



MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR DE CUBA
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO DE MOA

Dr. "Antonio Núñez Jiménez"

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECHANICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

Trabajo de diploma

TITULO: SELECCION ENERGETICA Y ECONOMICA DE LOS MOTORES DE INDUCCION.

AUTOR: MARISLAIDIS REYES LOCADIO

TUTORES: MSC. IGNACIO ROMERO RUEDA
ING. ERNESTO SUÁREZ AVILA
DR. EULICER FERNÁNDEZ MOREZMA

"Año de la Revolución Energética en Cuba"
Moa-2006



.....Siempre mediremos por encima de todo a un técnico y a un científico no por sus conocimientos sino, por el grado de hermandad con que es capaz de aportar al género humano sus conocimientos.

“Fidel Castro Ruz



Dedico este trabajo en primer lugar a mi bisabuela Fernanda, por ser este uno de sus sueños, a mi madre y hermana, por haber inculcado en mí el propósito de estudiar hasta alcanzar el título y haber esperado pacientes y confiadas que obtendría el triunfo.

A mis dos amigas Yadira, Yeneisis a mi amigo, Juaquin y a alguien que en la recta final de mi etapa como estudiante llenó de alegría e ilusiones nuevas mi vida, para ti es también este logro Wilder Cervantes Matos.



Agradecimientos:

A todas aquellas amistades que de una forma u otra hicieron posible la culminación de este trabajo, quienes siempre creyeron en mí. En especial a mi tutor M.Sc. Ignacio Romero Rueda, por su ayuda incondicional.

A todos gracias.

RESUMEN

Resumen:

En el trabajo de diploma se establece una metodología para la selección económicamente energética en los motores de inducción. En la primera parte se hace un análisis en cuanto a la eficiencia en los motores y como se comporta según diferentes fabricantes, terminando en una evaluación de las eficiencias energéticas y cuales son los métodos generales que se emplean en las inversiones.

La segunda parte recoge la influencia de diferentes factores en el rendimiento del motor de inducción y la determinación del coeficiente de carga en los mismos.

Por último se escoge un caso de estudio y se le aplica la metodología descrita en los capítulos anteriores a motores reales existente en el CAI. Loynaz Echeverría Cordobés, demostrando la factibilidad de la sustitución o reemplazo de motores obsoletos por nuevos.

Abstract:

This undergraduates paper establishes a methodology which specifically deals with the economic selection of induction motors. The first chapter begins with an analysis of motor efficiency and the general methods used when making investments.

The second chapter deals with the influences of different factures on induction motor efficiency and the determination of the loading coefficient of the these induction motors.

Finally a case study was given in which the methodology discussed in the previous chapters was applied, the motor studied are motor which can be found at the CAI. Loynaz Echeverría Cordobés.

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN GENERAL

I.I. Fundamentación del trabajo realizado

La mayor parte del consumo de energía eléctrica en la industria se debe al uso de los motores eléctricos, ya que así lo demuestran las estadísticas.

El hecho de que los motores eléctricos suministren la mayor parte de la energía motriz que mueve a los equipos industriales y el uso tan extendido que tienen, representan uno de los campos más fértiles de oportunidades para el ahorro de energía, que se traducirán en una reducción en los costos de producción y en una mayor competitividad.

El ahorro de energía comienza desde la selección apropiada de los motores. Se debe elegir el más adecuado para las necesidades que se tienen, tomando en cuenta las condiciones ambientales de operación, condiciones de arranque y regulación de velocidad, así como su tamaño y potencia. Los mayores ahorros de energía se logran cuando el motor opera a su máxima eficiencia.

Cuando se elige un motor eléctrico, un parámetro que no se debe pasar por alto es la eficiencia del motor. La eficiencia alta representa ahorros económicos para el usuario final y beneficios sustentables para el país y la sociedad en su conjunto.

I.II. Problemas de la investigación

El desconocimiento a escala industrial del comportamiento e incidencia del motor de inducción cuando opera bajo determinadas condiciones, lleva a tomar decisiones erróneas en ocasiones y soluciones que no garantizan una explotación confiable y segura de estos motores en la carga de la industria.

I.III. Objetivo general

Establecer una metodología para la selección económicamente energética de motores de inducción que permita su operación más eficiente y confiable.

I.IV. Objetivos específicos

- Métodos de Evaluación Energética Aplicada a Motores Eléctricos
- Evaluar el rendimiento y la carga del motor de inducción para diferentes condiciones.
- Evaluar el ahorro de energía con el uso de motores eficiente.

I.V. Hipótesis

Si se tiene el dominio de la incidencia de las situaciones a que se enfrenta el motor de inducción en su operación en la industria, se pueden mejorar los indicadores de potencia la adecuada selección económicamente energética aumentando siempre la vida útil del motor de inducción.

I.VI. Tareas a resolver

- Definir el uso de motores eficiente como tecnología para aumentar la eficiencia.
- Realizar un análisis de los motores para evaluar las inversiones en la eficiencia energética.
- Evaluar la influencia de los diferentes factores en el rendimiento del motor de inducción.
- Definir los aspectos a tener en cuenta para el análisis correcto.
- Estimar el grado de carga para el motor de inducción.
- Expresiones generales para el cálculo del ahorro de energía.
- Definir los elementos fundamentales del funcionamiento.
- Ejemplo práctico de un caso de estudio.

ÍNDICE

Tabla de Contenido

Introducción

I.I	Introducción.	1
I.II	Problema de la investigación.	1
I.III	Objetivo general.	1
I.IV	Objetivos específicos.	1
I.V	Hipótesis.	2
I.VI	Tareas a resolver.	2

Capítulo I: Métodos de Evaluación Energética en Motores Eléctricos.

I.1	Nociones generales del motor de inducción.	3
I.2	La eficiencia de los motores eléctricos.	3
I.3	La evaluación económica de la eficiencia energética.	7
I.4	Métodos generales para evaluar inversiones en eficiencia energética	7
I.5	Aplicación de la metodología de evaluación a los motores eléctricos.	11
I.6	Elementos de análisis para definir cuando hay que cambiar un motor por otro.	12
I.7	Elementos de análisis para definir cuando hay que introducir un motor nuevo eficiente.	13
I.8	Ilustración del proceso de evaluación de la introducción de un motor eficiente para distintas situaciones.	13
I.9	Conclusión.	16

Capítulo 2: Evaluación del Rendimiento en Motores de Inducción y Factores Influyentes

II.1	Introducción.	17
II.2	Determinación del Rendimiento	18
II.3	Razones para Determinar la Carga del Motor	25
II.4	Determinación de la Carga del Motor	26
II.5	Determinación de la eficiencia del motor	29
II.6	Conclusiones.	30

Capítulo 3: Evaluación del Ahorro de Energía con el uso de Motores Eficientes	32
III.1 Introducción	32
III.2 Elementos Fundamentales a tener en cuenta.	32
III.3 Expresiones empleadas.	34
III.4 Caso de estudio	35
III.5 Conclusiones.	41
Conclusiones.	42
Recomendaciones	43
Bibliografía	44
Anexos	

CAPÍTULO I



CAPITULO I. Métodos de Evaluación Energética Aplicada a Motores Eléctricos

I.1. Nociones generales del motor de inducción.

I.2. La eficiencia de los motores eléctricos.

I.3. La evaluación económica de la eficiencia energética.

I.4. Métodos generales para evaluar inversiones en eficiencia energética.

I.5. Aplicación de la metodología de evaluación a los motores eléctricos.

I.6. Elementos de análisis para definir cuando hay que cambiar un motor por otro.

I.7. Elementos de análisis para definir cuando hay que introducir un motor nuevo eficiente.

I.8. Ilustración del proceso de evaluación de la introducción de un motor eficiente para distintas situaciones.

I.9. Conclusión

I.1. Nociones generales del motor de inducción.

El uso eficiente de la energía (UEE) constituye una de las más importantes opciones tecnológicas. Sólo tiene sentido en la medida que permite reducir los costos globales de producción. Ello implica considerar no sólo el costo total de los equipos nuevos, en los casos de reemplazo de equipos existentes en uso, los equipos eficientes cuestan, en general más que los equipos estándares además de los costos diferenciales de operación y mantención de los equipos eficientes respecto a los estándares.

Las principales pérdidas eléctricas provienen del uso de motores, equipo que constituye uno de los objetivos principales de cualquier programa de eficiencia energética, no sólo en el caso de los proyectos nuevos también en situaciones de reemplazo de equipos existentes.

Para una mejor comprensión de las características de los motores eficientes, se introducen algunos elementos que relacionan el concepto de eficiencia y las fuentes de pérdidas, para luego describir los principales elementos relativos a motores eficientes.

I.2. La eficiencia de los motores eléctricos.

La eficiencia o rendimiento se puede definir como el cociente entre la potencia mecánica de salida del motor y la potencia eléctrica demandada, siendo las pérdidas la diferencia entre ambas potencias.

Los motores eléctricos de inducción atendiendo a su eficiencia se clasifican en:

1. Eficiencia estándar.
 2. Eficiencia alta.
 3. Premium
- **Eficiencia estándar:** Es el promedio de eficiencia de un lote de motores estándar del mismo diseño y que cumple con los valores de eficiencia nominal.
 - **Eficiencia alta:** Es el promedio de eficiencia de un lote de motores de alta eficiencia del mismo diseño y que cumplen con los valores de eficiencia nominal.
 - **Eficiencia Premium:** Es un conjunto de niveles de eficiencia superiores a los definidos en el EPAct. Está formado por una alianza de grupos públicos, privados y por el gobierno.

En la tabla1.1 se muestra la evolución de la eficiencia de los motores a lo largo del tiempo lo que permite estimar el rendimiento de un motor instalado en una industria o faena, cuando la placa no lo indica pero se conoce aproximadamente el año de fabricación o instalación.

Tabla1.1 Evolución del rendimiento de los motores eléctricos (en %)

Potencia en HP	Año de procedencia				
	1944	1955	1965	1981	1991
7,5	84,5	87,0	84,0	91,0	91,7
15	87,0	89,5	88,0	92,4	93,0
25	89,5	90,5	89,0	93,6	94,1
50	90,5	91,0	91,5	94,1	94,5
75	91,0	90,5	91,5	95,0	95,4
100	91,5	92,0	92,0	95,0	96,2

Las distintas normas internacionales distinguen los motores eficientes del estándar; en general, el rendimiento de los primeros para los distintos niveles de carga, es siempre superior al de los motores estándar. Sin embargo, no existe una definición única a nivel mundial y es posible apreciar; incluso, dentro de un mismo país, motores eficientes que presentan rendimientos distintos según el fabricante. Una característica importante de los motores de más de 100 **hp** resulta ser la similitud de las eficiencias a medida que aumenta el tamaño, llegando a ser prácticamente idénticas para los motores de mayor potencia.

Las tablas siguientes presentan las eficiencias nominales (para plena carga) de motores abiertos (ODP) de 1800 rpm, estándares y eficientes, manufacturados por distintos fabricantes.

Tabla 1.2 Eficiencias de motores estándares (ODP) de 1800 rpm en %

Rendimientos en % de motores eficientes (ODP) de 1800 rpm, distintos fabricantes estadounidenses											
Fabricante	Potencias en HP										
	1	2	3	5	7,5	10	25	50	75	100	200
Baldor	82,5	84,0	86,5	87,5	88,5	89,5	92,4	94,1	94,1	94,1	--
GE	84,0	84,0	89,5	89,5	91,7	91,7	94,1	94,5	95,4	96,2	96,2
Lincoln	--	--	--	--	--	--	--	--	--	93,6	--
Marathon	82,5	84,0	86,5	86,5	88,5	89,5	92,4	93,0	94,1	94,1	95,0
Magne Tek	82,5	84,0	89,5	89,5	91,7	91,0	93,6	94,5	95,4	95,4	96,2
Reliance	82,5	84,0	87,5	88,5	89,5	90,2	93,0	94,1	95,0	95,4	95,8
Toshiba	85,5	86,5	88,5	87,5	90,2	91,0	92,4	93,6	94,5	94,5	95,0
Us	85,5	85,5	86,5	88,5	89,5	90,2	--	93,6	95,0	95,4	95,4
Promedio	83,6	84,6	87,8	88,2	89,9	90,4	93,0	93,9	94,8	94,8	95,6

Un factor de suma importancia en el rendimiento con que se usan los motores es el factor de carga, debido a que el rendimiento de éstos varía con dicho factor. La tabla siguiente presenta la variación de la eficiencia de un motor con la carga, independientemente de la potencia de los motores, según valores proporcionados en un catálogo de SIEMENS. Este cuadro tiene una validez aproximada que es generalizable, ya que se basa en una distribución porcentual de las pérdidas, la que no cambia mayormente ni por los tipos ni por los tamaños de los motores.

Tabla 1.3 Variación de la eficiencia con la carga. (fc factor de carga del motor)

fc= 0,25	fc= 0,5	fc= 0,75	fc= 1,0	fc= 1,25
93,0	96,0	97,0	97,0	96,5
92,0	95,0	96,0	96,0	95,5
90,0	93,5	95,0	95,0	94,5
89,0	92,5	94,0	94,0	93,5
88,0	91,5	93,0	93,0	92,5
87,0	91,0	92,0	92,0	91,5
86,0	90,0	91,0	91,0	90,0
85,0	89,0	90,0	90,0	89,0
84,0	88,0	89,0	89,0	88,0
80,0	87,0	88,0	88,0	87,0
79,0	86,0	87,0	87,0	86,0
78,0	85,0	86,0	86,0	85,0
76,0	84,0	85,0	85,0	83,5
74,0	83,0	84,0	84,0	82,5



fc= 0,25	fc= 0,5	fc= 0,75	fc= 1,0	fc= 1,25
72,0	82,0	83,0	83,0	81,5
70,0	81,0	82,0	82,0	80,5
68,0	80,0	81,0	81,0	79,5
66,0	79,0	80,0	80,0	78,5
64,0	77,0	79,5	79,0	77,5
62,0	75,5	78,5	78,0	76,5
60,0	74,0	77,5	77,0	75,0

Esta tabla permite conocer la eficiencia aproximada de un motor para un régimen de carga dado conocida su eficiencia para otro régimen de carga, independientemente de su potencia o de si se trata de motores eficientes o estándar.

Otro aspecto relevante a considerar es el efecto que el mantenimiento y conservación de los motores posee sobre la eficiencia de los mismos. En efecto, la lubricación, limpieza y rebobinado afectan el rendimiento del motor. Un rebobinado inadecuado puede producir una disminución de la eficiencia de alrededor de 2% a 4% en la vida útil del motor. En general puede afirmarse que las fallas mecánicas (fallas de rodamientos, torsión de ejes, mal montaje, etc.) constituyen entre un 50 a 60% de las fallas de los motores y del orden de un 30% son fallas eléctricas (principalmente cortocircuitos y, en menor medida, barras cortadas en las jaulas de ardilla). Adicionalmente, un motor eficiente tiene un mejor rendimiento para los distintos niveles de carga y un mejor factor de potencia. La tabla siguiente resume los valores medios del factor de potencia para un motor estándar y uno eficiente de 30 kW operando ambos bajo cargas variables.

Tabla 1.4 Factor de potencia y eficiencia para un motor estándar.

Eficiencia y factor de potencia para distintos factores de carga de un motor de 30 KW.								
Factor de carga en %	Eficiencia %				Factor de potencia			
	100	75	50	25	100	75	50	25
Motor eficiente	93,4	93,9	93,0	91,7	0,882	0,866	0,840	0,693
Motor estándar	90,9	90,8	89,6	84,4	0,876	0,838	0,766	0,584

La evaluación económica de motores alternativos no puede ignorar el valor del factor de potencia de éstos, ya que ello afecta al factor de potencia de la planta y por ende la inversión en condensadores para compensar la carga inductiva, lo que en el caso de Cuba pasa a ser muy importante actualmente debido a la exigencia de un factor de potencia global de 0,92.

Por último, un motor eficiente es normalmente más robusto y mejor construido que el motor estándar lo que se traduce en menores gastos de mantenimiento, lo que si bien es difícil de evaluar



en general, constituye una ventaja económica que debe incorporarse en el análisis aunque nada más sea en forma cualitativa.

I.3 La evaluación económica de la eficiencia energética.

Es posible ahorrar energía o reducir la demanda máxima, cuando corresponda, mediante acciones que no requieren inversiones (ya sea mediante manejo de la carga o gestión de la operación de los equipos) o que, exigen inversiones. Cuando sean necesarias dichas inversiones, se deberá determinar si ellas son rentables, lo que es hasta cierto punto un concepto arbitrario, ya que depende de los criterios del inversor. El objeto de un análisis energético orientado en función de los usos finales de la energía es desarrollar una estrategia de abastecimiento energético al mínimo costo.

La rentabilidad de las opciones eficientes energéticamente dependerá de la inversión diferencial, de la magnitud de la energía ahorrada, del costo unitario de la energía ahorrada, de la vida útil de la inversión y de la tasa de descuento. Este último parámetro reconoce el valor en el tiempo del capital.

I.4 Métodos generales para evaluar inversiones en eficiencia energética.

Invertir en eficiencia energética supone un gasto de capital actual, para ahorrar costos de operación en el futuro. La tasa de descuento permite comparar cuantitativamente gastos y ahorros que ocurren en fechas diferentes. El problema consiste en definir cuál es la tasa de descuento «correcta» para una evaluación dada. Desgraciadamente no existe una respuesta teórica a esta pregunta. En general, esta es una decisión basada en políticas de la empresa que definen el umbral de rentabilidad a partir del cual están dispuestas a invertir.

La evaluación de los beneficios relativos de las inversiones en eficiencia energética requiere determinar los costos anuales de capital involucrados en las distintas alternativas en consideración, para ello es necesario calcular dichos costos a partir de un factor conocido como el factor de recuperación del capital. Se determina de acuerdo con la función siguiente:

$$I = \sum^n \frac{A}{(1 + d)^n} \quad (1.1)$$

Donde:

I: Vida útil de una inversión

n: Cantidad de años



d : Tasa de descuento adoptada por la empresa

A : Costo anual

la que es una serie geométrica, cuya suma se puede calcular mediante la ecuación siguiente.

$$I = \frac{A \cdot [(1+d)^n - 1]}{d \cdot (1+d)^n} \quad (1.2)$$

El factor que multiplica A es conocido como el factor «valor presente uniforme» y su recíproco como el factor de recuperación del capital (FRC).

$$FRC = \frac{d(1+d)^n}{[(1+d)^n - 1]} \quad (1.3)$$

y $A = I \cdot FRC$ (Costo anual del capital invertido) (1.4)

La evaluación de las inversiones en eficiencia energética se realiza recurriendo a distintos enfoques dependiendo de los objetivos, condiciones y preferencias del analista. Los más conocidos son: período de recuperación simple (PRS), período de recuperación descontada (PRD), tasa interna de retorno (TIR), costo del ciclo de vida (CCV), costo del ciclo de vida anualizado (CCVA) y costo de ahorrar energía (CAE). A continuación se presentan brevemente aquellos más utilizados por los analistas y con algo de mayor detalle los que se refieren al ciclo de vida y costo de ahorrar energía, los que serán privilegiados en los ejemplos que se presentan más adelante.

- **Período de recuperación simple (PRS).**

Este método es el más simple y probablemente el más usado, especialmente cuando la inversión se recupera en períodos muy cortos de tiempo. El PRS no tiene en cuenta ni la vida útil del equipo ni el valor del dinero en el tiempo y se calcula en base a la función siguiente:

$$PRS = \frac{\Delta I}{PE (E_{est} - E_{efic})} \quad (1.5)$$

Donde:

PE : Precio unitario de la energía

E_{est} : Consumo de energía anual del equipo estándar

E_{efic} : Consumo de energía anual del equipo eficiente

Dependiendo del caso, ΔI puede corresponder a la diferencia entre los costos de capital de la opción eficiente y estándar; el costo de la opción eficiente y la reparación eventual de la opción estándar

existente o simplemente el costo de capital de la primera, si el equipo estándar opera normalmente (sin necesidad de reparación en una perspectiva de corto plazo).

- **Período de recuperación descontada (PRD).**

En este caso se consideran tanto la vida útil del equipo como el valor del dinero. El período de recuperación descontada (PRD) se determina mediante la función:

$$PRD = n \cdot FRC(d, n) \frac{\Delta I}{PE(E_{est} - E_{efc})} \quad (1.6)$$

En que:

n : vida útil del equipo

d : tasa de descuento

$FRC(d, n)$: factor de recuperación del capital

- **Tasa interna de retorno (TIR).**

La tasa interna de retorno se define como la tasa de descuento para la cual dos alternativas de inversión tienen el mismo valor presente neto. Al evaluar las alternativas estándar y eficiente, la TIR es el valor (i) para el cual se cumple la igualdad siguiente:

$$I_{est} + PE * E_{est} * \sum_1^n [1 / (1 + i)^n] = I_{efc} + PE * E_{efc} * \sum_1^n [1 / (1 + i)^n] \quad (1.7)$$

Donde:

I_{est} : Inversión en equipos estándar

I_{efc} : Inversión en equipos eficientes

lo que equivale a igualar el valor presente de los ahorros de energía con el diferencial de la inversión requerida.

$$PE(E_{est} - E_{efc}) \sum [1 / (1 + i)^n] = (I_{efc} - I_{est}) \quad (1.8)$$

- **Costo del ciclo de vida (CCV) y costo del ciclo de vida anualizado (CCVA).**

El costo del ciclo de vida CCV es el valor presente de todos los costos (costo inicial de capital, costos de operación y costos de mantención) asociados a la inversión durante toda su vida útil. Para comparar las dos alternativas -eficiente y estándar- se deberán comparar CCV_1 y CCV_2 respectivamente, los que se expresan mediante las ecuaciones siguientes:



$$\begin{aligned}
 CCV_1 &= I_{est} + \sum_1^n E_{est} \cdot PE \cdot (1+d)^{-n} + \sum_1^n M_{est} \cdot (1+d)^{-n} \\
 CCV_2 &= I_{efic} + \sum_1^n E_{efic} \cdot PE \cdot (1+d)^{-n} + \sum_1^n M_{efic} \cdot (1+d)^{-n}
 \end{aligned}
 \tag{1.9}$$

Donde:

M_{est} : Costo de mantención del equipo estándar

M_{efic} : Costo de mantención del equipo eficiente

A menudo la metodología adoptada apunta a comparar los costos anuales de las dos opciones -la eficiente y el estándar- para ello se recurre a los costos anualizados del ciclo de vida (CCVA) de los equipos, para lo cual se emplean las funciones siguientes:

$$\begin{aligned}
 CCVA_1 &= I_{est} \cdot FRC(d, n) + PE \cdot E_{est} + M_{est} \\
 CCVA_2 &= I_{efic} \cdot FRC(d, n) + PE \cdot E_{efic} + M_{efic}
 \end{aligned}
 \tag{1.10}$$

- **Costo de ahorrar energía (CAE).**

El costo de ahorrar energía (CAE), proporciona una medida para clasificar ordenadamente las opciones de ahorro o abastecimiento de energía sobre una base consistente y que es útil para identificar las inversiones más económicamente eficientes para una empresa o un país. Este indicador se calcula como el costo de capital diferencial anualizado -diferencia entre las inversiones requeridas para la opción eficiente y estándar- más el diferencial de los costos de mantención, dividido por los ahorros anuales de energía.

$$CAE = [FRC(d, n) \cdot (I_{efic} - I_{est}) + (M_{efic} - M_{est})] / (E_{est} - E_{efic})
 \tag{1.11}$$

En este caso el precio de la energía no necesita especificarse, lo que constituye la fortaleza del método, debido a las incertidumbres que normalmente rodean las estimaciones del precio de la energía en un horizonte de largo plazo. La evaluación de la ventaja relativa de la opción eficiente se lleva a cabo comparando el valor de CAE con los precios vigentes de la energía, en la medida que esta diferencia sea significativa, y que aún suponiendo una disminución sustancial de éstos -obviamente, dentro de lo que la lógica permite esperar- el CAE siga siendo inferior a dichos precios, es posible concluir que la opción eficiente es recomendable.

El ejemplo siguiente, resume una aplicación del método para distintas tecnologías y lo compara con el costo evitado de la generación termoeléctrica a carbón.



Tabla 1.5 costos ahorrados

Costo de la energía eléctrica ahorrada (en US\$1990)						
Medida Eficiente	ΔI /unidad US\$	FRC	Mantenimiento \$/año	Costo anual	Energía ahorrada (kWh/año)	CAE US\$/MWh
Motor	181	0,092	0	16,61	1,193	13,92

El costo evitado de la planta termoeléctrica considerada o la tarifa en el caso que no se trate de autoabastecimiento es de US\$ 62,78/MWh, en consecuencia la energía debería reducir sus costos en más de 50% para que las tecnologías eficientes evaluadas no sean rentables.

1.5 Aplicación de la metodología de evaluación a los motores eléctricos.

Como una manera de ilustrar los métodos de evaluación de las alternativas energéticamente eficiente, se ha realizado un ejemplo correspondiente a los motores.

Los parámetros de análisis que se utilizarán para evaluar los beneficios relativos de introducir un motor eficiente en relación con mantener un motor estándar existente o seleccionar un motor eficiente en el caso de un nuevo proyecto o de ampliación de la capacidad productiva son los siguientes.

a) Horas de uso del motor.

Las horas anuales de uso del motor constituyen uno de los parámetros básicos para evaluar un proyecto de eficiencia energética, ya que los beneficios del proyecto varían en forma lineal con el tiempo de uso del equipo. En principio, un motor que opera menos de 2.000 horas al año difícilmente podrá ser reemplazado por un motor eficiente, incluso cuando la alternativa es comprar un motor nuevo, estándar o eficiente.

b) Eficiencias relativas.

En principio, la diferencia de eficiencias entre los motores estándar y eficiente disminuye a medida que aumenta la potencia. En el caso de las potencias mayores, si bien las diferencias relativas son de 1 a 2%, las diferencias absolutas son importantes. Conviene señalar que no siempre los fabricantes que presentan las mejores eficiencias para un determinado tipo de motor (potencia, número de polos, tipo de carcasa, etc.) lideran necesariamente las eficiencias para otros tipos, por lo que se sugiere,



para evaluar proyectos de eficiencia, disponer de la información acerca de las características eléctricas y de precios de los principales fabricantes internacionales.

c) Precio de los motores y costo medio de rebobinado.

Otro de los parámetros importantes para este tipo de evaluación lo constituyen los costos alternativos de las opciones consideradas, incluidos los costos de rebobinado y los precios de los motores nuevos, estándares y eficientes, del tipo abierto y cerrado. No se ha estimado conveniente incluir aquí precios referenciales para estos motores, ya que los precios de lista no guardan relación con los que obtienen efectivamente los compradores, debido a que la práctica normal es otorgar descuentos más o menos significativos, dependiendo de la importancia del comprador; respecto de los precios de lista.

d) Costos de operación y mantención.

Este parámetro debería incluir los cargos por potencia y energía, en el caso que se trate de proyectos nuevos y sólo energía para empresas que se supone tienen un contrato con la empresa eléctrica que especifica la demanda máxima. No se estima relevante cambiar el contrato por la introducción de algunos motores eficientes en reemplazo de los motores estándares existentes en planta. Si bien los costos de mantenimiento se reducen en el caso de los motores eficientes, en los ejemplos que se presentan más adelante este factor ha sido despreciado, lo que no implica que si el evaluador dispone de información confiable acerca de la diferencia de costos de mantención no los incorpore en su análisis, particularmente si ésta es relevante para las conclusiones de su evaluación.

I.6 Elementos de análisis para definir cuando hay que cambiar un motor por otro.

a) Frecuencia de las fallas del motor.

Desde el punto de vista económico, la frecuencia de falla constituye un factor importante en la definición del reemplazo de un motor estándar por uno eficiente, incluso sin necesidad de esperar que el motor falle de nuevo. Los costos derivados de las detenciones de la producción pueden llegar a ser tan elevados que el análisis económico no debería ignorarlos.

b) Nivel de reparación a realizar.

El costo del rebobinado es en muchos casos, para los motores de pequeña potencia, del orden del costo del motor y para los motores mayores, bastante significativo, lo que permite rentabilizar la introducción de los motores eficientes en la medida que el factor de uso no sea excesivamente



reducido (a evaluar en cada caso). Por el contrario, una reparación menor puede no justificar el reemplazo.

c) Obsolescencia del motor existente.

En la tabla 1.3 se presentaron los rendimientos medios de motores fabricados entre 1944 y 1991. Al respecto es posible afirmar que un motor con una utilización de por lo menos 4.000 horas fabricado antes de los años 70.s es un candidato al cambio.

Este factor de utilización es solo referencial, ya que motores con menos horas de uso podrán ser sustituidos dependiendo de las eficiencias relativas, del costo del motor eficiente y del precio de la energía.

I.7. Elementos de análisis para definir cuando hay que introducir un motor nuevo eficiente.

En los puntos anteriores se ha detallado cómo influyen los distintos parámetros de análisis involucrados en la decisión de seleccionar un motor eficiente, en el caso de un proyecto o de una ampliación de la capacidad de producción. En consecuencia, y con fines de recapitulación solamente, se enumeran a continuación los siguientes elementos a tener en cuenta en la selección de un motor eléctrico, eficiente o estándar:

- Costos relativos del motor estándar y eficiente.
- Eficiencias relativas de ambos tipos de motores.
- Horas de uso previstas para el motor.
- Curva de carga del motor.
- Precios de la potencia y de la energía.
- Costos de mantenimiento de ambos tipos de motores.
- Vida útil de los dos tipos de motores.

I.8. Ilustración del proceso de evaluación de la introducción de un motor eficiente para distintas situaciones.

- **Nuevo:** Compara el eventual beneficio económico de comprar un motor Premium nuevo en vez de un modelo Eficiente o Estándar nuevos.



- **Reemplazo de un motor existente:** Compara los costos de operación de un motor existente modelo Estándar con aquellos de un motor nuevo Premium o Eficiente.
- **Rebobinado:** Compara económicamente el costo de reparación (rebobinado), reinstalación y operación de un motor Estándar que debe ser reparado con la compra de un motor Premium o Eficiente.

En los ejemplos que se presentan a continuación se han adoptado los siguientes supuestos:

d = tasa de descuento = 12%

n = vida útil del equipo; 20 años en el caso del motor nuevo y 10 años en el caso del motor rebobinado

Costo de la energía = 4,0 US ¢/kWh

O&M = costos de operación y mantención; por simplicidad sólo se consideran los cargos por energía; vale decir; que no se consideran los menores cargos por demanda máxima ni los eventuales para mayores costos de mantenimiento de los motores estándar.

$I_1 - I_2$ = diferencial de inversiones entre la opción eficiente y la convencional; en que si el motor estándar está en funcionamiento, $I_2 = 0$

En los ejemplos que se presentan a continuación se han considerado motores de 50 HP, del tipo abierto y de 4 polos. Las eficiencias adoptadas corresponden a los valores medios indicados en las tablas 1.2 y 1.3.

a) Opción motor nuevo estándar versus motor nuevo eficiente.

1 Rendimiento motor estándar	0,909
2 Rendimiento motor eficiente	0,939
3 Precio motor estándar	1688 US\$
4 Precio motor eficiente	2066 US\$
5 Factor de carga f_c	0,8
6 Número de horas anuales de operación	6.000 y 4.000
7.a Cons. anual motor estándar	$6.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,909 = 197,0$ MWh
7.b Cons. anual motor estándar	$4.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,909 = 131,3$ MWh
8.a Cons. anual motor eficiente	$6.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,939 = 190,7$ MWh
8.b Cons. anual motor eficiente	$4.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,939 = 127,1$ MWh
9 Inversión diferencial	$2.066 - 1688 = 378$ US\$.
10 Costo anual del capital	$378 * 0,139 = 52,54$ US\$/año.
11.a Costo energía ahorrada , 6000 hrs	$52,54/6,3$ MWh = 0,83 US\$¢/kWh.
11.b Costo energía ahorrada, 4000 hrs	$52,54/4,2$ MWh = 1,25 US\$¢/kWh.



En este inciso el consumo anual de los motores relaciona las horas de trabajo anual, el factor de carga, la potencia en KW y el rendimiento del motor. Cuando se obtiene el resultado para ambos motores se compara notando que no hay mucha diferencia entre el consumo del motor estándar y el eficiente. La inversión diferencial no es más que la diferencia entre el precio del motor eficiente y el estándar, el costo anual del capital es la relación entre la inversión diferencial y el *FRC*. Esta opción será comparada con el inciso **b**).

b) Opción rebobinado versus motor nuevo eficiente.

1 Rendimiento motor rebobinado	0,889 (2% inferior al estándar nuevo)
2 Rendimiento motor eficiente	0,939
3 Valor del rebobinado	706 US\$
4 Precio motor eficiente	2,066 US\$
5 Factor de carga f_c	0,8
6 Número de horas anuales de operación	6.000 y 4.000
7.a Cons. anual motor rebobinado	$6.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,889 = 201,4$ MWh
7.b Cons. anual motor rebobinado	$4.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,889 = 134,3$ MWh
8.a Cons. anual motor eficiente	$6.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,939 = 190,7$ MWh
8.b Cons. anual motor eficiente	$4.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,939 = 127,1$ MWh
9 Inversión diferencial	1.360 US\$.
10 Costo anual del capital	$2.066 * 0,139 - 706 * 0,177 = 162,2$ US\$/año.
11.a Costo de energía ahorrada 6,000 hrs	$162,2/10,7$ MWh = 1,52 US\$/kWh
11.b Costo de energía ahorrada, 4,000 hrs	$162,2/7,2$ MWh = 2,25 US\$/kWh

Como en el caso anterior; la introducción del motor eficiente es más económica que la opción convencional, en este caso el rebobinado del motor existente.

c) Opción motor obsoleto funcionando versus motor nuevo eficiente.

1. Rendimiento motor obsoleto	0,895 (2% inferior al estándar del año 1961).
2. Rendimiento motor eficiente	0,939
3. Precio motor eficiente	2,066 US\$
4. Factor de carga f_c	0,8
5. Número de horas anuales de operación	6.000 y 4.000
6a. Cons. anual motor obsoleto	$6.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,895 = 200,0$ MWh
6b. Cons. anual motor obsoleto	$4.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,895 = 133,4$ MWh
7a. Cons. anual motor eficiente	$6.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,939 = 190,7$ MWh
7b. Cons. anual motor eficiente	$4.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,939 = 127,1$ MWh
9. Inversión diferencial	2.066 US\$.
10. Costo anual del capital	$2.066 * 0,139 = 287,2$ US\$/año.
11a. Costo de energía ahorrada 6,000 h	$287,2/9,4$ MWh = 3,06 US\$/kWh
11b. Costo de energía ahorrada, 4,000 h	$287,2/6,3$ MWh = 4,46 US\$/kWh



En este caso, la rentabilidad del proyecto sería negativa para 4.000 horas de uso del motor; salvo que se considerara además el cargo por potencia, despreciado en el cálculo. La posibilidad de que el ahorro de potencia pueda ser considerado como un ahorro efectivo dependerá de la viabilidad de cambiar en el contrato el cargo por demanda máxima, lo que sería quizás atractivo si se trata de cambiar un número importante de motores. Por el contrario, si el motor trabaja 6,000 horas/año, el cambio sería rentable.

1.9. Conclusión

- Se demuestra que la rentabilidad de las opciones eficientes energéticamente dependerá de la inversión diferencial, de la magnitud de la energía ahorrada, del consumo unitario de la energía ahorrada, de la vida útil de la inversión y de la tasa de descuento.
- Se definen los métodos generales para la evaluación de las inversiones en eficiencia energética, planteando que la tasa de descuento es la que permite comparar cuantitativamente los gastos y ahorro que ocurren en fechas diferentes siendo esta una decisión basada en la política de empresa que definen el umbral de rentabilidad a partir del cual están dispuesto a invertir.
- Los métodos de evaluación quedan bien explicado, utilizando en nuestro trabajo el costo de ahorrar energía (CAE).
- Se definen los parámetros que se utilizan en la metodología de la evaluación. aplicada a los motores eléctricos, dejando claro que el precio de los mismos y el costo medio del rebobinado constituyen parámetros importantes para este tipo de evaluación. Estimando que los precios de lista en algunos casos no guardan relación con los que obtienen efectivamente los compradores, debido a que en la práctica lo normal es otorgar descuentos más o menos significativos dependiendo de la importancia del comprador.
- Se obtienen los elementos para definir cuando hay que cambiar un motor o introducir uno nuevo eficiente.
- Se ilustran los tres escenarios de la evaluación del proceso: Nuevo motor, Rebobinado y Reemplazo de un motor existente. Se demuestra que el rebobinado del motor no es muy factible porque en motores de baja potencia cuesta alrededor del precio de un nuevo motor y en los motores de mayor potencia es bastante significativo.

CAPÍTULO II



CAPITULO II: Evaluación del Rendimiento en Motores de Inducción y Factores Influyentes.

II.1. Introducción.

II.2. Determinación del Rendimiento.

II.3. Razones para Determinar la Carga del Motor.

II.4. Determinación de la Carga del Motor.

II.5. Determinación de la eficiencia del motor.

II.6. Conclusiones.

II.1. Introducción.

De la potencia eléctrica total consumida por un motor eléctrico de la red, la mayor parte es entregada al mecanismo accionado y es, por tanto, aprovechada. Ahora bien, una parte se pierde dentro del motor, como consecuencia de los procesos electromagnéticos que se llevan a cabo en su interior, convirtiéndose en calor y tiene dos efectos negativos: aumentar el consumo de energía eléctrica del motor y elevar la temperatura del aislamiento de la máquina disminuyendo su vida útil si sobrepasa un límite. El objetivo de este trabajo es precisamente determinar el consumo con el objetivo de analizar las posibles medidas a tomar para disminuirlo y aumentar la eficiencia energética de las instalaciones industriales. Las pérdidas de potencia (y, por tanto, de energía si consideramos también el tiempo de operación) que ocurren en un motor son de tres tipos:

Las pérdidas variables: que dependen del cuadrado de la corriente que circula por el motor y, por tanto, de la carga que lleva en su eje. Evidentemente son función también de las resistencias de los devanados.

Las pérdidas constantes: que son a su vez de dos tipos: las de acero o magnéticas y las mecánicas. Las primeras ocurren en el acero activo de la máquina y dependen del flujo magnético el cual es proporcional a la relación entre la tensión y la frecuencia y, por tanto, si estas variables no varían, estas pérdidas pueden considerarse también constantes. Las pérdidas mecánicas son debidas a la rotación de la máquina por la fricción entre las partes fijas y móviles y el batimiento del aire en su interior. Dependen de la velocidad de rotación. Como en la inmensa mayoría de los casos la

velocidad del motor de inducción varía muy poco con la carga, estas pérdidas suelen considerarse también constantes.

Las pérdidas adicionales o indeterminadas: no contempladas en los acápites anteriores y debidas a fenómenos tales como la variación de flujo a la que da lugar el ranurado del estator y el rotor, las corrientes parásitas en el interior de los conductores, el flujo de dispersión que eventualmente pueda circular en las partes no activas de la máquina y otras. Estas pérdidas son extraordinariamente difíciles de considerar o determinar en la práctica y están entre el 1% y el 3% de la potencia útil de la máquina.

II.2. Determinación del Rendimiento

El rendimiento actual de un motor puede diferir de su rendimiento original nominal por diversas causas que se pueden agrupar como sigue:

- a) Condiciones electromecánicas de operación diferentes a las nominales
- b) Condiciones ambientales diferentes de las nominales
- c) Estado deficiente del motor (por reparaciones)

Así, el rendimiento actual del motor corresponde al rendimiento de placa sujeto a correcciones, las que quedan representadas en la siguiente expresión:

$$\eta = K_v \cdot K_f \cdot K_d \cdot K_c \cdot K_t \cdot K_a \cdot K_r \cdot \eta_0 \quad (2.1)$$

Siendo:

η_l = Rendimiento del motor corregido.

η_0 = Rendimiento de placa del motor a 100% de carga.

La expresión anterior considera que la eficiencia original del motor se modifica debido a las circunstancias siguientes:

- trabajar con voltaje diferente al nominal (K_v y K'_v)
- trabajar con frecuencia diferente a la nominal (K_f y K'_f)
- trabajar con voltaje y/o corrientes desequilibradas (K_d y K'_d).
- trabajar con carga diferente a la nominal (K_c y K'_c)
- trabajar a distintas temperaturas ambiente (K_t y K'_t)

- trabajar en distintas alturas sobre el nivel del mar (K_a y $K'a$)
- reparaciones (rebobinados) en la vida del motor (K_r y $K'r$)

En la sección siguiente se entregan los factores de corrección que modifican el valor de la eficiencia tanto del motor patrón como alternativo.

- **Factores para la corrección de la eficiencia**

Tanto la eficiencia del motor patrón como la de los motores alternativos son corregidas por las condiciones de operación y su historial de reparaciones. La corrección es diferente para motores nuevos y para motores antiguos, debido a que en los motores nuevos (eficientes) las pérdidas Joule están significativamente disminuidas en el estator, luego la distribución de pérdidas es diferente para ambos casos. Igualmente, el diseño actual de los motores es tal que el máximo de rendimiento se logra a un 75% de la carga, lo que también altera la distribución de pérdidas con carga nominal. Esto se refleja en que las relaciones para los factores K cambian numéricamente.

- **Factor de corrección que considera el efecto de trabajar con el motor actual a voltaje diferente del nominal.**

Considera el efecto sobre el rendimiento cuando se trabaja con voltaje diferente del nominal. En este caso, cabe indicar que la situación considerada es aquella que, debido a la mala regulación de voltaje de la instalación, el motor queda operando con voltaje aplicado usualmente inferior al nominal. Su rango de validez es para tensiones menores a 110% de la tensión nominal (es decir, no considera la saturación de la máquina). Su efecto se centra en cuantificar como varían las pérdidas Joule (estator y rotor), en el hierro y mecánicas (estas últimas se pueden considerar constantes).

El factor de corrección para un motor estándar es:

$$K_v = \frac{I}{\eta_0 + (I - \eta_0) \cdot \left\{ I + 0.6 \cdot \left[\left(\frac{V_n}{V_a} \right)^2 - 1 \right] - 0.2 \cdot \left[I - \left(\frac{V_a}{V_n} \right)^2 \right] \right\}} \quad (2.2)$$

Donde:

η_0 = Eficiencia nominal del motor estándar

V_n = Voltaje nominal (de placa).

V_a = Voltaje con que se alimenta el motor en la realidad (promedio de las tres fases).

El factor de corrección para un motor eficiente es:

$$Kv = \frac{1}{\eta_{ef,n} + (1 - \eta_{ef,n}) \cdot \left\{ 1 + 0.5 \cdot \left[\left(\frac{Vn}{Va} \right)^2 - 1 \right] - 0.3 \cdot \left[1 - \left(\frac{Va}{Vn} \right)^2 \right] \right\}} \quad (2.3)$$

Donde:

$\eta_{ef,n}$ = Eficiencia nominal del motor eficiente

Vn = Voltaje nominal (de placa)

Va = Voltaje operación (promedio de las tres fases).

- **Factor que considera el efecto de trabajar con el motor actual a frecuencia distinta de la nominal.**

La variación de la frecuencia de alimentación afecta principalmente las pérdidas en el hierro y las mecánicas (roce y ventilación). Al igual que en el caso de la corrección por voltaje, no se considera saturación magnética en la máquina. Los fabricantes aseguran que este fenómeno no ocurre si la frecuencia es a lo sumo un 5% inferior a la frecuencia nominal.

El factor de corrección para el motor estándar es:

$$Kf = \frac{1}{\eta_0 + (1 - \eta_0) \cdot \left[0.2 \cdot \left(\frac{fn}{fa} \right) + 0.05 \left(\frac{fa}{fn} \right) + 0.05 \left(\frac{fa}{fn} \right)^2 + 0.7 \right]} \quad (2.4)$$

Donde:

η_0 = Eficiencia nominal motor estándar

fn = Frecuencia nominal (de placa)

fa = Frecuencia con que opera el motor en la realidad (frecuencia leída).

El factor de corrección del motor eficiente es:

$$Kf = \frac{1}{\eta_{ef,n} + (1 - \eta_{ef,n}) \cdot \left[0.3 \left(\frac{fn}{fa} \right) + 0.06 \left(\frac{fa}{fn} \right) + 0.06 \left(\frac{fa}{fn} \right)^2 + 0.58 \right]} \quad (2.5)$$

Donde:

$\eta_{ef,n}$ = Eficiencia nominal motor eficiente

f_n = Frecuencia nominal (de placa)

f_a = Frecuencia de operación (frecuencia leída).

- **Factor que considera el efecto de trabajar con voltaje y/o impedancias desequilibradas del motor actual.**

Cuando los 3 enrollados de un motor quedan sometidos a voltajes de diferentes magnitudes, se alteran los flujos magnéticos y las pérdidas en el núcleo con respecto a las condiciones nominales. Igualmente, el desequilibrio de voltajes provoca un desequilibrio en las corrientes por los 3 enrollados, modificando las pérdidas Joule respecto de las condiciones nominales.

El factor de corrección para el motor estándar es:

$$K_d = \frac{I}{\eta_0 + (1 - \eta_0) \left[0.6 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot (f_{des_I})^2 \right) + 0.3 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot (f_{des_V})^2 \right) + 0.1 \right]} \quad (2.6)$$

y para el motor eficiente es:

$$K_d = \frac{I}{\eta_{ef,n} + (1 - \eta_{ef,n}) \left[0.5 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot (f_{des_I})^2 \right) + 0.4 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot (f_{des_V})^2 \right) + 0.1 \right]} \quad (2.7)$$

Donde:

η_0 = Eficiencia nominal motor estándar

$\eta_{ef,n}$ = Eficiencia nominal motor eficiente

f_{des_I} = Factor de desequilibrio de corriente.

$$f_{des_I} = \frac{|I_{abc}|}{I_p} \quad (2.8)$$

Con $|I_{abc}|$ = mayor valor $\{ |I_p - I_a|, |I_p - I_b|, |I_p - I_c| \}$ donde: I_a, I_b, I_c son las corrientes de fase.

$$I_p = (I_a + I_b + I_c)/3$$

f_{des_V} = Factor de desequilibrio de voltajes.

$$f_{des_V} = \frac{|V_{abc}|}{V_p}$$

Con $|V_{a,b,c}|$ = mayor valor $\{ |V_p - V_a|, |V_p - V_b|, |V_p - V_c| \}$ donde: V_a, V_b, V_c son los voltajes de fase.

$$V_p = (V_a + V_b + V_c)/3$$

- **Factor que considera el efecto de trabajar con el motor actual con carga diferente a la nominal.**

Las pérdidas Joule son las más afectadas cuando el motor trabaja con un grado de carga diferente del valor nominal. El grado de carga se define como la razón entre la potencia mecánica del motor en operación y la potencia nominal. Cuando la información del motor contiene la eficiencia a 50%, 75%, 100% de la carga, se determina la parábola que pasa por estos tres puntos. Seguidamente se interpola la eficiencia en el factor de carga establecido por el usuario. En el caso que una de las eficiencias (a 50%, a 75%) no esté informada, se asume que el comportamiento del factor de corrección sigue la expresión siguiente para el motor estándar:

$$K_c = \frac{f_c}{f_c \cdot \eta_0 + (1 - \eta_0) \cdot (0.6 \cdot f_c^2 + 0.4)} \quad (2.9)$$

Donde:

η_0 = Eficiencia nominal motor estándar

f_c = Factor de carga (0/1)

Para el motor eficiente el coeficiente es:

$$K'_c = \frac{f'_c}{f'_c \cdot \eta_{ef.n} + (1 - \eta_{ef.n}) \cdot (0.5 \cdot f'_c^2 + 0.5)} \quad (2.10)$$

Donde:

$\eta_{ef.n}$ = Eficiencia nominal motor eficiente

f'_c = Factor de carga motor nuevo (0/1).

Cuando la potencia del motor nuevo es distinta a la del motor actual, se utiliza un factor de carga corregido tal que:

$$f'c = \frac{Pa}{Palter} \cdot fc \quad (2.11)$$

Donde:

Pa es la potencia del motor actual y $Palter$ es la potencia del motor nuevo.

Estas expresiones son válidas para cargas menores o iguales al 115% de la carga nominal del motor.

- **Factor que considera el efecto de la temperatura ambiente sobre el trabajo del motor actual.**

La temperatura ambiente afecta la temperatura de los enrollados del motor y por ende sus pérdidas Joule y su rendimiento. Las normas obligan a los fabricantes a asegurar las características de placa del motor para una temperatura ambiente de 40°C. El factor para el motor estándar es:

$$Kt = \frac{I}{\eta_0 + (1 - \eta_0) \cdot \left[0.6 \cdot \left(\frac{334.5 + Ta}{374.5} \right) + 0.4 \right]} \quad (2.12)$$

Para el motor eficiente el factor de corrección es:

$$K't = \frac{I}{\eta_{ef.n} + (1 - \eta_{ef.n}) \cdot \left[0.5 \cdot \left(\frac{334.5 + Ta}{374.5} \right) + 0.5 \right]} \quad (2.13)$$

Donde:

η_0 = Eficiencia nominal motor estándar

$\eta_{ef.n}$ = Eficiencia nominal motor eficiente

Ta = Temperatura ambiente promedio [°C], calculada como:

$$Ta = \frac{(\text{Temperatura máxima} + \text{Temperatura mínima})}{2} \quad (2.14)$$

El rango de la temperatura para la cual la expresión es válida corresponde a $0 < Ta < 60$.

- **Factor que considera el efecto de la altura sobre el nivel del mar en el trabajo del motor actual.**

A mayor altura sobre el nivel del mar, el enrarecimiento del aire hace más dificultosa la transferencia de calor por convección forzada desde las superficies externas del motor al medio ambiente. Esto provoca la elevación de la temperatura de los enrollados y por ende de las pérdidas Joule. Las normas exigen a los fabricantes asegurar el rendimiento de placa para una altura de 1000 metros sobre el nivel del mar.

$$Ka = \frac{I}{\eta_0 + (I - \eta_0) \cdot \left[\frac{0.6}{(a - b \cdot h/1000)} + 0.4 \right]} \quad (2.15)$$

y para el motor eficiente:

$$K'a = \frac{I}{\eta_{ef,n} + (I - \eta_{ef,n}) \cdot \left[\frac{0.5}{(a - b \cdot h/1000)} + 0.5 \right]} \quad (2.16)$$

Donde:

η_0 = Eficiencia nominal motor estándar

$\eta_{ef,n}$ = Eficiencia nominal motor eficiente

h = «Altura» variable sacada de la ventana «Catastro de motores, Operación».

Esta expresión es válida para el rango $0 < h < 4.000$

$ns > 1.200$ rpm entonces $a = 1,087$ y $b = 0,087$

$ns \leq 1.200$ rpm entonces $a = 1,06$ y $b = 0,06$

ns = Corresponde a la velocidad de giro (RPM) del motor. Este valor está sacado de la ventana «Catastro de motores, Datos de operación»

- **Factor que considera el efecto de reparaciones (rebobinados) en la vida del motor actual.**

Las reparaciones que sufre un motor durante su vida, en particular los rebobinados, van dañando el núcleo ya sea por el calentamiento de la falla misma del enrollado o, principalmente, por el proceso de extracción de las bobinas dañadas (donde se aplican golpes y calor) y colocación de las nuevas



bobinas. Estadísticamente se ha encontrado que el rendimiento del motor suele reducirse entre un 1% y 2% después de cada rebobinado (Válido tanto para motores estándar, como eficientes).

$$Kr = 0,985 Nr$$

Donde:

Nr = Número de rebobinados en la vida del motor.

Para dar validez al comportamiento de estos factores se determina el rendimiento corregido para un motor de los que se analizan en el capítuloIII, y se compara ambos resultados (motorII obsoleto con el nuevo motor). Quedando reflejado en la siguiente tabla:

Tabla2.1 Cálculos obtenidos de las formulas a partir de la 2.1 hasta la 2.16.

Factor para la corrección de la eficiencia	Motor estándar	Motor eficiente
Kv :	0.21	0.28
Kf :	1	1
Kd :	-	-
Kc :	0.93	1
Kt :	1	1
Ka :	0.51	1
Kr :	1.96	-
Rendimiento	0.19	0.26

Estos factores disminuyen el rendimiento del motor ya que el mismo trabajará en condiciones anormales para su funcionamiento. Pero se comprueba que a motores de alta eficiencia muy bien seleccionados tienen menor influencia.

II.3. Razones para Determinar la Carga del Motor

Muchos motores funcionan de 50 a 100% de su carga nominal. La eficiencia máxima generalmente se encuentra cerca del 75% de la carga nominal. La eficiencia del motor de inducción tiende a decrecer bruscamente por debajo del 50%. De forma general, el rango de buena eficiencia varía con la potencia del motor y tiende a ser mayor para grandes motores. Un motor es considerado subcargado cuando la eficiencia se encuentra en el rango que cae bruscamente, también cae el factor de potencia, pero en menor grado que la eficiencia, y la carga en el eje. La sobrecarga del motor produce sobrecalentamiento y pérdidas de eficiencia. Muchos motores son diseñados con un **factor**

de servicio que admiten sobrecargas ocasionales. El factor de servicio es un multiplicador que indica cuanto puede ser sobrecargado un motor bajo condiciones ambientales ideales. Este factor de servicio para el trabajo continuo reduce la eficiencia y el tiempo de vida útil.

Nunca debe operar sobrecargado cuando el voltaje está por debajo del nominal o cuando el enfriamiento es afectado por altitud, alta temperatura del ambiente, o por la superficie lisa del motor. Si en su operación usas equipamientos que operan por un largo período bajo el 50% de la carga, considere hacer modificaciones. Muchas veces los motores están sobredimensionados porque es muy cómodo para condición de pico, tales como cuando una bomba tiene que satisfacer ocasionalmente alta demandas.

Determinando si su motor está con la carga adecuada usted tiene la posibilidad de la toma de decisión acerca de cuando reemplazarlo y cual es la selección del mismo. La medición de la carga de un motor es relativamente rápida y fácil cuando se usan las técnicas que se situarán más abajo.

Para motores que operan sobre 1000 horas por año se recomienda ensayarlos y usando el análisis de los resultados, dividirlo dentro de las siguientes categorías:

- Motores que están significativamente sobredimensionado y subcargados — reemplace con otro más eficiente, dimensión y modelo apropiado en la próxima oportunidad.
- Motores que están moderadamente sobredimensionado y subcargados — reemplace con otro más eficiente, dimensión y modelo apropiado cuando este falle.
- Motores que están correctamente dimensionado pero de eficiencia estándar – reemplace estos con motores de eficiencia Premium cuando estos fallen.

II.4. Determinación de la Carga del Motor

1). Medición de la potencia de entrada.

Se puede cuantificar el estado de carga del motor por comparación directa de la potencia de entrada medida bajo carga y la potencia requerida cuando el motor opera a capacidad nominal.

Esta relación se expresa por la ecuación:

$$P_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot PF}{1000} \quad (2.17)$$

Donde:

P_1 = Potencia trifásica en kW

V = Valor efectivo de la tensión media aritmética medido entre línea a línea para las tres fases

I = Valor efectivo medio de la corriente medida en las tres fases.

PF = Factor de potencia en pu.

$$P_{in} = hp \cdot \frac{0.7457}{\eta_{in}} \quad (2.18)$$

Donde:

P_{in} = Potencia de entrada a carga nominal en kW.

hp = Potencia nominal de salida en horsepower

η_{in} = Eficiencia a plena carga.

$$kc = \frac{P_i}{P_{in}} \cdot 100\% \quad (2.19)$$

Donde:

kc = Potencia de salida en % de la potencia nominal

P_i = Potencia trifásica medida en kW

P_{in} = Potencia de entrada a plena carga en kw.

2). Medición de la corriente de línea

El método de estimación de la carga por la corriente se recomienda cuando solo es posible la medición de la corriente. La corriente que demanda un motor es aproximadamente lineal respecto a la carga, cayendo por debajo del 50% para baja carga. Para los puntos de carga por encima del 50%, las corrientes de magnetización requerida, el factor de potencia y la curva de corriente comienzan un incremento no lineal. En la región de baja carga la medición de corriente no es indicador útil de la carga.

La corriente nominal es aplicada solo a la tensión nominal del motor. El valor efectivo de la corriente medida tiene que ser corregido por la tensión. Si la tensión de alimentación es mayor que la indicada en la chapa del motor, el valor de la corriente medida será correspondientemente mayor que el esperado para condiciones nominales y tiene que ser ajustado. La ecuación que relaciona la carga del motor con los valores medidos de corriente se muestra en la ecuación 4.

$$k_c = \frac{I}{I_r} \cdot \frac{V}{V_r} \cdot 100\% \quad (2.20)$$

Donde:

k_c = Potencia de salida en % de la potencia nominal

V = Valor efectivo de la tensión media medido entre línea a línea para las tres fases

V_r = Tensión nominal.

I = Valor efectivo medio de la corriente medida en las tres fases.

I_r = Corriente nominal.

3) Método del deslizamiento.

El método para la estimación de la carga del motor se recomienda cuando solo es posible la medición de la velocidad de operación.

La velocidad sincrónica de un motor de inducción depende de la frecuencia de la red alimentación y del número de polos con lo cual fue enrollado. Para las frecuencias altas, el motor funciona a mayor velocidad.

La velocidad del eje de un motor es menor que la sincrónica, esta diferencia es referida como un deslizamiento. El incremento del deslizamiento es proporcional a la carga que mueve el motor, por ejemplo un motor funciona con un 50% de carga, tiene un deslizamiento medio entre la velocidad nominal y sincrónica.

Usando un tacómetro se puede medir la velocidad del eje y es posible calcular la carga del motor.

La carga del motor puede ser estimada con el deslizamiento medido según se muestra en la figura 5.

$$k_c = \frac{Slip}{S_s - S_r} \cdot 100\% \quad (2.21)$$

Donde:

k_c = Potencia de salida en % de la potencia nominal

$Slip$ = Velocidad sincrónica – Velocidad medida en rpm

S_s = Velocidad sincrónica en rpm

S_r = Velocidad a plena carga en rpm.

El método de velocidad/deslizamiento para determinar la carga es ampliamente utilizado, por su simplicidad y seguridad. La construcción de la mayoría de los motores hace accesible el eje a través

de una lámpara estroboscópica. La precisión del método del deslizamiento, por lo general, es limitada, por la tolerancia.

El deslizamiento también varía inversamente con respecto al cuadrado de la tensión teniendo sus tolerancias. Un factor de corrección puede ser insertado en la ecuación de la carga a través del deslizamiento. La misma con el voltaje compensado puede ser calculada por la ecuación 2.22.

$$k_c = \frac{Slip}{(S_s - S_n) \cdot \left(\frac{V_r}{V}\right)^2} \cdot 100\% \quad (2.22)$$

Donde:

k_c = Potencia de salida en % de la potencia nominal

$Slip$ = Velocidad sincrónica – Velocidad medida en rpm

S_s = Velocidad sincrónica en rpm

S_r = Velocidad a plena carga en rpm.

V = Valor efectivo de la tensión media medido entre línea a línea para las tres fases

V_r = Tensión nominal.

El método del deslizamiento es generalmente no recomendado para la determinación de la carga del motor en el área.

II.5. Determinación de la eficiencia del motor

Por definición es la relación entre la potencia de salida o útil a la potencia total de entrada y se expresa comúnmente en porcentaje como se muestra en la ecuación:

$$\eta = \frac{0.7457 \cdot hp \cdot k_c}{P_i} \cdot 100\% \quad (2.23)$$

Donde:

η = Eficiencia de operación en %

hp = Potencia nominal en horsepower

k_c = Factor de carga

P_i = Potencia trifásica de entrada en kW

La figura 2.1 representa la variación del rendimiento con la carga bajo determinadas condiciones.

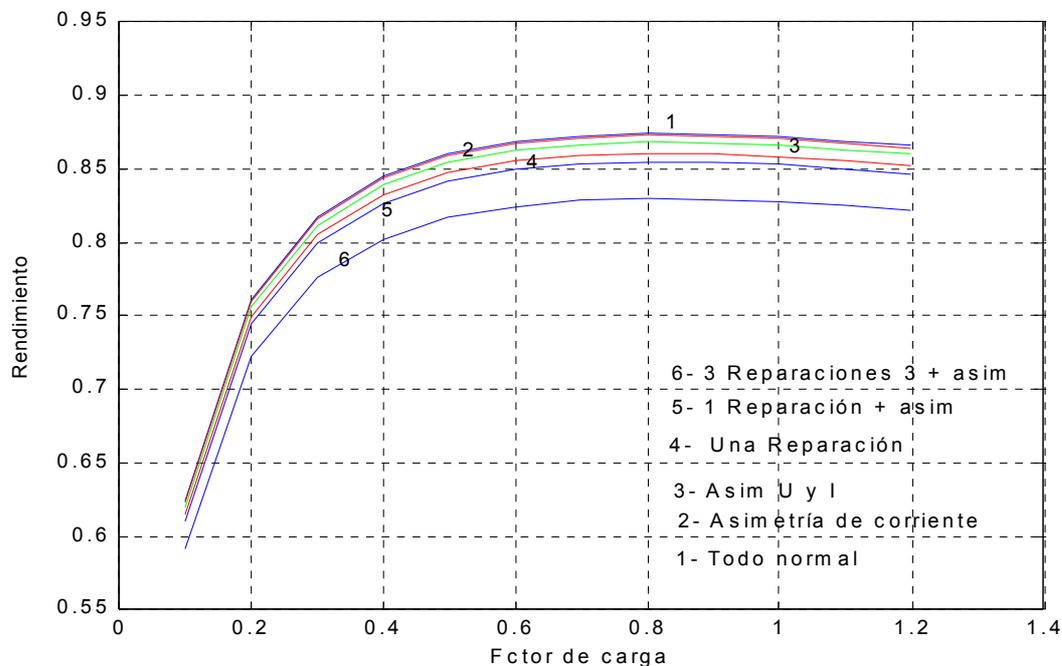


Figura 2.1 Variación del rendimiento con la carga.

Del gráfico se realizó un análisis pertinente del comportamiento de los diferentes parámetros que en el se relacionan obteniendo que:

1. Todo continúa normal U_N balanceado sin reparación.
2. Existe una asimetría de corriente provocada por una tensión despreciable.
3. Existe asimetría cuantificable de tensión y corriente.
4. Todo normal, comentando que fue reparado una vez.
5. Tiene una reparación más asimétrica de tensión y corriente.
6. Tres reparaciones mas asimétrica.

II.6. Conclusiones.

- Se plantea que la potencia eléctrica que se pierde dentro del motor es consecuencia de los procesos electromagnéticos causando efectos negativos: aumentan el consumo de energía



eléctrica del motor y elevan la temperatura del aislamiento de la máquina disminuyendo la vida útil si sobrepasa un límite.

- Se define la expresión para determinar el rendimiento del motor corregido. Pues en mucho de los casos puede estar operando a un valor diferente del nominal producto a diferentes causas expuesta en el trabajo.
- Se deja claro como influye cada factor en el rendimiento, sobre que parámetros actúan y la expresión que los identifica.
- Se demuestra la importancia del estado de carga del motor a la hora de analizar la eficiencia ya que nos permite tomar la decisión de cuando reemplazar un motor y como será la selección del mismo.
- Se definen los tres casos con los que se puede determinar el coeficiente o factor de carga del motor, utilizando en nuestro trabajo el método de la medición de la potencia.
- Se define la eficiencia del motor y como se determina una vez analizados los factores que intervienen en la expresión.

CAPÍTULO III



Capítulo III. Evaluación del Ahorro de Energía con el uso de Motores Eficiente.

III.1. Introducción.

III.2. Elementos Fundamentales a tener en cuenta.

III.3. Expresiones empleadas.

III.4. Caso de estudio.

III.5. Conclusiones.

III.1. Introducción:

En este capítulo se analiza el comportamiento de seis motores de inducción. Con el objetivo de evaluar el ahorro de energía enmarcado en el escenario del reemplazo de un motor obsoleto por uno nuevo eficiente empleando para la selección de los mismos un programa. La metodología empleada es la expuesta en los capítulos anteriores con el fin de demostrar que es válida para motores en uso. En este capítulo se analizan los elementos fundamentales a tener en cuenta, las expresiones empleadas y el caso de estudio.

III.2. Elementos Fundamentales a tener en cuenta.

Para la metodología expuesta en capítulos anteriores se tomará una muestra de seis motores que se encuentran funcionando en el CAI. Loynaz Echeverría Cordobés, tomada del trabajo realizado por el programa energético que lleva a cabo el país. Se tuvieron en cuenta una serie de factores que intervienen en el funcionamiento del mismo así como el escenario en el cual nos enmarcaríamos.

- Potencia nominal del motor
- Potencia real del motor
- Rendimiento
- Factor de carga
- Horas de trabajo anual
- Vida útil del equipo
- Velocidad
- Voltaje



- Números de polos
- Números de motores
- Costo de la energía: 4,0 US ¢/kWh)

Tabla 3.1 Datos de los motores existentes

motor	Pn(W)	Pr(W)	η	Fc	H/anual	H/anual	V/útil	U(V)	N/polos	rpm
I	30	6,5	0,43	0,20	6000	4.000	20	440	2	1800
II	75	25	0,55	0,30	6000	4.000	20	440	4	3600
III	55	23.6	0,85	0.40	6000	4.000	20	440	4	3600
IV	45	30.6	0,87	0,68	6000	4.000	20	440	4	3600
V	250	187	0,77	0,70	6000	4.000	20	440	4	3600
VI	175	150	0,88	0,85	6000	4.000	20	440	4	3600

La tabla 3.1 muestra los valores nominales y reales de seis motores de inducción. Realizando un análisis pertinente a los parámetros pudimos percatarnos que no presentan un adecuado funcionamiento, contando con bajo rendimiento y factor de carga a demás estos motores tienen un tiempo de operación mayor que el tiempo de vida útil. Enmarcándonos en el escenario del reemplazo de un motor obsoleto por uno nuevo eficiente.

Analizando los eventuales beneficios económicos de reemplazar un motor de eficiencia Estándar en operación por un motor Premium o Eficiente le permite al usuario decidir si es económicamente conveniente reemplazar motores en operación, viejos, de baja eficiencia, y sobredimensionados. El análisis considera el precio total de compra del nuevo motor más sus costos de instalación.

Para ayudar en la toma de decisiones con el fin de hacer la mejor selección, los análisis de los módulos **Análisis de Ahorros del Motor** y del **Mejor Disponible** son capaces de examinar el reemplazo de un motor sobredimensionado y en bajas condiciones de carga por un motor Premium que esté acoplado a los requerimientos reales de carga. Los motores que operan a una carga constante de menos de un 40% de plena carga son candidatos a ser reemplazados con un motor de potencia inferior Premium. Debido a la incertidumbre que hay respecto a la estimación de carga, se recomienda que el nivel de carga del reemplazo no exceda el 85 %.

Para hacer uso de esta capacidad simplemente cambie la potencia nominal del motor Premium. La carga en el motor de baja potencia se recalcula inmediatamente, basándose en la potencia del motor



de reemplazo así como en la potencia y el grado de carga del motor existente. Luego se determina la eficiencia del motor de más baja carga a ese punto de carga. Si se utiliza el factor de corrección de carga/velocidad para cargas centrifugas, la carga impuesta sobre el motor de baja potencia se borra automáticamente. La nueva carga se basa en la potencia nominal del motor de reemplazo y del uso de las leyes de afinidad, tomando en cuenta la velocidad de operación del mismo, como también la velocidad del motor sobredimensionado.

Para el mismo se realizó una base de datos en Microsoft Excel y la selección del motor fue mediante el software Programa Internacional para la Selección de motores y el Análisis de Ahorro.

III.3. Expresiones empleadas.

Cuando nos situamos en el reemplazo de un motor obsoleto por uno nuevo eficiente tomando como base el trabajo de los mismos para 6000 y 4000 horas al año. Nos apoyamos en la metodología expuesta en los capítulos anteriores para llevarlo a la práctica con el objetivo de demostrar lo planteado.

$$K_c = \frac{P_R}{P_N} \quad (3.1)$$

Donde:

K_c : Factor de carga

P_R : Potencia real del motor

P_N : Potencia nominal

Con el factor de carga determinamos en que por ciento de la carga nominal el motor está operando y hasta que punto podemos elevar su eficiencia.

$$CA_1 = \frac{NA \cdot K_c \cdot P_N}{(\eta \cdot 1000)} \quad (3.2)$$

Donde:

CA_1 : Consumo anual del motor obsoleto

NA : Número de horas anuales

η : Rendimiento



$$CA_2 = \frac{NA \cdot K_c \cdot P_N}{(\eta \cdot 1000)} \quad (3.3)$$

CA₂: Consumo anual del motor eficiente

$$CA_c = I_d \cdot FRC \quad (3.4)$$

Donde:

CA_c: Costo anual del capital

I_d: Inversión diferencial

$$CE_a = \frac{CA_c}{(CA_1 - CA_2)/10} \quad (3.5)$$

Donde:

CE_a: Costo de energía ahorrada

III.4. Caso de Estudio

La tabla 3.2 recoge los resultados del reemplazo de los motores. El objetivo de la misma ha sido analizar el comportamiento del consumo de energía anual y obtener cuanto se ahorra con la propuesta planteada.

En este caso se ha trabajado con un rango de potencia desde (30- 175 KW). Para seleccionar la potencia del nuevo motor se analiza el factor de carga y el rendimiento del obsoleto. Si este se encuentra operando por debajo del 40% de su carga nominal es candidato al reemplazo por un nuevo motor.

En el caso del motor I, presenta una potencia de 30KW para un valor de 8,71Hp, el K_c es de 0,20 muy bajo y un rendimiento de 0,43. Analizando todos estos valores se propone un motor de 10Hp manteniendo la velocidad (rpm), número de polos y la tensión del motor obsoleto constante para la selección del nuevo motor logrando en el mismo un nuevo factor de carga igual a 0,84.

La potencia real del motor actual no es más que el valor en KW al que está trabajando el motor obsoleto. El rendimiento de los motores en uso se obtuvo a través de las mediciones realizadas en el CAI. Loynaz y el de los nuevos motores es el valor al cual queríamos elevar el rendimiento dando la posibilidad el programa empleado para la selección de los equipos.



Tabla3.2 Base de datos

Elementos	Motor I	Motor II	Motor III	Motor IV	Motor V	MotorVI
Potencia nominal del motor obsoleto (kw)	30	75	55	45	250	175
Potencia nominal del motor a seleccionar (kw)	7,46	29,84	29,84	37,3	223,8	186,5
Potencia real del motor actual	6,5	25	23,6	30,6	187	150
Potencia en (hp) del motor real	8,71	33,51	31,64	41,02	250,67	201,07
1. Rendimiento motor obsoleto	0,43	0,55	0,85	0,87	0,77	0,88
2. Rendimiento motor eficiente	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
3. Precio motor eficiente	663	2.392	2.392	1.697	9.846	8.238
4. Factor de carga (fc) del motor obsoleto	0,20	0,30	0,40	0,68	0,70	0,85
4. Factor de carga (fc) del motor eficiente	0,84	0,84	0,79	0,82	0,84	0,80
5. Número de horas anuales de operación	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
5. Número de horas anuales de operación	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
6a. Consumo anual motor obsoleto MWh 6000	83,72	183,11	155,29	211,03	1.363,64	1.014,20
6b. Consumo anual motor obsoleto MWh 4000	41,64	245,45	77,23	140,69	909,09	676,14
7a. Consumo anual motor eficiente MWh 6000	41,53	159,74	150,80	195,53	1.194,89	958,47
7b. Consumo anual motor eficiente MWh 4000	6,36	38,13	50,85	108,05	667,35	675,29
Vida útil del equipo (n)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Tasa de descuento (d)	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
FRC=d*(1+d)^n/[(1+d)^n-1]	0,134	0,134	0,134	0,134	0,134	0,134
9. Inversión diferencial	663	2.392	2.392	1.697	9.846	8.238
10. Costo anual del capital	88,84	320,53	320,53	227,40	1.319,36	1.103,89
11a. Costo de energía ahorrada 6000h USD¢/kWh	0,21	0,37	7,13	1,47	0,78	1,98
11b. Costo de energía ahorrada 4000h USD¢/kWh	0,25	0,38	1,21	0,70	0,55	0,84
Diferencias del consumo anual 6000h	372,39 kWh	42,19	85,71	4,50	15,51	168,75
Diferencias del consumo anual 4000h	420,84 kWh	35,28	83,94	26,39	32,64	241,74

Cuando se realiza la selección a través del programa se obtienen una relación de motores eficiente que cumplen con las características propuestas. Cada motor en su recomendación contiene el precio y una serie de parámetros característicos del motor, de todos seleccionamos aquel que cubra las necesidades planteada a un menor precio. El factor de carga del motor obsoleto se determinó según la formula (3.1) de la misma manera la del motor eficiente. El consumo del motor candidato al reemplazo es muy alto para ambas horas de trabajo reduciendo el consumo anual con la introducción de motores eficiente en más del 50%.

La inversión diferencial no es más que el precio del motor para este escenario, si fuese para la opción motor nuevo estándar versus motor nuevo eficiente entonces la inversión diferencial sería:

$$I_d = P_{obso} - P_{nuev} \tag{3.6}$$

Donde:

I_d : Inversión diferencial

P_{obso} : Precio del motor obsoleto

P_{nuevo} : Precio del motor nuevo



En este caso, la rentabilidad del ejemplo es factible para las horas de uso del motor. El costo de energía ahorrada para ambos casos disminuye en comparación con la demanda fijada (Costo de la energía = 4,0 US ¢/kWh) a excepción del motor III que solo es válido para 6000 horas de trabajo pero como lo analizamos para un lote de motores, no tiene gran influencia ya que ahorra en otros aspectos a tratar. La posibilidad de que el ahorro de potencia pueda ser considerado como un ahorro efectivo dependerá de la viabilidad de cambiar en el contrato el cargo por demanda máxima, lo que sería quizás atractivo si se trata de cambiar un número importante de motores. Cuando analizamos el factor de carga del motor eficiente podemos ver que cumplimos ya que no se pasa del 85% de su carga.

Para el primer motor se obtuvo un consumo anual del obsoleto de 83,72MWh cuando se realizó la metodología para el reemplazo se logra un consumo anual del motor eficiente de 41,53 MWh con un costo anual de 88,84\$, para una diferencia del consumo de 42.19 MWh. Ahorrando por año un costo de energía de 0.25 USD¢/kWh y un factor de carga de 0.84. Para el resto de los motores se realiza un análisis similar logrando efectividad en el reemplazo.

La figura 3.1 es la interpretación grafica del comportamiento de los motores con respecto a la potencia nominal. En el se puede apreciar que los motores obsoletos están mal seleccionados en el mayor de los casos operando casi sin carga trayendo como consecuencia baja eficiencia. En el caso del motor seis es lo contrario ya que el mismo se encontraba subcargado. Con la nueva selección de motores se aprovecha al máximo la potencia nominal siempre teniendo en cuenta que el factor de carga no sobrepase el 85% para no sobrecargar al motor percatándonos de la gran diferencia existente.

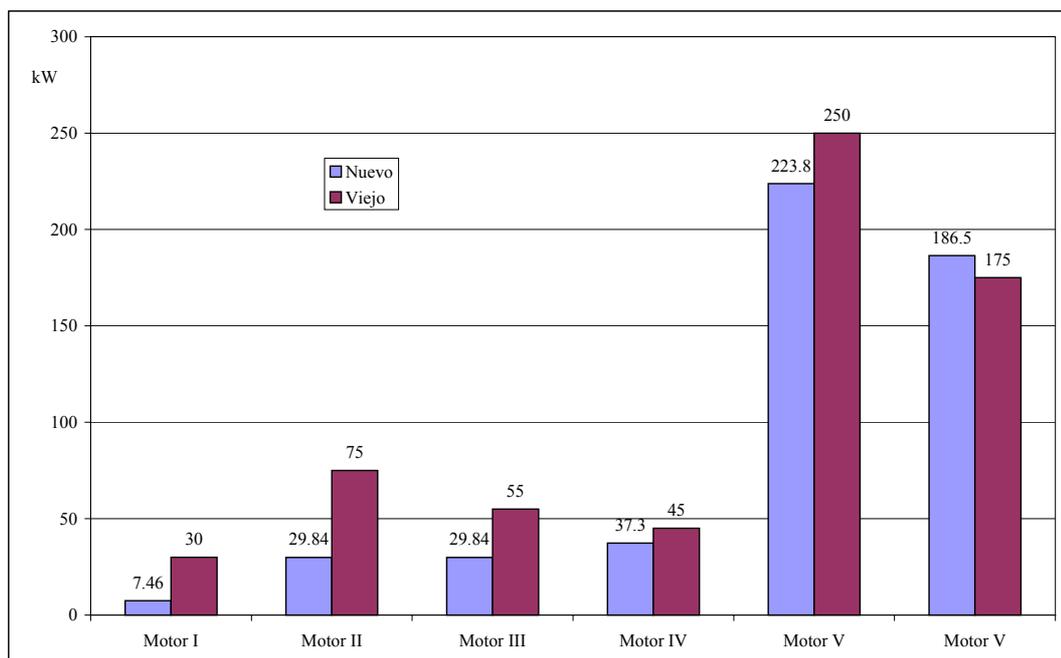


Figura3.1 Gráfico de la potencia en función del motor

En la figura 3.2 se analiza el comportamiento del factor de carga en función de los motores. Pudiendo verificar que con la introducción de nuevas máquinas el coeficiente de carga aumenta en comparación a los existentes teniendo los mismos un mayor aprovechamiento. Se logra que estos motores contengan un valor promedio, quedando siempre por debajo del límite al que estos se encuentran expuestos para entrar en sobrecargas. Con este resultado hay mejoras en la eficiencia a la cual trabajará el motor.

La figura 3.3 representa el comportamiento del consumo anual en MWh tanto para el motor obsoleto como para el eficiente ambos para las diferentes horas de trabajo. En este gráfico se puede observar que el motor obsoleto presenta un mayor consumo quedando para ambas horas por encima del eficiente. La diferencia de consumo por motor es buena aunque para el motorVI cuando se analiza para 4000h esta varía en 1 MWh afectando el consumo de energía ahorrada por año, como este trabajo es basado en el comportamiento para un lote de motor se obtiene que para 6000h la diferencia del consumo anual es de 372,39 kWh y para 4000h es de 420,84. Estas dos figuras se encuentran en la página siguiente.

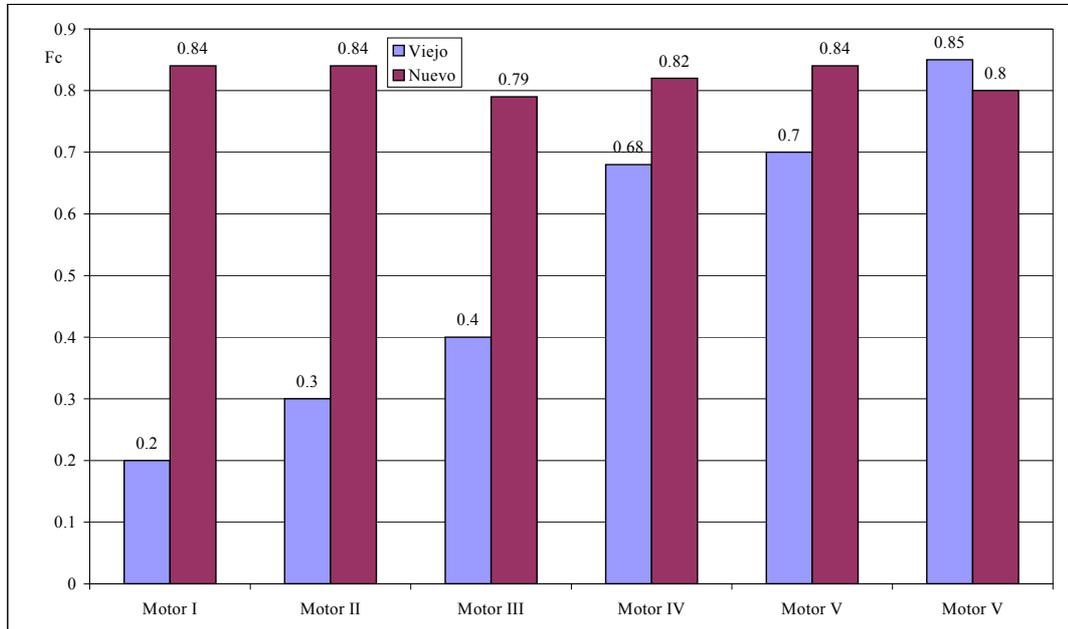


Figura3.2 Gráfico del factor de carga en función del motor

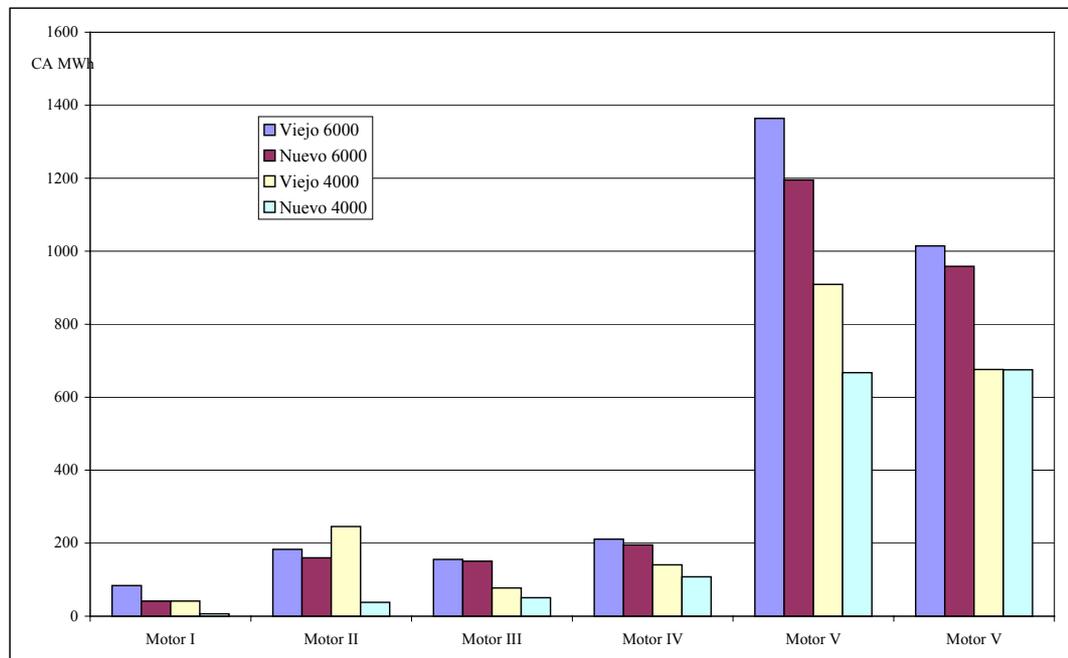


Figura3.3 Gráfico del consumo anual en MWh en función del motor

El gráfico de la figura 3.4 representa el comportamiento del consumo de energía para las diferentes horas de trabajo, realizando un análisis muy similar al de los gráficos anteriores.

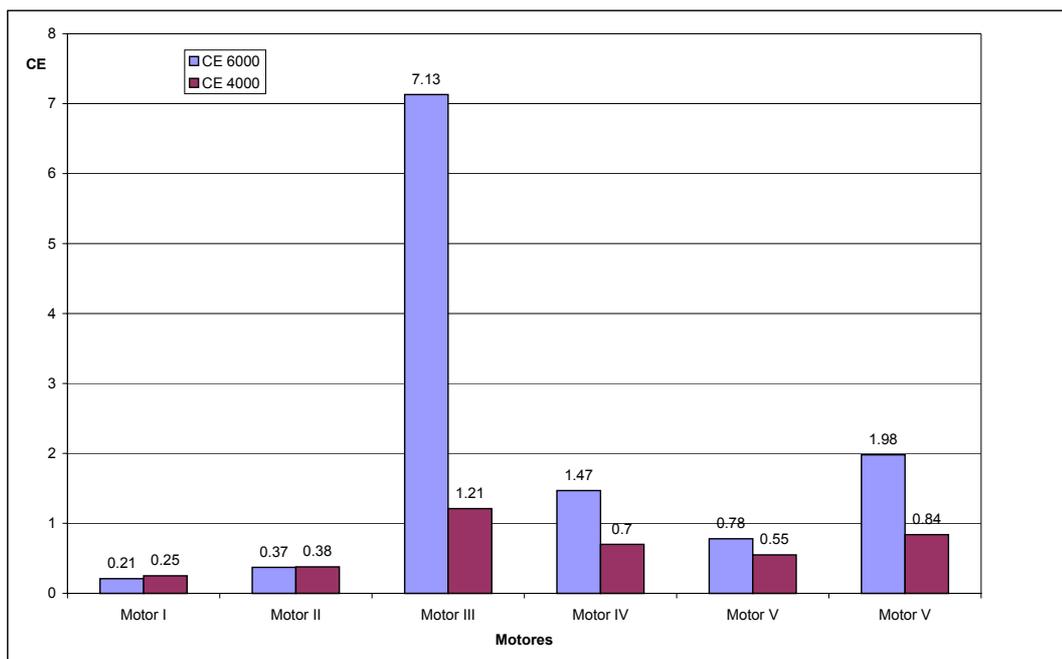


Figura3.4 Gráfico del consumo energía en función del motor

En la tabla 3.3 se encuentran los datos del primer motor que se selecciona con la ayuda del software Programa Internacional para la Selección de motores y el Análisis de Ahorro. Los datos de los restantes motores se encuentran a partir del anexo 1.5. Esta tabla se encuentra en la página siguiente.



Tabla 3.3 Datos del nuevo motor

Motor1	Datos
Fabricante	Hemco Frame
U	False
Modelo	Global-OP
Eje Vertical	False
Catálogo	HB0104DBA
Montaje frontal C	False
Tipo de motor	NEMA
Diseño B D Flange	False
Potencia (HP)	10
Factor de servicio	1,15
Velocidad (RPM)	1800
Peso (libras)	149,0
Velocidad a plena carga (RPM)	1765
Clase del aislamiento	F
Carcasa tipo	ODP
Precio de lista (\$)	663
Frame No	215T
Garantía (años)	3
Tensión nominal	208-230/460
Barras del rotor	28
Uso específico	<Motor de uso general>
Ranuras del estator	36
Inercia del rotor (kgm ²)	0
Resistencia del enrollado (en miliohms a 25 C)	0,0
Funcionamiento	
Eficiencia (%)	
IEC	
Tipo de prueba	N/A N/A
Plena carga	N/A 89,5
75% carga	N/A 90,3
50% carga	N/A 90,0
25% carga	N/A 85,4
Factor de potencia (%)	
IEEE	
Plena carga	82,0
75% carga	77,4
50% carga	66,7
25% carga	45,9
Par (libras-pie)	
Plena carga	30,0
Par máximo	75,0
Par mínimo	0,0
Rotor bloqueado	54,0
Intensidad de corriente (A)	
Plena carga	13,2
Vacio	4,4
Rotor bloqueado	80,0



Pasos a seguir para la selección del motor empleando Programa Internacional para la Selección de motores y el Análisis de Ahorro

1. Seleccionar el escenario.
2. Introducir los datos del motor obsoleto.
3. Fijar la potencia del nuevo motor.
4. Fijar el valor al se quiere elevar el rendimiento.
5. oprimir la opción buscar.
6. escoger el motor más económico.
7. Imprimir el resultado de la búsqueda.

III.5. Conclusiones.

- Se hace mención a los diferentes factores que intervienen en el funcionamiento del motor para el análisis de la eficiencia.
- Para el reemplazo del motor obsoleto, el rendimiento de los motores eficiente se eleva hasta un valor del 94%.
- Se obtiene un factor de carga por encima del 40% un valor promedio entre todos los motores con un buen aprovechamiento.
- Se demuestra que con el reemplazo de motores el consumo anual disminuye alrededor del 30-40% del consumo anual del motor existente.
- El costo de energía ahorrada de todos los motores para 6000 h es como promedio 1.99 USD¢/kWh y para 4000 h es de 0.65 USD¢/kWh quedando por debajo de la norma. Solo para Motor III el costo de la energía ahorrada queda por encima de la norma.
- Se obtiene una diferencia de consumo anual para 6000 h de 379 kWh y para 4000 h de 420.84 kWh

CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se definen los métodos generales para la evaluación de las inversiones en eficiencia energética.
- Se ilustran los tres escenarios de la evaluación del proceso: Nuevo motor, Rebobinado y Reemplazo de un motor existente.
- Se demuestra la importancia del estado de carga del motor a la hora de analizar la eficiencia ya que nos permite tomar la decisión de cuando reemplazar un motor y como será la selección del mismo.
- Durante el análisis del caso de estudio se demostró que el reemplazo del motor obsoleto, por otro de mejor eficiencia eleva el rendimiento hasta un valor del 94%, aumenta el factor de carga y el consumo anual disminuye alrededor del 30-40% del consumo anual del motor existente.
- El costo de energía ahorrada de todos los motores depende del número de horas para el cual opera el motor.



Recomendaciones

- Utilizar el presente trabajo en la disciplina de ingeniería eléctrica para el desarrollo del proyecto integrador en 3er año, para la aplicación de la metodología de selección de motores.
- Gestionar la aplicación de la metodología aquí propuesta para la industria del territorio.
- Utilizar este trabajo en la sustitución de motores obsoletos que se lleva a cabo en el país por el PAEC.
- Que sirva de material para consulta en la temática de selección de motores de inducción.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía.

- 1- Ivanov-Smolenski, A. V. Máquinas Eléctricas (tomo II). Editorial Mir - Moscú.
- 2- Caracterización energética de motores de inducción trifásica. www.prismas.com
- 3- Mc Pherson, G. An Introduction to Electrical Machines and Transformers. Second Edition, 1989.
- 4- Voldek, I. Máquinas Eléctricas (en dos tomos). La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 1974.
- 5- Recomendaciones para el ahorro de energía en motores eléctricos. FIDE. México D.F, Pág. 24
- 6- Revisión de la normatividad en la aplicación de motores de inducción de la eficiencia alta. Boletín IIE, marzo abril del 2001.
- 7- Uso eficiente de la energía eléctrica. www.energuia.com
- 8- Manual_evamotor. www.cubaenergía.com
- 9- Alianza para la recuperación económica. Diario de Yucatán, México, pág. 67, 31 de octubre del 95
- 10- NEMA.MG-10-1994, Energy Managment guide for Selection and Use of FIFEC Frecuency, DC.1994

ANEXOS

Anexo

Anexo.1 Valores por defecto de Eficiencia en Motores.

Los valores de eficiencia se determinan obteniendo el promedio para cada punto de carga (100%, 75%, 50%, y 25%) para todos los motores de uso general a una potencia, velocidad y tipo de carcasa dada. Se pueden obtener valores de eficiencia predeterminados para motores de 1 a 500 hp, con velocidades sincrónicas de 900, 1200, 1800 y 3600 RPM, y para carcasas ODP y TEFC.

Los valores de rendimiento para los motores eficientes se calculan como los valores promedio para todos los motores con eficiencias a plena carga mayor o iguales a aquellos citados en la norma NEMA MG. Los motores Premium son aquellos cuyos valores de eficiencia a plena carga son superiores.

- **Para motores en kW con potencias fraccionarias:**

Tabla 1.1 anexo Valores de eficiencia 1 a 500 hp,

Valor característico	Rango en kW	Valor característico	Rango en kW
0.03	$0.025 \leq kw < 0.040$	0.25	$0.22 \leq kw < 0.28$
0.04	$0.040 \leq kw < 0.057$	0.3	$0.28 \leq kw < 0.35$
0.06	$0.057 \leq kw < 0.070$	0.37	$0.35 \leq kw < 0.45$
0.09	$0.07 \leq kw < 0.11$	0.45	$0.45 \leq kw < 0.50$
0.12	$0.11 \leq kw < 0.14$	0.55	$0.50 \leq kw < 0.66$
0.15	$0.14 \leq kw < 0.17$	0.75	$0.66 \leq kw < 0.90$
0.18	$0.17 \leq kw < 0.22$	0.9	$0.90 \leq kw < 1.00$

Tabla 1.2 anexo Valores de eficiencias superiores a 500hp

Valor característico	Rango en kW	Valor característico	Rango en kW
1.1	$1.00 \leq kw < 1.25$	75	$73 \leq kw < 85$
1.3	$1.25 \leq kw < 1.45$	90	$85 \leq kw < 100$
1.5	$1.45 \leq kw < 1.75$	110	$100 \leq kw < 120$
1.8	$1.75 \leq kw < 2.00$	132	$120 \leq kw < 146$
2.2	$2.0 \leq kw < 2.5$	150	$146 \leq kw < 155$
2.6	$2.5 \leq kw < 2.8$	160	$155 \leq kw < 175$
3	$2.8 \leq kw < 3.5$	185	$175 \leq kw < 195$
3.7	$3.5 \leq kw < 4.0$	200	$195 \leq kw < 215$

4	$4.0 \leq kw < 4.4$	225	$215 \leq kw < 235$
4.5	$4.4 \leq kw < 5.2$	250	$235 \leq kw < 275$
5.5	$5.2 \leq kw < 6.0$	280	$275 \leq kw < 285$
6	$6.0 \leq kw < 7.5$	300	$285 \leq kw < 310$
7.5	$7.5 \leq kw < 8.5$	315	$310 \leq kw < 325$
9.2	$8.5 \leq kw < 10.5$	335	$325 \leq kw < 345$
11	$10.5 \leq kw < 12.5$	355	$345 \leq kw < 375$
13	$12.5 \leq kw < 14$	400	$375 \leq kw < 430$
15	$14 \leq kw < 17$	450	$430 \leq kw < 475$
18.5	$17 \leq kw < 21$	500	$475 \leq kw < 550$
22	$21 \leq kw < 25$	560	$550 \leq kw < 610$
26	$25 \leq kw < 29$	630	$610 \leq kw < 700$
30	$29 \leq kw < 34$	710	$700 \leq kw < 775$
37	$34 \leq kw < 43$	800	$775 \leq kw < 850$
45	$43 \leq kw < 50$	900	$850 \leq kw < 950$
55	$50 \leq kw < 73$	1000	$950 \leq kw < 1125$

Anexo.2 **Glosario**

Amperes (A). Unidad de medida de la corriente eléctrica. La corriente nominal indica la corriente promedio de entrada al motor. Hay tres tipos comunes de corrientes a motores:

- Corriente en vacío es la que consume el motor cuando se encuentra sin carga.
- Corriente a plena carga, es la corriente solicitada por el motor cuando se encuentra operando bajo plena carga mecánica.
- Corriente de rotor bloqueado: es la corriente que circula cuando el rotor del motor se detiene o se bloquea e indica la cantidad de corriente que se puede esperar en los primeros segundos de la partida de un motor.

Calidad de la energía. Las condiciones del nivel de tensión, desbalanceo de voltaje, factor de potencia, y la presencia de armónicas. Una baja calidad de la energía reduce la eficiencia y la confiabilidad del equipo eléctrico. Varias estrategias son usadas para optimizar los niveles de tensión, aumentar el factor de potencia y disminuir la contaminación armónica, como lo son ajustes en transformadores y modificaciones en los circuitos de las cargas.

Carcasa. Se diseñan diferentes tipos de carcasas de motores para protegerlos de varios niveles de exposición a la humedad, partículas y químicos. Los cuatro tipos de carcasas más usados son:

- **Open Drip Proof (ODP)** permite que el aire circule a través del motor, pero tiene una cubierta que evita la entrada de gotas de líquido. Los motores ODP son apropiados para ambientes protegidos.
- **Totally Enclosed Fan Cooled (TEFC)** motores diseñados para impedir que el aire exterior circule dentro de él. Dispone de un ventilador para su enfriamiento. Los motores TEFC pueden funcionar al aire libre y en ambientes polvorientos y contaminados.
- **Totally Enclosed Nonventilated (TENV)** motores que no están equipados de refrigeración a sus partes cubiertas por medios externos.
- **Explosion Proof (EXPL)** es un tipo de motor TEFC diseñado para prevenir chispas o explosiones dentro del motor producidas por materiales inflamables.

Cargo por Demanda. Este cargo se determina a partir del período (15 o 30 minutos) del consumo de potencia más alto en el mes. Los cargos por demanda se están volviendo muy comunes en clientes industriales y comerciales, llegando a US\$17 por kilowatt por mes en los Estados Unidos.

Demanda máxima. Es la demanda medida como el máximo consumo de kW en un período de 15 a 30 minutos a lo largo de un mes.

Diseño. Existen cuatro tipos de diseño para motores NEMA: A, B, C, y D. Los motores de diseño A y B son para uso general en aplicaciones que requieren bajo par, como lo son bombas centrífugas, ventiladores y máquinas de par constante. Los diseños A y el B son similares excepto que el B tiene un límite en la corriente de partida. Los motores de Diseño C y D producen un alto par de arranque y son diseñados para el uso en correas, grúas, ascensores, y otras aplicaciones de alto par.

Eficiencia. La energía mecánica de salida dividida por la energía eléctrica de entrada. Existen muchos métodos para medir la eficiencia de un motor, pero el estándar usado exclusivamente en los Estados Unidos es el IEEE 112-B. Este estándar especifica un protocolo de pruebas que usa un

dinamómetro para probar un motor bajo niveles de carga específicos. Todos los valores de eficiencia almacenados en la base de datos US Catálogo del IMSSA y que después son usados en los cálculos del programa son basados en eficiencias determinadas según IEEE 112-B.

Eficiencia nominal. Un valor promedio basado en las pruebas de una población de motores por medio de la norma IEEE 112-B. A pesar de que estadísticamente se esperan pequeñas variaciones en las eficiencias, algunos motores dan como resultado valores un poco por encima o un poco por debajo de su referente nominal. NEMA ha establecido valores mínimos garantizados de eficiencia para cada referente nominal, de tal manera que toma en cuenta estas variaciones. Todos los valores en la base de datos US Catálogo del IMSSA son nominales en vez de las eficiencias mínimas garantizadas.

Empuje. Es la medida de la fuerza que se ejerce sobre los rodamientos en un motor de eje vertical.

Fabricante. Nombre de la compañía productora de los motores. Se incluyen 18 fabricantes en la base de datos US Catalogo del IMSSA. Algunos fabricantes tienen divisiones que ofrecen motores con diferentes marcas, como lo hace A.O. Smith/MagneTek/Century y U.S. Motors/Emerson/Leroy Somer.

Factor de Carga. Es el resultado de la división de la potencia de operación del motor por la potencia de diseño. Por ejemplo, un motor de 10hp manejando una carga de 7.5 hp tiene un factor de carga del 75%.

Factor de Potencia. La medida de la relación de fase entre las ondas de corriente y tensión en un sistema eléctrico. Las cargas inductivas, como los motores eléctricos, tienden a reducir el factor de potencia. La mayoría de los motores trifásicos tienen un factor de potencia especificado para indicar el impacto que pueden tener en el sistema. Los factores de potencia bastante bajos pueden reducir la eficiencia de un sistema, muchas distribuidoras cobran cargos adicionales a las industrias por bajo factor de potencia. Se usan bancos de condensadores para solucionar este problema.

Factor de Servicio. Un multiplicador que indica la habilidad de un motor para trabajar a grados de cargas mayores. Un motor de 10-hp con un factor de servicio de 1.15 puede operar continuamente con una carga de 11.5 hp sin sobrecalentarse, aunque esto reducirá su eficiencia y su vida útil.

Modelo. Es el nombre dado a un modelo de motor por el fabricante. Si no se especifica un nombre, se enlista como “Standard.”

Número de catálogo. Es un número asignado al motor por el fabricante, debido a su clase y características. No todos los fabricantes usan números de catálogo, pero si le es suministrado, debe ser usado cuando se pide información o cuando se quiere comprar.

NEMA (National Electrical Manufacturers Association). Una organización de fabricantes de motores en Estados Unidos. NEMA establece estándares y publica información que es extensamente usada en la industria de los motores.

NEMA (dirección postal):

NEMA
2101 L Street NW
Washington, DC 20037
Phone: (202) 457-8400

Par. Una medida de torsión tomada en libras-pie (libras de peso en un brazo de 1 pie). Se incluye tres tipos de par típico en la base de datos de IMSSA:

- Par a plena carga.**
- Par de rotor bloqueado,** es el par máximo que puede producir el motor cuando se detiene por completo el rotor.
- Par máximo,** es el par que el motor puede producir antes de perder estabilidad

Período de recuperación simple. El tiempo requerido para que los ahorros de energía obtenidos debido a una inversión en eficiencia energética alcancen el costo inicial. El período de recuperación simple no considera la tasa de interés del préstamo ni el valor del dinero en el tiempo.

Sistema Motriz. La fuente de alimentación eléctrica, el motor, los controles de velocidad, el embrague o sistema de poleas.

Tamaño del Frame. NEMA definió dimensiones estándar de *frame*. Seleccione un motor nuevo con el mismo tamaño de frame, a menos que usted planea modificar el montaje del mismo. Por ejemplo, reemplace un motor con un frame NEMA 286T con otro motor del mismo tamaño del frame.

Tensión Nominal. Es el nivel, o niveles de voltaje para los cuales fue diseñado el motor y que constituyen sus tensiones de operación.

Velocidad. Los motores de inducción eléctricos tienen dos tipos de velocidades:

- Velocidad sincrónica.** Es la velocidad a la cual rota el campo magnético del motor. La base de datos incluye motores con velocidades sincrónicas de 900, 1.200, 1.800, y 3.600 rpm.

- Velocidad a plena carga- rpm.** La velocidad a la cual el rotor del motor gira bajo plena carga, la cual es típicamente un 2% más lenta que la sincrónica. Aunque incluso un pequeño cambio en la velocidad de operación puede afectar la eficiencia de bombas y ventiladores, seleccione un motor con una velocidad a plena carga bastante similar para esas aplicaciones.

Anexo3

Tabla 1.5anexo3. Datos del motor seleccionado

Motor2	Datos
Fabricante	Baldor Frame
U	False
Modelo	SUPER-E, NEMA Premium
Eje Vertical	False
Catálogo	EM2538T
Montaje frontal C	False
Tipo de motor	NEMA
Diseño B D Flange	False
Potencia (HP)	40
Factor de servicio	1,15
Velocidad (RPM)	3600
Peso (libras)	378,0
Velocidad a plena carga (RPM)	3539
Clase del aislamiento	F
Carcasa tipo	ODP
Precio de lista (\$)	2 392
Frame No	286TS
Garantía (años)	3
Tensión nominal	230/460
Barras del rotor	28
Uso específico	<Motor de uso general>
Ranuras del estator	36
Inercia del rotor (kgm ²)	0
Resistencia del enrollado (en miliohms a 25 C)	156,0
Funcionamiento	
Eficiencia (%)	
IEC IEEE	
Tipo de prueba	N/A N/A
Plena carga	N/A 94,1
75% carga	N/A 94,6
50% carga	N/A 94,4
25% carga	N/A 92,2
Factor de potencia (%)	
Plena carga	90,0
75% carga	89,0
50% carga	84,0
25% carga	66,0
Par (libras-pie)	
Plena carga	59,4
Par máximo	200,0
Par mínimo	0,0
Rotor bloqueado	124,0
Intensidad de corriente (A)	
Plena carga	44,0
Vacio	11,1
Rotor bloqueado	315,0

Tabla 1.6anexo3 Datos del motor seleccionado

Motor3	Datos
Fabricante	Baldor Frame
U	False
Modelo	SUPER-E, NEMA Premium
Eje Vertical	False
Catálogo	EM2538T
Montaje frontal C	False
Tipo de motor	NEMA
Diseño B D Flange	False
Potencia (HP)	40
Factor de servicio	1,15
Velocidad (RPM)	3600
Peso (libras)	378,0
Velocidad a plena carga (RPM)	3539
Clase del aislamiento	F
Carcasa tipo	ODP
Precio de lista (\$)	2 392
Frame No	286TS
Garantía (años)	3
Tensión nominal	230/460
Barras del rotor	28
Uso específico	<Motor de uso general>
Ranuras del estator	36
Inercia del rotor (kgm ²)	0
Resistencia del enrollado (en miliohms a 25 C)	156,0
Funcionamiento	
Eficiencia (%)	
IEC	
Tipo de prueba	N/A N/A
Plena carga	N/A 94,1
75% carga	N/A 94,6
50% carga	N/A 94,4
25% carga	N/A 92,2
Factor de potencia (%)	
IEEE	
Plena carga	90,0
75% carga	89,0
50% carga	84,0
25% carga	66,0
Par (libras-pie)	
Plena carga	59,4
Par máximo	200,0
Par mínimo	0,0
Rotor bloqueado	124,0
Intensidad de corriente (A)	
Plena carga	44,0
Vacio	11,1
Rotor bloqueado	315,0

Tabla 1.7 anexo3. Datos del motor seleccionado

Motor4	Datos
Fabricante	WEG Electric Motors Frame
U	False
Modelo	W21 High Efficiency
Eje Vertical	False
Catálogo	05036OP3E324TS
Montaje frontal C	False
Tipo de motor	NEMA Diseño B D_
Flange	False
Potencia (HP)	50
Factor de servicio	1,15
Velocidad (RPM)	3600
Peso (libras)	478,0
Velocidad a plena carga (RPM)	3550
Clase del aislamiento	F
Carcasa tipo	ODP
Precio de lista (\$)	1 697
Frame No	324TS
Garantía (años)	2
Tensión nominal	208-230/460
Barras del rotor	0
Uso específico	<Motor de uso general>
Ranuras del estator	0
Inercia del rotor (kgm^2)	0
Resistencia del enrollado (en miliohms a 25 C)	0,0
Funcionamiento	
Eficiencia (%)	
IEC	
Tipo de prueba	N/A N/A
Plena carga	N/A 93,6
75% carga	N/A 93,0
50% carga	N/A 91,7
25% carga	N/A 0,0
Factor de potencia (%)	
IEEE	
Plena carga	88,0
75% carga	86,0
50% carga	81,0
25% carga	0,0
Par (libras-pie)	
Plena carga	73,4
Par máximo	190,8
Par mínimo	0,0
Rotor bloqueado	146,8
Intensidad de corriente (A)	
Plena carga	55,1
Vacio	0,0
Rotor bloqueado	330,6

Tabla 1.8 anexo3. Datos del motor seleccionado

Motor5	Datos
Fabricante	WEG Electric Motors Frame
U	False
Modelo	W21 High Efficiency
Eje Vertical	False
Catálogo	30036OP3G445TS
Montaje frontal C	False
Tipo de motor	NEMA
Diseño B D_Flange	False
Potencia (HP)	300
Factor de servicio	1,15
Velocidad (RPM)	3600
Peso (libras)	2007,0
Velocidad a plena carga (RPM)	3565
Clase del aislamiento	F
Carcasa tipo	ODP
Precio de lista (\$)	9 846
Frame No	445TS
Garantía (años)	2
Tensión nominal	460
Barras del rotor	0
Uso específico	<Motor de uso general>
Ranuras del estator	0
Inercia del rotor (kgm ²)	0
Resistencia del enrollado (en miliohms a 25 C)	0,0
Funcionamiento	
Eficiencia (%)	
Tipo de prueba	N/A N/A
Plena carga	N/A 95,0
75% carga	N/A 94,5
50% carga	N/A 94,1
25% carga	N/A 0,0
Factor de potencia (%)	
Plena carga	92,0
75% carga	91,0
50% carga	81,0
25% carga	0,0
Par (libras-pie)	
Plena carga	435,0
Par máximo	1131,0
Par mínimo	0,0
Rotor bloqueado	870,0
Intensidad de corriente (A)	
Plena carga	316,0
Vacio	0,0
Rotor bloqueado	1990,8

Tabla 1.9 anexo3. Datos del motor seleccionado

Motor 6	Datos
Fabricante	Baldor Frame
U	False
Modelo	GENERAL PURPOSE
Eje Vertical	False
Catálogo	M2565T-4
Montaje frontal C	False
Tipo de motor	NEMA
Diseño B D Flange	False
Potencia (HP)	250
Factor de servicio	1,15
Velocidad (RPM)	3600
Peso (libras)	1261,0
Velocidad a plena carga (RPM)	3556
Clase del aislamiento	B
Carcasa tipo	ODP
Precio de lista (\$)	8 238
Frame No	445TS
Garantía (años)	2
Tensión nominal	460
Barras del rotor	40
Uso específico	<Motor de uso general>
Ranuras del estator	48
Inercia del rotor (kgm ²)	0
Resistencia del enrollado (en miliohms a 25 C)	101,0
Funcionamiento	
Eficiencia (%)	
Tipo de prueba	N/A N/A
Plena carga	N/A 94,5
75% carga	N/A 94,9
50% carga	N/A 94,4
25% carga	N/A 91,6
Factor de potencia (%)	
Plena carga	91,0
75% carga	90,0
50% carga	87,0
25% carga	70,0
Par (libras-pie)	
Plena carga	369,0
Par máximo	1120,0
Par mínimo	0,0
Rotor bloqueado	540,0
Intensidad de corriente (A)	
Plena carga	271,6
Vacio	59,0
Rotor bloqueado	1855,0