción jaula de ardilla.**

En la actualidad, existen a nivel mundial normas que se aplican para la construcción y operación de los motores eléctricos y dependen de la región donde se comercialicen.

Europa, Asia y algunos países de América del Sur (Brasil y Argentina), se rigen bajo la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). Una característica de esta norma es que indica que la frecuencia de operación de los motores eléctricos debe de ser a 50 Hz; además de que, las medidas y sus valores eléctricos y mecánicos de los motores deben darse en el sistema internacional de unidades (SI). (Normas, 2001).

La zona norte y centro del continente Americano, se rige bajo la Asociación Nacional de Fabricantes de Equipos Eléctricos (NEMA). Una característica de esta norma es que indica que la frecuencia de operación de los motores eléctricos debe ser a 60 Hz. Sus medidas y valores mecánicos y eléctricos deben aplicarse en el sistema inglés. (Normas, 2001).

En este contexto, existen normas para regular la eficiencia mínima de los motores de alta eficiencia energética, para que puedan ser comercializados, como son: la NEMA MG-1 en su apartado de valores mínimos de eficiencias energéticas, la Asociación Canadiense de Normas (CSA) en su denominación C390-93 y en México la norma es la NOM-016-ENER-2002. (itesm, 2003).

Estas normas imponen a los productores eléctricos a cumplir con estándares de calidad en cada uno de los elementos que componen a los equipos en su totalidad; y así poder comercializarlos en las zonas donde requieran certificados de calidad y de operación.

A continuación se muestran algunas normas y especificaciones aplicables a la operación de motores eléctricos:

Norma	Descripción
NRF-048-PEMEX-2007	Diseño de instalaciones eléctricas en plantas industriales para PEMEX.
NRF-050-PEMEX-2007	Bombas centrífugas PEMEX.
NRF-053-PEMEX-2006	Sistemas de protección anticorrosiva a base de recubrimientos para instalaciones superficiales.
NRF-095-PEMEX-2004	Motores Eléctricos.
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos Electrónicos.
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.
CFE W6000-14	Motores eléctricos trifásicos de inducción de alta tensión con rotor tipo jaula de ardilla en potencias de 149 [kW] y mayores.
ANSI	American National Standard Institute.
AFBMA	Antifriccion Bearings Manufacturers Association.
API	American Petroleum Institute.
NEMA	National Electrical Manufacturers Association.
NEC	National Electrical Code.
HIS	Hidraulic Institute Standards.
ASME	American Society of Mechanical Engineers.

**Tabla 1.7 Normas aplicables a la operación de motores<sup>1</sup>.**

## 1.8 Conclusiones.

Del capítulo anterior se puede concluir que los motores eléctricos son de gran importancia para la industria, pues la mayoría de sus procesos son realizados con la ayuda de éstos. Además de que a partir de los conceptos definidos, es posible tener un panorama más general de los factores que deben considerarse para este proyecto.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con datos de (FIDE, 2009).



---

Estos factores son: El combustible que utilizan los motores para su funcionamiento, la unidad para medir el consumo energético, que en México existen programas como el FIDE que financian proyectos para mejorar la eficiencia de los procesos de las industrias; y que también, existen diferentes tarifas eléctricas dependiendo del nivel de tensión, de la región y del horario en que trabaje la planta.

También se comprendió el principio de funcionamiento de los motores de inducción jaula de ardilla; así como, sus características, las partes que lo constituyen y las normas actuales que los rigen.

---

## **CAPÍTULO 2.**

### **SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS.**

#### **2.1 Introducción.**

Una vez descritos los antecedentes de los motores eléctricos y definidos los conceptos que los involucran. En el siguiente capítulo se describirá la importancia de una correcta selección de motores eléctricos, tomando en cuenta los tipos de motores y los elementos para su selección.

Así como también, las aplicaciones de los motores eléctricos trifásicos de inducción jaula de ardilla (por tipo de carga y por par de arranque). Se definirán los tipos de torques y el tipo de pérdidas (efecto Joule en el estator y en el rotor, pérdidas mecánicas y pérdidas indeterminadas o adicionales), en este tipo de motores.

Se analizarán los tipos de motores de acuerdo a su eficiencia (eficiencia alta y eficiencia Premium); así como, el estudio de métodos de ahorro de energía tomando en cuenta los tipos de arrancadores.

También, se expondrá cómo corregir el de factor de potencia por medio de bancos de capacitores y bancos de capacitores automáticos para obtener un resultado de ahorro de energía.

---

## **2.2 Importancia de la correcta selección de motores eléctricos.**

Es importante hacer una buena selección de un motor eléctrico; ya que, de eso dependerá la oportunidad de obtener la mayor vida útil del equipo y una máxima eficiencia, lo que retribuirá directamente a evitar posibles descomposturas o fallas.

La selección del tipo adecuado de motor con respecto a su: enclaustramiento, índice de protección, montaje, par de arranque y diseños NEMA e IEC; sólo puede ser efectuada después de un análisis cuidadoso, considerando factores tales como: costo inicial, capacidad de la red, necesidad de corrección del factor de potencia, par requerido, efecto de inercia de la carga, necesidad de regulación de velocidad y exposición de la máquina a ambientes agresivos. (WEG, 2010).

## **2.3 Tipos de motores.**

Como se mencionó anteriormente, los motores eléctricos son máquinas destinadas a transformar energía eléctrica en energía mecánica. Así pues, atendiendo al tipo de corriente utilizada para su alimentación, existen dos tipos de motores eléctricos (Pedraza, 1999):

- 1) Motores de corriente directa (CD) o corriente continua (CC). Se utilizan en casos en los que es importante regular continuamente la velocidad del motor y también en los que es imprescindible utilizar corriente directa; como es el caso de motores accionados por pilas o baterías; es decir, tienen aplicaciones muy específicas. Los motores de corriente directa pueden ser de 4 tipos:
  - De excitación independiente
  - De excitación serie
  - De excitación (shunt) o derivación
  - De excitación compuesta (compund).

---

2) Motores de corriente alterna (CA). Son los tipos de motores más usados en la industria, ya que tienen una aplicación más generalizada gracias a su facilidad de utilización, poco mantenimiento y bajo costo de fabricación. Además de que estos equipos se alimentan con el sistema de distribución de energía convencional. Los motores de corriente alterna se dividen en:

- Motores síncronos
- Motores asíncronos que a su vez se dividen en:
  - Monofásicos que a su vez se dividen en:
    - De bobinado auxiliar
    - De espira en corto circuito
    - Universal
  - Trifásicos que a su vez se dividen en:
    - De rotor bobinado
    - De rotor en corto circuito (jaula de ardilla)

Los motores síncronos son motores de velocidad constante y proporcional con la frecuencia de la red. En contraparte, en el motor asíncrono la parte móvil (rotor) gira a una velocidad inferior a la de sincronismo. Estos motores pueden ser monofásicos y trifásicos (Chapman, 1998).

Los motores trifásicos son motores en los que el bobinado inductor colocado en el estator, está formado por tres bobinados independientes desplazados  $120^\circ$  eléctricos entre sí y alimentados por un sistema trifásico de corriente alterna. Se encuentran de dos tipos: de rotor bobinado y de rotor en corto circuito (jaula de ardilla). (Pérez Amador, 1994).

---

El motor jaula de ardilla es el más utilizado en cualquier aplicación industrial, debido a su construcción robusta y simple, de funcionamiento seguro, además de ser la solución más económica; pero tiene el inconveniente de que absorbe una elevada intensidad de corriente en el arranque. (Pérez Amador, 1994).

## **2.4 Elementos para la selección de motores eléctricos trifásicos de inducción jaula de ardilla.**

En la selección correcta de los motores, es importante contemplar las características técnicas de aplicación y las características de carga. Los elementos a considerar para una adecuada selección de un motor eléctrico trifásico de inducción jaula de ardilla (WEG, 2010), son:

- Enclaustramiento
- Índice de protección
- Tipo de montaje
- Par de arranque
- Diseños norma NEMA
- Diseños norma IEC

### **2.4.1 Por Enclaustramiento.**

Por norma, los motores están diseñados para operar en un ambiente con temperatura no superior a 40°C y en una altura no superior a 1000 metros sobre el nivel del mar (Cortés, 2002). La instalación en cualquier ambiente por encima de estas condiciones, hará que el motor deba ser operado a una carga menor de la nominal. Esto sucede porque las propiedades refrigerantes disminuyen.

---

La vida útil de un motor está principalmente en su devanado. Si la refrigeración es insuficiente, el devanado se debilita y sufre daños severos. Generalmente los motores jaula de ardilla están refrigerados mediante aire. A mayor altitud sobre el nivel del mar, el aire toma una densidad mayor y a una misma velocidad, se tendrá menor flujo de aire.

En cuanto a la temperatura ambiente, es necesario garantizar que el motor no tenga una elevación de temperatura tal, que lo haga tener un calentamiento por encima de su límite térmico.

La carcasa de un motor es la parte que protege y cubre al estator y al rotor (Cortés, 2002). Y puede ser:

- Totalmente cerrada (enclaustramiento TCCV o TEFC)
- Abierta (enclaustramiento APG)
- A prueba de goteo (enclaustramiento APG)
- A prueba de explosiones (enclaustramiento TCCV-APE)
- De tipo sumergible

#### **2.4.2 Por Índice de Protección.**

Para garantizar una adecuada selección de motor, se debe considerar las condiciones del ambiente como: la contaminación, presencia de agentes químicos, utilización en lugares abiertos o cerrados. Y para ello es importante conocer el significado de grado de protección (IP), definido por las normas internacionales NBR-6146 e IEC-34.5.

IP significa Protección Interna y determina el grado de protección mecánico o de enclaustramiento del motor (WEG, 2010). Viene seguido de dos cifras características.

La primera de ellas indica la protección contra el ingreso de cuerpos sólidos y la segunda, la protección contra el ingreso de líquidos. Cuando mayor es el grado de protección IP, más protegido está el equipo. Como se muestra a continuación:

Motor	Clase de Protección	1° Algarismo		2° Algarismo
		Protección contra contacto	Protección contra cuerpos extraños	Protección contra agua
Motores Abiertos	IP00	No hay	No hay	No hay
	IP02	No hay	No hay	Gotas de agua hasta una inclinación de 15° vertical
	IP11	Torque accidental con las manos	Cuerpos extraños solidos de dimensiones arriba de 50 mm	Gotas de agua en vertical
	IP12	Torque accidental con las manos	Cuerpos extraños solidos de dimensiones arriba de 50 mm	Gotas de agua hasta una inclinación de 15° vertical
	IP13	Torque accidental con las manos	Cuerpos extraños solidos de dimensiones arriba de 50 mm	Agua de lluvia hasta una inclinación de 60° vertical
	IP21	Torque accidental con los dedos	Cuerpos extraños solidos de dimensiones arriba de 12 mm	Gotas de agua en la vertical
	IP22	Torque con los dedos	Cuerpos extraños solidos de dimensiones arriba de 12 mm	Gotas de agua hasta una inclinación de 15° vertical
	IP23	Torque con los dedos	Cuerpos extraños solidos de dimensiones arriba de 12 mm	Agua de lluvia hasta una inclinación de 60° vertical
Motores Cerrados	IP44	Torque con herramientas	Cuerpos extraños solidos de dimensiones arriba de 1 mm	Salpicados de todas direcciones
	IP54	Protección completa contra torque	Protección contra acúmulo de polvos nocivos	Salpicados de todas direcciones
	IP55	Protección completa contra torque	Protección contra acúmulo de polvos nocivos	Chorros de agua en todas direcciones
	IP(W)55	Protección completa contra torque	Protección contra acúmulo de polvos nocivos	Lluvia, maresía

**Tabla 2.4.2 Índices de protección IP<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con datos de (WEG, 2010).

---

### **2.4.3 Por tipo de montaje.**

Muchos de los problemas que se presentan en los motores (vibraciones y desalineación durante el funcionamiento), tienen origen en la forma en que se montan. El acomodo de las partes constructivas de las máquinas con relación a su fijación, la disposición de sus descansos y la punta de eje; son uniformadas por las normas: NBR-5031, IEC 34-7, DIN 42950 y NEMA MG 1-4.03. (Torres, 2011).

### **2.4.4 Por par de arranque.**

Uno de los momentos más críticos para el motor, la red y la carga es el arranque. Por sus características propias, el motor jaula de ardilla consume durante el arranque una corriente que puede oscilar entre 5 y 7 veces la corriente nominal (Enriquez Harper, 2006). El arranque es el periodo en el que el motor hace la transición desde su estado de reposo hasta su velocidad de régimen.

Para la red, la mejor condición de arranque es en la que el tiempo de transición es el mínimo posible y la corriente consumida también es la mínima posible. Para el motor la mejor condición de arranque es la que garantiza el menor calentamiento. Y para la carga la mejor condición es la que garantiza los menores desgastes mecánicos.

En general, el tipo de arranque de cada aplicación debe ser analizado adecuadamente para lograr el mejor equilibrio entre las tres partes mencionadas previamente. Existen diferentes tipos de arranque (Harper, 2008):

- 1.- Directo: El motor tendrá una corriente de arranque normal (hasta siete veces la corriente nominal) y un par de arranque normal.



---

2.- Estrella – Triángulo: La corriente y el torque se reducen a la tercera parte (hasta tres veces la corriente nominal).

3.- Por autotransformador: El autotransformador es fabricado para entregar al motor una tensión menor de la nominal. Esta tensión puede estar entre el 30 % y el 70 % dependiendo de la aplicación. La corriente y el torque variarán en producción cuadrática a la tensión de alimentación.

4.- Arranque electrónico suave: En este método, el arrancador alimenta el motor con una tensión reducida y gradualmente aumenta la tensión hasta la tensión de régimen. El comportamiento inicial de la corriente y el torque será idéntico al método anterior, pero el comportamiento durante todo el periodo de transición, dependerá de la manera como el arrancador suave sea controlado.

5.- Variador de velocidad (variador de frecuencia): Se logra limitar la corriente de arranque a valores de hasta dos veces la corriente nominal, mientras se obtiene un torque de arranque adecuado para cualquier aplicación. La transición será la más suave posible de todos los métodos. Mecánicamente es la mejor forma de hacer la operación, además de que permite realizar un control de velocidad preciso, gracias a los avances de la electrónica de potencia y control.

En los primeros tres métodos se da una transición brusca desde el reposo hasta su velocidad de régimen. En los métodos 2 y 3, adicionalmente se da una transición desde el estado de tensión reducida a tensión plena. En el método 4, se logra una transición menos brusca, pero aún con algunos saltos, pues lo que se está controlando es la tensión de alimentación. En el método 5, se logra una transición mucho más suave, pues se está controlando efectivamente la velocidad del motor y de la carga.

---

#### **2.4.5 Diseños norma NEMA.**

Como se mencionó anteriormente, la Asociación Nacional de Fabricantes de Equipos Eléctricos (NEMA), es una norma bajo la cual se fabrican los motores en la zona norte y centro del continente Americano.

Esta norma ha desarrollado un sistema de identificación con letras, en la cual cada tipo de motor comercial de inducción de jaula de ardilla se fabrica de acuerdo con determinada norma de diseño; y se coloca en determinada clase, identificada con una letra (A, B, C, D y F), de acuerdo al diseño de la jaula del rotor (Siemens, 2009). Estos diseños serán definidos posteriormente.

#### **2.4.6 Diseños norma IEC.**

Como se mencionó anteriormente, la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), es una norma acogida por la gran mayoría de países y especialmente los europeos.

Existen varias diferencias en la construcción de motores dependiendo de la norma, pero lo más significativo es que mientras que las dimensiones según IEC son en milímetros (mm), según NEMA son en pulgadas (plg). Por esta razón es que la intercambiabilidad no es inmediata (ABB, 2009).

### **2.5 Aplicación de motores eléctricos trifásicos de inducción jaula de ardilla.**

Hoy en día, el motor tipo jaula de ardilla es el más práctico para implementaciones en donde se requiera variación de velocidad; además de que puede instalarse en ambientes de riesgo por la característica de carecer de chispa interna.

---

Este tipo de motores, se utilizan con más frecuencia en las tecnologías de accionamiento, debido a su sencilla estructura mecánica y eléctrica y a su alta fiabilidad. Su aplicación sólo está limitada por sus características de par y velocidad de la carga. (Domínguez Flores, 1998).

La correcta selección del motor implica que el mismo cumpla las exigencias requeridas por la aplicación específica. Bajo este aspecto el motor debe básicamente ser capaz de:

- Acelerar la carga en tiempo suficientemente corto, para que el calentamiento no dañe las características físicas de los materiales aislantes.
- Funcionar en el régimen especificado sin que la temperatura de sus diversas partes exceda la clase del aislante, o que el ambiente pueda venir a provocar la destrucción del mismo.
- Bajo el punto de vista económico, funcionar con valores de rendimiento y factor de potencia dentro de la franja óptima para la cual fue proyectado.

## **2.6 Aplicación de motores eléctricos por tipo de carga.**

La carga es la que define la potencia y velocidad del motor. En la mayoría de las aplicaciones, el motor jaula de ardilla puede atender cualquier carga en su eje, pero es conveniente hacer un estudio detallado de cuál será el momento de inercia (Fitzgerald, 2004). Es ideal conocer las condiciones de la carga durante la especificación del motor, pues el comportamiento varía dependiendo de ésta.

Máquinas como bombas y ventiladores tienen un comportamiento específico diferente de elevadores. En todas estas máquinas, los torques de arranque son diferentes y con toda seguridad, los ciclos de trabajo varían.

---

### **2.6.1 Bombas.**

Son máquinas destinadas a suministrar energía al líquido, a partir de una fuente externa, con el fin de promover su desplazamiento. (Cortés, 2002).

### **2.6.2 Compresores.**

Son máquinas destinadas a producir la compresión de gases. Convierten trabajo mecánico en calentamiento. (Cortés, 2002).

### **2.6.3 Ventiladores.**

Son máquinas rotativas capaces de aumentar la energía de un fluido por el aumento de la presión estática y cinética. (Cortés, 2002).

### **2.6.4 Molinos de piedra.**

En los molinos de piedra, el motor impulsa al rotor a una alta velocidad a través de la cinta, pues en el rotor hay una serie de martillos. Cuando el material entra en el área de trabajo de martillos, son triturados para alcanzar el tamaño requerido y obtener el producto final. (Cortés, 2002).

### **2.6.5 Elevadores.**

Es un sistema de transporte vertical para movilizar personas o bienes entre diferentes niveles. Utilizado para ascender o descender. Se conforma con partes mecánicas, eléctricas y electrónicas que funcionan conjuntamente para lograr un medio seguro de movilidad. (Cortés, 2002).

---

## **2.7 Aplicación por par de arranque.**

De acuerdo con las características de par en relación a velocidad y corriente de arranque, los motores de inducción trifásicos con rotor jaula de ardilla, son clasificados en categorías para tipo de carga (Harper, 2008). Estas categorías son definidas en la norma NBR 7094 (Normas, 2001). Y son las siguientes:

- Categoría N: Par de arranque normal, corriente de arranque normal y bajo deslizamiento. Constituyen la mayoría de los motores encontrados en el mercado y sirven para accionar cargas normales, como bombas, ventiladores, etc.
- Categoría H: Par de arranque alto, corriente de arranque normal y bajo deslizamiento. Usados para cargas que exigen mayor par en el arranque, como transportadoras, cargas de alta inercia y algunos tipos de ventiladores.
- Categoría D: Par de arranque alto, corriente de arranque normal y alto deslizamiento. Usados en excéntricas y máquinas semejantes, donde la carga presenta picos periódicos. Usados también en elevadores y cargas que necesitan de par de arranque muy alto y corriente de arranque limitada.

## **2.8 Tipos de torques en los motores eléctricos según norma NEMA.**

Los motores trifásicos de potencias mayores de 1HP son clasificados por las normas NEMA. (Siemens, 2009), según el diseño de la jaula del rotor:

- NEMA A: Torque alto, deslizamiento nominal bajo y corriente de arranque alta. Son usados para aplicaciones especiales donde se requiere un torque máximo mayor que el normal para satisfacer los requerimientos de sobrecargas de corta duración.

- 
- NEMA B: Torque normal, corriente de arranque normal y deslizamiento nominal normal. Es el motor típico dentro del rango de 1 a 125 HP. Este tipo de motor proporcionará un arranque y una aceleración suave para la mayoría de las cargas y también puede resistir temporalmente picos elevados de carga sin detenerse.
  - NEMA C: Torque alto, deslizamiento nominal normal, corriente de arranque normal. Son motores de inducción con rotor de doble jaula de ardilla, que desarrollan un alto torque de arranque y por ello son utilizados para cargas de arranque pesado.
  - NEMA D: Torque alto, alto deslizamiento nominal, baja corriente de arranque. Este motor combina un alto torque de arranque con un alto deslizamiento nominal (Ultra high slip). Estos motores son recomendados para cargas de corta duración con frecuentes arranques y paradas.
  - NEMA F: Torque de arranque bajo, corriente de arranque baja y bajo deslizamiento nominal. Son motores pocos usados; ya que se utiliza en casos en los que es importante limitar la corriente de arranque.

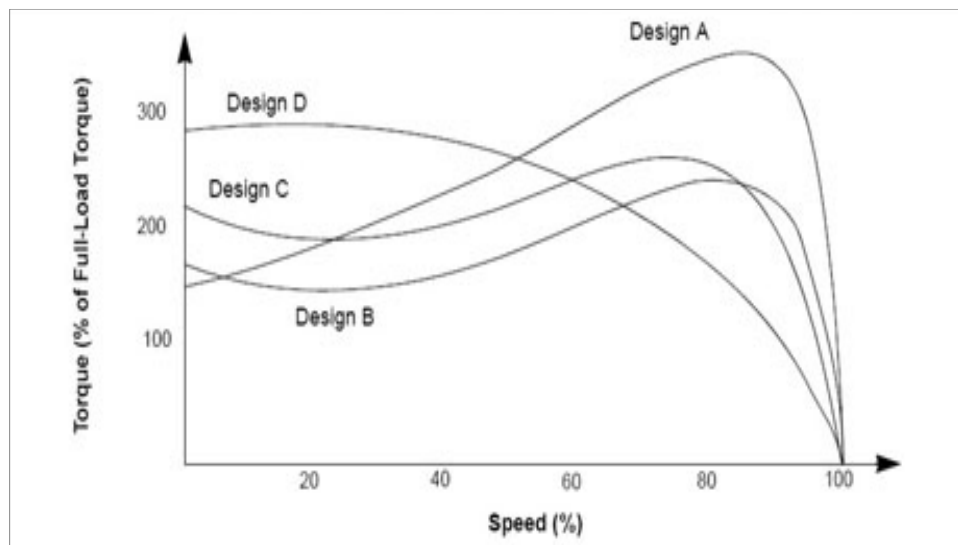


Figura 2.8 Curvas torque-velocidad de motores diseño NEMA. (Siemens, 2009)

---

## **2.9 Ahorro de energía en motores trifásicos de inducción jaula de ardilla.**

Alrededor del 60% el consumo de la energía eléctrica generada se debe al funcionamiento de los motores eléctricos. Son incontables los ejemplos de la aplicación de motores en la industria, el comercio, los servicios y el hogar. El accionamiento de máquinas por motores eléctricos es de gran importancia económica.

El ahorro de energía comienza desde la selección apropiada de los motores. Siempre hay uno adecuado a las necesidades que se tienen, tanto en lo que respecta a su tipo, por condiciones ambientales de operación, por condiciones de arranque o regulación de velocidad, así como por su tamaño o potencia.

En el accionamiento de motores de inducción jaula de ardilla, se encuentran importantes oportunidades de ahorro de energía debido al avance en el diseño y construcción de motores de alta eficiencia. En México se calcula que se utilizan más de 350 millones de motores eléctricos y de éstos un alto porcentaje es de tipo jaula de ardilla. (Campos Avella, 2004).

## **2.10 Tipo de Pérdidas en motores trifásicos de corriente alterna.**

El calentamiento de los conductores debido al paso de corriente eléctrica fue uno de los primeros efectos observados por los científicos al estudiar los fenómenos eléctricos; sin embargo, habría de pasar algún tiempo antes de que se conociera la magnitud de tal efecto calorífico y los factores de los que depende.

Hasta 1840, James Prescott Joule (1818-1889) encontró la ley que rige la producción de calor por el paso de una corriente eléctrica a través de un conductor. A dicha ley se le conoce como Ley de Joule. (Serway & Faughn, 2001).

---

La ley de Joule establece que la cantidad de calor (Q) producida es directamente proporcional a la resistencia (R) del conductor, al cuadrado de la intensidad de corriente (I) que lo atraviesa y al tiempo (t) que la corriente pasa por el conductor. Esto es:

$$Q = I^2 \times R \times t \dots\dots (2.10)$$

Esta ley, también llamada el efecto calorífico, puede ser explicada a partir del mecanismo de conducción de los electrones en un metal. La energía disipada en los choques internos aumenta la agitación térmica del material, lo que da lugar a un aumento de la temperatura y por consiguiente producción de calor.

Los motores de inducción trifásicos, forman parte de las cargas que no son puramente resistivas. En éstos, parte de la energía eléctrica consumida se disipa en forma de calor (pérdida de energía) y otra fracción de dicha energía se emplea en producir un trabajo mecánico (trabajo útil). (FIDE, 2009). Es por eso que es importante considerar en el rendimiento de un motor, las pérdidas que se producen en el mismo.

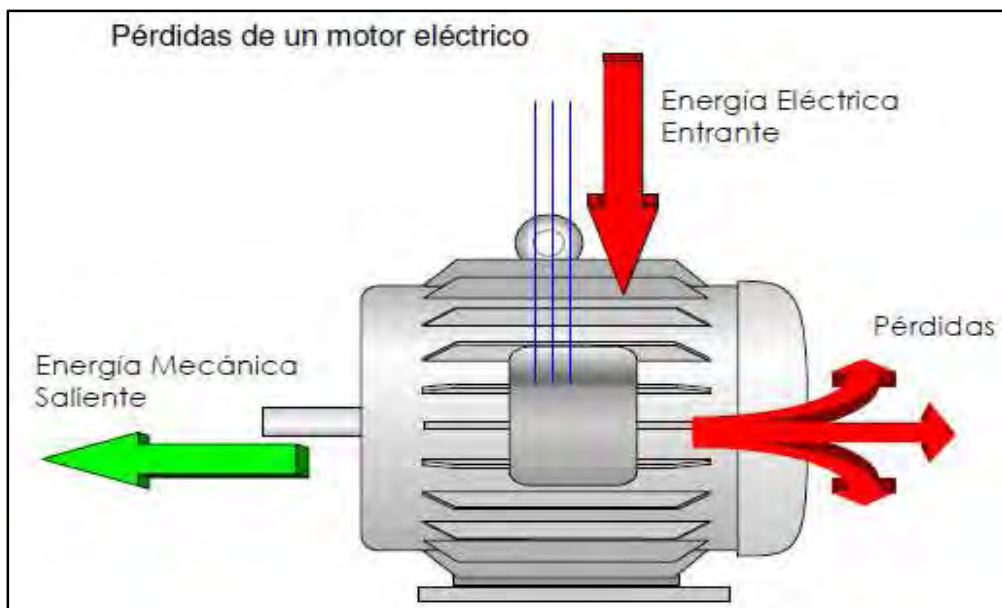


Figura 2.10 Pérdidas en el motor durante su funcionamiento (Proenergía SAC).



---

### **2.10.1 Pérdidas por efecto Joule en estator.**

Estas pérdidas son expresadas como  $I^2 \cdot R$ , y por consiguiente se incrementan rápidamente con la carga del motor y son proporcionales al deslizamiento. Son causadas por el calentamiento provocado por la circulación de corriente a través de la resistencia del devanado del estator. (Pedraza, 1999).

Entre las técnicas empleadas para reducir estas pérdidas está la optimización del diseño de las ranuras del estator. Las laminaciones del estator deben ser de acero de baja pérdida, lo más uniformes y delgadas posibles para maximizar la intensidad de los campos magnéticos. Deben estar alineadas cuidadosamente para garantizar que los canales sean rectos; naturalmente, cuanto más delgadas sean las laminaciones, éstas serán más caras de producir. Además, una gran precisión de alineamiento exige técnicas de producción más especializadas.

### **2.10.2 Pérdidas por efecto Joule en rotor.**

De igual manera que sucede con las pérdidas en el estator, este tipo de pérdidas son expresadas como  $I^2 \cdot R$ ; y aparecen en forma de calor consecuencia de la resistencia eléctrica ejercida por las barras conductoras del rotor. (Pedraza, 1999)

Las pérdidas en el rotor son causadas por las corrientes en el mismo y por las pérdidas en el entrehierro. Estas pérdidas se reducen aumentando el tamaño de las barras conductoras y los anillos terminales para reducir la resistencia. Las pérdidas de carga por dispersión resultan del flujo de fugas inducidas por las corrientes de carga y se pueden reducir mejorando la forma geométrica de las ranuras.

---

### 2.10.3 Pérdidas mecánicas.

Este tipo de pérdidas son debidas a la fricción entre rodamientos y a las pérdidas por resistencia del aire al giro de un ventilador y otros elementos rotativos del motor. (Chapman, 1998).

### 2.10.4 Pérdidas indeterminadas o adicionales.

Las pérdidas adicionales son todas aquellas que no se pueden clasificar en ninguna de las categorías descritas anteriormente. Por convención, se asume que son iguales al 1% de salida de la máquina. (Cortés, 2002).

La naturaleza de estas pérdidas es muy compleja, pero algunos de los elementos que influyen son: el diseño del devanado, la relación entre la magnitud del entrehierro y las aberturas; la relación entre el número de ranuras del estator y del rotor, la inducción en el entrehierro; las condiciones de superficie del rotor, el tipo de contacto superficial entre las barras y las laminaciones del rotor.

La eficiencia de un motor mide la conversión de la energía eléctrica en trabajo útil. Así pues, para aumentarla es preciso reducir estas pérdidas.

## 2.11 Comparación de tipos de motores por eficiencia.

La eficiencia de un motor es la relación entre la potencia eléctrica de salida y la potencia eléctrica de entrada. Este es el concepto más importante desde el punto de vista del consumo de energía y del costo de operación de un motor eléctrico. (Sánchez, 1996). Y se expresa de la siguiente manera:

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ eléctrica\ de\ salida}{Potencia\ eléctrica\ de\ entrada} \dots\dots\dots (2.11)$$

---


$$Eficiencia = \frac{Potencia\ eléctrica\ que\ entra - Pérdidas}{Potencia\ eléctrica\ que\ entra} \dots\dots\dots (2.11.a)$$

En un caso ideal, el valor más alto de eficiencia es la unidad (1), si las pérdidas fueran cero (como lo indica la expresión 2.11.a).

Los fabricantes de motores hacen innovaciones tecnológicas para disminuir las pérdidas al máximo posible empleando materiales de alta calidad y un proceso de mejora continua en la fabricación.

En octubre de 2008 surgió la norma IEC 60034-30 (ABB, 2009), que establece 4 categorías para los motores según su eficiencia. Cabe aclarar que la designación IE4 se encuentra aún en etapa de estudio.

Designación	Categoría
IE1	Standard
IE2	High (Alta Eficiencia)
IE3	Premium
IE4	Super Premium

**Tabla 2.11 Categorías de los tipos de eficiencia según la IEC 60034-30 (ABB, 2009).**

### 2.11.1 Motor eficiencia alta.

Hay diferencias sustanciales en la eficiencia de los motores para un tipo y tamaño dado. La eficiencia en carga parcial es importante en aplicaciones que implican operación extendida a cargas reducidas.

El tamaño es un factor principal en eficiencias parciales. Los pequeños motores son menos eficientes por motivos prácticos y económicos.

---

Los motores eléctricos de eficiencia estándar, no consideran la eficiencia como la principal cualidad, más bien privilegian la funcionalidad y precio. Los motores con más de 15 años podrían considerarse de eficiencia estándar. (Campos Avella, 2004).

Los motores de eficiencia alta, surgen en la década de los años noventa, como consecuencia de contrarrestar los altos precios de la energía y por la necesidad evidente de hacer un uso eficiente y racional de la energía (Campos Avella, 2004).

Las mejoras recientes en la eficiencia de los motores eléctricos son debido a los nuevos componentes básicos que todos los motores poseen (Proenergía SAC). Tales como:

- Cable con una resistencia más baja: Reduce la generación de calor en los bobinados del estator. La resistencia más baja se consigue principalmente haciendo los conductores más gruesos. Esto requiere reducir el espesor del aislamiento, lo cual requiere materiales de aislamiento mejorados.
- Diseño mejorado del circuito eléctrico del rotor: La corriente del rotor en un motor es inducida por el campo magnético del bobinado del estator. El voltaje inducido es bajo, así que los conductores del rotor deben tener muy baja resistencia para permitir las altas corrientes requeridas. Reduciendo la resistencia de los conductores del rotor reducen las pérdidas de calor e incrementan la producción de energía en relación a la entrada de energía.
- Laminación de acero más delgada en los circuitos magnéticos: Esto reduce las corrientes parásitas, que son corrientes eléctricas circulares inducidas en el acero de los circuitos magnéticos. Estas corrientes disipan energía calentando el acero.

- 
- Forma mejorada del núcleo del estator de acero y circuitos magnéticos del rotor: Para incrementar la fuerza producida en relación a las pérdidas.
  - Huecos más pequeños entre estator y rotor: Logrando reducir pérdidas de flujo magnético.
  - Diseño de ventiladores internos, aletas de refrigeración, y paso del aire de refrigeración para reducir el requerimiento de energía de enfriamiento: Los motores de alta eficiencia producen menos calor, así que necesitan menos refrigeración. También pueden diseñarse para sobrevivir a temperaturas más altas.
  - Rodamientos con fricción más baja: Se disminuyen las pérdidas por el efecto joule y pérdidas mecánicas.

### **2.11.2 Motor eficiencia Premium.**

La innovación de los motores premium se basa en elevar aún más la eficiencia de los motores eléctricos. Para ello se ha perfeccionado su proceso de manufactura y se utilizan materiales de alta calidad, lo cual implica que su costo es también más elevado (Siemens, 2009). De la misma forma que ocurre con los motores de alta eficiencia, se pone especial cuidado en la fabricación de los componentes básicos; logrando una eficiencia aún mayor. En la figura 2.11.2, se observa un comparativo de los diferentes tipos de eficiencia.



Figura 2.11.2 Comparativo de los diferentes tipos de eficiencia (Siemens, 2009).

## 2.12 Ahorro de energía en el método de arranque.

El ahorro de energía en el método de arranque es necesario para la industria que trabaja con motores de grandes dimensiones, los cuales al arrancar sin algún dispositivo consumirían una gran cantidad de energía, lo cual no sería benéfico; ya que, traería como consecuencia altos costos en la facturación eléctrica.

La corriente de arranque en conexión directa para un motor de inducción, puede ser de siete veces la corriente normal a plena carga (Enriquez Harper, 2006). En algunas circunstancias, y especialmente para los motores más pequeños, esta elevada corriente de arranque es aceptable, pero para máquinas más grandes, el requerimiento en el sistema eléctrico local, podría ser demasiado grande y la tensión en los bobinados de la máquina podría ser excesiva.

Es por esta situación, se han implementado diversos métodos de arranque para reducir el excesivo consumo en el arranque de motores de grandes dimensiones.

---

### **2.12.1 Arrancador a tensión plena.**

Cuando se arranca un motor eléctrico conectándolo directamente a la tensión de la red, éste desarrolla un elevado torque de arranque que puede aumentar hasta 160% de su valor nominal. Así el arrancador a tensión plena es aquel en el cual, el motor para salir del punto de inercia, consume toda la corriente que necesite proporcionada por la red de alimentación a la cual está conectado el motor. (Harper, 2008).

Los arrancadores a tensión plena, son utilizados para el arranque de motores jaula de ardilla. Cuentan con interruptor termo magnético, contacto de carga y relevador de sobrecarga; y un control por botón pulsador doble. En rangos de 25 HP hasta 60 HP.

### **2.12.2 Arrancador suave (Soft Starter).**

Los arrancadores electrónicos suaves usan un dispositivo simple para retardar el encendido de cada ciclo de tensión y por lo tanto reducir el voltaje efectivo aplicado al motor. Aparte de un pequeño ahorro de energía durante la rampa de subida, no reducen la energía que consume el motor; sin embargo, sí reducen el desgaste mecánico durante el arranque y la parada, permitiendo el ahorro de energía desconectando los motores con mayor frecuencia. (Harper, 2008).

Muchos arrancadores suaves incorporan actualmente una característica de optimización de energía para proporcionar ahorros energéticos adicionales cuando se funciona durante largos periodos a muy baja carga.

En unidades más grandes, es usual conmutar el arrancador suave una vez que el motor está funcionando en carga para prevenir las pérdidas de potencia en los equipos.

---

### 2.12.3 Drive (Variador de velocidad).

La velocidad de los motores depende de la alimentación y de las características propias del motor, los cuales no se pueden modificar fácilmente. Para lograr ese control, se emplea un variador de velocidad. Estos variadores se utilizan en una amplia gama de aplicaciones industriales.

Un variador de velocidad puede consistir en una combinación de motor eléctrico y un controlador que se encargará de regular la velocidad del mismo. Los variadores incluyen tanto el controlador como el motor eléctrico; sin embargo, es común emplear el término variador únicamente al controlador eléctrico. (Enriquez Harper, 2006).

Las ventajas de controlar la velocidad de un proceso son las siguientes:

- Operaciones más suaves.
- Control de la aceleración.
- Distintas velocidades de operación para cada fase del proceso.
- Permitir operaciones lentas para fines de ajuste o prueba.
- Ajuste de la tasa de producción.
- Permitir el posicionamiento de alta precisión.
- Control del Par motor (torque).

Tipos de variadores de velocidad:

- Variadores para motores de CC: Controlan la velocidad de motores de corriente continua serie, derivación, compuesto y de imanes permanentes.
- Variadores de velocidad por corrientes de Eddy: Consta de un motor de velocidad fija y un embrague de corrientes de Eddy. El embrague contiene un rotor de velocidad fija (acoplado al motor) y un rotor de



---

velocidad variable, separados por un pequeño entrehierro. De esta forma, a mayor intensidad de campo magnético, mayor par y velocidad transmitidos, y a menor campo magnético menores serán el par y la velocidad en el rotor de salida. El control de la velocidad de salida de este tipo de variadores generalmente se realiza por medio de lazo cerrado, utilizando como elemento de retroalimentación un tacómetro de C.A.

- Variadores de deslizamiento: Este tipo de variadores se aplica únicamente para los motores de inducción de rotor devanado. De esta forma, a mayor deslizamiento, menor velocidad mecánica del motor. El deslizamiento puede incrementarse al aumentar la resistencia del devanado del rotor, o bien, al reducir el voltaje en el devanado del rotor. De esta forma es que puede conseguirse el control de la velocidad en los motores de inducción de rotor devanado.
- Variadores para motores de C.A (variadores de frecuencia): Permiten controlar la velocidad tanto de motores de inducción como de los motores síncronos mediante el ajuste de la frecuencia de alimentación al motor. La frecuencia y la velocidad son directamente proporcionales, de tal manera que al aumentar la frecuencia de alimentación al motor, se incrementará la velocidad de la flecha, y al reducir el valor de la frecuencia disminuirá la velocidad del eje. Por ello es que este tipo de variadores manipula la frecuencia de alimentación al motor a fin de obtener el control de la velocidad de la máquina.

#### **2.12.4 Arrancador a tensión reducida.**

Lo arrancadores a tensión reducida, son aquellos en los cuales la corriente en las terminales del motor disminuye en proporción directa con la tensión reducida mientras que el torque se reduce en la relación del cuadrado de dicha tensión.

---

### 2.12.5 Arrancador estrella-triángulo.

Los arrancadores estrella-triángulo, es otra opción que se tiene para el arranque de motores y reducir el consumo de corriente al arranque.

Por un lado se tiene una conexión estrella, la cual consiste en unir entre sí una terminal de cada bobina del estator y alimentar la otra terminal, para generar una tensión equivalente a la tensión entre fases, dividida por el factor de  $\sqrt{3}$ , entre las terminales de cada bobina.

Por el otro lado se tiene una conexión triángulo (delta), que consiste en conectar en serie las bobinas del estator y aplicar tensión equivalente a la tensión línea-línea.

La característica principal para utilizar este tipo de conexión en el arranque de un motor es que cada una de las bobinas sea independiente y sus extremos sean accesibles desde la placa del motor.

La secuencia de arranque comienza en configuración estrella, generando una tensión en cada una de las bobinas del estator  $\sqrt{3}$  veces menor que la nominal, con una reducción proporcional de la corriente nominal ( $I_n$ ).

Una vez que el motor alcanza entre el 70% y 80% de su velocidad nominal, se desconecta el acoplamiento en estrella para realizar la conmutación en triángulo (delta), a partir del cual, el motor comienza a operar en condiciones nominales. (Enriquez Harper, 2006).

---

### 2.13 Corrección de factor de potencia.

Todos los aparatos eléctricos consumen una cantidad de energía eléctrica a la cual se le llama activa, esta es la que se registra en los medidores y es facturada por la empresa que suministra la energía eléctrica. (Chapman, 1998)

Hay otros aparatos, que debido a su funcionamiento consumen una cantidad mayor de energía eléctrica a la que registra el medidor. Una es la potencia activa, y la otra es la potencia reactiva que no es registrada por los medidores de la compañía suministradora de energía eléctrica. La potencia reactiva no es consumida como tal, sino “entretenida” entre el aparato y la red eléctrica.

La energía total consumida está conformada por la potencia activa y la potencia reactiva la cual da como resultado la potencia aparente.

Los motores de inducción tienen el inconveniente de que aún en óptimas condiciones consumen potencia reactiva, por lo que es una de las causas principales del bajo factor de potencia en las instalaciones industriales.

El factor de potencia es indicativo de la eficiencia con que se está utilizando la energía eléctrica para producir un trabajo útil. Se define como el porcentaje de la relación de la potencia activa (kW) y la potencia aparente o total (kVA). (Pérez Amador, 1994).

$$\text{Factor de potencia} = \frac{\text{Potencia activa}}{\text{Potencia aparente}} \times 100 \dots \dots (2.13)$$

Un bajo factor de potencia significa energía desperdiciada y afecta a la adecuada utilización del sistema eléctrico. El corregir el factor de potencia es reducir el costo de la energía reactiva en la factura eléctrica.

---

Ya que los motores de inducción son una de las causas principales del bajo factor de potencia se pueden tomar las siguientes medidas con respecto a éstos para corregirlo:

- Selección correcta del tipo, potencia y velocidad de los motores.
- Empleo de motores trifásicos en lugar de monofásicos.
- Aumento de la carga de los motores a su potencia nominal (evitar sobredimensionamiento del motor).
- Evitar el trabajo prolongado en vacío de los motores.
- Reparación correcta y de alta calidad de los motores.
- Instalación de capacitores en los motores de mayor capacidad.
- Cargos y bonificaciones por factor de potencia.

### **2.13.1 Bancos de capacitores.**

Los bancos de capacitores son agrupamientos de unidades montadas sobre bastidores metálicos, que se instalan en un punto de la red de media tensión en subestaciones o en alimentadores de distribución, con el objeto de suministrar potencia reactiva y regular la tensión del sistema. (Proenergía SAC).

El diseño de los bancos debe atender a los siguientes criterios:

- Lograr la potencia reactiva deseada en un punto del sistema, dividiendo este valor en una determinada cantidad de capacitores monofásicos de una potencia unitaria normalizada.
- Conectar las unidades en una conexión definida. De esta manera los capacitores tienen una tensión nominal igual a la tensión de fase del sistema.

- 
- Efectuar el conexionado de modo tal, que permita el uso de un esquema de protección seguro, sencillo y económico.
  - Instalar el banco en un sitio que satisfaga condiciones de seguridad, comodidad, facilidad para su operación, control y mantenimiento; y que esté protegido contra intervenciones no autorizadas o vandalismo.

Además de las unidades capacitivas, los bancos pueden incluir elementos de protección, maniobra y control tales como fusibles, llaves de maniobra en vacío o en aceite, sistemas de protección por desequilibrio, controladores automáticos, reactancias de inserción, etc.

Los bancos de capacitores se clasifican en:

- Bancos de capacitores para montaje en poste: Pueden armarse por agrupamiento, en disposición estrella con neutro flotante, de capacitores monofásicos diseñados para la tensión de fase del sistema, y con potencias unitarias normalizadas. Se logra una importante reducción de las pérdidas y de las caídas de tensión.
- Bancos de capacitores para montaje a nivel "Silla y doble silla": Son bancos para instalación al nivel del piso y se emplean principalmente en redes de distribución.
- Bancos de capacitores para montaje a nivel "Box": Son bancos compactos que aprovechan la ventaja de los capacitores con fusibles interiores. Se emplean en estaciones transformadoras de rebaje de alta tensión a media tensión. Como el montaje se ejecuta a nivel del piso, es necesario colocar un cerco perimetral en el recinto donde se encuentra el banco.

- 
- Bancos de capacitores en Torre para Alta Tensión: Son bancos formados en cada fase por grupos de capacitores en paralelo y estos a su vez conectados en serie hasta lograr la tensión de fase deseada, formando configuraciones en doble estrella con neutro flotante. Se emplean en las grandes estaciones transformadoras de alta tensión, generalmente conectados a las barras principales. Donde el principal objetivo es la inyección de una gran cantidad de potencia reactiva.
  - Bancos de capacitores para montaje a nivel Totalmente Protegidos: Es el banco más empleado en redes de distribución. Se utilizan cuando se desee recurrir a una construcción simple y económica. Son fáciles de instalar ya que su montaje es a nivel, y no presentan partes vivas expuestas lo que los hace sumamente seguros.
  - Bancos de capacitores en Celdas: Estos bancos pueden ser fijos o automáticos y ejecutarse para uso interior o intemperie con el grado de protección que la instalación requiera.
  - Bancos Fijos: Disponen de protección externa por medio de fusibles de alta capacidad de ruptura. Pueden emplearse para compensación individual de grandes motores de media tensión, o compensación fija de barras empleando fusibles con seccionamiento.
  - Bancos automáticos: Se emplean para compensación centralizada de barras de media tensión, disponiendo de uno o varios pasos que pueden ser de potencias diferentes, que mediante una adecuada combinación, permiten distintos escalonamientos de potencia reactiva disponible.

---

### **2.13.2 Banco de capacitores automáticos.**

El banco de capacitores automáticos es otro método utilizado para corregir el factor de potencia. La potencia total del banco de capacitores se instala en la acometida cerca de los tableros de distribución de energía, los cuales suministran la potencia reactiva demandada por diversos equipos con diferentes potencias y tiempos de operación. (Proenergía SAC).

La potencia total del banco de capacitores se divide en bloques los cuales están conectados a un regulador automático de energía reactiva, que conecta y desconecta los bloques que sean necesarios para obtener el factor de potencia previamente programado en dicho regulador.

Con este tipo de compensación se tienen las siguientes ventajas:

- Mejor utilización de la capacidad de los bancos de capacitores.
- Mejora en la regulación del voltaje en el sistema eléctrico.
- Suministro de potencia reactiva según los requerimientos del momento.

La desventaja de corregir el factor de potencia mediante este método, es que las diversas líneas de distribución no son descargadas de la potencia reactiva, además se requiere de un regulador automático para compensar la potencia reactiva, según las necesidades de cada momento.

### **2.14 Resultado de ahorro de energía.**

Se debe fomentar el ahorro de energía mediante el uso de variadores de velocidad; ya que, un equipo accionado mediante éstos, emplea menor energía que si dicho equipo fuera activado a una velocidad fija constante.

---

Cuando una bomba es impulsada por un motor que opera a velocidad fija, el flujo producido puede ser mayor al necesario. Para ello, el flujo podría regularse mediante una válvula de control dejando estable la velocidad de la bomba, pero resulta más eficiente regular dicho flujo, controlando la velocidad del motor, en lugar de restringirlo por medio de la válvula; ya que, el motor no tendrá que consumir una energía no aprovechada. (Enriquez Harper, 2006).

Cuando los motores eléctricos son arrancados a tensión reducida, la corriente en las terminales del motor disminuye en proporción directa con la tensión reducida mientras que el torque se reduce en la relación del cuadrado de dicha tensión.

## **2.15 Conclusiones.**

En este capítulo se comprendió la importancia de hacer una buena selección de un motor eléctrico; y que, de eso depende el obtener: una buena vida útil del equipo, una máxima eficiencia, un menor consumo eléctrico y por consiguiente un menor costo por dicho consumo. También se conocieron los diferentes tipos de motores eléctricos que existen y los elementos a considerar para una buena selección de los mismos.

Se describió que el arranque es de suma importancia; y éste debe ser el adecuado para lograr el mejor equilibrio entre la red, el motor y la carga. Es por ello que existen diferentes tipos, dependiendo de la aplicación del motor; todos ellos poniendo especial atención a que no se eleve de forma considerable la corriente de arranque y por supuesto que exista ahorro de energía.

También se mencionó que existen dos normas de diseño de los motores de inducción jaula de ardilla a partir de 1 HP, que los clasifican en 5 tipos dependiendo del tipo de torque. Estas normas son: NEMA e IEC, la primera para el norte y centro de América; y la segunda para los países europeos.



---

La aplicación de estos motores está limitada a sus características de par y velocidad de la carga. Pues es ésta, la que define la potencia y la velocidad del motor. La curva par-velocidad indica el momento de inercia de las diferentes cargas, ya que el comportamiento es variado. Así pues, dependiendo de sus características de par-velocidad y de la corriente de arranque, los motores de rotor de jaula de ardilla se clasifican en N, H y D.

Un punto a favor de los motores de inducción jaula de ardilla, es que en su accionamiento se encuentran importantes oportunidades de ahorro de energía debido al avance en el diseño y su construcción. Evitando así, pérdidas por efecto joule y/o pérdidas mecánicas. Para una mayor eficiencia; ya sea: estándar, alta ó Premium.

Por otra parte, la desventaja de estos motores es que aún en óptimas condiciones, consumen potencia reactiva. Esto causa un bajo factor de potencia en las instalaciones de la planta, lo cual indica la existencia de energía desperdiciada. Así pues, al corregir el factor de potencia se reduce el costo de la energía reactiva en la factura eléctrica.

Con lo anterior, se tiene un mejor panorama de lo que se debe considerar en el proyecto a realizar.

---

## **CAPITULO 3.**

### **PROPUESTA DE SUSTITUCIÓN DE MOTORES EN LA PLANTA QUÍMICA ENMEX.**

#### **3.1 Introducción.**

Como se mencionó anteriormente, el mayor porcentaje de la energía eléctrica que se consume en la industria moderna es a través de los motores.

Esta realidad, unida a la crisis energética actual, ha motivado a la fabricación de motores cada vez más eficientes, y a la adopción de disposiciones legales que obligan a los usuarios de los motores a tomar medidas para una disminución del consumo de energía eléctrica de estas máquinas.

Es por ello, que se realizó un levantamiento de datos en la planta química ENMEX, para conocer las condiciones reales de los motores a analizar, para así calcular los consumos eléctricos y los costos de operación y mantenimiento.

Y a través del estudio de tecnologías actuales y de marcas comerciales en el mercado actual en motores eléctricos, plantear una propuesta para un mayor ahorro de energía, basado en estudios de costo de inversión y operación.

#### **3.2 Descripción de la instalación.**

ENMEX, S.A. DE C.V. es una empresa 100% mexicana que refleja los esfuerzos empresariales de Arancia Grupo Industrial en el área de la Biotecnología. (<http://www.enmex.com.mx>, 2003).

---

En 1970 la empresa, bajo el nombre de Color de Caramelo, S.A DE C.V., introduce a México enzimas importadas de Miles Laboratories Inc. como Amilasa y Proteasa bacterianas, principalmente. Así mismo se inicia la elaboración de mezclas enzimáticas.

En 1972 se construye como ENMEX, S.A con el objeto de producir enzimas en México, iniciando con Alfa Amilasa Bacteriana, Amiloglucosidasa y Renina microbiana.

EN 1975 cambia la razón social a ENMEX, S.A. DE C.V.

En 1979 comienza la producción de Alfa Amilasa Termoestable y en 1982 se inicia la producción de Proteasa Neutra y Alfa Amilasa en polvo para la industria cervecera.

Durante 1983 da inicio la producción de la Proteasa Alcalina. En 1986 se implementa el proceso de granulación de Proteasa Alcalina para detergente, dando mayor versatilidad a las presentaciones.

Hasta la fecha se continúa implementado mejoras tanto en equipo como en procesos, cuyo objetivo fundamental es proporcionar enzimas que cumplan con los requerimientos del mercado a precios competitivos.

Dentro de la Tecnología de ENMEX se encuentra la BIOTECNOLOGÍA que es el uso integrado de la Bioquímica, la Microbiología y la Ingeniería para lograr una aplicación tecnológica industrial de las capacidades de los microorganismos, células de tejidos, cultivos y demás productos biológicos para la elaboración de productos y servicios comerciales.

---

ENMEX se enfoca actualmente en una de las áreas más atractivas de la Biotecnología: la fabricación de ENZIMAS microbianas por medio de fermentación sumergida.

Las ENZIMAS son proteínas de gran tamaño que son producidas dentro de células vivas de plantas, animales y microorganismos. Todos los organismos vivos requieren enzimas para crecer y para la producción y utilización de la energía, la cual es esencial para vivir.

Dentro de las células, las enzimas actúan como catalizadores para acelerar las reacciones químicas que controlan los procesos de transformación del metabolismo celular.

Las enzimas son proteínas de alta especificidad que aceleran la hidrólisis o síntesis de compuestos orgánicos como carbohidratos, grasa y proteínas.

### **3.3 Tipo y uso de los motores.**

En la planta ENMEX, se tiene un número importante de motores eléctricos para diferentes aplicaciones, tales como: bombas, compresores, ventiladores, extractores de vapores y motores para aplicaciones de fermentación.

Como se ya se mencionó en el capítulo 2, las bombas suministran la energía suficiente para poder trasladar fluidos de diferentes densidades de un lugar a otro. Y los compresores ayudan a convertir trabajo mecánico, en este caso en producir la compresión de vapores o gases en el calor necesario para la fabricación de componentes químicos.

---

### 3.4 Consumo de energía eléctrica de motores actuales.

La determinación de los parámetros energéticos de los motores (eficiencia, factor de potencia, corriente, potencia de salida, etc.), es un objetivo altamente prioritario en cualquier estudio energético que se realice.

Esto es, que al evaluar con exactitud el comportamiento energético de un motor en sus condiciones reales de operación; fundamentalmente se persigue estimar medidas de ahorro de energía que puedan modificar la operación del motor existente o incluso conducir a la sustitución del motor analizado por otro de características más apropiadas para accionar la carga.

Para ello, se utilizan los datos del fabricante, con el mínimo de mediciones posibles y para no provocar afectaciones en el proceso productivo.

De esta forma, se realizó un levantamiento de datos de 27 motores en la planta química ENMEX, con el objetivo de conocer las condiciones reales de dichos equipos, para posteriormente realizar un estudio energético.

Así pues, la estimación de operación de los motores analizados en los horarios consumo para la tarifa eléctrica es la siguiente:

*Estimación de operación del motor* $_{base} = 34\%$

*Estimación de operación del motor* $_{intermedia} = 54\%$

*Estimación de operación del motor* $_{punta} = 12\%$

Los 27 motores analizados tienen un factor de servicio de 0.78 y un régimen de operación de 24 horas al día, los 365 días del año.

---

El factor de servicio es el cociente entre la energía real generada durante un periodo (generalmente anual) y la energía generada si hubiera trabajado a plena carga durante ese mismo periodo, conforme a valores nominales de placa de identificación de los equipos. (Chapman, 1998).

Esto se debe, a que los motores operan generalmente fuera de su estado de carga nominal e incluso con régimen de operación variable en el tiempo. Es un indicativo de la utilización de la capacidad de la planta en el tiempo.

### CÁLCULO DE PARÁMETROS ENERGÉTICOS DE LOS MOTORES ANALIZADOS.

Los motores operan las 24 horas del día:

$$\text{Hrs de operación al día}_x = \left(24 \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}}\right]\right) \times (\text{Estimación de operación del motor}_x) \dots (3.4)$$

Dónde:

$x = \text{base, intermedia, punta.}$

Horarios en función de la tarifa eléctrica; esto es:

$$\text{Hrs de operación al día}_{\text{base}} = \left(24 \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}}\right]\right) \times (0.34) = \mathbf{8.16} \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}}\right]$$

$$\text{Hrs de operación al día}_{\text{intermedia}} = \left(24 \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}}\right]\right) \times (0.54) = \mathbf{12.96} \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}}\right]$$

$$\text{Hrs de operación al día}_{\text{punta}} = \left(24 \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}}\right]\right) \times (0.12) = \mathbf{2.88} \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}}\right]$$

---

Así pues, considerando un factor de servicio ( $F_s$ ) de 0.78 se tiene:

$$\text{Hrs de operación neta al día}_x = (F_s) \times (\text{Hrs de operación al día}_x) \dots\dots(3.4.a)$$

Dónde:

$x = \text{base, intermedia, punta.}$

Por lo tanto:

$$\text{Hrs de operación neta al día}_{\text{base}} = (0.78) \times \left(8.16 \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}}\right]\right) = \mathbf{6.36} \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}}\right]$$

$$\text{Hrs de operación neta al día}_{\text{intermedia}} = (0.78) \times \left(12.96 \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}}\right]\right) = \mathbf{10.11} \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}}\right]$$

$$\text{Hrs de operación neta al día}_{\text{punta}} = (0.78) \times \left(2.88 \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}}\right]\right) = \mathbf{2.25} \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}}\right]$$

Entonces:

$$\text{Total de hrs netas de operación al día} = \sum \text{Hrs de operación neta al día}_x \dots\dots (3.4.b)$$

Dónde:

$x = \text{base, intermedia, punta.}$

Por lo tanto:

$$\text{Total de hrs netas de operación al día} = (6.36 + 10.11 + 2.25) \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}}\right]$$

$$\text{Total de hrs netas de operación al día} = \mathbf{18.72} \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}}\right]$$

---

Así, el total de horas netas de operación al año está dado por:

$$\text{Total de hrs netas de operación}_{\text{año}} = (\text{Total de hrs netas de operación al día}) \times (365 \left[ \frac{\text{días}}{\text{año}} \right]) \dots (3.4.c)$$

$$\text{Total de hrs netas de operación}_{\text{año}} = \left( 18.72 \left[ \frac{\text{hrs}}{\text{día}} \right] \right) \times \left( 365 \left[ \frac{\text{días}}{\text{año}} \right] \right)$$

Finalmente:

**Total de hrs netas de operación**<sub>año</sub> = **6833**  $\left[ \frac{\text{hrs}}{\text{año}} \right]$ . Para cada uno de los 27 motores instalados analizados.

Por otra parte, para calcular el factor de potencia (F.P.), se utilizó la siguiente fórmula:

$$F.P. = \frac{P}{\sqrt{3} * V * I * \eta} \dots (3.4.d)$$

Dónde:

$V$  = Tensión nominal del motor [V]

$I$  = Corriente nominal del motor [A]

$\eta$  = Eficiencia estándar del motor

$P$  = Capacidad del motor [W]

1 HP = 746 [VA = W]

Ej. Para el motor 1 (compresor):

$$F.P. = \frac{(400 \times 746 [VA])}{(\sqrt{3}) * (460 [V]) * (451 [A]) * (0.938)}$$

**F.P. = 0.885**



Posteriormente, en una hoja de cálculo<sup>1</sup> se realizó el mismo procedimiento para cada uno de los 26 motores faltantes. Los resultados se muestran a continuación:

DATOS DE PLACA DE MOTORES INSTALADOS										
N°	Ubicación	Proceso	Motor	Factor de servicio	Horas de operación al año	F.P.	Eficiencia	Capacidad [HP]	Voltaje [V]	Corriente [A]
1	Área de compresores	compresor	us motors	0.78	6833	0.885	0.938	400	460	451
2		compresor	us motors	0.78	6833	0.885	0.938	400	460	451
3		compresor	siemens	0.78	6833	0.927	0.945	616.62	460	659
4	Pozo frío	Bomba	weg	0.78	6833	0.863	0.930	60	460	70
5		Bomba	us motors	0.78	6833	0.863	0.930	60	460	70
6		Bomba	us motors	0.78	6833	0.883	0.941	75	460	84.5
7		Bomba	us motors	0.78	6833	0.894	0.930	75	460	84.5
8	Bombas de glicol	Bomba	siemens	0.78	6833	0.887	0.875	15	460	18.1
9		Bomba	weg	0.78	6833	0.887	0.875	15	460	18.1
10	Fermentadores	Agitador	us motors	0.78	6833	0.884	0.935	150	460	170
11		Agitador		0.78	6833	0.884	0.935	150	460	170
12		Agitador	us motors	0.78	6833	0.884	0.935	150	460	170
13		Agitador	weg	0.78	6833	0.870	0.950	150	460	170
14	Bombas de vacío Toffola	Bomba	us motors	0.78	6833	0.844	0.885	15	460	18.8
15		Bomba	us motors	0.78	6833	0.844	0.885	15	460	18.8
16	Bombas tanques de filtrado	Bomba	us motors	0.78	6833	0.887	0.875	15	460	18.1
17		Bomba	us motors	0.78	6833	0.887	0.875	15	460	18.1
18	Agitador tanque de filtrado	Bomba		0.78	6833	0.822	0.890	10	460	12.8
19	Agitador tanque opcional	Bomba		0.78	6833	0.827	0.902	20	460	25.1
20	Derrame 1	Bomba		0.78	6833	0.827	0.902	20	460	25.1
21	Derrame 2	Bomba		0.78	6833	0.827	0.902	20	460	25.1
22	Bombas vacío filtro Eimco	Bomba	Reliance	0.78	6833	0.846	0.917	40	460	48.3
23		Bomba		0.78	6833	0.855	0.910	30	460	36.1
24		Bomba		0.78	6833	0.855	0.910	30	460	36.1
25	Bomba P100 de ultrafiltración	Bomba		0.78	6833	0.856	0.905	25	460	30.2
26	Ventiladores	Ventilador		0.78	6833	0.844	0.885	15	460	18.8
27		Ventilador		0.78	6833	0.846	0.917	40	460	48.3

**Tabla 3.4 Datos de placa de motores instalados<sup>2</sup>.**

<sup>1</sup> Microsoft Excel 2010.

<sup>2</sup> Elaboración de tabla propia con datos obtenidos de placa de motores.

---

Por otro lado, se calculó la corriente (I) de salida de los motores instalados:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot F.P. \cdot \eta} [A] \dots\dots\dots (3.4.e)$$

*Dónde:*

*V = Tensión del motor [V]*

*F.P. = Factor de Potencia*

*η = Eficiencia media del motor*

*P = Capacidad del motor [W]*

*1 HP = 746 [VA = W]*

Ej. Para el motor 1 (compresor):

$$I = \frac{(400 \times 746 [VA])}{(\sqrt{3}) \times (460 [V]) \times (0.885) \times (0.90)} [A]$$

Esto es:

$$I = 470.04[A]$$

Posteriormente, en una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para cada uno de los 26 motores faltantes.

En la siguiente tabla se muestran los datos de las lecturas de los motores analizados:

DATOS DE LECTURA DE MOTORES INSTALADOS										
N°	Ubicación	Proceso	Motor	Factor de servicio	Horas de operación al año	F.P.	Eficiencia	Capacidad [HP]	Voltaje [V]	Corriente [A]
1	Área de compresores	compresor	us motors	0.78	6833	0.885	0.90	400	460	470.04
2		compresor	us motors	0.78	6833	0.885	0.90	400	460	470.04
3		compresor	siemens	0.78	6833	0.870	0.92	616.62	460	721.32
4	Pozo frío	Bomba	weg	0.78	6833	0.863	0.92	60	460	70.76
5		Bomba	us motors	0.78	6833	0.863	0.92	60	460	70.76
6		Bomba	us motors	0.78	6833	0.883	0.92	75	460	86.43
7		Bomba	us motors	0.78	6833	0.894	0.915	75	460	85.89
8	Bombas de glicol	Bomba	siemens	0.78	6833	0.887	0.85	15	460	18.63
9		Bomba	weg	0.78	6833	0.887	0.85	15	460	18.63
10	Fermentadores	Agitador	us motors	0.78	6833	0.840	0.925	150	460	180.76
11		Agitador		0.78	6833	0.840	0.925	150	460	180.76
12		Agitador	us motors	0.78	6833	0.840	0.925	150	460	180.76
13		Agitador	weg	0.78	6833	0.830	0.91	150	460	185.95
14	Bombas de vacío Toffola	Bomba	us motors	0.78	6833	0.844	0.875	15	460	19.01
15		Bomba	us motors	0.78	6833	0.844	0.875	15	460	19.01
16	Bombas tanques de filtrado	Bomba	us motors	0.78	6833	0.887	0.865	15	460	18.31
17		Bomba	us motors	0.78	6833	0.887	0.865	15	460	18.31
18	Agitador tanque de filtrado	Bomba		0.78	6833	0.822	0.88	10	460	12.95
19	Agitador tanque opcional	Bomba		0.78	6833	0.827	0.89	20	460	25.44
20	Derrame 1	Bomba		0.78	6833	0.827	0.89	20	460	25.44
21	Derrame 2	Bomba		0.78	6833	0.827	0.89	20	460	25.44
22	Bombas vacío filtro Eimco	Bomba	Reliance	0.78	6833	0.846	0.90	40	460	49.21
23		Bomba		0.78	6833	0.855	0.89	30	460	36.91
24		Bomba		0.78	6833	0.855	0.89	30	460	36.91
25	Bomba P100 de ultrafiltración	Bomba		0.78	6833	0.856	0.88	25	460	31.06
26	Ventiladores	Ventilador		0.78	6833	0.844	0.875	15	460	19.01
27		Ventilador		0.78	6833	0.846	0.90	40	460	49.21

**Tabla 3.4.a Datos de lectura de motores instalados<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados de lectura de motores.

---

Los 27 motores analizados intervienen en diferentes procesos dentro de la planta. A partir de los datos recaudados en sitio, se calcularon los consumos eléctricos para cada uno de ellos.

### CÁLCULO DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LOS MOTORES INSTALADOS:

Partiendo de que la capacidad (P) del motor instalado se define como:

$$P = V \times I \text{ [VA = W]} \dots\dots\dots (3.4.f)$$

*Dónde:*

*V = Tensión del motor [V]*

*I = Corriente de salida del motor instalado [A]*

Se tiene que el Consumo de Energía Eléctrica (C. E) para cada motor está dado por:

$$C.E._x = \left[ \frac{(V \times I) \times \left( \begin{smallmatrix} \text{Estimación de} \\ \text{operación del motor}_x \end{smallmatrix} \right) \times \left( \begin{smallmatrix} \text{Total de hrs netas} \\ \text{de operación} \\ \text{año} \end{smallmatrix} \right)}{1000} \right] \dots\dots (3.4.g)$$

*Dónde:*

*x = base, intermedia, punta.*

*V = Tensión del motor [V]*

*I = Corriente de salida del motor instalado [A]*

*1 HP = 0.746 [kW]*

Por lo tanto, el consumo total de energía eléctrica se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Consumo Total de energía} = (C.E_{\text{base}}) + (C.E_{\text{intermedia}}) + (C.E_{\text{punta}}) \dots\dots (3.4.h)$$

Ej. Para el motor 1 (compresor):

$$C.E_{\text{base}} = \left[ \frac{(460[V] \times 470.04[A]) \times (0.34) \times \left(6833 \left[\frac{\text{hrs}}{\text{año}}\right]\right)}{1000} \right]$$

$$C.E_{\text{base}} = 502,310.6 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{año}}\right]$$

$$C.E_{\text{intermedia}} = \left[ \frac{(460[V] \times 470.04[A]) \times (0.54) \times \left(6833 \left[\frac{\text{hrs}}{\text{año}}\right]\right)}{1000} \right]$$

$$C.E_{\text{intermedia}} = 797,787.4 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{año}}\right]$$

$$C.E_{\text{punta}} = \left[ \frac{(460[V] \times 470.04[A]) \times (0.12) \times \left(6833 \left[\frac{\text{hrs}}{\text{año}}\right]\right)}{1000} \right]$$

$$C.E_{\text{punta}} = 177,286.1 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{año}}\right]$$

$$\text{Consumo Total de energía} = (502,310.6 + 797,787.4 + 177,286.1) \left[\frac{\text{kWh}}{\text{año}}\right]$$

$$\text{Consumo Total de energía} = 1,477,384.1 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{año}}\right]$$

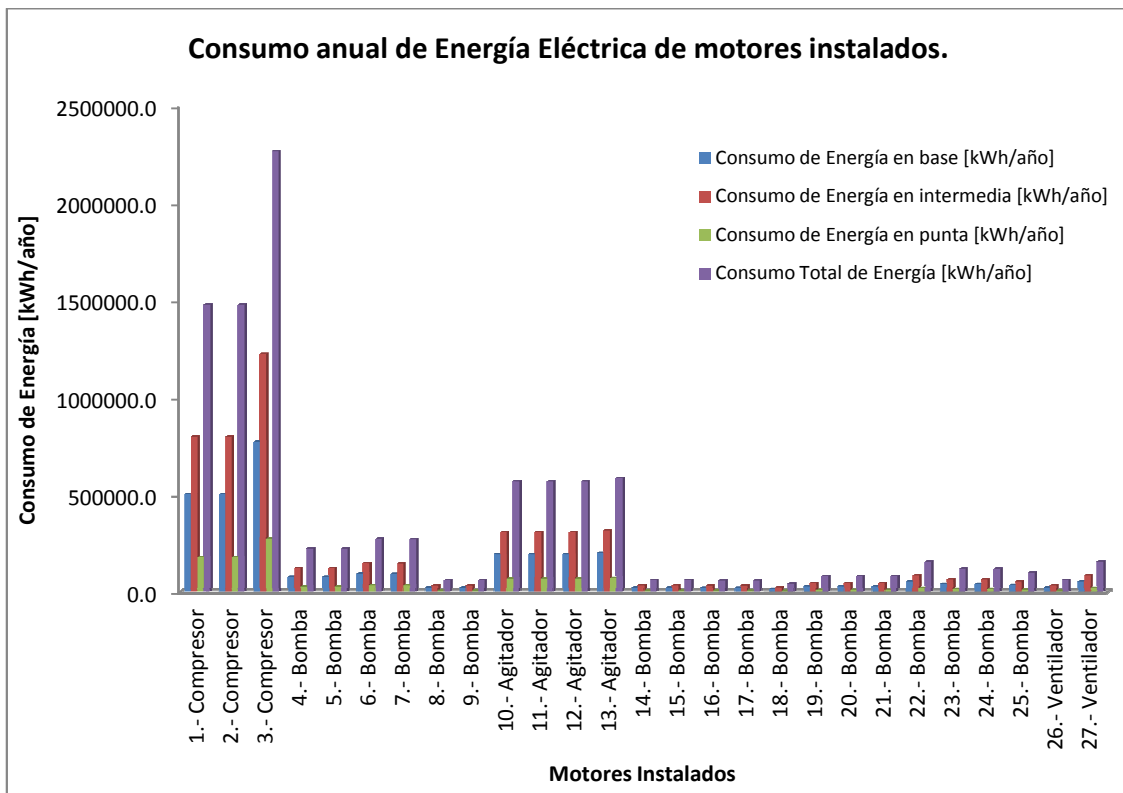
Posteriormente, en una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para cada uno de los 26 motores faltantes.

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE MOTORES INSTALADOS							
N°	Ubicación	Proceso	Motor	Consumo de Energía en base [kWh/año]	Consumo de Energía en intermedia [kWh/año]	Consumo de Energía en punta [kWh/año]	Consumo Total de Energía [kWh/año]
1	Área de compresores	compresor	us motors	502310.6	797787.4	177286.1	1477384.1
2		compresor	us motors	502310.6	797787.4	177286.1	1477384.1
3		compresor	siemens	770843.7	1224281.2	272062.5	2267187.5
4	Pozo frío	Bomba	weg	75618.6	120100.1	26688.9	222407.6
5		Bomba	us motors	75618.6	120100.1	26688.9	222407.6
6		Bomba	us motors	92362.1	146692.8	32598.4	271653.3
7		Bomba	us motors	91781.3	145770.2	32393.4	269944.9
8	Bombas de glicol	Bomba	siemens	19911.5	31624.1	7027.6	58563.1
9		Bomba	weg	19911.5	31624.1	7027.6	58563.1
10	Fermentadores	Agitador	us motors	193163.9	306789.8	68175.5	568129.2
11		Agitador		193163.9	306789.8	68175.5	568129.2
12		Agitador	us motors	193163.9	306789.8	68175.5	568129.2
13		Agitador	weg	198713.6	315604.0	70134.2	584451.8
14	Bombas de vacío Toffola	Bomba	us motors	20320.2	32273.3	7171.8	59765.4
15		Bomba	us motors	20320.2	32273.3	7171.8	59765.4
16	Bombas tanques de filtrado	Bomba	us motors	19566.2	31075.7	6905.7	57547.6
17		Bomba	us motors	19566.2	31075.7	6905.7	57547.6
18	Agitador tanque de filtrado	Bomba		13834.2	21971.9	4882.6	40688.7
19	Agitador tanque opcional	Bomba		27184.8	43175.8	9594.6	79955.2
20	Derrame 1	Bomba		27184.8	43175.8	9594.6	79955.2
21	Derrame 2	Bomba		27184.8	43175.8	9594.6	79955.2
22	Bombas vacío filtro Eimco	Bomba	Reliance	52590.8	83526.5	18561.4	154678.7
23		Bomba		39445.2	62648.2	13921.8	116015.3
24		Bomba		39445.2	62648.2	13921.8	116015.3
25	Bomba P100 de ultrafiltración	Bomba		33190.1	52713.7	11714.1	97617.9
26	Ventiladores	Ventilador		20320.2	32273.3	7171.8	59765.4
27		Ventilador		52590.8	83526.5	18561.4	154678.7

**Tabla 3.4.b. Consumos Eléctricos de motores instalados analizados<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados anteriormente.



**Gráfica 3.4 Consumo anual de Energía Eléctrica de motores instalados<sup>1</sup>.**

De la tabla y gráfica anteriores, se deduce que el mayor consumo eléctrico lo representan los compresores 1, 2 y 3; y los agitadores 10, 11, 12 y 13 (del área de fermentadores).

### 3.5 Costos de operación de motores actuales.

Para obtener el costo de consumo de energía eléctrica (C.C.E) para cada uno de los 27 motores analizados, se utilizó la siguiente fórmula:

$$C.C.E._x = \left[ \left( C.E._x \left[ \frac{kWh}{año} \right] \right) \times \left( costo\ de\ kWh_x \left[ \frac{\$}{kWh} \right] \right) \right] \dots\dots\dots (3.5)$$

<sup>1</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 3.4.b

---

Dónde:

*C.E.*: Consumo de energía eléctrica

*x*: base, intermedia, punta

Por lo tanto, el costo total de consumo de energía eléctrica al año para cada motor, está dado por:

$$\text{Costo Total de } C.E. = (C.C.E.\textit{.base} + C.C.E.\textit{.intermedia} + C.C.E.\textit{.punta}) \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right] \dots (3.5.a)$$

Ej. Para el motor 1 (compresor):

$$C.C.E.\textit{.base} = \left[ \left( 502,310.58 \left[ \frac{kWh}{\text{año}} \right] \right) \times \left( 0.761 \left[ \frac{\$}{kWh} \right] \right) \right]$$

$$C.C.E.\textit{.base} = 382,220.24 \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

$$C.C.E.\textit{.intermedia} = \left[ \left( 797,787.40 \left[ \frac{kWh}{\text{año}} \right] \right) \times \left( 0.911 \left[ \frac{\$}{kWh} \right] \right) \right]$$

$$C.C.E.\textit{.intermedia} = 726,405.59 \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

$$C.C.E.\textit{.punta} = \left[ 177,286.09 \left( \left[ \frac{kWh}{\text{año}} \right] \right) \times \left( 2.107 \left[ \frac{\$}{kWh} \right] \right) \right]$$

$$C.C.E.\textit{.punta} = 373,461.98 \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$



---

Finalmente:

$$\text{Costo Total de C. E.} = (382,220.24 + 726,405.59 + 373,461.98) \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Costo Total de C. E.} = \mathbf{1,482,087.80} \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

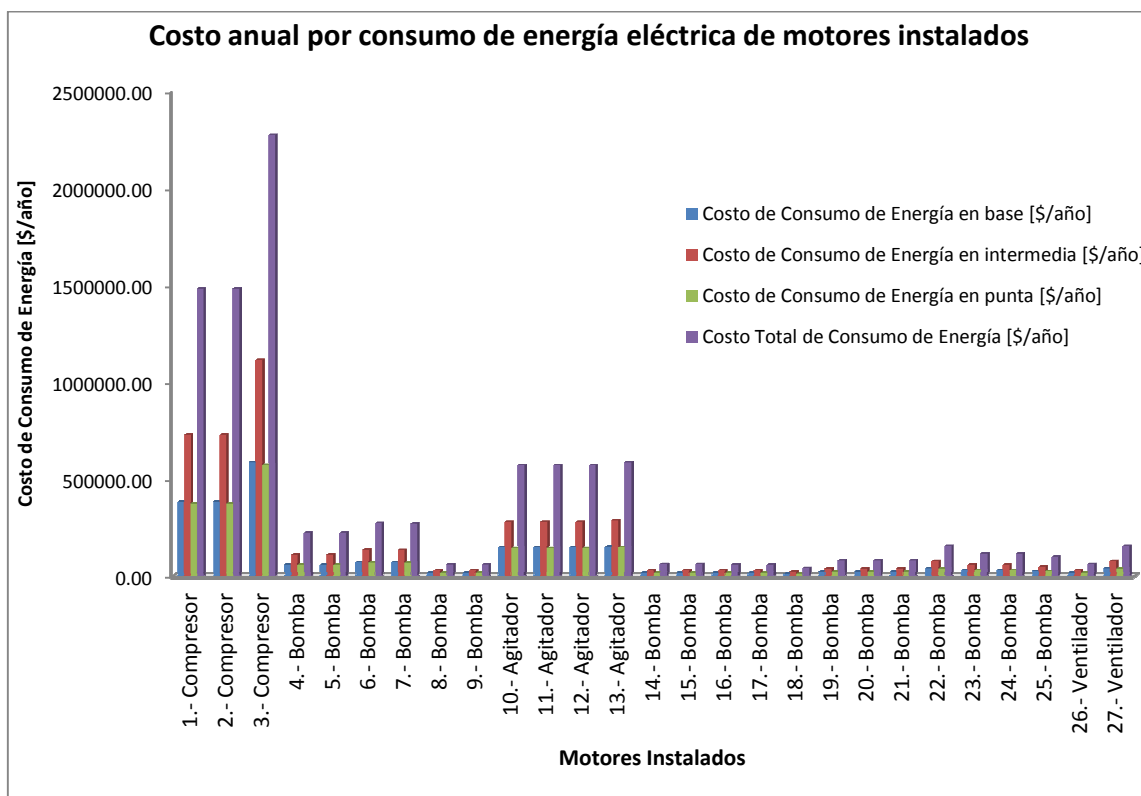
Posteriormente, en una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para cada uno de los 26 motores faltantes.

En la tabla y gráfica 3.5 se muestran los costos generados por el consumo de energía eléctrica de los 27 motores analizados.

COSTOS EN CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE MOTORES INSTALADOS							
N°	Ubicación	Proceso	Motor	Costo de Consumo de Energía en base [\$/año]	Costo de Consumo de Energía en intermedia [\$/año]	Costo de Consumo de Energía en punta [\$/año]	Costo Total de Consumo de Energía [\$/año]
1		compresor	us motors	382220.24	726405.59	373461.98	1482087.80
2	Área de compresores	compresor	us motors	382220.24	726405.59	373461.98	1482087.80
3		compresor	siemens	586553.60	1114739.01	573113.21	2274405.82
4		Bomba	weg	57540.02	109354.20	56221.53	223115.75
5	Pozo frío	Bomba	us motors	57540.02	109354.20	56221.53	223115.75
6		Bomba	us motors	70280.58	133567.50	68670.15	272518.24
7		Bomba	us motors	69838.58	132727.49	68238.28	270804.34
8	Bombas de glicol	Bomba	siemens	15151.11	28794.53	14803.94	58749.58
9		Bomba	weg	15151.11	28794.53	14803.94	58749.58
10	Fermentadores	Agitador	us motors	146983.11	279339.86	143615.11	569938.08
11		Agitador		146983.11	279339.86	143615.11	569938.08
12		Agitador	us motors	146983.11	279339.86	143615.11	569938.08
13		Agitador	weg	151205.98	287365.38	147741.21	586312.57
14	Bombas de vacío Toffola	Bomba	us motors	15462.15	29385.65	15107.85	59955.65
15		Bomba	us motors	15462.15	29385.65	15107.85	59955.65
16	Bombas tanques de filtrado	Bomba	us motors	14888.38	28295.20	14547.22	57730.80
17		Bomba	us motors	14888.38	28295.20	14547.22	57730.80
18	Agitador tanque de filtrado	Bomba		10526.75	20005.97	10285.53	40818.25
19	Agitador tanque opcional	Bomba		20685.55	39312.67	20211.56	80209.78
20	Derrame 1	Bomba		20685.55	39312.67	20211.56	80209.78
21	Derrame 2	Bomba		20685.55	39312.67	20211.56	80209.78
22	Bombas vacío filtro Eimco	Bomba	Reliance	40017.58	76052.98	39100.61	155171.16
23		Bomba		30014.80	57042.81	29327.03	116384.64
24		Bomba		30014.80	57042.81	29327.03	116384.64
25	Bomba P100 de ultrafiltración	Bomba		25255.13	47997.12	24676.43	97928.68
26	Ventiladores	Ventilador		15462.15	29385.65	15107.85	59955.65
27		Ventilador		40017.58	76052.98	39100.61	155171.16

**Tabla 3.5 Costo anual de Consumos Eléctricos de los motores instalados<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados anteriormente.



**Gráfica 3.5 Costo por Consumo anual de Energía Eléctrica de motores instalados<sup>1</sup>.**

De acuerdo a los resultados de la tabla y la gráfica anteriores, se confirma que los compresores 1, 2 y 3; y los agitadores 10, 11, 12 y 13 (del área de fermentadores), generan el mayor costo de consumo de energía eléctrica en la planta química ENMEX.

### 3.6 Estudio de tecnologías actuales en los motores eléctricos.

Los motores eléctricos consumen cerca del 60 % del total de la energía eléctrica en la industria. Una gran parte de esta energía es consumida por motores sobredimensionados que no operan en su óptimo punto de rendimiento; además de que son antiguos y poco eficientes.

<sup>1</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 3.5.

---

El constante avance en los estudios de la tecnología en los motores hace que actualmente tengan entre 10% y 40% menos pérdidas. Así pues, las aplicaciones de nuevas tecnologías tienden a cambiar la forma en que los motores eléctricos son aplicados y controlados. (Fitzgerald, 2004).

En un motor eléctrico cerrado, la carcasa también ejerce un papel fundamental en el desempeño, pues éste es el responsable para conducir el calor interno generado hacia la superficie, donde será disipado por el flujo que proviene del sistema de ventilación externo del motor.

Otro punto de estudio es la temperatura de operación reducida, a través de nuevos sistemas de ventilación. Como se sabe, la vida útil de un motor eléctrico está directamente relacionada con las propiedades térmicas y dieléctricas de sus materiales aislantes.

El sistema de ventilación está compuesto por el ventilador, tapa ventilador y carcasa que deben de ser dimensionados para una máxima disipación de calor, eliminando puntos de concentración de calor y reduciendo las temperaturas de operación de los devanados y consecuentemente aumentar la vida útil de los motores. (Fitzgerald, 2004).

Otro aspecto importante es mejorar los intervalos de lubricación con menores costos de operación. Los intervalos de lubricación varían en función de la posición del montaje de los motores ya sea horizontal o vertical, velocidad nominal, tamaño de los rodamientos, tipo de grasa y temperatura de operación.

Como en cualquier intervención de mantenimiento se depende de personal y equipamiento, por lo cual en cuanto menor sea dicha intervención tanto menor será el costo.

---

Nuevos sistemas de lubricación mejoran el flujo de la grasa por las tapas y caja de rodamientos. Los motores de inducción son reconocidos por su reducido costo de adquisición y gran robustez. Adicionalmente, después de la instalación de los motores no requieren muchas intervenciones para su mantenimiento.

Las principales recomendaciones son la verificación periódica de los espectros de vibración (principalmente en motores grandes) para validar las condiciones de operación.

El uso de variadores de frecuencia es reconocido como una de las principales formas motrices para el aumento de la eficiencia energética de procesos, se puede ajustar a la potencia de salida del motor para mejorar y atender los requisitos de la carga. (Harper, 2008).

Los picos de tensión de la forma de onda característicos de los variadores de frecuencia tienen efectos perjudiciales sobre los devanados de los motores llevando a una falla prematura del sistema de aislamiento.

### **3.7 Marcas comerciales de motores eléctricos en el mercado mundial.**

Entre las marcas reconocidas de mayor competitividad en el mercado mundial de motores eléctricos se tienen las siguientes:

- WEG. Empresa de capital Brasileño. En México su planta de producción y punto central de distribución se encuentra en el municipio de Huehuetoca, Estado de México.
- ABB. Su planta y punto de distribución se ubica en San Luis Potosí, México. Empresa de Origen Sueco.

- 
- TECO-WESTINGHOUSE. Unión estratégica de dos empresas de motores eléctricos para mejorar su posición dentro del mercado Mexicano. En México solo se desempeña como distribuidor y sus almacenes se encuentran en Guanajuato.
  - US MOTORS. Empresa de Estados Unidos de América. Se ubica dentro de la República Mexicana en el estado de Monterrey.
  - IEM. Por sus siglas en español: Industria Eléctrica Mexicana y sus instalaciones están actualmente en Tlalnepantla, Estado de México.
  - SIEMMENS. Empresa de origen Alemán. Su planta de producción y distribución se encuentra en Guadalajara, México.
  - BALDOR. Empresa de Estados Unidos de América. En México en el año 2010 se unieron las empresas ABB y Baldor para poder tener mayor presencia y competitividad.

Estas marcas de presencia mundial desarrollan motores de corriente alterna como lo son de rotor devanado y de jaula de ardilla; así como también de corriente directa en sus diferentes aplicaciones.

### **3.8 Propuesta de un Programa de ahorro de energía en la instalación.**

Al realizar un análisis de eficiencia energética es necesario identificar todas las posibles áreas de oportunidad que brinden un beneficio significativo, tomando en cuenta que estas medidas a alcanzar pueden tener posibles afectaciones dentro del proceso.

---

Las medidas de optimización energética que fueron identificadas son las siguientes:

- Reemplazo de motores: Debido a que los motores eléctricos de alta eficiencia son motores de diseño y construcción especial que presentan menos pérdidas que los motores eléctricos estándares. Una menor pérdida de potencia hace que el motor tenga una mayor eficiencia; es decir, que consuma menos energía para realizar el mismo trabajo que un motor normal.
- Instalación de variador de velocidad en equipos que así lo requieran: Dado el proceso que manejan algunos motores es posible instalar un variador para un adecuado aprovechamiento del consumo energético del equipo.
- Administración de la demanda: Para minimizar costos, operación y control de los motores en horarios adecuados.
- Implementar sistemas de arranque a tensión reducida: Para evitar picos de corriente en el momento de arranque.
- Revisión del correcto acoplamiento de moto-reductores: Con el fin de no perder la fuerza mecánica por malos ajustes.
- Selección adecuada de calibre de conductor para evitar caída de tensión: Garantiza que el cable estará en condición de transportar la corriente del circuito sin deteriorarse, pero no asegura que la caída de tensión en el cable tenga un valor aceptable ya que los dos fenómenos son completamente diferentes e independientes. La caída de tensión máxima generalmente admitida en el caso de la fuerza motriz es el 5% de la tensión de trabajo.

- 
- Análisis de vibración para evitar la desalineación del equipo: Debido a que se generan vibraciones significativas en la dirección axial, las cuales se generan por un eje agrietado debido a un acoplamiento de movimientos transversal y axial, esto también puede generar vibraciones en los descansos a ambos lados del acoplamiento, lo cual genera cargas adicionales en los descansos lo que se traduce en un aumento de temperatura.
  - Adecuada revisión y mantenimiento de rodamientos y chumaceras: Es fundamental para que el eje del motor este en buen funcionamiento y no realice un mayor esfuerzo ocasionando un mal funcionamiento.
  - Implementación de medidas de limpieza: Para una adecuada disipación de calor en el equipo y evitar aumento de temperatura, cuando aumenta la temperatura, la vida del motor disminuye. Descuidar la limpieza crea fallas innecesarias en el motor y gastos innecesarias de mantenimiento.
  - Instalación de bancos de capacitores para mejorar el factor de potencia: un bajo factor de potencia es causa de recargos en los cargos de energía eléctrica y limita la capacidad de los equipos con el riesgo de incurrir en sobrecargas peligrosas y pérdidas excesivas.

Las medidas de optimización citadas pueden tener posibles afectaciones al implementarse; tales como:

En el caso del remplazo de motores por motores de eficiencia Premium, algunos de los problemas que se pudiese tener es el hecho de que estos operan a una velocidad mayor que los motores viejos y podría ocasionar un incremento en la carga, sobre todo cuando se accionan ventiladores o bombas centrífugas, y también la corriente de arranque suele ser mayor y puede provocar que se



---

sobrepasen los límites máximos de caída de voltaje en la red en el momento de arranque.

Así, al instalar variadores de velocidad se debe hacer un estudio para saber qué armónicos se tienen en la red y considerar si es necesario instalar filtros para atenuar los armónicos que ocasionan más distorsión, no obstante se requiere un tiempo para realizar la programación.

Si se realizan cambios para la adecuada administración de los equipos pueden existir afectaciones en el proceso de operación y en el de producción de la planta, lo que generaría más que un beneficio, una pérdida económica muy significativa para la empresa, en el caso de que el análisis no se hiciera correctamente.

Con respecto a implementación de sistemas de arranque, acoplamiento de moto-reductores, análisis de vibración y revisión de rodamientos y chumaceras, el problema más grande que se tendría, es tener que apagar los motores para completar el análisis o revisión y esto generaría pérdidas de producción a la planta.

En el caso de que se encontrara que el calibre del conductor no fuera el correcto, será necesario hacer un estudio económico adicional; ya que, este reemplazo implica un gasto adicional.

Y por último, al instalar banco de capacitores es necesario considerar el efecto que las armónicas presentes pueden tener en la respuesta del sistema eléctrico, se debe hacer un análisis muy detallado de la ubicación correcta y del dimensionamiento para no tener un efecto en la distribución de armónicas.

Como se observa, las mejoras identificadas se ubican en diferentes áreas. Para el alcance de este proyecto únicamente se tomará en cuenta la primera medida.

Dado que, para llevar a cabo todas las demás, es necesario sacar de operación algunos equipos, lo cual afectaría el proceso de producción de la planta.

Así pues, la opción más viable para reducir el consumo energético e incrementar la eficiencia de los procesos, es el reemplazo de los motores existentes que consumen más energía eléctrica y por consiguiente representan un mayor costo por dicho consumo.

### 3.9 Propuesta y cálculo de sustitución de motor eléctrico.

De acuerdo a los resultados de la tabla 3.4.b y gráfica 3.4 (consumo anual de energía eléctrica de motores instalados analizados), se dedujo que el mayor consumo eléctrico lo representan los compresores 1, 2 y 3; y los agitadores 10, 11, 12 y 13 (del área de fermentadores). Los cuales se muestran a continuación:

MOTORES INSTALADOS CON MAYOR CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA										
N°	Ubicación	Proceso	Motor	Factor de servicio	Horas de operación al año	Eficiencia	Capacidad [kW]	F.P.	Voltaje [V]	Corriente [A]
1		compresor	us motors	0.78	6833	0.90	298.40	0.885	460	470.04
2	Área de compresores	compresor	us motors	0.78	6833	0.90	298.40	0.885	460	470.04
3		compresor	siemens	0.78	6833	0.92	460.00	0.870	460	721.32
10		Agitador	us motors	0.78	6833	0.925	111.90	0.840	460	180.76
11	Fermentadores	Agitador		0.78	6833	0.925	111.90	0.840	460	180.76
12		Agitador	us motors	0.78	6833	0.925	111.90	0.840	460	180.76
13		Agitador	weg	0.78	6833	0.91	111.90	0.830	460	185.95

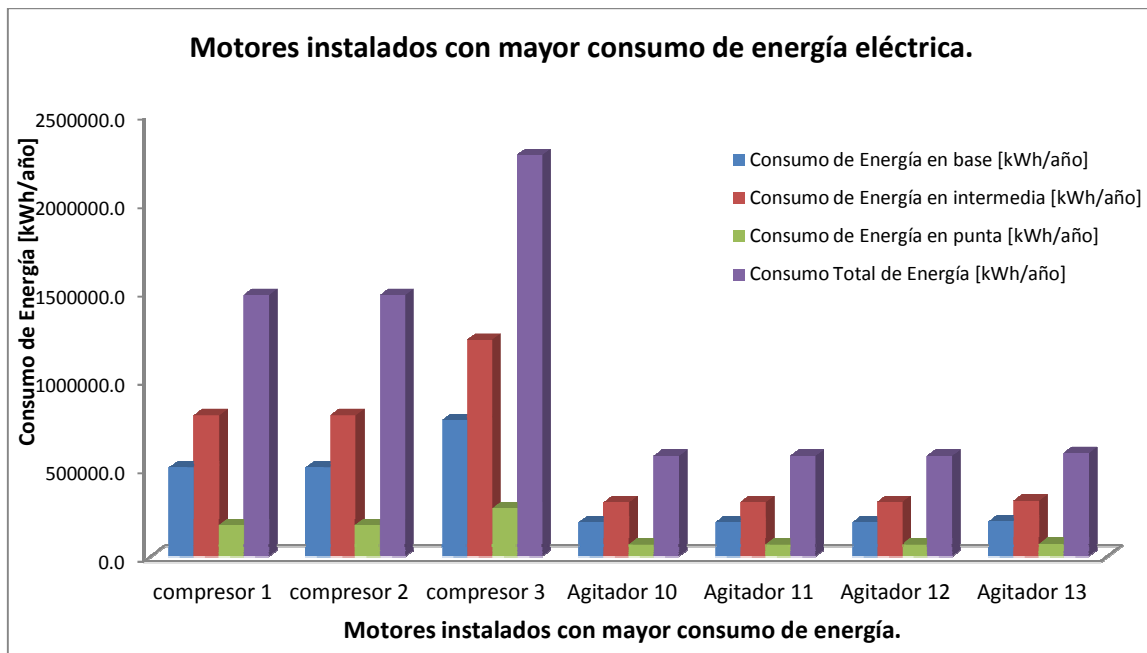
Tabla 3.9 Datos de lectura de los motores con mayor consumo energético<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores obtenidos de la tabla 3.4.a.

El consumo de energía eléctrica de estos motores se muestra a continuación:

MOTORES INSTALADOS CON MAYOR CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA							
N°	Ubicación	Proceso	Motor	Consumo de Energía en base [kWh/año]	Consumo de Energía en intermedia [kWh/año]	Consumo de Energía en punta [kWh/año]	Consumo Total de Energía [kWh/año]
1		compresor	us motors	502310.6	797787.4	177286.1	1477384.1
2	Área de compresores	compresor	us motors	502310.6	797787.4	177286.1	1477384.1
3		compresor	siemens	770843.7	1224281.2	272062.5	2267187.5
10		Agitador	us motors	193163.9	306789.8	68175.5	568129.2
11	Fermentadores	Agitador		193163.9	306789.8	68175.5	568129.2
12		Agitador	us motors	193163.9	306789.8	68175.5	568129.2
13		Agitador	weg	198713.6	315604.0	70134.2	584451.8
<b>Consumo de Energía [kWh/año]:</b>							<b>7510795.1</b>

Tabla 3.9.a Consumo Energético anual de motores que más energía consumen<sup>1</sup>.



Gráfica 3.9 Consumo Energético anual de motores que más energía consumen<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores obtenidos de la tabla 3.4.b.

<sup>2</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 3.4.b.

El consumo de energía anual para los 7 motores mencionados se obtuvo de la siguiente manera:

$$\text{Consumo de Energía}_{7 \text{ motores}} = \sum_{i=1}^3 \text{Consumo Total de energía}_{\text{motor } i} + \sum_{i=10}^{13} \text{Consumo Total de energía}_{\text{motor } i} \dots (3.9)$$

Dónde:

$i$  = número de motor.

Esto es:

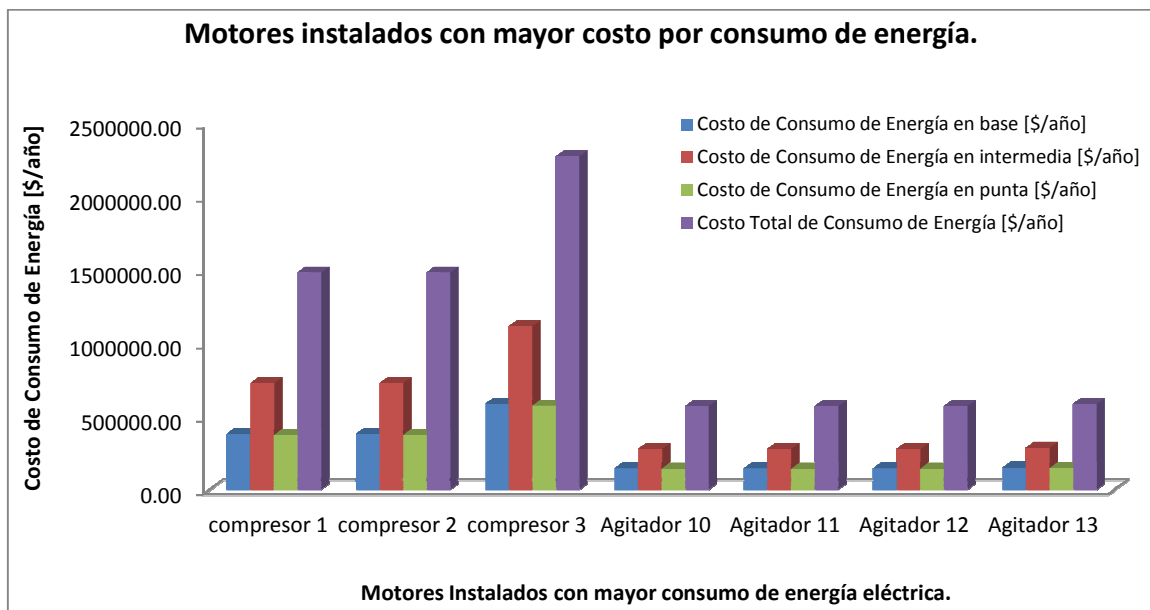
$$\text{Consumo de energía}_{7 \text{ motores}} = (1477384.1 \times 2) + (2,267,187.5) + (568,129.2 \times 3) + (584,451.8) \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

$$\text{Consumo de Energía}_{7 \text{ motores}} = 7,510,795.1 \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

Por otra parte, de acuerdo a los resultados de la tabla 3.5 y a la gráfica 3.5 (Costo por consumo anual de energía eléctrica de motores instalados), se confirma que los compresores 1, 2 y 3; y los agitadores 10, 11, 12 y 13 (del área de fermentadores), generan el mayor costo de consumo de energía eléctrica en la planta química ENMEX. Como se observa en la tabla 3.9.b y gráfica 3.9.a.

MOTORES INSTALADOS CON MAYOR COSTO POR CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA							
N°	Ubicación	Proceso	Motor	Costo de Consumo de Energía en base [\$/año]	Costo de Consumo de Energía en intermedia [\$/año]	Costo de Consumo de Energía en punta [\$/año]	Costo Total de Consumo de Energía [\$/año]
1		compresor	us motors	382220.24	726405.59	373461.98	1482087.80
2	Área de compresores	compresor	us motors	382220.24	726405.59	373461.98	1482087.80
3		compresor	siemens	586553.60	1114739.01	573113.21	2274405.82
10		Agitador	us motors	146983.11	279339.86	143615.11	569938.08
11	Fermentadores	Agitador		146983.11	279339.86	143615.11	569938.08
12		Agitador	us motors	146983.11	279339.86	143615.11	569938.08
13		Agitador	weg	151205.98	287365.38	147741.21	586312.57
Costo por de Consumo Energía Eléctrica [\$/año]:							7534708.23

Tabla 3.9.b Costo anual por consumo de motores que más energía consumen<sup>1</sup>.



Gráfica 3.9.a Costo por consumo anual de motores que más energía consumen<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores obtenidos de la tabla 3.5.

<sup>2</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 3.5.

El costo total por consumo anual de energía para los 7 motores mencionados se obtuvo de la siguiente manera:

$$\text{Costo Consumo de Energía}_{7 \text{ motores con mayor consumo}} = \sum_{i=1}^3 \text{Costo Consumo Total de energía}_{\text{motor } i} + \sum_{i=10}^{13} \text{Costo Consumo Total de energía}_{\text{motor } i} \quad (3.9.a)$$

Dónde:

$i$  = número de motor.

Entonces:

$$\text{Costo Consumo de Energía}_{7 \text{ motores con mayor consumo}} = (1482087.8 \times 2) + (2274405.82) + (569938.08 \times 3) + (586312.57) \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Costo Consumo de Energía}_{7 \text{ motores con mayor consumo}} = 7,534,708.23 \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

Dado que estos siete motores intervienen en los procesos más representativos de la planta y operan las 24hrs del día; **en estos equipos es dónde se encuentran las mayores áreas de oportunidad para reducir el consumo eléctrico y el gasto por este servicio.** Estos equipos se remplazarían por unos motores de mayor eficiencia, pero con parámetros nominales similares a los instalados.

En la tabla 3.9.c se muestran los motores que se proponen para la sustitución de los 7 equipos antes mencionados:

DATOS DE PLACA DE MOTORES PROPUESTOS									
N°	Proceso	Motor	Factor de servicio	Horas de operación al año	Eficiencia	Capacidad [HP]	F.P.	Voltaje [V]	Corriente [A]
1	compresor	weg	0.78	6833	0.962	400	0.86	460	455
2	compresor	weg	0.78	6833	0.962	400	0.86	460	455
3	compresor	weg	0.78	6833	0.963	616.62	0.87	460	659
10	Agitador	weg	0.78	6833	0.958	150	0.85	460	170
11	Agitador	weg	0.78	6833	0.958	150	0.85	460	170
12	Agitador	weg	0.78	6833	0.958	150	0.85	460	170
13	Agitador	weg	0.78	6833	0.958	150	0.85	460	170

Tabla 3.9.c Datos de placa de motores propuestos<sup>1</sup>.

El cálculo de la corriente de salida, se hizo de la misma manera que en que se calcularon los de los motores instalados (fórmula 3.4.e). Esto es:

Ej. Para el motor propuesto 1 (compresor):

$$I = \frac{(400 \times 746 [VA])}{(\sqrt{3}) \times (460 [V]) \times (0.86) \times (0.962)} [A]$$

$$I = 452.70[A]$$

Posteriormente, en una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para cada uno de los 6 motores propuestos faltantes.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con datos de placa de motores propuestos.

En la siguiente tabla se muestra la estimación de datos de lectura de los motores propuestos:

DATOS DE LECTURA DE MOTORES PROPUESTOS									
N°	Proceso	Motor	Factor de servicio	Horas de operación al año	F.P.	Eficiencia	Capacidad [HP]	Voltaje [V]	Corriente [A]
1	compresor	weg	0.78	6833	0.86	0.962	400	460	452.70
2	compresor	weg	0.78	6833	0.86	0.962	400	460	452.70
3	compresor	weg	0.78	6833	0.87	0.963	616.62	460	689.12
10	Agitador	weg	0.78	6833	0.85	0.958	150	460	172.48
11	Agitador	weg	0.78	6833	0.85	0.958	150	460	172.48
12	Agitador	weg	0.78	6833	0.85	0.958	150	460	172.48
13	Agitador	weg	0.78	6833	0.85	0.958	150	460	172.48

Tabla 3.9.d Estimación de datos de campo de motores propuestos<sup>1</sup>.

Con esto, la estimación del consumo de energía eléctrica de los motores propuestos, se hizo de la misma manera en que se calcularon los de los motores instalados; es decir, se utilizaron las fórmulas 3.4.f, 3.4.g y 3.4.h respectivamente.

Ej. Para el motor propuesto 1(compresor):

Consumo de Energía Eléctrica (C.E) en base, intermedia y punta:

$$C.E_{base} = \left[ \frac{(460[V] \times 452.70[A]) \times (0.34) \times \left(6833 \left[\frac{hrs}{año}\right]\right)}{1000} \right]$$

$$C.E_{base} = 483,773.7 \left[\frac{kWh}{año}\right]$$

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con datos de estimación de lectura de motores propuestos.



$$C.E_{intermedia} = \left[ \frac{(460[V] \times 452.70[A]) \times (0.54) \times (6833 \left[ \frac{hrs}{año} \right])}{1000} \right]$$

$$C.E_{intermedia} = 768,346.5 \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

$$C.E_{punta} = \left[ \frac{(460[V] \times 452.70[A]) \times (0.12) \times (6833 \left[ \frac{hrs}{año} \right])}{1000} \right]$$

$$C.E_{punta} = 170,743.7 \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

Consumo Total de energía eléctrica:

$$Consumo\ Total\ de\ energía = (483,773.7 + 768,346.5 + 170,743.7) \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

$$Consumo\ Total\ de\ energía = 1,422,864.0 \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

Posteriormente, en una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para cada uno de los 6 motores propuestos faltantes.

Por otro lado, de la fórmula 3.9, el consumo de energía anual para los 7 motores propuestos se tiene:

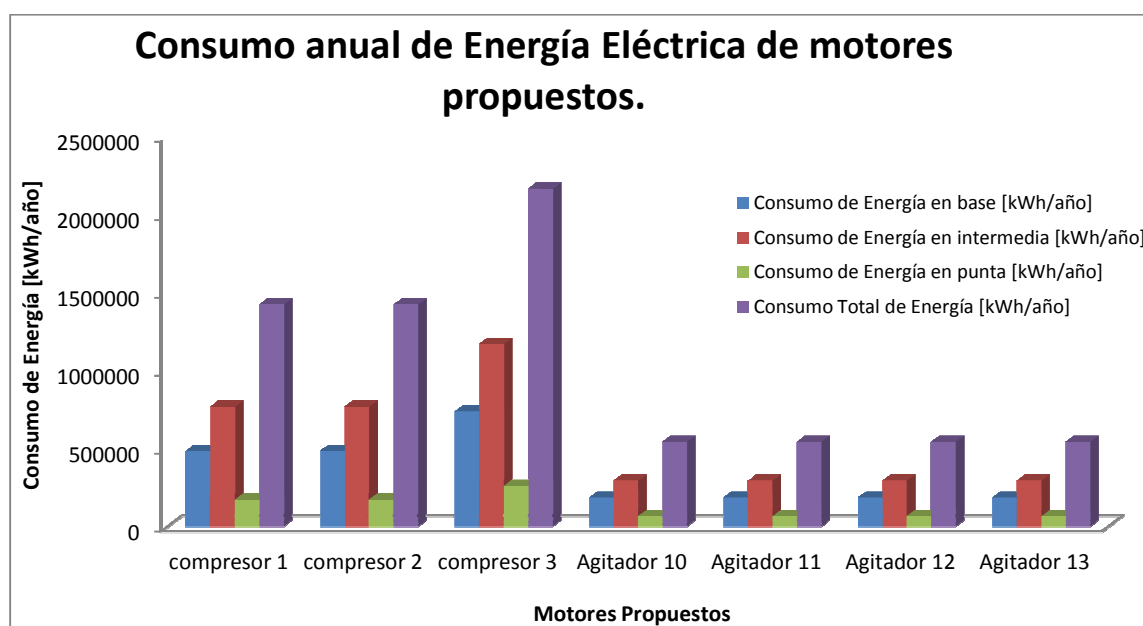
$$Consumo\ de\ Energía_{7\ motores\ propuestos} = (1,422,864.0 \times 2) + (2165952.7) + (542105.4 \times 4) \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

$$Consumo\ de\ Energía_{7\ motores\ propuestos} = 7,180,102.2 \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE MOTORES PROPUESTOS						
N°	Proceso	Motor	Consumo de Energía en base [kWh/año]	Consumo de Energía en intermedia [kWh/año]	Consumo de Energía en punta [kWh/año]	Consumo Total de Energía [kWh/año]
1	compresor	weg	483773.7	768346.5	170743.7	1422864.0
2	compresor	weg	483773.7	768346.5	170743.7	1422864.0
3	compresor	weg	736423.9	1169614.5	259914.3	2165952.7
10	Agitador	weg	184315.8	292736.9	65052.6	542105.4
11	Agitador	weg	184315.8	292736.9	65052.6	542105.4
12	Agitador	weg	184315.8	292736.9	65052.6	542105.4
13	Agitador	weg	184315.8	292736.9	65052.6	542105.4
Consumo Energía de motores propuestos [kWh/año]:						<b>7180102.2</b>

Tabla 3.9.e Consumo de Energía Eléctrica de motores propuestos<sup>1</sup>.



Gráfica 3.9.b Consumo anual de Energía Eléctrica de motores propuestos<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con datos calculados anteriormente.

<sup>2</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 3.9.e.

---

### 3.10 Costos de los nuevos motores.

#### COSTO DE OPERACIÓN DE LOS MOTORES PROPUESTOS:

El cálculo del costo de consumo de energía eléctrica para los 7 motores propuestos, se hizo de la misma manera que con los motores instalados; es decir, se utilizaron las fórmulas 3.5 y 3.5.a respectivamente.

Ej. Para el motor propuesto 1 (compresor):

$$C.C.E_{base} = \left[ \left( 483773.7 \left[ \frac{kWh}{año} \right] \right) \times \left( 0.761 \left[ \frac{\$}{kWh} \right] \right) \right]$$

$$C.C.E_{base} = 368,115.11 \left[ \frac{\$}{año} \right]$$

$$C.C.E_{intermedia} = \left[ \left( 768,346.5 \left[ \frac{kWh}{año} \right] \right) \times \left( 0.911 \left[ \frac{\$}{kWh} \right] \right) \right]$$

$$C.C.E_{intermedia} = 699,598.94 \left[ \frac{\$}{año} \right]$$

$$C.C.E_{punta} = \left[ \left( 170,743.7 \left[ \frac{kWh}{año} \right] \right) \times \left( 2.107 \left[ \frac{\$}{kWh} \right] \right) \right]$$

$$C.C.E_{punta} = 359680.06 \left[ \frac{\$}{año} \right]$$

$$\text{Costo Total de C.E.} = (368,115.11 + 699,598.94 + 359680.06) \left[ \frac{\$}{año} \right]$$

$$\text{Costo Total de C.E.} = 1,427,394.11 \left[ \frac{\$}{año} \right]$$

Posteriormente, en una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para cada uno de los 6 motores propuestos faltantes.

Así pues, una vez teniendo el costo total de energía eléctrica de cada uno de los 7 motores propuestos, se calculó el costo anual total de consumo de energía, de la siguiente manera (fórmula 3.9.a):

$$\text{Costo Consumo de Energía}_{7 \text{ motores propuestos}} = (1,427,394.11 \times 2) + (2,172,848.76) + (543,831.37 \times 4) \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

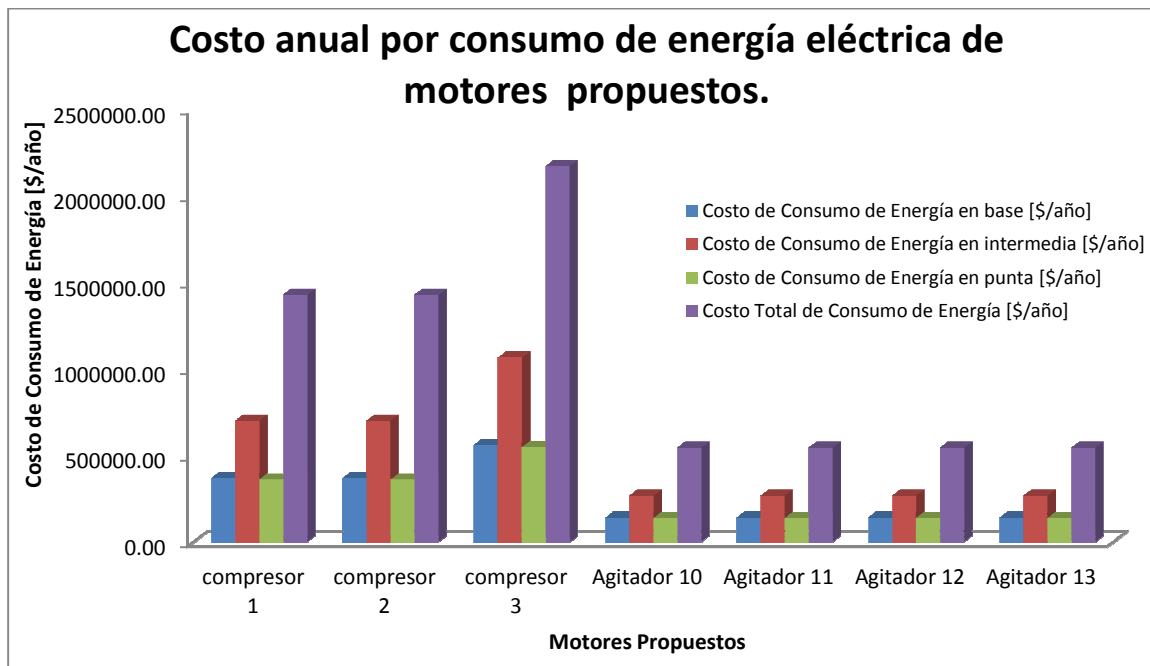
$$\text{Costo Consumo de Energía}_{7 \text{ motores propuestos}} = 7,202,962.45 \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla y gráfica siguientes:

COSTO POR CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE MOTORES PROPUESTOS						
N°	Proceso	Motor	Costo de Consumo de Energía en base [\$/año]	Costo de Consumo de Energía en intermedia [\$/año]	Costo de Consumo de Energía en punta [\$/año]	Costo Total de Consumo de Energía [\$/año]
1	compresor	weg	368115.11	699598.94	359680.06	1427394.11
2	compresor	weg	368115.11	699598.94	359680.06	1427394.11
3	compresor	weg	560362.74	1064963.54	547522.48	2172848.76
10	Agitador	weg	140250.37	266544.36	137036.64	543831.37
11	Agitador	weg	140250.37	266544.36	137036.64	543831.37
12	Agitador	weg	140250.37	266544.36	137036.64	543831.37
13	Agitador	weg	140250.37	266544.36	137036.64	543831.37
Costo Consumo Energía de motores propuestos [\$/año]:						<b>7202962.45</b>

Tabla 3.10 Costo por consumo de Energía Eléctrica de motores propuestos<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con datos calculados anteriormente.



Gráfica 3.10 Costo por consumo anual de Energía Eléctrica de motores propuestos<sup>1</sup>.

#### COSTO DE INVERSIÓN DE LOS MOTORES PROPUESTOS:

El compresor 3, tiene un precio de lista en [USD] por lo que es necesario calcularlo en [MN], Esto es:

$$\text{Precio al cliente}_{\text{motor } 3} = (\text{precio de lista [USD]}) \times \left( t_c \left[ \frac{\text{MN}}{\text{USD}} \right] \right) \dots\dots (3.10)$$

Dónde:

$t_c$  = tipo de cambio.

Entonces:

$$\text{Precio al cliente}_{\text{motor } 3} = (24,754 \text{ [USD]}) \times \left( \frac{14 \text{ [MN]}}{1 \text{ [USD]}} \right)$$

$$\text{Precio al cliente}_{\text{motor } 3} = 346,556 \text{ [\$]}$$

<sup>1</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 3.10.

---

Los compresores 1 y 2; y los agitadores 10, 11, 12 y 13 tienen un descuento de 63%, Esto es:

$$Descuento_{63\%} = [(Precio\ de\ lista) \times (0.63)] \dots\dots (3.10.a)$$

$$Precio\ al\ cliente = (Precio\ de\ lista) - (Descuento_{63\%}) \text{ [\$]} \dots\dots (3.10.b)$$

Ej. Para el motor 1 (compresor):

$$Descuento_{63\%} = (508,100) \times (0.63) \text{ [\$]}$$

$$Descuento_{63\%} = \mathbf{320,103} \text{ [\$]}$$

Entonces:

$$Precio\ al\ cliente = (508,100) - (320,103) \text{ [\$]}$$

$$Precio\ al\ cliente = \mathbf{187,997} \text{ [\$]}$$

Posteriormente, en una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para cada uno de los 5 motores propuestos faltantes.

Por otra parte, el costo de los 7 motores propuestos, se calculó de la siguiente manera:

$$Costo_{7\ motores\ propuestos} = \sum_{i=1}^3 Costo_{motor\ i} + \sum_{i=10}^{13} Costo_{motor\ i} \dots\dots (3.10.c)$$

Dónde:

*i* = número de motor.

Entonces:

$$\text{Costo } 7 \text{ motores propuestos} = (187,997 \times 2) + (346,556) + (69,527 \times 4) [\$]$$

$$\text{Costo motores propuestos} = 1,000,658.3 [\$]$$

Los resultados se muestran a continuación:

COSTO DE MOTORES PROPUESTOS						
N°	Proceso	Motor	Capacidad	Precio de lista 2011 [\\$]	Descuento (63%)	Precio al cliente [\\$]
1	compresor	weg	400	508100	320103	187997
2	compresor	weg	400	508100	320103	187997
3	compresor	weg	616.62	346556	-	346556
4	Agitador	weg	150	187911	118383.93	69527
5	Agitador	weg	150	187911	118383.93	69527
6	Agitador	weg	150	187911	118383.93	69527
7	Agitador	weg	150	187911	118383.93	69527
Costo de motores propuestos [\$/año]:						<b>1000658.3</b>

Tabla 3.10.a Costo de inversión de motores propuestos<sup>1</sup>.

#### COSTO DE INSTALACIÓN DE LOS MOTORES PROPUESTOS:

Este costo depende de la capacidad del motor, del número de personas que se necesitan para dicha instalación y por consiguiente el número de horas que implica.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con datos calculados anteriormente.

---

Tomando en cuenta los parámetros anteriores, el cálculo del costo de instalación se hizo de la siguiente manera:

Ej. Para el motor 1 (compresor):

$$\text{Precio de instalación}_{\text{por persona}} = \left( \text{Hrs de instalación} \right) \times \left( \text{Costo de hr de instalación [USD]} \right) \times (t_c) \dots \dots (3.10.d)$$

Dónde:

$t_c =$  tipo de cambio.

$$\text{Precio de instalación}_{\text{por persona}} = (5 [\text{hrs}]) \times \left( 60 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{hr}} \right] \right) \times \left( 14 \left[ \frac{\$}{\text{USD}} \right] \right)$$

$$\text{Precio de instalación}_{\text{por persona}} = \mathbf{4,200} [\$]$$

Se necesitan 2 personas para realizar la instalación, entonces:

$$\text{Precio de instalación total}_{\text{motor 1}} = \left( \text{Precio de instalación}_{\text{persona}} \right) \times \left( \text{N}^\circ \text{ de personas para instalación} \right) \dots (3.10.e)$$

$$\text{Precio de instalación total}_{\text{motor 1}} = (4,200 [\$]) \times (2)$$

$$\text{Precio de instalación total}_{\text{motor 1}} = \mathbf{8,400} [\$]$$

Posteriormente, en una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para cada uno de los 6 motores propuestos faltantes.



Así pues, el costo total de instalación de los 7 motores propuestos, se calculó utilizando la fórmula 3.10.c, esto es:

$$\text{Costo de instalación } \underset{\text{propuestos}}{7 \text{ motores}} = (8400 \times 2) + (10080) + (3360 \times 4)[\$]$$

$$\text{Costo de instalación de motores propuestos} = 40,320.00[\$]$$

Los resultados se muestran a continuación:

COSTO DE INSTALACIÓN DE MOTORES PROPUESTOS								
N°	Proceso	Motor	Capacidad	Personal	Horas de instalación	Costo de hora de instalación [USD]	Tipo de cambio [\$]	Precio de instalación [\$]
1	compresor	weg	400	2	5	60	14.00	8400
2	compresor	weg	400	2	5	60	14.00	8400
3	compresor	weg	616.62	2	6	60	14.00	10080
4	Agitador	weg	150	2	2	60	14.00	3360
5	Agitador	weg	150	2	2	60	14.00	3360
6	Agitador	weg	150	2	2	60	14.00	3360
7	Agitador	weg	150	2	2	60	14.00	3360
Costo de instalación motores propuestos [\$/año]:								<b>40320.0</b>

Tabla 3.10.b Costo de instalación de motores propuestos<sup>1</sup>.

### 3.11 Conclusiones.

Después de realizar el levantamiento de datos de 27 motores que intervienen en los procesos más representativos en la planta química ENMEX, fué posible conocer los consumos eléctricos de cada uno de ellos.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con datos calculados anteriormente.

---

Con los resultados obtenidos, se observó que los compresores 1, 2 y 3; y los agitadores 10, 11, 12 y 13; consumen mayor energía eléctrica (en base, intermedia y punta). Es por ello que se determinó que es en esos equipos dónde se encuentran las mayores áreas de oportunidad para reducir dicho consumo eléctrico y por consiguiente el gasto por este servicio.

Así pues, al determinar e identificar las medidas de optimización para disminuir el elevado consumo eléctrico de estos siete motores, se pudo observar que existen diferentes factores que afectan su rendimiento. Sin embargo, la opción más viable para reducir dicho consumo e incrementar la eficiencia de los procesos, es el reemplazo de ellos.

Los 7 motores propuestos son de la marca WEG, con especificaciones técnicas similares a los instalados. Es decir, con capacidad, factor de servicio, factor de potencia y voltaje nominal similares; pero con una mayor eficiencia. Lo cual garantiza que la corriente demandada sea menor para la misma producción en la planta. Y eso se traduce en ahorro en el consumo eléctrico y también en los costos de operación de los motores. Lo cual se corroboró al realizar los cálculos correspondientes.

También en este capítulo se calcularon los costos de inversión y de instalación de los nuevos motores. Datos que más adelante serán de utilidad al realizar el análisis financiero de la factibilidad del proyecto de sustitución.

---

## **CAPITULO 4.**

### **ANÁLISIS DE VIABILIDAD Y TOMA DE DECISIONES.**

#### **4.1 Introducción.**

El objetivo de cualquier estudio de viabilidad, es el análisis de un conjunto concreto de necesidades para proponer una solución a corto, mediano o largo plazo que tenga en cuenta restricciones financieras, técnicas, legales y operativas. (FIDE, 2009).

Muchas veces cuando se emprende el desarrollo de un proyecto los recursos y el tiempo no son realistas para su materialización sin tener pérdidas o resultados en un corto tiempo. La viabilidad y el análisis de riesgos están inversamente relacionados, si el riesgo del proyecto es alto, la viabilidad de obtener los resultados esperados se reduce, sin embargo se deben tomar en cuenta cuatro áreas principales de interés:

- Viabilidad económica: Es una evaluación de los costos de desarrollo, comparados con los ingresos netos o beneficios obtenidos al realizar el cambio de motores en la planta. El análisis financiero incluye un análisis de costo-beneficio; esto es, una valoración de la inversión comparado con los beneficios que se obtendrán con la puesta en marcha de la sustitución de los motores.

Es importante que en el desarrollo del análisis, el cliente pueda apreciar de manera clara los beneficios de optar por una propuesta. El análisis de costo-beneficio es una fase muy importante de ella depende la posibilidad de desarrollo del proyecto.

- 
- Viabilidad Técnica: Es un estudio de funciones, rendimiento y restricciones que puedan afectar la realización de un sistema aceptable. En el Análisis Técnico se evaluaron los principios de operación de la planta y al mismo tiempo se recogió información adicional sobre el rendimiento y características de mantenimiento.

Los resultados obtenidos del análisis técnico son la base para determinar sobre si continuar o abandonar el proyecto, si hay riesgos de que no funcione, no tenga el rendimiento deseado o si los motores elegidos no son los más adecuados para la planta.

- Viabilidad Legal: Es determinar cualquier posibilidad de infracción, violación o responsabilidad legal en que se podría incurrir al desarrollar el proyecto.
- Alternativas: Es una evaluación de los enfoques alternativos del desarrollo del proyecto.

El estudio de la viabilidad puede documentarse como un informe aparte para el cliente y para quien llevara a cabo la realización del proyecto. (FIDE, 2009).

#### **4.2 Indicadores técnicos- económicos.**

Beneficios técnicos:

- Mayor productividad: Al realizar cambios y mejorar el equipo se tiene una mejor calidad de vida de los equipos y una mejora en la producción.
- Modernización: Proporciona a la planta una mayor seguridad en el trabajo y una mejor imagen corporativa.

- 
- Disminución de costos de mantenimiento: Esto se refleja en la disminución de compra de refacciones y mano de obra, así como en los paros programados.
  - Disminución de costos por penalización: Esta disminución se reflejaría en la facturación y el aumento de la bonificación por el factor de potencia que de igual manera generaría ganancias.
  - Reducción de costos en la tarifa eléctrica: Genera un incremento en las ganancias.

#### Beneficios energéticos:

- Reducción en consumo de combustible: Al existir una reducción se tienen menos gastos y por tanto una mayor ganancia.
- Reducción de emisiones: Al reducir las emisiones generadas se tiene un beneficio al medio ambiente y a la población en general. También proporciona una mejor presentación a la empresa.

#### **4.3 Afectaciones medioambientales.**

La presencia en el ambiente de cualquier contaminante que lo perjudique se considera como una afectación.

En los últimos años, se ha dedicado creciente atención a la medición y la reducción del ruido producido por los motores eléctricos y a la respectiva legislación sobre la comodidad sonora. (Prias, 2004).

---

El proyecto adecuado de los motores, reduciendo los factores que dan origen al ruido, exige una serie de accesorios, o incluso el confinamiento acústico del motor. Lo cual representa un costo adicional y debe compararse con el beneficio obtenido.

Otra afectación al medio ambiente es la vibración, ya que puede provocar alteraciones al entorno. Una causa puede ser el desequilibrio magnético. Las fuerzas que actúan en el entrehierro entre el estator y el rotor tienden a aproximarlos y producen vibraciones con el doble de frecuencia de alimentación. Aunque en esas condiciones una pequeña vibración sea normal, una asimetría en el entrehierro puede reforzar esa vibración e incluso producir el ruido.

Si no se tiene un control adecuado de las vibraciones, se pueden provocar daños tanto a la estructura física de la planta como a las construcciones contiguas en caso de estar muy cerca de ellas; es por ello, que cada uno de los motores debe estar instalado en un lugar adecuado para contrarrestar las mismas.

El ritmo desbocado del cambio climático tendrá como consecuencia grandes alteraciones físicas, como la elevación del nivel del mar, deterioros ambientales y serias amenazas para la humanidad.

Al buscar la causa de esta aceleración se encontró que existe una relación directa entre el calentamiento global y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero provocado por las sociedades humanas, tanto industrializadas como en desarrollo.

El nivel de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ha aumentado un 31%. Esto ha ocasionado el incremento de la temperatura media de la superficie terrestre; lo cual aumenta la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos. (Frers, 2006).

---

#### 4.4 Cálculo de ahorro de la energía.

Una vez calculados los consumos anuales de energía eléctrica de los motores viables a sustituir y de los motores propuestos (mostrados en las tablas 3.9.a y 3.9.e respectivamente); es fundamental analizar si existen ahorros.

Los cuales se calcularon de la siguiente manera:

$$\text{Ahorro consumo de energía}_x = \left( C.E.x_{\text{motor } i \text{ con mayor consumo}} \right) - \left( C.E.x_{\text{motor } i \text{ propuesto}} \right) \dots\dots\dots (4.4)$$

Dónde:

$x = \text{base, intermedia, punta, total.}$

$i = 1,2,3,10,11,12,13.$

Por otro lado, los ahorros de los 7 motores en total se calculan:

$$\text{Ahorro consumo de energía}_{7 \text{ motores en } x} = \sum_{i=1}^3 \text{Ahorro consumo de energía } x_{\text{motor } i} + \sum_{i=10}^{13} \text{Ahorro consumo de energía } x_{\text{motor } i} \dots(4.4.a)$$

Dónde:

$x = \text{base, intermedia, punta, total.}$

$i = \text{número de motor.}$

- Ahorro anual por consumo de energía en base:

Ej. Para el motor 1 (compresor):

$$\text{Ahorro consumo de energía}_{\text{base}} = (502310.6) - (483773.7) \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Ahorro consumo de energía}_{\text{base}} = \mathbf{18,536.8} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right]$$

Posteriormente, en una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para los 6 pares de motores faltantes. Así como también el ahorro total:

$$\text{Ahorro total consumo de energía}_{\text{base}} = (18536.8 \times 2) + (34419.8) + (8848.1 \times 3) + (14397.8) \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Ahorro total consumo de energía}_{\text{base}} = \mathbf{112,435.6} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right]$$

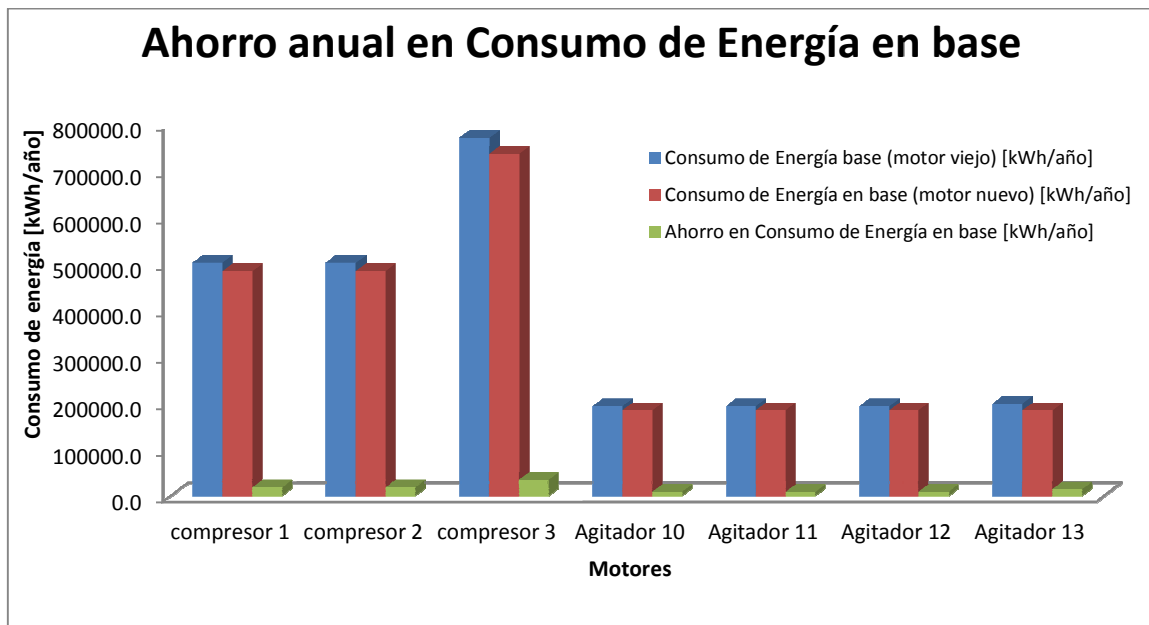
Los resultados se muestran a continuación:

AHORROS EN CONSUMO DE ENERGÍA EN BASE							
N°	Proceso	Motor	Consumo de Energía en base (motor viejo) [kWh/año]	Consumo de Energía en base (motor nuevo) [kWh/año]	Ahorro en Consumo de Energía en base [kWh/año]		
1	compresor	us motors / weg	502310.6	483773.7	18536.8		
2	compresor	us motors / weg	502310.6	483773.7	18536.8		
3	compresor	siemens / weg	770843.7	736423.9	34419.8		
10	Agitador	us motors / weg	193163.9	184315.8	8848.1		
11	Agitador		193163.9	184315.8	8848.1		
12	Agitador	us motors / weg	193163.9	184315.8	8848.1		
13	Agitador	weg / weg	198713.6	184315.8	14397.8		
<b>Ahorro anual en Consumo de Energía en base [kWh/año]:</b>					<b>112435.6</b>		

Tabla 4.4 Ahorros en consumo de energía en base<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados anteriormente.





Gráfica 4.4 Ahorros en consumo de energía en base<sup>1</sup>.

- Ahorro anual por consumo de energía en intermedia:

Ej. Para el motor 1 (compresor):

$$\text{Ahorro consumo de energía}_{intermedia} = (797787.4) - (768346.5) \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

$$\text{Ahorro consumo de energía}_{intermedia} = 29,440.9 \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

$$\text{Ahorro total consumo de energía}_{intermedia} = (29440.9 \times 2) + (54666.8) + (14052.9 \times 3) + (22867.0) \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

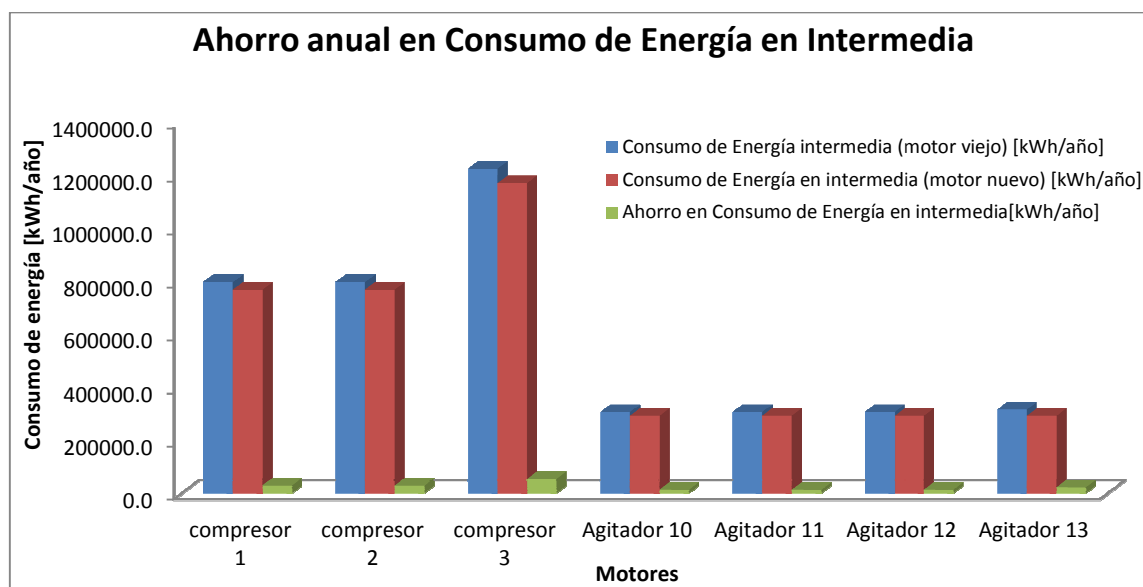
$$\text{Ahorro total consumo de energía}_{intermedia} = 178,574.2 \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

<sup>1</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 4.4.

Posteriormente, en una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para los 6 pares de motores faltantes. Esto es:

AHORROS EN CONSUMO DE ENERGÍA EN INTERMEDIA					
N°	Proceso	Motor	Consumo de Energía en intermedia (motor viejo) [kWh/año]	Consumo de Energía en intermedia (motor nuevo) [kWh/año]	Ahorro en Consumo de Energía en intermedia [kWh/año]
1	compresor	us motors / weg	797787.4	768346.5	29440.9
2	compresor	us motors / weg	797787.4	768346.5	29440.9
3	compresor	siemens / weg	1224281.2	1169614.5	54666.8
10	Agitador	us motors / weg	306789.8	292736.9	14052.9
11	Agitador		306789.8	292736.9	14052.9
12	Agitador	us motors / weg	306789.8	292736.9	14052.9
13	Agitador	weg / weg	315604.0	292736.9	22867.0
<b>Ahorro anual en Consumo de Energía en intermedia [kWh/año]:</b>					<b>178574.2</b>

Tabla 4.4.a Ahorro anual en consumo de energía en intermedia<sup>1</sup>.



Gráfica 4.4.a Ahorro anual en consumo de energía en intermedia<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados anteriormente.

<sup>2</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 4.4.a.

- Ahorro anual por consumo de energía en punta:

Ej. Para el motor 1 (compresor):

$$\text{Ahorro consumo de energía punta} = (177286.1) - (170743.7) \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

$$\text{Ahorro consumo de energía punta} = 6542.4 \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

$$\text{Ahorro total consumo de energía punta} = (6542.4 \times 2) + (12148.2) + (3122.9 \times 3) + (5081.6) \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

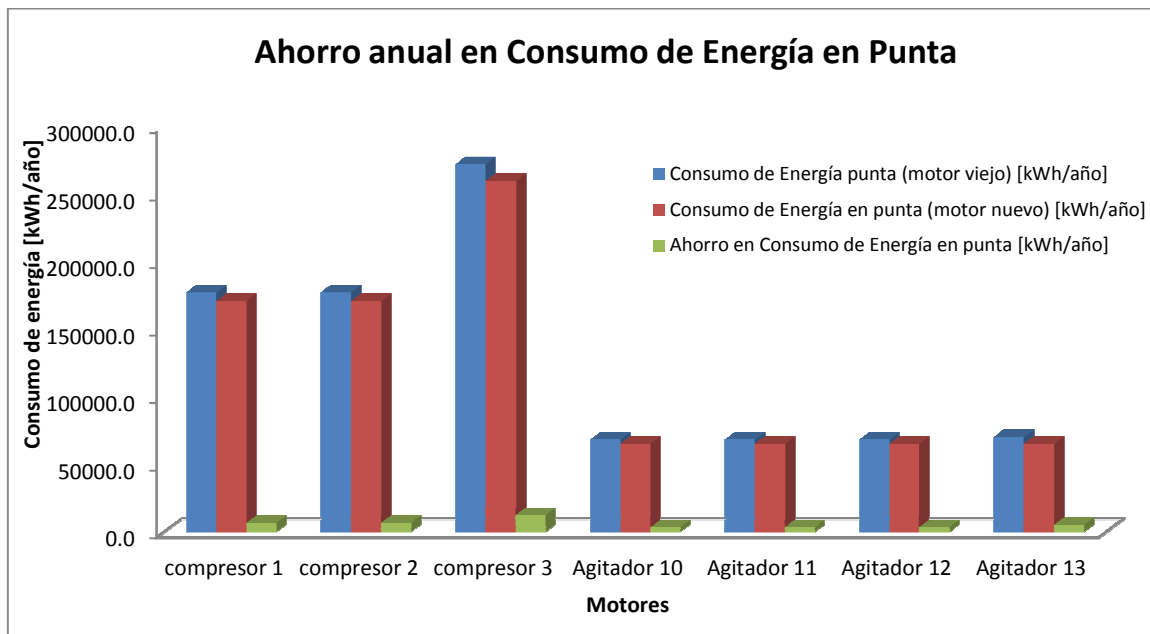
$$\text{Ahorro total consumo de energía punta} = 39,683.1 \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

Posteriormente, en una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para los 6 pares de motores faltantes. Como se muestra a continuación:

AHORROS EN CONSUMO DE ENERGÍA EN PUNTA					
N°	Proceso	Motor	Consumo de Energía en punta (motor viejo) [kWh/año]	Consumo de Energía en punta (motor nuevo) [kWh/año]	Ahorro en Consumo de Energía en punta [kWh/año]
1	compresor	us motors / weg	177286.1	170743.7	6542.4
2	compresor	us motors / weg	177286.1	170743.7	6542.4
3	compresor	siemens / weg	272062.5	259914.3	12148.2
10	Agitador	us motors / weg	68175.5	65052.6	3122.9
11	Agitador		68175.5	65052.6	3122.9
12	Agitador	us motors / weg	68175.5	65052.6	3122.9
13	Agitador	weg / weg	70134.2	65052.6	5081.6
<b>Ahorro anual en Consumo de Energía en punta [kWh/año]:</b>					<b>39683.1</b>

Tabla 4.4.b Ahorro anual en consumo de energía en punta<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados anteriormente.



Gráfica 4.4.b Ahorro anual en consumo de energía en punta<sup>1</sup>.

- Ahorro anual por consumo total de energía:

Ej. Para el motor 1 (compresor):

$$\text{Ahorro consumo de energía total} = (1477384.1) - (1422864.0) \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

$$\text{Ahorro consumo de energía total} = 54520.1 \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

$$\text{Ahorro total consumo de energía total} = (54520.1 \times 2) + (101234.7) + (26023.8 \times 3) + (42346.4) \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

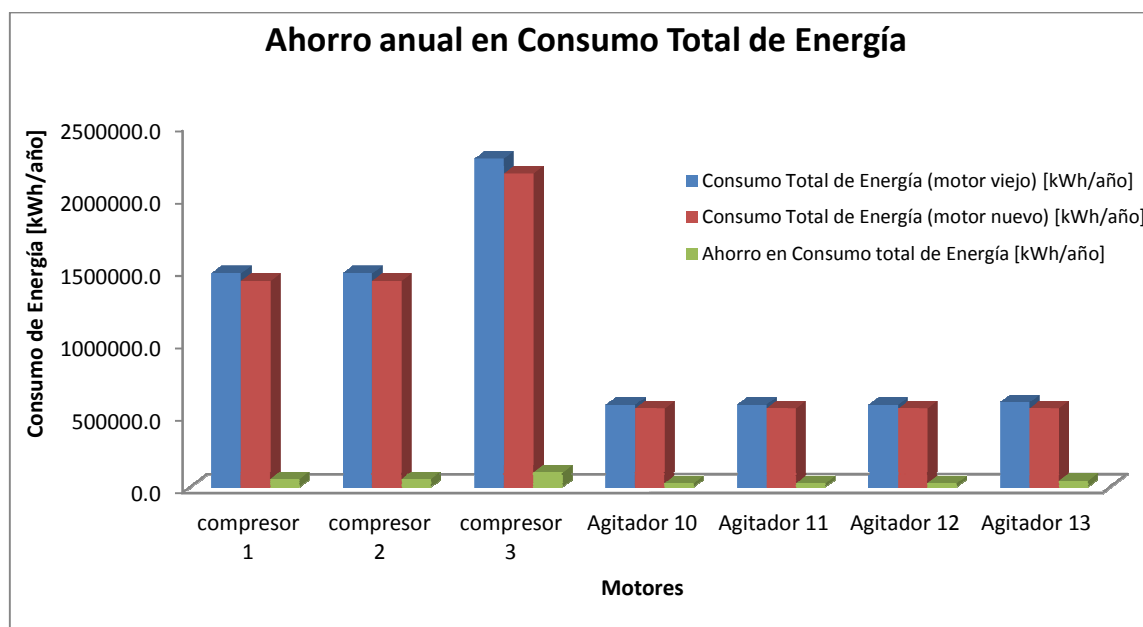
$$\text{Ahorro total consumo de energía total} = 330,692.9 \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

<sup>1</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 4.4.b.

Posteriormente, en una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para los 6 pares de motores faltantes. Como se muestra a continuación:

AHORROS EN CONSUMO DE ENERGÍA					
N°	Proceso	Motor	Consumo Total de Energía (motor viejo) [kWh/año]	Consumo Total de Energía (motor nuevo) [kWh/año]	Ahorro en Consumo de Energía [kWh/año]
1	compresor	us motors / weg	1477384.1	1422864.0	54520.1
2	compresor	us motors / weg	1477384.1	1422864.0	54520.1
3	compresor	siemens / weg	2267187.5	2165952.7	101234.7
10	Agitador	us motors / weg	568129.2	542105.4	26023.8
11	Agitador		568129.2	542105.4	26023.8
12	Agitador	us motors / weg	568129.2	542105.4	26023.8
13	Agitador	weg / weg	584451.8	542105.4	42346.4
<b>Ahorro anual en Consumo de Energía [kWh/año]:</b>					<b>330692.9</b>

Tabla 4.4.c Ahorro anual en consumo total de energía<sup>1</sup>.



Gráfica 4.4.c Ahorro anual en consumo total de energía<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados anteriormente.

<sup>2</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 4.4.c.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se tiene que el consumo anual de energía eléctrica de los motores viables a sustituir es de 7,510,795.1 [kWh/año] (tabla 3.9.a) y para los motores propuestos es de 7,180,102.2 [kWh/año] (tabla 3.9.e). Por lo tanto, se tiene un ahorro anual en consumo de energía eléctrica de 330,692.9 [kWh/año].

#### 4.5 Estimación de la reducción de costos de operación.

Cuando se comparan económicamente dos motores de la misma potencia pero de diferente eficiencia nominal, resulta necesario determinar los ahorros anuales generados por el uso del motor de mayor eficiencia. El objetivo de dicha comparación es determinar en qué tiempo el ahorro obtenido por un menor consumo energético compensa el costo adicional del motor de alta eficiencia.

Una vez calculados los costos por consumos anuales de energía eléctrica de los motores viables a sustituir y de los motores propuestos (mostrados en las tablas 3.9.b y 3.10 respectivamente); es fundamental analizar si existen ahorros. Los cuales se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Ahorro costo por consumo de energía}_x = \left( \text{Costo por } C.E._x \text{ motor } i \text{ con mayor consumo} \right) - \left( \text{Costo por } C.E._x \text{ motor } i \text{ propuesto} \right) \dots\dots (4.5)$$

*Dónde:*

*x = base, intermedia, punta, total.*

*i = 1,2,3,10,11,12,13.*

Por otro lado, los ahorros de los 7 motores en total se calculan:

$$\text{Ahorro costo por consumo de energía de } 7 \text{ motores en } x = \sum_{i=1}^3 \text{Ahorro costo por consumo de energía } x_{\text{motor } i} + \sum_{i=10}^{13} \text{Ahorro costo por consumo de energía } x_{\text{motor } i} \quad \dots(4.5.a)$$

Dónde:

$x = \text{base, intermedia, punta, total.}$

$i = \text{número de motor.}$

- Ahorro anual en costos por consumo de energía en base:

Ej. Para el motor 1 (compresor):

$$\text{Ahorro costo por consumo de energía base} = (382220.24) - (368115.11) \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Ahorro costo por consumo de energía base} = \mathbf{14,105.1} \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

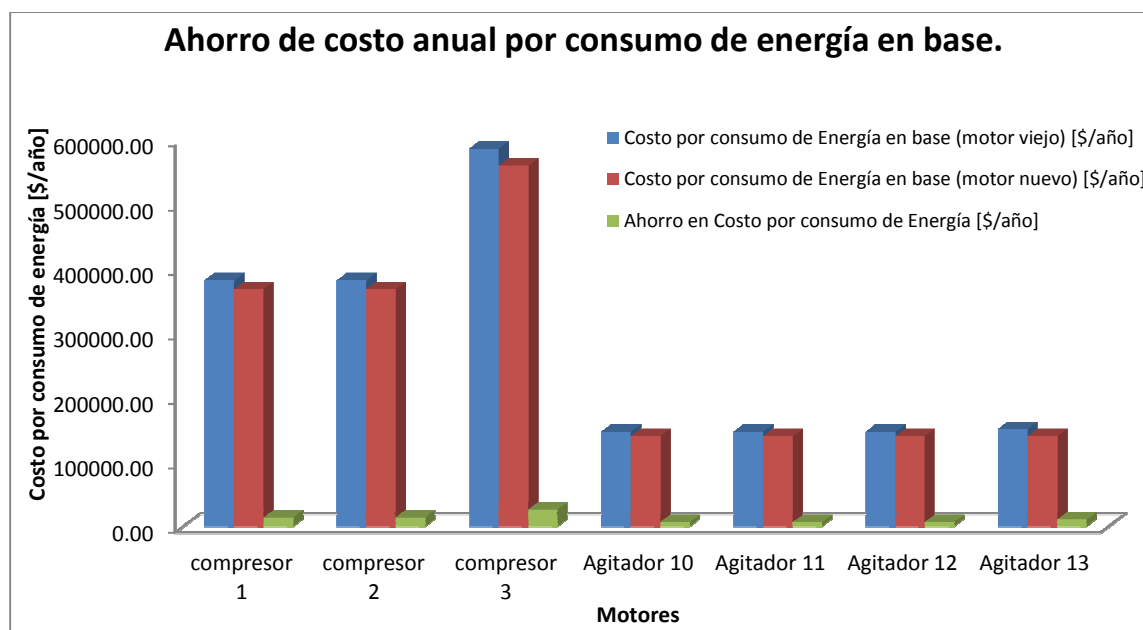
$$\text{Ahorro total costo por consumo de energía base} = (14105.1 \times 2) + (26190.9) + (6732.7 \times 3) + (10955.6) \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Ahorro total costo por consumo de energía base} = \mathbf{85,555.0} \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

Posteriormente, en una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para los 6 pares de motores faltantes. Como se muestra a continuación:

AHORROS EN COSTO POR CONSUMO DE ENERGÍA EN BASE					
N°	Proceso	Motor	Costo por consumo de Energía en base (motor viejo) [\$/año]	Costo por consumo de Energía en base (motor nuevo) [\$/año]	Ahorro en Costo por consumo de Energía en base [\$/año]
1	compresor	us motors / weg	382220.24	368115.11	14105.1
2	compresor	us motors / weg	382220.24	368115.11	14105.1
3	compresor	siemens / weg	586553.60	560362.74	26190.9
10	Agitador	us motors / weg	146983.11	140250.37	6732.7
11	Agitador		146983.11	140250.37	6732.7
12	Agitador	us motors / weg	146983.11	140250.37	6732.7
13	Agitador	weg / weg	151205.98	140250.37	10955.6
<b>Ahorro anual en costo por consumo de Energía en base [\$/año]:</b>					<b>85555.0</b>

Tabla 4.5 Ahorro anual en costos por consumo de energía en base<sup>1</sup>.



Gráfica 4.5 Ahorro anual en costos por consumo de energía en base<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados anteriormente.

<sup>2</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 4.5.



- 
- Ahorro anual en costos por consumo de energía en intermedia:

Ej. Para el motor 1 (compresor):

$$\begin{array}{l} \text{Ahorro costo} \\ \text{por consumo} \\ \text{de energía} \end{array} \text{intermedia} = (726405.59) - (699598.94) \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

$$\begin{array}{l} \text{Ahorro costo} \\ \text{por consumo} \\ \text{de energía} \end{array} \text{intermedia} = 26,806.6 \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

$$\begin{array}{l} \text{Ahorro total costo} \\ \text{por consumo} \\ \text{de energía} \end{array} \text{intermedia} = (26806.6 \times 2) + (49775.5) + (12795.5 \times 3) + (20821.0) \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

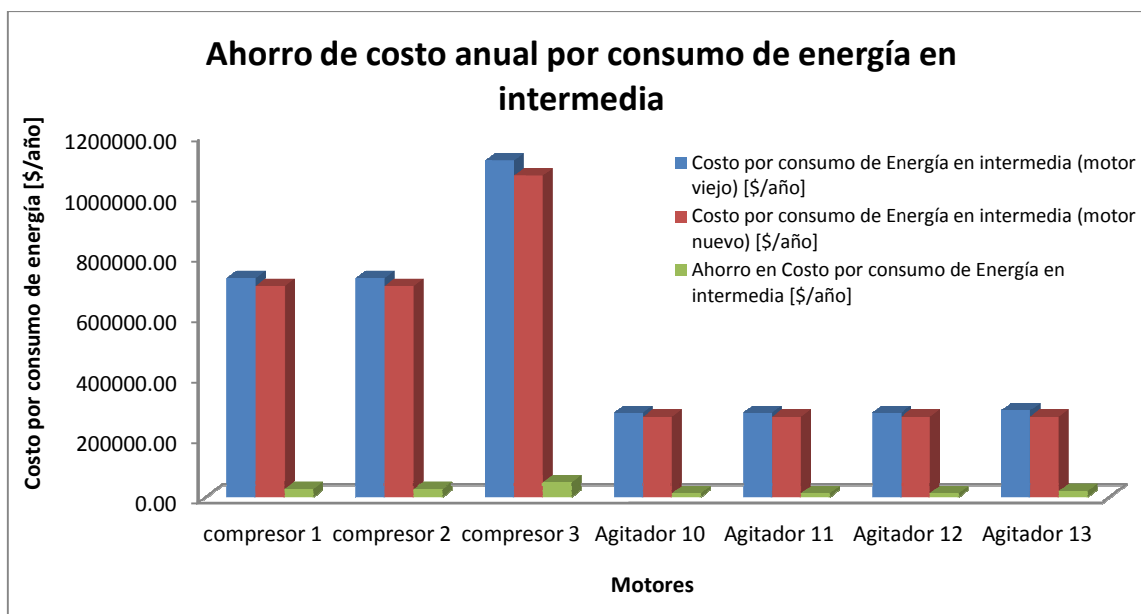
$$\begin{array}{l} \text{Ahorro total costo} \\ \text{por consumo} \\ \text{de energía} \end{array} \text{intermedia} = 162,596.3 \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

Posteriormente, en una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para los 6 pares de motores faltantes.

Los resultados se muestran a continuación:

AHORROS EN COSTO POR CONSUMO DE ENERGÍA EN INTERMEDIA					
N°	Proceso	Motor	Costo por consumo de Energía en intermedia (motor viejo) [\$/año]	Costo por consumo de Energía en intermedia (motor nuevo) [\$/año]	Ahorro en Costo por consumo de Energía en intermedia [\$/año]
1	compresor	us motors / weg	726405.59	699598.94	26806.6
2	compresor	us motors / weg	726405.59	699598.94	26806.6
3	compresor	siemens / weg	1114739.01	1064963.54	49775.5
10	Agitador	us motors / weg	279339.86	266544.36	12795.5
11	Agitador		279339.86	266544.36	12795.5
12	Agitador	us motors / weg	279339.86	266544.36	12795.5
13	Agitador	weg / weg	287365.38	266544.36	20821.0
<b>Ahorro anual en costo por consumo de Energía en intermedia [\$/año]:</b>					<b>162596.3</b>

Tabla 4.5.a Ahorro anual en costos por consumo de energía en intermedia<sup>1</sup>.



Gráfica 4.5.a Ahorro anual en costos por consumo de energía en intermedia<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados anteriormente.

<sup>2</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 4.5.a.

- Ahorro anual en costo por consumo de energía en punta:

Ej. Para el motor 1 (compresor):

$$\text{Ahorro costo por consumo de energía en punta} = (373461.98) - (359680.06) \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Ahorro costo por consumo de energía en punta} = 13,781.9 \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Ahorro total costo por consumo de energía en punta} = (13781.9 \times 2) + (25590.7) + (6578.5 \times 3) + (10704.6) \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

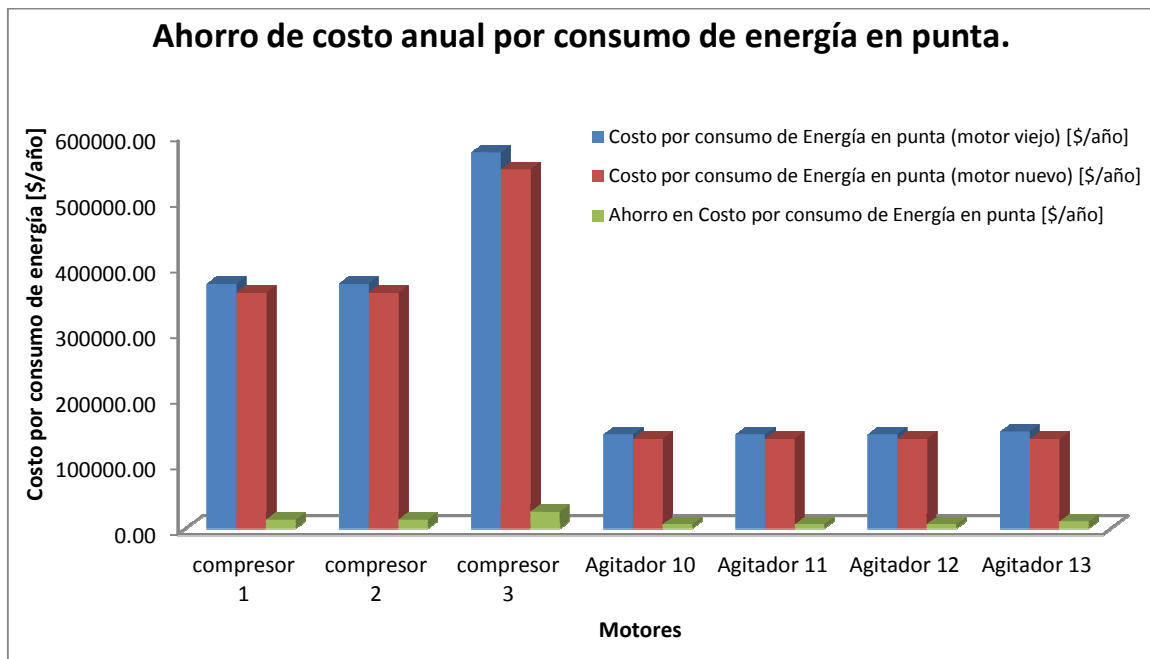
$$\text{Ahorro total costo por consumo de energía en punta} = 83,594.5 \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

Posteriormente, en una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para los 6 pares de motores faltantes. Los resultados se muestran a continuación:

AHORROS EN COSTO POR CONSUMO DE ENERGÍA EN PUNTA					
N°	Proceso	Motor	Costo por consumo de Energía en punta (motor viejo) [\$/año]	Costo por consumo de Energía en punta (motor nuevo) [\$/año]	Ahorro en Costo por consumo de Energía en punta [\$/año]
1	compresor	us motors / weg	373461.98	359680.06	13781.9
2	compresor	us motors / weg	373461.98	359680.06	13781.9
3	compresor	siemens / weg	573113.21	547522.48	25590.7
10	Agitador	us motors / weg	143615.11	137036.64	6578.5
11	Agitador		143615.11	137036.64	6578.5
12	Agitador	us motors / weg	143615.11	137036.64	6578.5
13	Agitador	weg / weg	147741.21	137036.64	10704.6
<b>Ahorro anual en costo por consumo de Energía en punta [\$/año]:</b>					<b>83594.5</b>

Tabla 4.5.b Ahorro anual en costo por consumo de energía en punta<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados anteriormente.



Gráfica 4.5.b Ahorro anual en costo por consumo de energía en punta<sup>1</sup>.

- Ahorro anual en costo por consumo total de energía:

Ej. Para el motor 1 (compresor):

$$\text{Ahorro costo por consumo de energía total} = (1482087.80) - (1427394.11) \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Ahorro costo por consumo de energía total} = 54,693.7 \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Ahorro total costo por consumo de energía total} = (54693.7 \times 2) + (101557.1) + (26106.7 \times 3) + (42481.2) \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

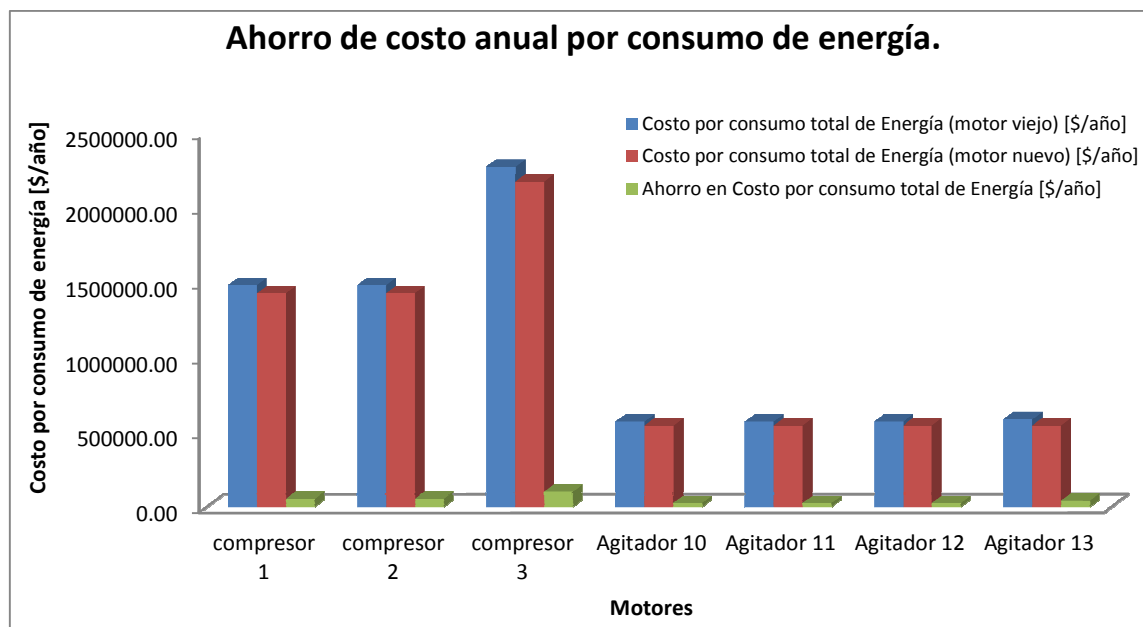
$$\text{Ahorro total costo por consumo de energía total} = 331,745.8 \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right]$$

<sup>1</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 4.5.b.

Posteriormente, en una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para los 6 pares de motores faltantes. Los resultados se muestran a continuación:

AHORROS EN COSTO POR CONSUMO DE ENERGÍA					
N°	Proceso	Motor	Costo por consumo total de Energía (motor viejo) [\$/año]	Costo por consumo total de Energía (motor nuevo) [\$/año]	Ahorro en Costo por consumo total de Energía [\$/año]
1	compresor	us motors / weg	1482087.80	1427394.11	54693.7
2	compresor	us motors / weg	1482087.80	1427394.11	54693.7
3	compresor	siemens / weg	2274405.82	2172848.76	101557.1
10	Agitador	us motors / weg	569938.08	543831.37	26106.7
11	Agitador		569938.08	543831.37	26106.7
12	Agitador	us motors / weg	569938.08	543831.37	26106.7
13	Agitador	weg / weg	586312.57	543831.37	42481.2
<b>Ahorro anual en costo por consumo de Energía Eléctrica [\$/año]:</b>					<b>331745.8</b>

Tabla 4.5.c Ahorro anual en costo por consumo total de energía<sup>1</sup>.



Gráfica 4.5.c Ahorro anual en costo por consumo total de energía<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados anteriormente.

<sup>2</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 4.5.c.

Los ahorros en consumo de energía eléctrica y de los costos por dicho consumo obtenidos, se muestran en la siguiente tabla:

AHORROS EN EL REEMPLAZO DE MOTORES								
N°	Proceso	Motor	Consumo Total de Energía (motor viejo) [kWh/año]	Consumo Total de Energía (motor nuevo) [kWh/año]	Ahorro en Consumo de Energía [kWh/año]	Costo por consumo total de Energía (motor viejo) [\$/año]	Costo por consumo total de Energía (motor nuevo) [\$/año]	Ahorro en Costo por consumo total de Energía [\$/año]
1	compresor	us motors / weg	1477384.1	1422864.0	54520.1	1482087.8	1427394.1	54693.7
2	compresor	us motors / weg	1477384.1	1422864.0	54520.1	1482087.8	1427394.1	54693.7
3	compresor	siemens / weg	2267187.5	2165952.7	101234.7	2274405.8	2172848.8	101557.1
10	Agitador	us motors / weg	568129.2	542105.4	26023.8	569938.1	543831.4	26106.7
11	Agitador		568129.2	542105.4	26023.8	569938.1	543831.4	26106.7
12	Agitador	us motors / weg	568129.2	542105.4	26023.8	569938.1	543831.4	26106.7
13	Agitador	weg / weg	584451.8	542105.4	42346.4	586312.6	543831.4	42481.2
<b>Ahorro en Consumo de Energía [kWh/año]:</b>					<b>330692.9</b>	<b>Ahorro Costo por consumo de Energía [\$/año]:</b>		<b>331745.8</b>

**Tabla 4.5.d Ahorros en el reemplazo de motores<sup>1</sup>.**

De acuerdo a los resultados anteriores, el ahorro en los costos de operación de los motores sería de 331,745.8 [\$/año].

Por otra parte, los motores 1, 2, 3 y 13 representan el mayor ahorro; por lo que se confirma que éstos motores son viables a sustituir (desde el punto de vista energético).

En cuanto a los motores 10, 11 y 12, aunque también tienen ahorros energéticos; éstos no son tan significativos. Es por eso que se debe conocer la viabilidad económica de la implementación de esta medida de reemplazo. Por lo que es necesario realizar un análisis financiero para cada uno de los motores del caso de estudio.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados anteriormente.

---

#### 4.6 Análisis financiero e indicadores de toma de decisiones.

El análisis financiero es la parte final de toda la secuencia para la factibilidad de un proyecto. Esto sirve para ver si la inversión propuesta será rentable. Para llevarlo a cabo, se debe tener en cuenta que los costos están afectados por el concepto de valor de dinero en el tiempo. Tales como: tasa de inflación, flujo efectivo, tasa de descuento TREMA, valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR). (Blank & Tarquin, 1999).

- Tasa de inflación: Es el incremento generalizado de los precios de bienes y servicios con relación a una moneda, durante un periodo de tiempo determinado. Este valor se expresa en porcentaje.
- Flujo efectivo ó flujo de caja (FNE): Son los flujos de entradas y salidas de efectivo, en un periodo dado. Constituye un indicador importante de la liquidez dentro de una empresa.

Puede ser utilizado para analizar la viabilidad de proyectos de inversión. Es la base de cálculo del valor presente neto y de la tasa interna de retorno.

- Tasa de descuento TREMA: Representa un balance entre el riesgo y la posible ganancia de la utilización de una suma de dinero en una situación y tiempo determinado. Es la tasa de rendimiento mínimo aceptable. Su valor siempre estará basado en el riesgo que corra la empresa en forma cotidiana en sus actividades productivas y mercantiles. La fórmula para calcularla es:

$$TREMA = Tasa\ pasiva + Tasa\ por\ riesgo..... (4.6)$$

La tasa pasiva es el porcentaje que paga una institución bancaria a quien deposita dinero mediante cualquiera de los instrumentos que para tal efecto existen. La tasa por riesgo es la tasa evaluada por el riesgo del proyecto; es decir, indica el crecimiento real del patrimonio de la empresa.

- 
- Valor presente neto (VPN): Es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual (es decir, actualizar mediante una tasa) todos los flujos de caja futuros del proyecto, de tal modo que el valor obtenido es el valor actual neto del proyecto. Se calcula de la siguiente manera:

$$VPN = -P + \sum_{i=1}^n \frac{FNE_i}{(1+tasa\ de\ interés\ TREMA)^i} \dots\dots (4.6.a)$$

*Dónde:*

*P = Inversión inicial*

*FNE = Flujo efectivo*

*i = número de periodos*

- Tasa interna de retorno (TIR): Es la tasa de descuento que hace que el VPN sea igual a cero; ó es la tasa que iguala la suma de los flujos descontados a la inversión inicial, el resultado es cero. Se le llama tasa interna de rendimiento porque supone que el dinero que se gana año con año se reinvierte en su totalidad. Esto es:

$$VPN = \sum_{i=1}^n \frac{FNE_i}{(1+tasa\ de\ interés\ TIR)^i} - P = 0 \dots\dots (4.6.b)$$

*Dónde:*

*VPN = Valor presente neto*

*P = Inversión inicial*

*FNE = Flujo efectivo*

*i = número de periodos*



Fórmulas adicionales a utilizar (FIDE, 2009):

$$\text{Precio de la energía} = \frac{\sum \text{costo kWh}_i}{3} \dots\dots\dots (4.6.c)$$

$$\text{Costo diferencial} = \text{Precio de compra del motor} + \text{Costo de instalación} \dots\dots\dots (4.6.d)$$

$$\text{Ahorros de energía} = \frac{\text{consumo anual de energía}_{\text{motor viejo}} - \text{consumo anual de energía}_{\text{motor nuevo}}}{\dots} \dots (4.6.e)$$

$$\text{Demanda} = \frac{\text{Ahorros de energía}}{\text{Horas de operación al año}} \dots\dots\dots (4.6.f)$$

$$\text{Ahorro en costos de energía} = \text{ahorros de energía} \times \text{Precio de la energía} \dots (4.6.g)$$

$$\text{Ahorro Total} = \text{Ahorros en costos de energía} + \text{otros ingresos} \dots\dots\dots (4.6.h)$$

$$\text{Relación beneficio - costo} = \frac{VPN_{\text{Ahorros}}}{VPN_{\text{Inversión inicial}}} \dots\dots\dots (4.6.i)$$

$$\text{Periodo de recuperación} = \frac{LOG\left(\frac{\text{Costos ahorrados}}{\text{Costos ahorrados} - VPN_{\text{Inversión inicial}} \times TREMA}\right)}{LOG(1+TREMA)} \dots\dots\dots (4.6.j)$$

Ej. Para el motor 1:

$$\text{Precio de la energía} = \left[ \frac{0.761 + 0.911 + 2.107 \left[ \frac{\$}{kWh} \right]}{3} \right] \left[ \frac{USD}{\$} \right]$$

$$\text{Precio de la energía} = 0.0899 \left[ \frac{USD}{kWh} \right]$$

$$\text{Costo diferencial} = 13,428 [USD] + 600 [USD]$$

$$\text{Costo diferencial} = 14,028.36$$

---

$$\text{Ahorros de energía} = 1,477,963.92 - 1,422,905.60 \left[ \frac{kWh}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Ahorros de energía} = 55,058.32 \left[ \frac{kWh}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Demanda} = \frac{55,058.32 \left[ \frac{kWh}{\text{año}} \right]}{6833 \left[ \frac{hrs}{\text{año}} \right]}$$

$$\text{Demanda} = 8.06 [kW]$$

$$\text{Ahorro en costos de energía} = 55,058.32 \left[ \frac{kWh}{\text{año}} \right] \times 0.0899 \left[ \frac{USD}{kWh} \right]$$

$$\text{Ahorro en costos de energía} = 4,900.19 \left[ \frac{USD}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Ahorro Total} = 4,900.19 \left[ \frac{USD}{\text{año}} \right]$$

Ahora, utilizando las fórmulas anteriores y teniendo en cuenta que la tasa de inflación anual a considerar es del 3.9%, la tasa de descuento TREMA = 20%, 18%, 16% y 14%. Además de que el periodo es de 20 años. El análisis de sensibilidad está dado de la siguiente manera:

---

Ej. Para el motor (compresor)1:

$$VPN_{Ahorro1} = \left[ \frac{\left(4900.19 \left[ \frac{USD}{año} \right] \right)}{(1 + 0.20)^1} \right]$$

$$VPN_{Ahorro1} = \left[ \frac{4900.19 \left[ \frac{USD}{año} \right]}{(1.20)^1} \right]$$

$$VPN_{Ahorro1} = \mathbf{4083.49[USD]}$$

...

Donde:

$$\dots = VPN_{ahorro\ 2\ al\ 19}$$

$$VPN_{Ahorro20} = \left[ \frac{\left(4900.19 \left[ \frac{USD}{año} \right] \right)}{(1 + 0.20)^{20}} \right]$$

$$VPN_{Ahorro20} = \left[ \frac{4900.19 \left[ \frac{USD}{año} \right]}{(1.20)^{20}} \right]$$

$$VPN_{Ahorros} = \mathbf{127.82[USD]}$$

Entonces:

$$VPN_{Ahorros} = 4083.49 + \dots + 127.82 [USD]$$

$VPN_{Ahorros} = \mathbf{23,862[USD]}$  Para TREMA del 20% y un periodo de 20 años.

---

En una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para TREMA= 18%, 16% y 12%. Los resultados se muestran en la tabla 4.6.c (Análisis de sensibilidad de compresor 1).

El  $VPN_{Inversión\ inicial}$  , en este caso es el costo diferencial; es decir, 14,028.36 [USD]. Y es el mismo para los diferentes valores de TREMA.

El VPN se calculó de la siguiente manera:

$$VPN = 23,862 - 14028.36[USD]$$

**$VPN = 9834[USD]$**  Para TREMA del 20% y un periodo de 20 años.

En una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para TREMA= 18%, 16% y 12%. Los resultados se muestran en la tabla 4.6.c (Análisis de sensibilidad de compresor 1).

La relación beneficio costo se calculó:

$$Relación\ beneficio - costo = \frac{23,862[USD]}{14,028.36 [USD]}$$

**$Relación\ beneficio - costo = 1.70$**  Para TREMA del 20% y un periodo de 20 años.

$$Periodo\ de\ recuperación = \frac{LOG\left(\frac{4900.19}{4900.19 - 14028.36 \times 0.20}\right)}{LOG(1 + 0.20)}$$

**$Periodo\ de\ recuperación = 4.66 [años]$**  Para un TREMA de 20%.

---

En una hoja de cálculo se realizó el mismo procedimiento para TREMA= 18%, 16% y 12%. Los resultados se muestran en la tabla 4.6.c (Análisis de sensibilidad de compresor 1). Así como también para los 6 motores faltantes.

Por razones de espacio y debido a que los motores 2, 11 y 12 son de características similares; sólo se muestra el análisis financiero de los motores 1, 3, 10 y 13.

## COMPRESOR 1 Potencia: 400 HP

Datos motor viejo			Datos motor Nuevo		
	3F,1N			3F,1N	
Potencia del motor	400	[HP]	Potencia del motor	400	[HP]
Potencia del motor	298.4	[KW]	Potencia del motor	298.4	[KW]
Voltaje suministrado al motor	460	[V]	Voltaje suministrado al motor	460	[V]
Corriente demandada por el motor	470.21	[A]	Corriente demandada por el motor	452.70	[A]
Factor de carga del motor para la evaluación	100%		Factor de carga del motor para la evaluación	100%	
Factor de potencia $\cos \phi$	0.885		Factor de potencia $\cos \phi$	0.86	
Eficiencia motor eléctrico.	0.9		Eficiencia motor eléctrico.	0.962	
Horas operación al año	6833	[h/año]	Horas operación al año	6833	[h/año]
Consumo de energía anual	1,477,963.92	[KWh/año]	Consumo de energía anual	1,422,905.60	[KWh/año]
			Precio de compra	\$ 13,428	[US\$]
			Costo de instalación	\$ 600	[US\$]

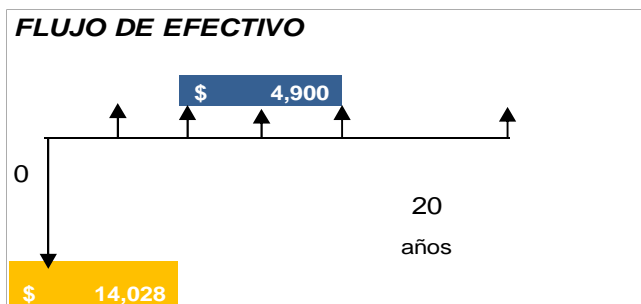
**Tabla 4.6 Datos compresor 1 (instalado y nuevo)<sup>1</sup>**

Resultados - Ahorros	
Costo diferencial	14028.36 [US\$]
Ahorros de energía	55058.31842 [KWh/año]
Demanda	8.05770795 [KW]
Ahorros de energía	4900.190339 [US\$/año]
Posibles ingresos por bonos de carbón	0 [US\$/año]
Ahorro total	4900.190339 [US\$/año]

**Tabla 4.6.a Resultado de ahorros<sup>1</sup>**

Supuestos de evaluación	
Tipo de cambio	\$ 14.00 [\$/US\$]
Tasa de inflación anual	3.90%
Tasa de descuento TREMA	16.00%
Tasa de financiamiento	0.00%
Expectativa de vida	20 [años]

**Tabla 4.6.b Supuestos de evaluación<sup>1</sup>**



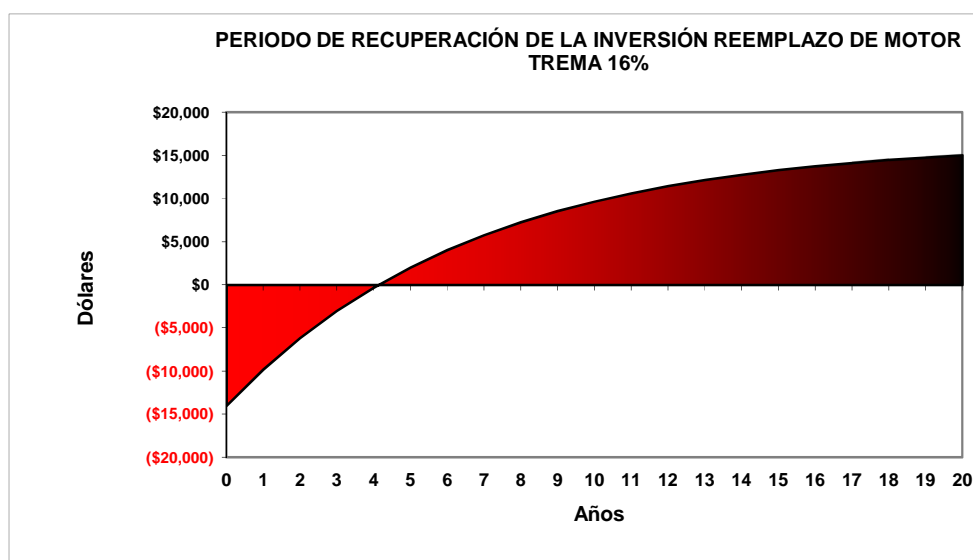
**Gráfica 4.6 Flujo efectivo compresor 1<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Elaboración de tablas propia y gráfica (Microsoft Excel 2010), con valores calculados anteriormente.

ESQUEMA Reemplazo de motor		ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD				
MONEDA CORRIENTE 2012 Dólares		20	20	20	20	PERIODO
ANUAL		20.00%	18.00%	16.00%	12.00%	Trema
VPN ahorros		\$23,862	\$26,229	\$29,052	\$36,602	
VPN Inversión inicial		\$ 14,028	\$ 14,028	\$ 14,028	\$ 14,028	\$
Costos Ahorrados		\$ 4,900	\$ 4,900	\$ 4,900	\$ 4,900	\$
	Valor presente neto	\$9,834	\$12,201	\$15,024	\$22,573	\$
	Mensualidad equivalente	\$2,019	\$2,279	\$2,534	\$3,022	\$/año
	Relación Beneficio - Costo	1.70	1.87	2.07	2.61	
	TASA INT. DE RENDIM.	34.84%	34.84%	34.84%	34.84%	TIR
	Período de recuperación simple	4.66	4.38	4.13	3.71	años
	A anualidad de la inversión	\$2,881	\$2,621	\$2,366	\$1,878	\$

**Tabla 4.6.c Análisis de sensibilidad de compresor 1<sup>1</sup>.**

Del análisis de sensibilidad para el valor de la TREMA se concluye que el periodo de recuperación de la inversión para el caso de este motor es de 4.13 años, con una TREMA del 16%. Lo cual confirma que el reemplazo del motor es viable y la inversión atractiva. Por otra parte, para una TREMA mayor al 16% el tiempo de recuperación de la inversión se extiende, pero sigue siendo una inversión atractiva para la empresa.



**Gráfica 4.6.a Periodo de recuperación de la inversión por reemplazo del motor 1<sup>2</sup>.**

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados anteriormente.

<sup>2</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 4.6.c.

**COMPRESOR 3**  
**Potencia: 616.62 HP**

Datos motor viejo				Datos motor Nuevo			
	3F,1N			3F,1N			
Potencia del motor	616.62	[HP]		Potencia del motor	616.62	[HP]	
Potencia del motor	460.00	[KW]		Potencia del motor	459.99852	[KW]	
Voltaje suministrado al motor	460	[V]		Voltaje suministrado al motor	460	[V]	
Corriente demandada por el motor	721.32	[A]		Corriente demandada por el motor	689.12	[A]	
Factor de carga del motor para la evaluación	100%			Factor de carga del motor para la evaluación	100%		
Factor de potencia $\cos \phi$	0.87			Factor de potencia $\cos \phi$	0.87		
Eficiencia motor eléctrico.	0.92			Eficiencia motor eléctrico.	0.963		
Horas operación al año	6833	[h/año]		Horas operación al año	6833	[h/año]	
Consumo de energía anual	2,267,253.85	[KWh/año]		Consumo de energía anual	2,166,016.14	[KWh/año]	
				Precio de compra	\$ 24,754	[US\$]	
				Costo de instalación	\$ 720	[US\$]	

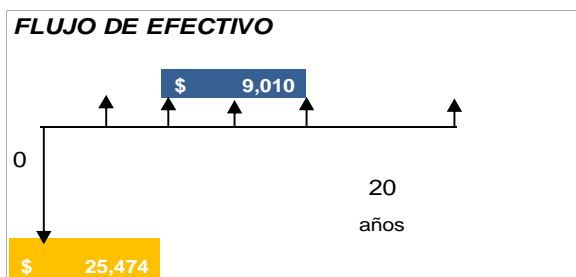
**Tabla 4.6.d Datos compresor 3 (instalado y nuevo)<sup>1</sup>.**

Resultados - Ahorros	
Costo diferencial	25474 [US\$]
Ahorros de energía	101,237.71 [KWh/año]
Demanda	14.81599748 [KW]
Ahorros de energía	9,010.16 [US\$/año]
Posibles ingresos por bonos de carbón	- [US\$/año]
Ahorro total	9,010.16 [US\$/año]

**Tabla 4.6.e Resultado de ahorros<sup>1</sup>**

Supuestos de evaluación			
Tipo de cambio	\$	14.00	[\$/US\$]
Tasa de inflación anual		3.90%	
Tasa de descuento TREMA		16.00%	
Tasa de financiamiento		0.00%	
Expectativa de vida		20	[años]

**Tabla 4.6.f Supuestos de evaluación<sup>1</sup>**



**Gráfica 4.6.b Flujo efectivo compresor 3<sup>1</sup>**

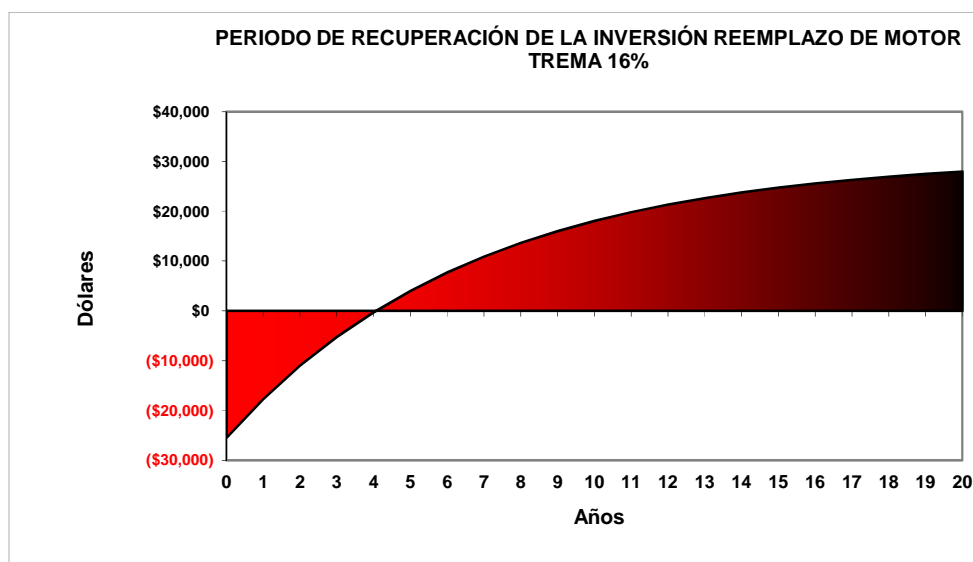
<sup>1</sup> Elaboración de tablas propia y gráfica (Microsoft Excel 2010), con valores calculados anteriormente.



ESQUEMA Reemplazo de motor		ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD				
MONEDA CORRIENTE 2012 Dólares		20	20	20	20	PERIODO
ANUAL		20.00%	18.00%	16.00%	12.00%	Trema
VPN ahorros		\$43,876	\$48,229	\$53,420	\$67,301	
VPN Inversión inicial		\$ 25,474	\$ 25,474	\$ 25,474	\$ 25,474	\$
Costos Ahorrados		\$ 9,010	\$ 9,010	\$ 9,010	\$ 9,010	\$
	Valor presente neto	\$18,402	\$22,755	\$27,946	\$41,827	\$
	Mensualidad equivalente	\$3,779	\$4,251	\$4,714	\$5,600	\$/año
	Relación Beneficio - Costo	1.72	1.89	2.10	2.64	
	TASA INT. DE RENDIM.	35.29%	35.29%	35.29%	35.29%	TIR
	Período de recuperación simple	4.57	4.30	4.06	3.66	años
	Anualidad de la inversión	\$5,231	\$4,759	\$4,297	\$3,410	\$

Tabla 4.6.g Análisis de sensibilidad de compresor 3<sup>1</sup>.

Del análisis de sensibilidad se concluye que el periodo de recuperación de la inversión para el caso de este motor es de 4.06 años, con una TREMA del 16%. Lo cual confirma que el reemplazo del motor es viable y la inversión atractiva. Por otra parte, para una TREMA mayor al 16% el tiempo de recuperación de la inversión se extiende, pero sigue siendo una inversión atractiva para la empresa.



Gráfica 4.6.c Periodo de recuperación de la inversión por reemplazo del motor 3<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados anteriormente.

<sup>2</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 4.6.g.

**AGITADOR 10**  
**Potencia: 150 HP**

Datos motor viejo			Datos motor Nuevo		
	3F,1N		3F,1N		
Potencia del motor	150	[HP]	Potencia del motor	150	[HP]
Potencia del motor	111.9	[KW]	Potencia del motor	111.9	[KW]
Voltaje suministrado al motor	460	[V]	Voltaje suministrado al motor	460	[V]
Corriente demandada por el motor	180.76	[A]	Corriente demandada por el motor	172.48	[A]
Factor de carga del motor para la evaluación	100%		Factor de carga del motor para la evaluación	100%	
Factor de potencia $\cos \phi$	0.84		Factor de potencia $\cos \phi$	0.85	
Eficiencia motor eléctrico.	0.925		Eficiencia motor eléctrico.	0.958	
Horas operación al año	6833	[h/año]	Horas operación al año	6833	[h/año]
Consumo de energía anual	568,145.88	[KWh/año]	Consumo de energía anual	542,121.27	[KWh/año]
			Precio de compra \$	4,966	[US\$]
			Costo de instalación \$	240	[US\$]

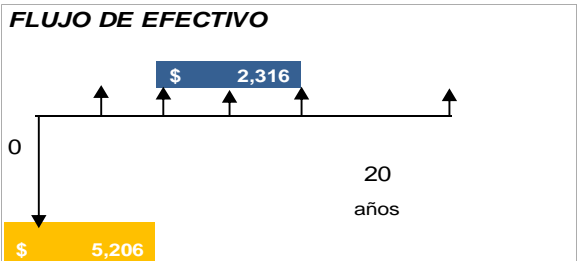
**Tabla 4.6.h Datos agitador 10 (instalado y nuevo)<sup>1</sup>.**

Resultados - Ahorros	
Costo diferencial	5206.21 [US\$]
Ahorros de energía	26,024.61 [KWh/año]
Demanda	3.808665547 [KW]
Ahorros de energía	2,316.19 [US\$/año]
Posibles ingresos por bonos de carbón	- [US\$/año]
Ahorro total	2,316.19 [US\$/año]

**Tabla 4.6.i Resultado de ahorros<sup>1</sup>**

Supuestos de evaluación	
Tipo de cambio \$	14.00 [\$/US\$]
Tasa de inflación anual	3.90%
Tasa de descuento TREMA	16.00%
Tasa de financiamiento	0.00%
Expectativa de vida	20 [años]

**Tabla 4.6.j Supuestos de evaluación<sup>1</sup>**



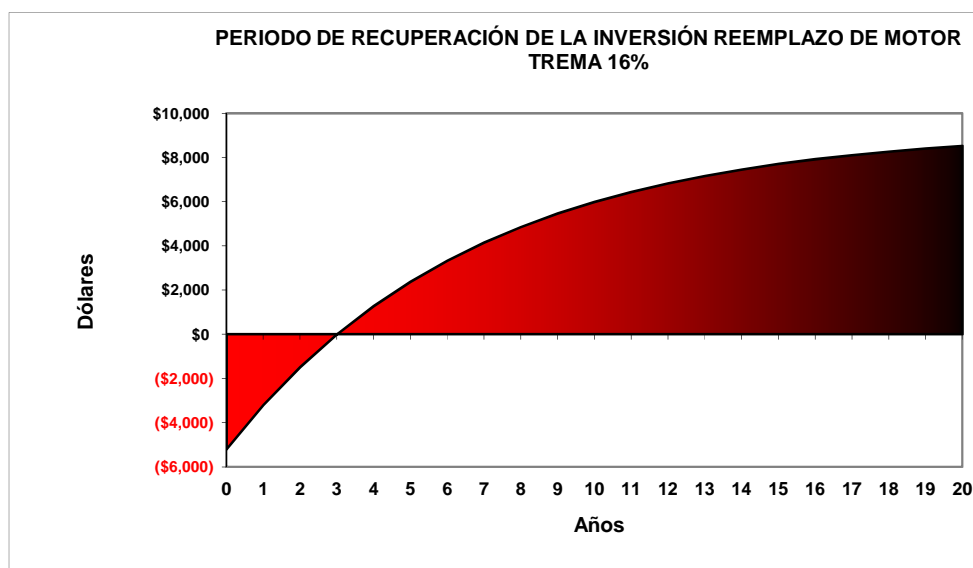
**Gráfica 4.6.d Flujo efectivo agitador 10<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Elaboración de tablas propia y gráfica (Microsoft Excel 2010), con valores calculados anteriormente.

ESQUEMA Reemplazo de motor		ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD				
MONEDA CORRIENTE 2012 Dólares		20	20	20	20	PERIODO
ANUAL		20.00%	18.00%	16.00%	12.00%	Trema
VPN ahorros		\$11,279	\$12,398	\$13,732	\$17,301	
VPN Inversión inicial		\$ 5,206	\$ 5,206	\$ 5,206	\$ 5,206	\$
Costos Ahorrados		\$ 2,316	\$ 2,316	\$ 2,316	\$ 2,316	\$
	Valor presente neto	\$6,073	\$7,192	\$8,526	\$12,094	\$
	Mensualidad equivalente	\$1,247	\$1,344	\$1,438	\$1,619	\$/año
	Relación Beneficio - Costo	2.17	2.38	2.64	3.32	
	TASA INT. DE RENDIM.	44.46%	44.46%	44.46%	44.46%	TIR
	Período de recuperación simple	3.27	3.13	3.00	2.77	años
	Añualidad de la inversión	\$1,069	\$973	\$878	\$697	\$

**Tabla 4.6.k Análisis de sensibilidad de agitador 10<sup>1</sup>.**

Del análisis de sensibilidad se concluye que el periodo de recuperación de la inversión para el caso de este motor es de 3 años, con una TREMA del 16%. Lo cual confirma que el reemplazo del motor es viable y la inversión atractiva. Por otra parte, para una TREMA mayor al 16% el tiempo de recuperación de la inversión se extiende, pero sigue siendo una inversión atractiva para la empresa.



**Gráfica 4.6.e Periodo de recuperación de la inversión por reemplazo del motor 10<sup>2</sup>.**

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados anteriormente.

<sup>2</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 4.6.k.

## AGITADOR 13 Potencia: 150 HP

Datos motor viejo				Datos motor Nuevo			
	3F,1N			3F,1N			
Potencia del motor	150	[HP]		Potencia del motor	150	[HP]	
Potencia del motor	111.9	[KW]		Potencia del motor	111.9	[KW]	
Voltaje suministrado al motor	460	[V]		Voltaje suministrado al motor	460	[V]	
Corriente demandada por el motor	185.95	[A]		Corriente demandada por el motor	172.48	[A]	
Factor de carga del motor para la evaluación	100%			Factor de carga del motor para la evaluación	100%		
Factor de potencia $\cos \phi$	0.83			Factor de potencia $\cos \phi$	0.85		
Eficiencia motor eléctrico.	0.91			Eficiencia motor eléctrico.	0.958		
Horas operación al año	6833	[h/año]		Horas operación al año	6833	[h/año]	
Consumo de energía anual	584,468.88	[KWh/año]		Consumo de energía anual	542,121.27	[KWh/año]	
				Precio de compra	\$ 4,966	[US\$]	
				Costo de instalación	\$ 240	[US\$]	

Tabla 4.6.I Datos agitador 13 (instalado y nuevo)<sup>1</sup>.

Resultados - Ahorros	
Costo diferencial	5206.21 [US\$]
Ahorros de energía	42,347.62 [KWh/año]
Demanda	6.197514497 [KW]
Ahorros de energía	3,768.94 [US\$/año]
Posibles ingresos por bonos de carbón	- [US\$/año]
Ahorro total	3,768.94 [US\$/año]

Tabla 4.6.m Resultado de ahorros<sup>1</sup>

Supuestos de evaluación		
Tipo de cambio	\$	14.00 [\$/US\$]
Tasa de inflación anual		3.90%
Tasa de descuento TREMA		16.00%
Tasa de financiamiento		0.00%
Expectativa de vida		20 [años]

Tabla 4.6.n Supuestos de evaluación<sup>1</sup>



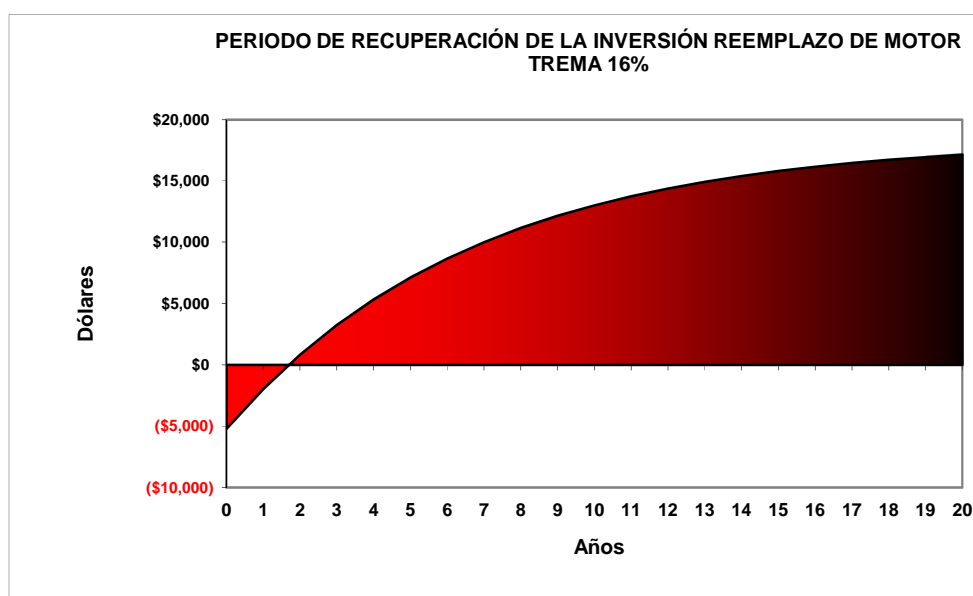
Gráfica 4.6.f Flujo efectivo agitador 13<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Elaboración de tablas propia y gráfica (Microsoft Excel 2010), con valores calculados anteriormente.

ESQUEMA Reemplazo de motor		ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD				
MONEDA CORRIENTE 2012 Dólares		20	20	20	20	PERIODO
ANUAL		20.00%	18.00%	16.00%	12.00%	Trema
VPN ahorros		\$18,353	\$20,174	\$22,345	\$28,152	
VPN Inversión inicial		\$ 5,206	\$ 5,206	\$ 5,206	\$ 5,206	\$
Costos Ahorrados		\$ 3,769	\$ 3,769	\$ 3,769	\$ 3,769	\$
Valor presente neto		\$13,147	\$14,968	\$17,139	\$22,946	\$
Mensualidad equivalente		\$2,700	\$2,796	\$2,891	\$3,072	\$/año
Relación Beneficio - Costo		3.53	3.88	4.29	5.41	
TASA INT. DE RENDIM.		72.39%	72.39%	72.39%	72.39%	TIR
Período de recuperación simple		1.77	1.73	1.68	1.60	años
Anualidad de la inversión		\$1,069	\$973	\$878	\$697	\$

Tabla 4.6.o Análisis de sensibilidad de agitador 13<sup>1</sup>.

Del análisis de sensibilidad se concluye que el periodo de recuperación de la inversión para el caso de este motor es de 1.68 años, con una TREMA del 16%. Lo cual confirma que el reemplazo del motor es viable y la inversión atractiva. Por otra parte, para una TREMA mayor al 16% el tiempo de recuperación de la inversión se extiende, pero sigue siendo una inversión atractiva para la empresa.



Gráfica 4.6.g Periodo de recuperación de la inversión por reemplazo del motor 13<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados anteriormente.

<sup>2</sup> Elaboración de gráfica en Microsoft Excel 2010 con valores obtenidos de la tabla 4.6.o.

---

De donde se desprende que de los 7 motores analizados, el reemplazo de todos ellos es económicamente viable; pues además de que se obtienen ahorros en el consumo eléctrico, el tiempo de recuperación de la inversión no supera los 5 años, lo cual puede ser atractivo para la empresa.

#### **4.7 Ingresos adicionales.**

Otro tipo de ingresos que podría obtenerse al realizar el reemplazo de motores, además del ahorro en costos de operación junto con el análisis financiero; son los ahorros en costos de mantenimiento y los incentivos que otorga la MDL (Mecanismo de Desarrollo Limpio), por emisiones anuales equivalentes de CO<sub>2</sub> evitadas.

##### **4.7.1 Ahorro en costos de mantenimiento.**

El costo de mantenimiento tiene por objetivo lograr con los mínimos costos el mayor tiempo de servicio de las instalaciones; así como también, de las máquinas productivas.

#### **COSTOS DE MANTENIMIENTO DE MOTORES NUEVOS**

En las máquinas eléctricas rotatorias nuevas, como lo son los motores eléctricos del tipo rotor jaula de ardilla, su mantenimiento es simple debido a que el único elemento de desgaste que sufre deterioro con el tiempo en condiciones idóneas de operación y sin que se presenten fallas externas son los rodamientos.

Considerando que un rodamiento tiene un tiempo de vida de 25,000 horas en uso de operación continuo; y que, como se mencionó anteriormente, al año la planta trabaja 6833 horas; se tiene lo siguiente:

---

---

$$\text{Años de vida del rodamiento} = \left( \frac{\text{Horas de vida del rodamiento}}{\text{Horas de operación al año del motor}} \right) \dots (4.7.1)$$

Entonces:

$$\text{Años de vida del rodamiento} = \left( \frac{25000 \text{ [hrs]}}{6833 \text{ } \left[ \frac{\text{hrs}}{\text{año}} \right]} \right)$$

$$\text{Años de vida del rodamiento} = 3.7 \text{ [años]}$$

Para un mantenimiento a 20 años. Se tiene:

$$N^{\circ} \text{ de veces de cambio de rodamiento} = \left( \frac{\text{tiempo contemplado de mtto.}}{\text{Años de vida del rodamiento}} \right) \dots (4.7.1. a)$$

Entonces:

$$N^{\circ} \text{ de veces de cambio de rodamiento} = \left( \frac{20 \text{ [años]}}{3.7 \text{ [años]}} \right)$$

$$N^{\circ} \text{ de veces de cambio de rodamiento} = 5.5 \cong 6$$

Lo anterior quiere decir que al motor nuevo el único mantenimiento que se le hará, serán 6 cambios de rodamientos en esos 20 años. Y eso traducido en costos se da de la siguiente manera:

$$\text{Costo de mantenimiento}_{a \text{ 20 años}} = (\text{Costo de rodamiento}) \times \left( \begin{array}{l} N^{\circ} \text{ de veces} \\ \text{de cambio de} \\ \text{rodamiento} \end{array} \right) \dots (4.7. b)$$

Así pues, estos costos están afectados por el concepto de valor del dinero en el tiempo. Tales como: la inflación, la tasa de descuento TREMA y el valor presente:

$$\text{Costo de } i_{\text{mantenimiento}} = (i_{\text{mantenimiento}} - 1) \times (1 + \text{inflación} [\%]) \dots (4.7. c)$$

$$VPN = \sum_{j=1}^6 \frac{\text{Costo de } j_{\text{mantenimiento}}}{(1 + \text{tasa de interés})^j} \dots (4.7. d)$$

Dónde:

$i = 1er, 2do, 3er, 4to, 5to, 6to.$

#### COSTOS DE MANTENIMIENTO DE MOTORES INSTALADOS

Como se mencionó anteriormente, en motores nuevos el mantenimiento es más simple comparado con motores viejos; ya que, éstos últimos para un mejor funcionamiento necesitan procedimientos tales como: medición de vibraciones, rectificado de tasas, cambio de flecha; y además, el cambio de rodamientos. Lo cual se refleja en el aumento de compra de refacciones y mano de obra, así como en los paros programados. Por lo que efectivamente, existe un ahorro considerable en los costos de mantenimiento. (Torres, 2011).

#### 4.7.2 Emisiones anuales equivalentes de CO<sub>2</sub> evitadas.

Los bonos de carbono son un mecanismo internacional de descontaminación para reducir las emisiones contaminantes al medio ambiente; es uno de los tres mecanismos propuestos en el Protocolo de Kyoto para la reducción de emisiones causantes del calentamiento global o efecto invernadero (GEI o gases de efecto invernadero). (Frers, 2006).



---

Se ofrecen incentivos económicos para que empresas privadas contribuyan a mejorar la calidad ambiental y se consiga regular la contaminación generada por sus procesos productivos.

Un bono de carbono representa el derecho a contaminar emitiendo una tonelada de dióxido de carbono. Las reducciones de emisiones de GEI se miden en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, y se traducen en Certificados de Emisiones Reducidas (CER).

Los proyectos que aplican a la certificación son de mejoramiento de eficiencia energética de procesos y la institución encargada de entregar estos bonos son las Naciones Unidas. El requisito que tienen que cumplir las empresas para poder recibirlos es demostrar nuevas inversiones en tecnologías menos contaminantes; como es el caso de la sustitución de motores de alta eficiencia en la planta química ENMEX.

El mecanismo que se emplea es el siguiente:

- Realizar estudios para determinar el nivel de reducción de gases.
- Realizar una presentación en la ONU (Organización de Naciones Unidas).
- Entrega de los certificados en caso de aprobación.

Es por ello que en la planta química ENMEX, además de que se busca optimizar los procesos para aumentar su eficiencia para el ahorro de energía; también se pretende disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente.

<b>Contenidos energéticos en gas natural</b>	
Contenido de Carbón en gas natural [tC/TJ]	15.3
Factor de CA en CO <sub>2</sub> [CO <sub>2</sub> /C]	3.667
Equivalente energético del MWh a TJ [TJ/MWh]	0.003601

**Tabla 4.7.2 Contenidos energéticos en gas natural<sup>1</sup>.**

---

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con datos obtenidos de (Frers, 2006).

## CÁLCULO DE EMISIONES ANUALES EQUIVALENTES DE CO<sub>2</sub> EVITADAS

De acuerdo con las siguientes fórmulas (FIDE, 2009), se calculó la cantidad de toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> del compresor 1 (instalado y propuesto). Como se muestra a continuación:

$$\text{Consumo anual de energía del proyecto} \frac{\text{MWh eléctricos}}{\text{año}} = \left[ \frac{(\text{Capacidad del motor}) \times (\text{hrs de operación al año}) \times (\text{factor de servicio})}{(1000) \times (\text{eficiencia del motor})} \right] \dots (4.7.2)$$

$$\text{Consumo anual de energía del proyecto} \frac{\text{MWh combustible}}{\text{año}} = \left( \frac{\text{Consumo anual de energía del proyecto} \frac{\text{MWh eléctricos}}{\text{año}}}{\text{eficiencia de turbinas}} \right) \dots (4.7.2.a)$$

$$\text{Emisiones anuales equivalentes del proyecto}_i = \left( \text{Consumo anual de energía del proyecto} \frac{\text{MWh combustible}}{\text{año}} \right) \times \left( \text{Contenido de carbón en gas natural} \right) \times (\text{Factor de CA en CO}_2) \times \left( \text{Equivalente energético del MWh a TJ} \right) \dots (4.7.2.b)$$

Dónde:

*i*: motor instalado, motor propuesto.

$$\text{Emisiones anuales reducidas equivalentes} = \text{Emisiones anuales equivalentes}_{\text{motor instalado}} - \text{Emisiones anuales equivalentes}_{\text{motor propuesto}} \dots (4.7.2.c)$$

---

Compresor 1 (instalado):

$$\begin{aligned} & \text{Consumo anual} \\ & \text{de} \\ & \text{energía del} \\ & \text{proyecto (motor 1 viejo)} \end{aligned} \frac{\text{MWh eléctricos}}{\text{año}} = \left[ \frac{(298.4 \text{ [kW]}) \times (8760 \frac{\text{hrs}}{\text{año}}) \times (0.78)}{(1000) \times (0.9)} \right]$$

$$\begin{aligned} & \text{Consumo anual} \\ & \text{de} \\ & \text{energía del} \\ & \text{proyecto} \\ & \text{(motor 1 viejo)} \end{aligned} \frac{\text{MWh eléctricos}}{\text{año}} = 2,265.5 \left[ \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right]$$

$$\begin{aligned} & \text{Consumo anual} \\ & \text{de} \\ & \text{energía} \\ & \text{del proyecto} \\ & \text{(motor viejo)} \end{aligned} \frac{\text{MWh combustible}}{\text{año}} = \left( \frac{2,265.5 \left[ \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right]}{0.38} \right)$$

$$\begin{aligned} & \text{Consumo anual} \\ & \text{de} \\ & \text{energía} \\ & \text{del proyecto} \\ & \text{(motor viejo)} \end{aligned} \frac{\text{MWh combustible}}{\text{año}} = 5,961.7 \left[ \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right]$$

$$\begin{aligned} & \text{Emisiones} \\ & \text{anuales} \\ & \text{equivalentes} \\ & \text{del proyecto} \end{aligned} \text{compresor 1} \text{ (viejo)} = \left( 5,961.7 \left[ \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right] \right) \times \left( 15.3 \left[ \frac{\text{tC}}{\text{TJ}} \right] \right) \times \left( 3.667 \left[ \frac{\text{CO}_2}{\text{C}} \right] \right) \times \left( 0.003601 \left[ \frac{\text{TJ}}{\text{MWh}} \right] \right)$$

$$\begin{aligned} & \text{Emisiones} \\ & \text{anuales} \\ & \text{equivalentes} \\ & \text{del proyecto} \end{aligned} \text{compresor 1} \text{ (viejo)} = 1,204.36 \left[ \frac{\text{tCO}_2}{\text{año}} \right]$$

---

Compressor 1 (propuesto):

$$\begin{aligned} & \text{Consumo anual} \\ & \text{de} \\ & \text{energía del} \\ & \text{proyecto (motor 1 nuevo)} \end{aligned} \frac{\text{MWh eléctricos}}{\text{año}} = \left[ \frac{(298.4 \text{ [kW]}) \times (8760 \text{ [hrs/año]}) \times (0.78)}{(1000) \times (0.962)} \right]$$

$$\begin{aligned} & \text{Consumo anual} \\ & \text{de} \\ & \text{energía del} \\ & \text{proyecto (motor 1 nuevo)} \end{aligned} \frac{\text{MWh eléctricos}}{\text{año}} = 2,119.4 \left[ \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right]$$

$$\begin{aligned} & \text{Consumo anual} \\ & \text{de} \\ & \text{energía} \\ & \text{del proyecto} \\ & \text{(motor nuevo)} \end{aligned} \frac{\text{MWh combustible}}{\text{año}} = \left( \frac{2,119.4 \left[ \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right]}{0.38} \right)$$

$$\begin{aligned} & \text{Consumo anual} \\ & \text{de} \\ & \text{energía} \\ & \text{del proyecto} \\ & \text{(motor nuevo)} \end{aligned} \frac{\text{MWh combustible}}{\text{año}} = 5,577.5 \left[ \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right]$$

$$\begin{aligned} & \text{Emisiones} \\ & \text{anuales} \\ & \text{equivalentes} \\ & \text{del proyecto compresor 1} \\ & \text{(nuevo)} \end{aligned} = \left( 5,577.5 \left[ \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right] \right) \times \left( 15.3 \left[ \frac{\text{tC}}{\text{TJ}} \right] \right) \times \left( 3.667 \left[ \frac{\text{CO}_2}{\text{C}} \right] \right) \times \left( 0.003601 \left[ \frac{\text{TJ}}{\text{MWh}} \right] \right)$$

$$\begin{aligned} & \text{Emisiones} \\ & \text{anuales} \\ & \text{equivalentes} \\ & \text{del proyecto compresor 1} \\ & \text{(nuevo)} \end{aligned} = 1,126.74 \left[ \frac{\text{tCO}_2}{\text{año}} \right]$$

---

Entonces:

$$\begin{array}{l} \textit{Emisiones} \\ \textit{anuales} \\ \textit{reducidas} \\ \textit{equivalentes} \end{array} = 1,204.36 \left[ \frac{tCO_2}{\text{año}} \right] - 1,126.74 \left[ \frac{tCO_2}{\text{año}} \right]$$

$$\begin{array}{l} \textit{Emisiones} \\ \textit{anuales} \\ \textit{reducidas} \\ \textit{equivalentes} \end{array} = 77.62 \left[ \frac{tCO_2}{\text{año}} \right]$$

En las tablas 4.7.2.a y 4.7.2.b se muestran los resultados obtenidos. Esto es, que la cantidad de toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> al año que pueden evitarse con la implementación de las medidas de optimización (reemplazo del compresor 1); cuyo total es de 77.62 [tCO<sub>2</sub>eq].

MOTOR VIEJO		
POTENCIA TOTAL DEL PROYECTO	298.4	KW eléctricos
HORAS DE OPERACIÓN POR AÑO	8760	h
FACTOR DE SERVICIO	78.00%	
CONTENIDO DE CARBON EN EL GAS NATURAL	15.3	tC/TJ
FACTOR DE C A CO2	3.667	CO2/C
EQUIVALENTE ENERGETICO DEL MWh A TJ	0.003601	TJ/MWh
CONSUMO ANUAL TOTAL DE ENERGIA DEL PROYECTO	2,265.5	MWh electricos/año
CONSUMO ANUAL TOTAL DE ENERGIA DEL PROYECTO	5,961.7	MWhcombustible/año
<b>EMISIONES ANUALES EQUIVALENTES DEL PROYECTO</b>	<b>1,204.36</b>	<b>tCO2/año</b>

**Tabla 4.7.2.a Emisiones anuales de CO<sub>2</sub> equivalentes del compresor 1 (instalado)<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados anteriormente.

MOTOR NUEVO		
POTENCIA TOTAL DEL PROYECTO	298.4	KW eléctricos
HORAS DE OPERACIÓN POR AÑO	8760	h
FACTOR DE SERVICIO	78.00%	
CONTENIDO DE CARBON EN EL GAS NATURAL	15.3	tC/TJ
FACTOR DE C A CO2	3.667	CO2/C
EQUIVALENTE ENERGETICO DEL MWh A TJ	0.003601	TJ/MWh
CONSUMO ANUAL TOTAL DE ENERGIA DEL PROYECTO	2,119.4	MWh electricos/año
CONSUMO ANUAL TOTAL DE ENERGIA DEL PROYECTO	5,577.5	MWhcombustible/año
<b>EMISIONES ANUALES EQUIVALENTES DEL PROYECTO</b>	<b>1,126.74</b>	<b>tCO2/año</b>
<b>EMISIONES ANUALES REDUCIDAS EQUIVALENTES DEL PROYECTO</b>	<b>77.62</b>	<b>tCO2/año</b>

Tabla 4.7.2.b Emisiones anuales de CO<sub>2</sub> equivalentes del compresor 1 (nuevo) y ahorro de emisiones<sup>1</sup>.

Con lo anterior y teniendo en cuenta que el ingreso estimado por emisiones evitadas se paga a 6 [USD] por tCO<sub>2</sub> equivalente, se tiene:

$$\text{Ingreso por emisiones anuales equivalentes}_{\text{compresor 1}} = \frac{\text{Emisiones anuales reducidas equivalentes}_{\text{compresor 1}}}{\text{Emisiones anuales equivalentes}_{\text{compresor 1}}} \times \text{costo tCO}_2 \text{ equivalente .... (4.7.2.d)}$$

$$\text{Ingreso por emisiones anuales equivalentes}_{\text{compresor 1}} = 77.62 \left[ \frac{\text{tCO}_2}{\text{año}} \right] \times 6 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{tCO}_2} \right]$$

$$\text{Ingreso por emisiones anuales equivalentes}_{\text{compresor 1}} = 465.72 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{año}} \right]$$

<sup>1</sup> Elaboración de tabla propia con valores calculados anteriormente.

---


$$\text{Ingreso por emisiones equivalentes} \times \text{periodo de recuperación} = \text{Ingreso por emisiones anuales equivalentes}_{\text{compresor 1}} \times \text{periodo de recuperación} \dots (4.7.2.e)$$

$$\text{Ingreso por emisiones equivalentes} \times \text{periodo de recuperación} = 465.72 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{año}} \right] \times 4.13 [\text{años}]$$

$$\text{Ingreso por emisiones equivalentes} \times \text{periodo de recuperación} = 1,923.42 [\text{USD}]$$

El ingreso económico obtenido por concepto de emisiones anuales equivalentes de CO<sub>2</sub> evitadas es de 465.72 [USD/año]. Lo cual, al cabo de los 4.13 años del periodo de recuperación de la inversión, alcanzaría un monto de 1,923.42 [USD], que para efectos de valor monetario es despreciable. Por esa razón no se incluye en el análisis financiero. Así pues, para efectos de cuidados del medio ambiente, resulta una medida más para no contribuir con el deterioro del mismo.

#### 4.8 Conclusiones.

De acuerdo con los resultados, se observa que existe un ahorro en el consumo de energía eléctrica de 330,692.9 [kWh/año]. Así como también, en los costos de operación, que fueron de 331,745.8 [\$/año]. Siendo los motores de mayor capacidad y eficiencia, los que representan un mayor ahorro, con respecto a los de menor capacidad y menor eficiencia. Por lo que desde el punto de vista energético, los siete motores analizados son viables a sustituir.

---

Por otra parte, al realizar el análisis financiero para ver si la inversión propuesta era económicamente rentable. Se desprende que de los 7 motores analizados, el reemplazo de todos ellos es viable. Pues además de que se confirman los ahorros en el consumo eléctrico, el tiempo de recuperación de la inversión no supera los 4.2 años, lo cual puede ser atractivo teniendo en cuenta que el tiempo de vida de un motor es de 20 años, por lo que se considera que los más de 15 años restantes serán de ganancias.

Además de los beneficios técnicos, energéticos y económicos que se mencionaron anteriormente. Otros factores que se consideraron en este análisis, fueron los beneficios ambientales. Pues con la modernización del equipo se consigue una mayor productividad, un ahorro en el consumo de energía y una reducción en consumo de combustible. Así como también, la disminución de costos de operación y mantenimiento, ingresos por bonificaciones debido a la corrección del factor de potencia; y un ingreso adicional por las emisiones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente evitadas al medio ambiente.

Con lo anterior se concluye que desde el punto de vista energético, técnico, económico y ambiental. La propuesta de sustitución de motores en la planta química ENMEX es viable y atractivo para la empresa.



---

## **CONCLUSIONES.**

Al realizar el análisis de los motores eléctricos que intervienen en los procesos más representativos en la Planta química ENMEX, se observó que en siete de estos equipos se encontraron las mayores áreas de oportunidad para mejorar la eficiencia energética y optimizar sus procesos. Ya que, estos motores representan un mayor consumo energético y un mayor costo en la facturación.

Así pues, de todo el desarrollo anterior se concluye que:

Para la implementación del proyecto de ahorro de energía, se deben de considerar los beneficios, las afectaciones técnicas y los elementos involucrados para una correcta selección de motores. Además de factores tales como: Su aplicación, que en este caso fueron compresores y agitadores; el tipo de pérdidas detectadas, el mejor método para ahorrar energía con un arranque adecuado y la manera de hacer más eficiente el sistema.

Así pues, considerando lo anterior, se optó por el reemplazo de los motores instalados por unos de similares características pero con mayor eficiencia. Pues cuando un motor opera cerca de sus condiciones nominales para cada aplicación, trae consigo beneficios en ahorro de energía y un menor costo de operación. Lo cual se comprobó al realizar los cálculos correspondientes.

Adicional a esto, una buena administración de la energía en el proceso de producción, disminuirá el costo por consumo de energía eléctrica trayendo consigo beneficios no solo económicos sino también en el proceso de producción.

Como se mencionó anteriormente, al realizar el análisis financiero para ver si la inversión propuesta era económicamente rentable. Se desprendió que el reemplazo de los 7 motores analizados es viable.

---

Pues el tiempo de recuperación de la inversión es  $\frac{1}{4}$  parte del tiempo de vida del motor, por lo que se considera que las  $\frac{3}{4}$  partes restantes serán de ganancias.

También se tomaron en cuenta los beneficios ambientales. Ya que, con la implementación de este proyecto habría una reducción en consumo de combustible. Así como también, ingresos adicionales por las emisiones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente evitadas al medio ambiente.

Con lo anterior se concluye que desde el punto de vista energético, técnico, económico y ambiental. La propuesta de sustitución de los 7 motores en la planta química ENMEX es viable y sumamente atractivo para la empresa.

Así pues, se determina que la estrategia propuesta para un uso eficiente de la energía, encaminada a incrementar la productividad y reducir los costos de energía eléctrica en las instalaciones. Trajo consigo un mayor aprovechamiento de los recursos energéticos y la disminución en el impacto ambiental que ocasionaban los procesos productivos. Por lo que se concluye que los objetivos del proyecto realizado se cumplieron satisfactoriamente.

---

## NOMENCLATURA.

CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
CC	Corriente Continua
SI	Sistema Internacional de Unidades
°C	Grado centígrado
cal	Caloría
J	Joule
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt hora
FIDE	Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica
NOM	Norma Oficial Mexicana
H-S	Tarifa horaria para servicio general en alta tensión
CFE	Comisión Federal de Electricidad
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
NEMA	Asociación Nacional de Fabricantes de Equipos Eléctricos
\$	Pesos Mexicanos
M.N.	Moneda Nacional
DP	Demanda máxima medida en el periodo de punta
DI	Demanda máxima medida en el periodo intermedio
DB	Demanda máxima medida en el periodo de base
DPI	Demanda máxima medida en el periodo de punta e intermedio
FRI	Factor de reducción
FRB	Factor de reducción
FP	Factor de potencia
HZ	Hertz
CSA	Asociación Canadiense de Normas
m	Metros
IP	Protección Interna
%	Porcentaje
Fs	Factor de Servicio
hrs	Horas
mm	Milímetros
plg	Pulgadas
TCCV	Enclaustramiento totalmente cerrado
APG	Enclaustramiento a prueba de goteo
APE	Enclaustramiento a prueba de explosiones
Q	Calor
R	Resistencia del conductor

---

t	Tiempo
FEM	Fuerza electromotriz
$I_n$	Corriente nominal
kVA	Kilovolt ampere
USD	Dólares Americanos
V	Tensión
V	Volts
I	Corriente
$\eta$	Eficiencia
P	Capacidad
P	Inversión inicial
HP	Caballo de potencia
A	Amperes
C.E.	Consumo de Energía Eléctrica
C.C.E	Costo de consumo de energía eléctrica
ABB	Asea Brown Boveri
IEM	Industria Eléctrica Mexicana
$t_c$	Tipo de cambio
CO2	Dióxido de Carbono
TREMA	Tasa de rendimiento mínimo aceptable
VPN	Valor presente neto
TIR	Tasa interna de retorno
FNE	Flujo efectivo ó flujo de caja
LOG	Logaritmo
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
GEI	Gases de efecto invernadero
CER	Certificados de Emisiones Reducidas
ONU	Organización de las Naciones Unidas
C	Carbón
tC	Toneladas de carbón
MWh	Megawatt hora
tCO <sub>2</sub> e	Toneladas de dióxido de carbono equivalente

---

## ANEXO A. MOTORES ELÉCTRICOS CONFORME A NORMAS.

- Datos que debe llevar la placa de identificación de los motores.

La NEMA MG1, sección 10.38, expresa que los siguientes datos deben de estar grabados en la placa de identificación de todo motor eléctrico:

- Razón social del fabricante
- Tipo
- Armazón (Frame)
- Potencia (HP)
- Designación de servicio (tiempo)
- Temperatura ambiente
- Velocidad (rpm)
- Frecuencia (Hz)
- Número de fases
- Corriente de carga nominal (A)
- Voltaje nominal (V)
- Letra de código para rotor bloqueado
- Letra clave de diseño
- Factor de servicio
- Clase de aislamiento.

- Clasificación de zonas según IEC y NEC.

<b>Atmosfera explosiva</b>	<b>IEC 60079 – 0 IEC 61241 – 0</b>	<b>NEC</b>	
<b>Gases o vapores</b>	Zona 0 y Zona 1	Clase I	División 1
	Zona 2	Clase I	División 2
<b>Polvos Combustibles</b>	Zona 20 y Zona 21	Clase II	División 1
	Zona 22	Clase II	División 2
<b>Fibras</b>	Zona 10	Clase III	División 1
	Zona 11		División 2

- Clases de aislamiento conforme NBR 7094.

Las clases de aislamiento utilizadas en máquinas eléctricas y los respectivos límites de temperatura:

Clase A (105°C);

Clase E (120°C);

Clase B (130°C);

Clase F (155°C);

Clase H (180°C).

- Valores límites de temperatura de rotor bloqueado, según las normas NEMA e IEC.

CLASSE TÉRMICA	T <sub>MAX</sub>						ΔT <sub>MAX</sub>		
	NEMA MG1.12.53			IEC 60079-7					
B F H	175	200	225	185	210	235	80	105	125

- Clases de temperatura según IEC y NEC.

IEC		NEC		Temperatura de ignición de los gases y/o vapores
Clases de temperatura	Temperatura máxima de la superficie	Clases de temperatura	Temperatura máxima de la superficie	
T1	450	T1	450	> 450
T2	300	T2	300	> 300
		T2A	280	> 280
		T2B	260	> 260
		T2C	230	> 230
		T2D	215	> 215
T3	200	T3	200	> 200
		T3A	180	> 180
		T3B	165	> 165
		T3C	160	> 160
T4	135	T4	135	> 135
		T4A	120	> 120
T5	100	T5	100	> 100
T6	85	T6	85	> 85

- Nivel de potencia sonora de acuerdo a la norma NBR 7565.

Grados de Protección			IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44
Velocidad Nominal (rpm) - "n"			n ≤ 960		960 < n ≤ 1320		1320 < n ≤ 1900		1900 < n ≤ 2360		2360 < n ≤ 3150		3150 < n ≤ 3750	
Franjas de potencias nominales - P			Nivel de potencia sonora dB (A)											
Generadores de corriente	Motores													
Alternada-Continua kva kW	kW	cv												
P ≤ 1,1	P ≤ 1,1	P < 1,5	73	73	76	76	77	78	79	81	81	84	82	86
1,1 < P ≤ 2,2	1,1 < P ≤ 2,2	1,5 < P ≤ 3,0	74	74	78	78	81	82	83	85	85	86	86	91
2,2 < P ≤ 5,5	2,2 < P ≤ 5,5	3,0 < P ≤ 7,5	77	78	81	82	85	86	86	90	89	93	93	95
5,5 < P ≤ 11	5,5 < P ≤ 11	7,5 < P ≤ 15	81	82	85	85	88	90	90	93	93	97	97	96
11 < P ≤ 22	11 < P ≤ 22	15 < P ≤ 30	84	86	88	88	91	94	93	97	96	100	97	100
22 < P ≤ 37	22 < P ≤ 37	30 < P ≤ 50	87	90	91	91	94	98	96	100	99	102	101	102
37 < P ≤ 55	37 < P ≤ 55	50 < P ≤ 75	90	93	95	94	96	100	98	102	101	104	103	104
55 < P ≤ 110	55 < P ≤ 110	75 < P ≤ 150	93	96	97	95	100	103	101	104	103	106	105	106
110 < P ≤ 220	110 < P ≤ 220	150 < P ≤ 300	97	99	100	102	103	106	103	108	105	109	107	110
220 < P ≤ 630	220 < P ≤ 630	300 < P ≤ 860	99	102	103	105	106	108	106	109	107	111	110	113
630 < P ≤ 1100	630 < P ≤ 1100	860 < P ≤ 1500	101	105	106	108	108	111	108	111	109	112	111	116
1100 < P ≤ 2500	1100 < P ≤ 2500	1500 < P ≤ 3400	103	107	108	110	109	113	109	113	110	113	112	118
2500 < P ≤ 6300	2500 < P ≤ 6300	3400 < P ≤ 8600	106	109	110	112	110	115	111	115	112	115	114	120

- Tipos de balanceo.

Balanceo	Tipo de máquina
Normal (N)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Máquinas sin requisitos especiales, tales como: máquinas gráficas, laminadores, trituradores, bombas centrífugas, máquinas textiles, transportadores, etc.</li> </ul>
Reducido (R)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Máquinas de precisión para trabajo sin vibración, tales como: máquinas a ser instaladas sobre fundamento aislado a prueba de vibración, mandriladoras y fresadoras de precisión, tornos, taladros de coordenadas, etc.</li> </ul>
Especial (S)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Máquinas para trabajo de alta precisión, tales como: rectificas, balanceadoras, mandriladora de coordenadas, etc.</li> </ul>



- Límites de vibración según NBR 11390 y IEC 60034-14.

Balanceo	Velocidad	Máximo valor eficaz de la velocidad de vibración para la altura H del eje		
		rpm de la máquina	56 a 132	160 a 225
		mm/s	mm/s	mm/s
N (normal)	600 a 1800	1,8	1,8	2,8
	1800 a 3600	1,8	2,8	4,5
R (reducida)	600 a 1800	0,71	1,12	1,8
	1800 a 3600	1,12	1,8	2,8
S (especial)	600 a 1800	0,45	0,71	1,12
	1800 a 3600	0,71	1,12	1,8

- Conexiones normales de los bobinados de los motores trifásicos.

Ejecución del bobinado	Tensión de Servicio	Arranque con interruptor estrella-triángulo	Arranque con interruptor compensador	Arranque con interruptor série-paralelo	Arranque con Soft-Starter
220/380	220 V	Si	Si	No	Si
	380 V	No	Si	No	Si
220/440/230/460	220 V/230 V	No	Si	Si	Si
	440 V/460 V	No	Si	No	Si
380/660	380 V	Si	Si	No	Si
220/380/440/760	220 V	Si	Si	Si	Si
	380 V	No	Si	Si	Si
	440 V	Si	Si	No	Si

- Formas constructivas normalizadas (montaje horizontal y vertical).

Las partes constructivas de las máquinas con relación a su fijación, la disposición de sus cojinetes y la punta de eje, son estandarizadas por la NBR 5031, IEC 60034-7, DIN – 42950 y NEMA MG 1-4.03. Como se muestra:












Figura	Designación WEG	Símbolo para			Carcaza	Fijación o montaje
		DIN 42950	IEC 60034 parte 7			
			Código I	Código II		
	B3D	B3	IM B3	IM1001	Con pies	Montada sobre subestructura (*)
	B3E					
	B5D	B5	IM B5	IM 3001	Sin pies	Fijada por brida "FF"
	B5E					
	B35D	B3/B5	IM B35	IM 2001	Con Pies	Montada sobre subestructura por los pies, con fijación suplementar por brida "FF"
	B35E					
	B14D	B14	IM B14	IM 3601	Sin pies	Fijada por brida "C"
	B14E					
	B34D	B3/B14	IM B34	IM 2101	Con Pies	Montado sobre subestructura por los pies, con fijación

















Figura	Designación WEG	DIN 42950	Símbolo para IEC 60034 parte 7		Carcaza	Fijación o montaje suplementar por brida "C"
			Código I	Código II		
	B34E					
	B6D	B6	IM B6	IM 1051	Con Pies	Montado en pared, pie a la izquierda, mirando del lado del accionamiento
	B6E					
	B7D	B7	IM B7	IM1061	Con Pies	Montado en pared, pie a la derecha, mirando por el lado del accionamiento
	B7E					
	B8D	B8	IM B8	IM 1071	Con Pies	Fijada en el techo
	B8E					

Figura	Designación WEG	DIN 42950	Símbolo para		Carcaza	Fijación o montaje
			IEC 60034 parte 7			
			Código I	Código II		
	V5	V5	IM V5	IM 1011	Com Pés	Montada en pared o sobre subestructura
	V6	V6	IM V6	IM 1031	Com Pés	Montada en pared o sobre subestructura
	V1	V1	IM V1	IM 3011	Sem Pés	Fijada por brida "FF", para abajo
	V3	V3	IM V3	IM 3031	Sem Pés	Fijada por brida "FF", para arriba
	V15	V1 / V5	IM V15	IM 2011	Com Pés	Montada en pared, con fijación suplementar por brida "FF", para abajo
	V36	V3 / V6	IM V36	IM 2031	Com Pés	Montada en pared, con fijación suplementar por brida "FF", para arriba
	V18	V18	IM V18	IM 3611	Sem Pés	Fijada por la cara superior de brida "C", para abajo
	V19	V19	IM V19	IM 3631	Sem Pés	Fijada por la cara superior de brida "C", para arriba

- Selección del tipo de motor por tipo de carga y par de arranque.

Tipo de carga	Par requerido		Características de la carga	Tipo de motor usado
	Arranque	Máximo		
 <p>Bombas centrífugas; ventiladores; taladros; compresores; rectificadoras; trituradoras.</p>	Entre 1 y 1,5 veces el par nominal	Valores máximos entre 220% y 250% del nominal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condiciones de arranque fáciles como engranajes intermedios, baja inercia o uso de acoplamientos especiales, simplifican el arranque.</li> <li>• Máquinas centrífugas, tales como bombas donde el par aumenta en función del cuadrado de velocidad hasta un máximo, conseguido a velocidad nominal.</li> <li>• A velocidad nominal puede estar sujeta a pequeñas sobrecargas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Par normal.</li> <li>• Corriente de arranque normal.</li> <li>• Categoría N.</li> </ul>
 <p>Bombas alternativas; compresores; cargadores; alimentadores; laminadores de barras.</p>	Entre 2 y 3 veces el par nominal	No mayor que 2 veces el par nominal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Par de arranque alto para romper la elevada inercia, contra presión, fricción de parada, rigidez en los procesos de materiales o condiciones mecánicas similares.</li> <li>• Durante la aceleración, el par exigido cae para el valor del par nominal.</li> <li>• No se aconseja sujetar el motor a sobrecargas durante la velocidad nominal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Par de arranque alto.</li> <li>• Corriente de arranque normal.</li> <li>• Categoría N.</li> </ul>
 <p>Prensas punzonadoras; grúa; puentes rodantes; elevadores de grúas; fijeras mecánicas; bombas de aceite para pozos.</p>	3 veces el par nominal	Requiere 2 a 3 veces el par nominal. Se consideran pérdidas durante los picos de carga.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cargas intermitentes, que requieren par de arranque, alto o bajo. Requieren arranques frecuentes, paradas e inversiones.</li> <li>• Máquinas accionadas como: prensas punzonadoras que pueden usar volante para soportar picos de potencia.</li> <li>• Pequeño reglaje es conveniente para amenizar los picos de potencias y reducir los esfuerzos mecánicos en el equipo accionado.</li> <li>• La alimentación precisa ser protegida contra picos de potencias, resultantes de las fluctuaciones de carga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Par de arranque alto.</li> <li>• Corriente de arranque normal.</li> <li>• Alto deslizamiento.</li> <li>• Categoría D.</li> </ul>
 <p>Ventiladores; máquinas-herramientas; mezcladores; transportadores.</p>	Algunas veces se necesita solamente parte del par nominal; y otras muchas veces el par nominal.	1 a 2 veces el par nominal en cada velocidad.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dos, tres o cuatro velocidades fijas son suficientes.</li> <li>• No es necesario el ajuste de velocidad.</li> <li>• Par de arranque puede ser pequeño (ventiladores) o alto (transportadores).</li> <li>• Las características de funcionamiento en varias velocidades, pueden variar entre potencia constante, par constante o características de par variable.</li> <li>• Máquinas de cortar metal poseen potencia constante; cargas de fricción son típicas de par constante, ventiladores son de par variable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Par normal o alto (velocidades múltiples).</li> </ul>



- Valores de eficiencia nominal a plena carga de acuerdo a la NOM-016-ENER-2002:

Potencia Nominal, kW	Potencia Nominal Cp	MOTORES CERRADOS				MOTORES ABIERTOS			
		2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos	2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos
0,746	1	75,5	82,5	80,0	74,0	75,5	82,5	80,0	74,0
1,119	1,5	82,5	84,0	85,5	77,0	82,5	84,0	84,0	75,5
1,492	2	84,0	84,0	86,5	82,5	84,0	84,0	85,5	85,5
2,238	3	85,5	87,5	87,5	84,0	84,0	86,5	86,5	86,5
3,730	5	87,5	87,5	87,5	85,5	85,5	87,5	87,5	87,5
5,595	7,5	88,5	89,5	89,5	85,5	87,5	88,5	88,5	88,5
7,460	10	89,5	89,5	89,5	88,5	88,5	89,5	90,2	89,5
11,19	15	90,2	91,0	90,2	88,5	89,5	91,0	90,2	89,5
14,92	20	90,2	91,0	90,2	89,5	90,2	91,0	91,0	90,2
18,65	25	91,0	92,4	91,7	89,5	91,0	91,7	91,7	90,2
22,38	30	91,0	92,4	91,7	91,0	91,0	92,4	92,4	91,0
29,84	40	91,7	93,0	93,0	91,0	91,7	93,0	93,0	91,0
37,30	50	92,4	93,0	93,0	91,7	92,4	93,0	93,0	91,7
44,76	60	93,0	93,6	93,6	91,7	93,0	93,6	93,6	92,4
55,95	75	93,0	94,1	93,6	93,0	93,0	94,1	93,6	93,6
74,60	100	93,6	94,5	94,1	93,0	93,0	94,1	94,1	93,6
93,25	125	94,5	94,5	94,1	93,6	93,6	94,5	94,1	93,6
111,9	150	94,5	95,0	95,0	93,6	93,6	95,0	94,5	93,6
149,2	200	95,0	95,0	95,0	94,1	94,5	95,0	94,5	93,6
186,5	250	95,4	95,0	95,0	94,5	94,5	95,4	95,4	94,5
223,8	300	95,4	95,4	95,0	---	95,0	95,4	95,4	---
261,1	350	95,4	95,4	95,0	---	95,0	95,4	95,4	---
298,4	400	95,4	95,4	---	---	95,4	95,4	---	---
335,7	450	95,4	95,4	---	---	95,8	95,8	---	---
373	500	95,4	95,8	---	---	95,8	95,8	---	---

## ANEXO B. LEVANTAMIENTO DE DATOS.

No.	Ubicación	Identificación	Aplicación	Acoplamiento	Fases	R.J.A.	Uso General	HP	Polos	208-230/460V	In standar(208-230/460)
1	Area de compresores	Compresor ZR5A	Compresor	Directo por cople	3	Si	Si	400	4	Si	996-901/451
2	Area de compresores	Compresor ZR5B	Compresor	Directo por cople	3	Si	Si	400	4	Si	996-901/451
3	Area de compresores	Compresor ZR5C	Compresor	Directo por cople	3	Si	Si	460 kW	4	Si /460	659
4	Pozo Frío	Bomba A	Bomba	Directo por cople	3	Si	Si	60	4	Si	155-140/70
5	Pozo Frío	Bomba B	Bomba	Directo por cople	3	Si	Si	60	4	Si	155-140/70
6	Pozo Frío	Bomba C	Bomba	Directo por cople	3	Si	Si	75	4	Si	187-169/84.5
7	Pozo Frío	Bomba D	Bomba	Directo por cople	3	Si	Si	75	4	Si	187-169/84.5
8	Bombas de Glicol	Motor 1	Bomba	Directo por cople	3	Si	Si	15	2	Si	40.1-36.3/18.1
9	Bombas de Glicol	Motor 2	Bomba	Directo por cople	3	Si	Si	15	2	Si	40.1-36.3/18.1
10	Fermentadores	Fermentador 1	Agitador	Polea y bandas	3	Si	Si	150	4	440	375-339/170
11	Fermentadores	Fermentador 2	Agitador	Directo por cople	3	Si	Si	150	4	440	375-339/170
12	Fermentadores	Fermentador 3	Agitador	Directo por cople	3	Si	Si	150	4	440	375-339/170
13	Fermentadores	Fermentador 4	Agitador	Directo por cople	3	Si	Si	150	4	Si	375-339/170
14	Bombas de vacío Toffola	Motor 1	Bomba	Directo por cople	3	Si	Si	15	4	Si	41.6-37.6/18.8
15	Bombas de vacío Toffola	Motor 2	Bomba	Directo por cople	3	Si	Si	15	4	Si	41.6-37.6/18.8
16	Bombas tanques de filtrado	Motor 1	Bomba	Directo por cople	3	Si	Si	15	2	Si	40.1-36.3/18.1
17	Bombas tanques de filtrado	Motor 2	Bomba	Directo por cople	3	Si	Si	15	2	Si	40.1-36.3/18.1
18	Agitador tanque de filtrado	Motor 1	Bomba	Polea y bandas	3	Si	Si	10	4	Si	28.2-25.5/12.8
19	Agitador tanque opcional	Motor opcional	Bomba	Directo por cople	3	Si	Si	20	4	Si	55.6-50.3/25.1
20	Derrame 1	Derrame 1	Bomba	Directo por cople	3	Si	Si	20	4	Si	55.6-50.3/25.1
21	Derrame 2	Derrame 2	Bomba	Directo por cople	3	Si	Si	20	4	Si	55.6-50.3/25.1
22	Bombas vacío filtro Eimco	Motor 1	Bomba	Polea y bandas	3	Si	Si	40	4	Si	107-96.6/48.3
23	Bombas vacío filtro Eimco	Motor 2	Bomba	Polea y bandas	3	Si	Si	30	4	Si	79.8-72.2/36.1
24	Bombas vacío filtro Eimco	Motor 3	Bomba	Polea y bandas	3	Si	Si	30	4	Si	79.8-72.2/36.1
25	Bomba P100 de ultrafiltración	Motor 1	Bomba	Directo por cople	3	Si	Si	25	4	Si	66.8-60.4/30.2
26	Ventiladores	Desecador	Ventilador	Polea y bandas	3	Si	Si	15	4	Si	41.6-37.6/18.8
27	Ventiladores	Estractor secador	Ventilador	Polea y bandas	3	Si	Si	40	4	Si	107-96.6/48.3

No.	In (A)	60 Hz	Diseño B	Nema	Frame	F1	Horizontal con patas	IP55	TEFC	Clase "F"	S1	F.S.	Eficiencia	ef. Estándar	ef. Media	ef. premium
1	459	Si	Si	Si	1507	Si	Si	IP23	ODP	B	Si	1.15	No indicada	0.938	0.90	0.962
2	No visible	Si	Si	Si	1507	Si	Si	IP23	ODP	B	Si	1	No indicada	0.938	0.90	0.962
3	700	Si	Si	Si	No visible	Si	Sin patas y brida D	IP54	Si	Si	Si	1	No indicada	0.945	0.92	0.963
4	152	Si	Si	Si	364T	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No visible	No indicada	0.93	0.92	0.95
5	152	Si	Si	Si	364T	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No visible	No indicada	0.93	0.92	0.95
6	Motor de la línea W21			Si	365T	Si	Si	Si	Si	Si	Si	1.25	Alta	0.941	0.92	0.954
7	190	Si	Si	Si	365T	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No visible	No indicada	0.93	0.915	0.954
8	No visible	Si	Si	Si	254T	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No visible	No indicada	0.875	0.85	0.917
9	No visible	Si	Si	Si	254T	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No visible	No indicada	0.875	0.85	0.917
10	No visible	Si	Si	Si	405T	Si	Si	Si	Si	Si	Si	1.15	No indicada	0.935	0.925	0.958
11	180/98	Si	Si	Si	405T	F2	Si	Si	Si	Si	Si	1.15	No indicada	0.935	0.925	0.958
12	No visible	Si	Si	Si	405T	Si	Si	Si	Si	Si	Si	1.15	No indicada	0.935	0.925	0.958
13	Motor de la línea W21			Si	405T	Si	Si	Si	Si	Si	Si	1.15	Alta	0.95	0.91	0.958
14	No visible	Si	No visible	Si	254T	F2	Si	Si	Si	Si	Si	No visible	No indicada	0.885	0.875	0.924
15	No visible	Si	No visible	Si	254T	F2	Si	Si	Si	Si	Si	No visible	No indicada	0.885	0.875	0.924
16	No visible	Si	Si	Si	256T	Si	Si	Si	Si	B	Si	No visible	No indicada	0.875	0.865	0.917
17	No visible	Si	Si	Si	256T	Si	Si	Si	Si	B	Si	No visible	No indicada	0.875	0.865	0.917
18	No visible	Si	Si	Si	215T	Si	Si	Si	Si	B	Si	No visible	No indicada	0.89	0.88	0.917
19	No visible	Si	Si	Si	256T	Si	Si	Si	Si	Si	Si	1.15	No indicada	0.902	0.89	0.93
20	No visible	Si	Si	Si	256T	Si	Si	Si	Si	Si	Si	1.15	No indicada	0.902	0.89	0.93
21	No visible	Si	Si	Si	256T	Si	Si	Si	Si	Si	Si	1.15	No indicada	0.902	0.89	0.93
22	No visible	Si	No visible	Si	326T	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No visible	No indicada	0.917	0.9	0.941
23	No visible	Si	No visible	Si	286T	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No visible	No indicada	0.91	0.89	0.936
24	No visible	Si	No visible	Si	286T	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No visible	No indicada	0.91	0.89	0.936
25	No visible	Si	Si	Si	284T	Si	Si	Si	Si	Si	Si	1.15	No indicada	0.905	0.88	0.936
26	No visible	Si	Si	Si	284U	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No visible	0.85	0.885	0.875	0.924
27	No visible	Si	Si	Si	404U	Si	Si	Si	Si	B	Si	No visible	0.85	0.917	0.9	0.941

No.	40°C @ 1000msn	Ambiente	Especialidades	Arranque	REGIMEN	hrs al año	Marca
1	50°C	Seco	Cunta con una ventilación forzada. Ofrecer clase H	D.O.L.	S1 / 24HRS	8760	US
2	50°C	Seco	Ofrecer slase H	D.O.L.	S1 / 24HRS	8760	US
3	50°C	Seco	Arránque Estrella-Delta, Giro CCW	D.O.L.	S1 / 24HRS	8760	SIEMENS
4	Si	Húmedo	Aplicar plan de pintura 202		S1 / 24HRS	8760	US
5	Si	Húmedo	Aplicar plan de pintura 202		S1 / 24HRS	8760	US
6	Si	Húmedo	Motor ya ha sido reembobinado. Aplicar plan de pintura 202		S1 / 24HRS	8760	WEG
7	Si	Húmedo	Aplicar plan de pintura 202		S1 / 24HRS	8760	US
8	No visible	Húmedo	Aplicar plan de pintura 202		S1 / 24HRS	8760	SIEMENS
9	No visible	Húmedo	Aplicar plan de pintura 202		S1 / 24HRS	8760	WEG
10	Si	Seco	1.10m entre centros de barrenos, diámetros, motríz 25cm, inducida 35cm, 7 bandas, flecha tipo J, Rodillos lado carga, serie:098778026		S1 / 24HRS	8760	US
11	Si	Seco			S1 / 24HRS	8760	No visible
12	Si	Seco	Flecha tipo J, serie:098822226		S1 / 24HRS	8760	US
13	Si	Seco	15018EP3E445T		S1 / 24HRS	8760	WEG
14	Si	Húmedo	Aplicar plan de pintura 202		S1 / 24HRS	8760	US
15	Si	Húmedo	Aplicar plan de pintura 202		S1 / 24HRS	8760	US
16	Si	Húmedo	Motor ya ha sido reembobinado. Aplicar plan de pintura 202		S1 / 24HRS	8760	US
17	Si	Húmedo	Motor ya ha sido reembobinado. Aplicar plan de pintura 202		S1 / 24HRS	8760	US
18	Si	Húmedo	Motor ya ha sido reembobinado. Aplicar plan de pintura 202 y ofrecer rodillos lado carga.		S1 / 24HRS	8760	No visible
19	Si	Húmedo	Motor ya ha sido reembobinado. Aplicar plan de pintura 202		S1 / 24HRS	8760	No visible
20	Si	Húmedo	Motor ya ha sido reembobinado. Aplicar plan de pintura 202		S1 / 24HRS	8760	No visible
21	Si	Húmedo	Motor ya ha sido reembobinado. Aplicar plan de pintura 202		S1 / 24HRS	8760	No visible
22	Si	Húmedo	El armazón está sobredimensionado debido a que está plaqueado a 50 Hz. Ofrecer el estandar. Ofrecer rodillos lado carga.		S1 / 24HRS	8760	Reliance
23	Si	Húmedo	Ofrecer rodillos lado carga. Aplicar plan de pintura 202		S1 / 24HRS	8760	No visible
24	Si	Húmedo	Ofrecer rodillos lado carga. Aplicar plan de pintura 202		S1 / 24HRS	8760	No visible
25	Si	Seco			S1 / 24HRS	8760	No visible
26	Si	Seco	Ofrecer rodillos lado carga.		S1 / 24HRS	8760	No visible
27	Si	Seco	Ofrecer rodillos lado carga.		S1 / 24HRS	8760	No visible



## ANEXO C. FICHAS TÉCNICAS DE MOTORES PROPUESTOS.

- Compresores 1 y 2. Motores de 400 HP:

		Nr.:			
		Fecha: 9/13/2011 4:33:53 PM			
<b>HOJA DE DATOS</b> <b>Motor trifásico de inducción - Rotor de jaula</b>					
Cliente	-				
Línea del producto	- TEFC - W22 NEMA Premium Efficiency				
Carcasa	- 586/7T				
Potencia	- 400 HP				
Frecuencia	- 60 Hz				
Polos	- 4				
Rotación nominal	- 1790				
Deslizamiento	- 0,56 %				
Voltaje nominal	- 208-230/460 V				
Corriente nominal	- 1010-910/455 A				
Corriente de arranque	- 5820/2910 A				
$I_p/I_n$	- 6,4				
Corriente en vacío	- 280/140 A				
Par nominal	- 1601 Nm				
Par de arranque	- 200 %				
Par máxima	- 220 %				
Categoría	- B				
Clase de aislación	- F				
Elevación de temperatura	- 80 K				
Tiempo de rotor bloqueado	- 19 s (caliente)				
Factor de servicio	- 1,15				
Régimen de servicio	- S1				
Temperatura ambiente	- -20°C - +40°C				
Altitud	- 1000 m				
Protección	- IP55				
Masa aproximada	- 1567 kg				
Momento de inercia	- 7,5479 kgm <sup>2</sup>				
Nivel de ruido	- 78 dB(A)				
	Delantero	Trasero	Carga	Factor de potencia	Rendimiento (%)
Rodamiento	6322 C3	6319 C3	100%	0,86	96,2
Intervalo de lubricación 6000 h		8000 h	75%	0,85	96,2
Cantidad de grasa	60 g	45 g	50%	0,78	95,8

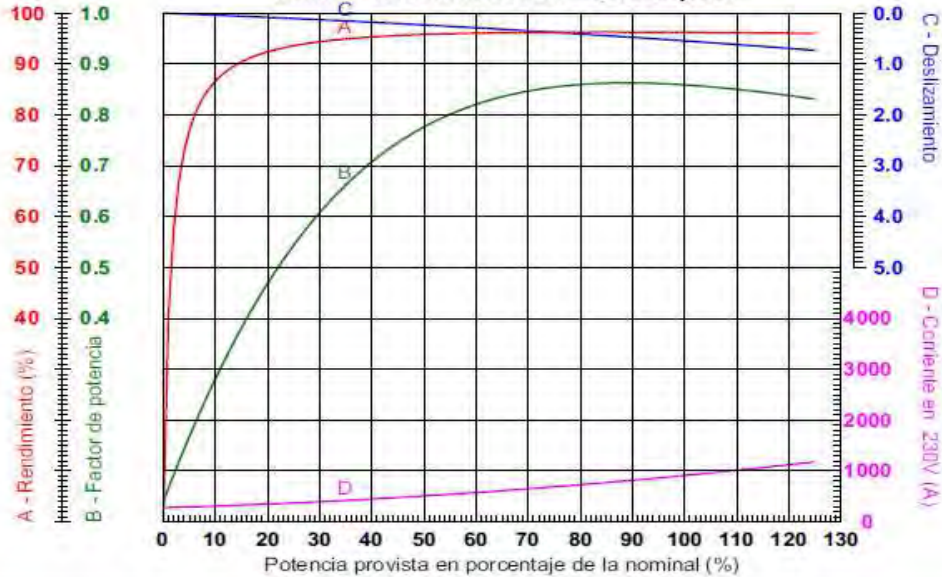


Nr.:

Fecha: 9/13/2011 4:33:53 PM

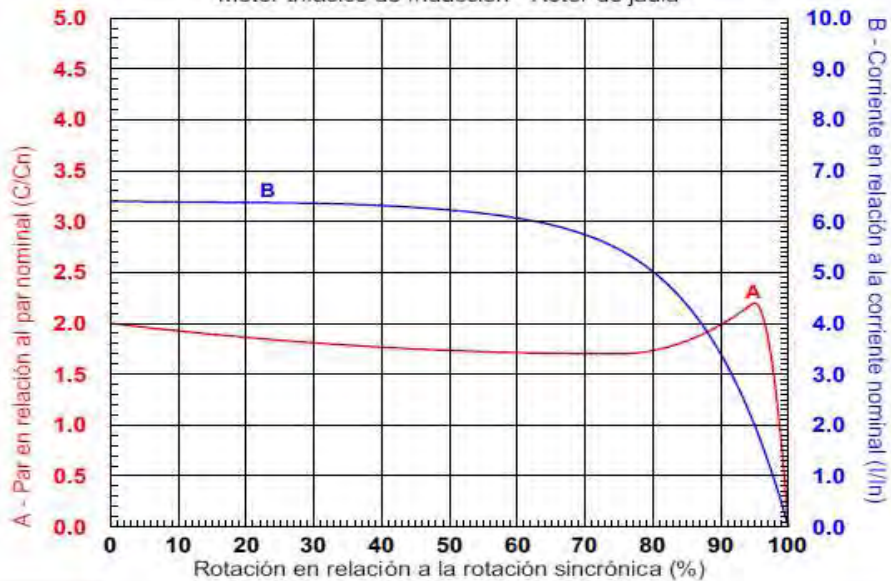
### CURVAS CARACTERÍSTICAS EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA

Motor trifásico de inducción - Rotor de jaula



### CURVAS CARACTERÍSTICAS EN FUNCIÓN DE LA ROTACIÓN


Motor trifásico de inducción - Rotor de jaula



Cliente :  
Línea del producto : TEFC - W22 NEMA Premium Efficiency

Potencia	: 400 HP	Ip/In	: 6,4
Carcasa	: 586/7T	Régimen de servicio	: S1
Rotación nominal	: 1790	Factor de servicio	: 1,15
Frecuencia	: 60 Hz	Categoría	: B
Voltaje nominal	: 208-230/460 V	Par de arranque	: 200 %
Clase de aislación	: F	Par máxima	: 220 %
Corriente nominal	: 1010-910/455 A		

- Compresor 3. Motor de 616.62 HP:

	<b>WEG México S.A de C.V</b>	Nr.: 133414/2011	
		Fecha: 14-SEP-2011	
<b>HOJA DE DATOS</b>		<b>PARA APROBACIÓN</b> <input type="checkbox"/> Aprobado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado con comentarios <input type="checkbox"/> No aprobado	
Motor Trifásico de Inducción - Rotor de Jaula			
Cliente	:		
Código del producto	:		
Línea del producto	:	HGF NORMAL NEMA - BAIXA TENSÃO	
Carcasa	:	HGF 5009/10/11T	
Potencia	:	600 HP	
Frecuencia	:	60 Hz	
Polos	:	4	
Rotación nominal	:	1783 rpm	
Resbalamiento	:	0.94 %	
Tensión nominal	:	460V	
Corriente nominal	:	659 A	
Corriente de arranque	:	4613 A	
Ip/In	:	7.0 Cód. G	
Corriente en vacío	:	204 A	
Torque nominal	:	2364 Nm	
Torque de arranque	:	140 %	
Torque máximo	:	250 %	
Clase de aislamiento	:	F	
Elevación de temperatura	:	80 K	
Tiempo de rotor bloqueado	:	16 s (caliente)	
Factor de servicio	:	1.00	
Régimen de servicio	:	S1	
Temperatura ambiente	:	-20°C hasta +40°C	
Altitud	:	1000 m	
Protección	:	IPW55 (TEFC)	
Forma constructiva	:	B3R(D)	
Sentido de giro	:	Ambos	
Masa aproximada*	:	2060 kg	
Momento de inercia	:	8.16 kgm <sup>2</sup>	
Nivel de Presión Sonora	:	79.0 dB(A) (global)	
Fuerzas en la fundación	:		
- Tracción máxima	:	38134 N	
- Compresión máxima	:	58342 N	
Carga	Fact. potencia	Rendimiento (%)	
100%	0.87	96.3	
75%	0.84	96.1	
50%	0.77	95.5	
	Rodamiento	Cantidad (lubricante)	
Delantero	6320-C3	51 g	
Trasero	6316-C3	34 g	
Intervalo de lubricación: 4500 h			
Grasa - MOBIL POLYREX EM			
Notas:			
EL MOTOR CUENTA CON:			
- RESISTENCIAS CALEFACTORAS			
- 2 RTD POR FASE			
- 1 RTD POR RODAMIENTO.			
Los valores indicados son garantizados, sujetos a las tolerancias de la norma NEMA MG 1-20. Nivel de ruido con tolerancia de +3 dB(A). (* ) El valor del peso puede cambiar sin previo aviso.			
Ejecutado vgutierrez	Verificado AUTOMATICO	Revisión Nr.: 0 Fecha: 14-SEP-2011	Aprobado

- Agitadores 10, 11, 12 y 13. Motores de 150 HP:

		Nr.:			
		Fecha: 9/13/2011 4:28:34 PM			
<b>HOJA DE DATOS</b> Motor trifásico de inducción - Rotor de jaula					
Cliente	:				
Línea del producto	: TEFC - W22 NEMA Premium Efficiency				
Carcasa	: 444/5T				
Potencia	: 150 HP				
Frecuencia	: 60 Hz				
Polos	: 4				
Rotación nominal	: 1780				
Deslizamiento	: 1,11 %				
Voltaje nominal	: 208-230/460 V				
Corriente nominal	: 376-340/170 A				
Corriente de arranque	: 2240/1120 A				
Ip/In	: 6,6				
Corriente en vacío	: 116/58,0 A				
Par nominal	: 590 Nm				
Par de arranque	: 200 %				
Par máxima	: 250 %				
Categoría	: B				
Clase de aislación	: F				
Elevación de temperatura	: 80 K				
Tiempo de rotor bloqueado	: 27 s (caliente)				
Factor de servicio	: 1,15				
Régimen de servicio	: S1				
Temperatura ambiente	: -20°C - +40°C				
Altitud	: 1000 m				
Protección	: IP55				
Masa aproximada	: 760 kg				
Momento de inercia	: 2,8104 kgm <sup>2</sup>				
Nivel de ruido	: 73 dB(A)				
	Delantero	Trasero	Carga	Factor de potencia	Rendimiento (%)
Rodamiento	6319 C3	6316 C3	100%	0,85	95,8
Intervalo de lubricación	8000 h	10000 h	75%	0,82	95,8
Cantidad de grasa	45 g	34 g	50%	0,74	95,4



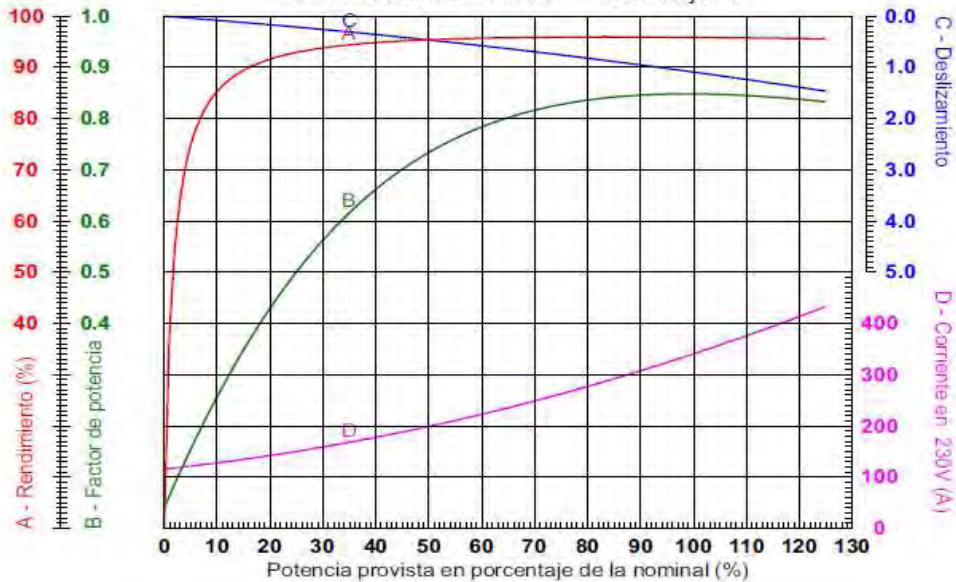


Nr.:

Fecha: 9/13/2011 4:28:34 PM

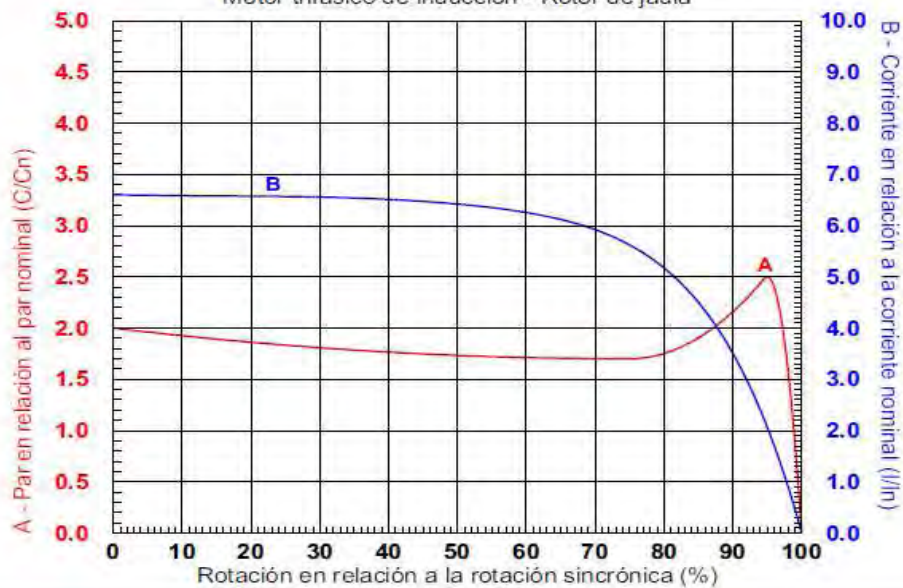
### CURVAS CARACTERÍSTICAS EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA

Motor trifásico de inducción - Rotor de jaula



### CURVAS CARACTERÍSTICAS EN FUNCIÓN DE LA ROTACIÓN

Motor trifásico de inducción - Rotor de jaula



Cliente :  
Línea del producto : TEFC - W22 NEMA Premium Efficiency

Potencia	: 150 HP	Ip/In	: 6,6
Carcasa	: 444/5T	Régimen de servicio	: S1
Rotación nominal	: 1780	Factor de servicio	: 1,15
Frecuencia	: 60 Hz	Categoría	: B
Voltaje nominal	: 208-230/460 V	Par de arranque	: 200 %
Clase de aislación	: F	Par máxima	: 250 %
Corriente nominal	: 376-340/170 A		

---

## BIBLIOGRAFÍA.

- 1.- *Tecnoficio*. (1998). Obtenido de <http://www.tecnoficio.com>:  
[http://www.tecnoficio.com/electricidad/motor\\_electrico.php](http://www.tecnoficio.com/electricidad/motor_electrico.php)
- 2.- <http://www.energia.inf.cu/iee-mep/diagno.htm>. (2001). Recuperado el 2011, de <http://www.energia.inf.cu/iee-mep/diagno.htm>: <http://www.energia.inf.cu/iee-mep/diagno.htm>
- 3.- *iso*. (2001). Obtenido de [http://www.iso.org/iso/fast\\_forward-es.pdf](http://www.iso.org/iso/fast_forward-es.pdf):  
[http://www.iso.org/iso/fast\\_forward-es.pdf](http://www.iso.org/iso/fast_forward-es.pdf)
- 4.- *Normas*. (2001). Obtenido de [http://www.iso.org/iso/fast\\_forward-es.pdf](http://www.iso.org/iso/fast_forward-es.pdf):  
[http://www.iso.org/iso/fast\\_forward-es.pdf](http://www.iso.org/iso/fast_forward-es.pdf)
- 5.- <http://www.enmex.com.mx>. (2003). Recuperado el Diciembre de 2011, de <http://www.enmex.com.mx>: <http://www.enmex.com.mx>
- 6.- *itesm*. (2003). Obtenido de <http://www.her.itesm.mx/cae/Ligas/Normas/NOM-016-ENER-2002.pdf>: <http://www.her.itesm.mx/cae/Ligas/Normas/NOM-016-ENER-2002.pdf>
- 7.- <http://www.aenor.es/actualidad/noticias>. (2010). Obtenido de <http://www.aenor.es/actualidad/noticias>:  
<http://www.aenor.es/actualidad/noticias>
- 8.- <http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas>. (2011). Recuperado el 2011, de <http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas>:  
<http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas>
- 9.- <http://portal.fide.org.mx>. (2011). Recuperado el 2011, de <http://portal.fide.org.mx>.
- 10.- ABB. (2009). Norma IEC en motores de CA.
- 11.- Blank, L. T., & Tarquin, A. J. (1999). *Ingeniería económica*. Colombia: Mc Graw Hill.
- 12.- Campos Avella, J. C. (2004). Eficiencia energética en motores eléctricos. Colombia.
- 13.- Chapman, S. J. (1998). *Máquinas Eléctricas*. México: Prentice Hall.
- 14.- Cortés, M. (2002). Curso moderno de las máquinas eléctricas rotativas. *La máquina eléctrica en general*. Reverté.

- 
- 15.- Domínguez Flores, R. (1998). Tesis de licenciatura. *Ahorro de energía en motores eléctricos de corriente alterna jaula de ardilla*. México: UAM.
  - 16.- Enriquez Harper, G. (2006). *Control de motores eléctricos*. México: Limusa.
  - 17.- FIDE. (2009). Evaluación energética de motores eléctricos de inducción.
  - 18.- Fitzgerald, K. K. (2004). *Electrical Machinery*. México: Mc Graw Hill.
  - 19.- Frers, C. (2006). <http://waste.ideal.es/dioxidodecarbono.htm>. Recuperado el Diciembre de 2011, de <http://waste.ideal.es/dioxidodecarbono.htm>: <http://waste.ideal.es/dioxidodecarbono.htm>
  - 20.- Harper, G. (2008). *Fundamentos de control de motores eléctricos en la industria*. Limusa Noriega Editores.
  - 21.- IIE. (2009). <http://www.iie.org.mx/boletin042009/divulga.pdf>. Recuperado el 2011, de <http://www.iie.org.mx/boletin042009/divulga.pdf>: <http://www.iie.org.mx/boletin042009/divulga.pdf>
  - 22.- Pedraza, J. J. (1999). *Máquinas eléctricas y transformadores*. Reverté.
  - 23.- Pérez Amador, V. (1994). *Generadores, motores y transformadores*. México, UNAM.
  - 24.- Prias, O. (2004). Los motores eléctricos y sus afectaciones al medio ambiente.
  - 25.- Proenergía SAC. (s.f.). Obtenido de <http://www.proenergiasac.com>: [http://www.proenergiasac.com/panel\\_097/upload/arch/1030946683.pdf](http://www.proenergiasac.com/panel_097/upload/arch/1030946683.pdf)
  - 26.- Sánchez, I. (1996). Tesis de licenciatura. *Ahorro de energía eléctrica en la industria al sustituir motores eléctricos estándar por motores de alta eficiencia*. UAM.
  - 27.- Serway, R. A., & Faughn, J. S. (2001). *Física*. México: Pearson Educación.
  - 28.- Siemens. (Diciembre de 2009). Motores de eficiencia NEMA y ahorro de energía. Puebla, México.
  - 29.- Torres, L. (2011). *Curso de mantenimiento preventivo y correctivo en motores eléctricos y diagnóstico de fallas*. Obtenido de <http://es.scribd.com/doc/66688334/Motores-Electricos>.
  - 30.- WEG. (2010). Selección y aplicación de motores eléctricos.