



República de Cuba.
Ministerio de Educación Superior.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
Dr. Antonio Núñez Jiménez.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica.
Departamento de Eléctrica.

*Trabajo de diploma en opción al título de
Ingeniero Eléctrico.*

*Título: Comportamiento del Motor de Inducción
en la Climatización Centralizada de hoteles.*

Autor:

Yuniel Sierra Aguilera

Tutores:

M.Sc. Reineris Montero Laurencio

M.Sc. Ignacio Romero Rueda

Declaración de Autoridad

Yuniel Sierra aguilera, autor de este trabajo de diploma titulado: Comportamiento del Motor de Inducción en la Climatización Centralizada de hoteles, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

ISMM de Moa, 26 de junio del 2009

“Año del 50 Aniversario del triunfo de la Revolución”

M.Sc. Reineris Montero Lurencio
Tutor

M.Sc. Ignacio Romero Rueda
Tutor

Yuniel Sierra Aguilera
Diplomante

Pensamientos:

*"Invertir en conocimientos produce siempre los mejores
beneficios".*

Benjamín Franklin

*"Hay una fuerza motriz más poderosa que
el vapor, la electricidad y la energía atómica:
la voluntad."*

Albert Einstein

Dedicatoria:

Dedico este trabajo con mucho cariño a todas esas personas que siempre han estado presentes, en especial:

A mis padres: Aleida y Elio que tanto me han apoyado siempre,

A mis hermanos Elio y Wilber,

A mi abuelita Vidalina,

A mis amigos,

Y a todas esas personas que son especiales para mí y saben que las quiero mucho aunque no las mencione.

Deseo agradecer:

A mis tutores por toda su ayuda en la realización de este trabajo,

A mis padres y a toda mi familia, que siempre me estimularon a seguir adelante con mis estudios,

A mis amigos, en especial a Ramos,

Y a todas las personas de las cuales recibí apoyo y consejo tanto en los buenos como en los malos momentos,

A todos, les doy las gracias.

Resumen

Este trabajo se realizó en el hotel Blau Costa Verde de Pesquero, que utiliza la climatización centralizada. El estudio se centra en el comportamiento de los motores de inducción trifásicos. Como es conocido más del 60 % de estos accionan bombas, ventiladores y compresores, se conoce que es posible ahorrar en los mismos, hasta un 70 % de la energía.

En este proyecto se evalúa el comportamiento de las variables energéticas del motor de inducción, en la impulsión de agua fría y caliente en la climatización centralizada de hoteles. Se describe un marco teórico relacionado con el motor de inducción, dónde se exponen las expresiones fundamentales, elementos de la regulación de velocidad y posibilidades de ahorro en los mismos. Se obtuvieron las características de los motores, utilizando y elaborando con ayuda de los tutores aplicaciones en Matlab. Luego se analizó el comportamiento del motor de inducción en la impulsión de agua fría y caliente en la climatización centralizada en el hotel caso de estudio. Demostrando que se puede hacer un uso más racional de la energía eléctrica en estos sistemas que utilizan las bombas centrífugas. Además se analizó la influencia de las variables del proceso en el comportamiento del motor de inducción en conjunto con el Sistema de Impulsión de Agua fría.

Summary

This work was done in the Blau Costa Verde Hotel of Pesquero, which utilizes a centralized air-conditioning system. The study focuses on the behaviour of three-phase induction motors. As it is known, more than 60 % of these drive pumps, fans and compressors, it is known that it is possible to save in these, up to 70 % of the energy.

In this project, the behaviour of the energy variables of the induction motor, in the impulsion of cold and hot water in the centralized air-conditioning of hotels is evaluated. It describes a theoretic frame pertaining to the induction motor, where the fundamental expressions are presented, along with the elements of the regulation of velocity and possibilities of saving in the same. The characteristics of the motors were obtained, utilizing and elaborating with the tutors' help applications in Matlab. Next the behaviour of the induction motor in the impulsion of cold and hot water in the centralized air-conditioning system in the case study hotel was analyzed. Thus demonstrating that a more rational use of electric power in these systems that use centrifugal pumps can be done. In addition the influence of the variables of the process in the behaviour of the motor of induction in tandem with the Cold Water Impulsion System was analyzed.

Tabla de contenidos

Resumen-----	IV
Summary-----	V
Tabla de contenidos-----	VI
Introducción -----	1
Capítulo I. Marco Teórico. -----	4
1.1 Introducción.-----	4
1.2 Estudios precedentes. -----	4
1.3 Expresiones fundamentales que caracterizan el motor de inducción. -----	13
1.3.1 Modelo del Motor de inducción. -----	19
1.3.2 Regulación de la velocidad en motores de inducción. -----	23
1.6 Conclusiones del capítulo-----	26
Capítulo II. Comportamiento del motor de inducción en las bombas de la climatización centralizada -----	27
2.1 Introducción. -----	27
2.2 Características de los motores de inducción en conjunto con el sistema de climatización del hotel Blau Costa Verde.-----	27
2.2.1 Determinación del circuito equivalente de los motores de inducción. -----	32
2.3 Comportamiento de los motores de inducción en la impulsión de agua fría a caudal variable y constante.-----	33
2.4 Comportamiento de los motores de inducción en la impulsión de agua caliente a caudal variable y constante.-----	44
2.4.1 Variador de velocidad y su integración con el accionamiento de la impulsión de agua fría. -----	49
2.5 Conclusiones del capítulo-----	52
Capítulo III. Interacción de las variables del proceso y el clima en los motores.--	53
3.1 Introducción.-----	53
3.2 Influencias de las variables del proceso y el clima en las bombas de la climatización centralizada.-----	53
3.3 Valoración técnica.-----	58

3.4 Conclusiones del capítulo -----	60
Conclusiones-----	61
Recomendaciones -----	62
Referencias Bibliográficas -----	63
Anexos -----	A

Introducción

Dentro de los costos energéticos en un hotel turístico la electricidad representa la mayor partida, siendo las áreas que consumen más energía eléctrica las de climatización y alumbrado. Para hoteles del Caribe, en particular, el consumo en el área de climatización puede llegar a representar alrededor del 65 % del total del consumo de electricidad, debido fundamentalmente a las temperaturas ambientales existentes, mientras que el consumo en equipos de refrigeración representa alrededor de un 14 %, el alumbrado un 11 %, los ventiladores y bombas un 12 % y la producción de agua caliente un 7 % aproximadamente [10] [15].

En este contexto energético se ubican los accionamientos de las bombas centrífugas que garantizan la impulsión de agua fría para la climatización centralizada y de agua caliente sanitaria. La generalidad en Cuba, es que estos circuitos trabajan a caudal constante, y no se han estudiado a profundidad las posibilidades de un uso racional de la energía eléctrica, adaptando los fluidos a la demanda de confort y los regímenes de consumo de agua caliente.

En el comportamiento termoenergético de estos sistemas juega un papel fundamental la situación del clima y porcentaje ocupacional del hotel, lo cual obliga a un trabajo en diferentes regímenes. La vigilancia de estos aspectos se debe conjugar con los parámetros del accionamiento para cada caso en particular.

Para el caso específico de los sistemas de impulsión de agua fría más del 92 % de los hoteles en Cuba cuentan con caudal constante. Una de las pretensiones de estas instalaciones debería ser el empleo de los variadores de velocidad. Esta tecnología ahorra energía y tiene sentido solamente si la consigna de la bomba (presión de descarga) no es mantenida en su valor máximo. Durante la etapa de diseño de los hoteles a caudal constante se prefija un valor de consigna durante los proyectos, pero la realidad indica que la instalación montada puede diferir de la prevista, hay más codos, longitudes, otros diámetros, rugosidades distintas a las adoptadas por tablas, bombas sobredimensionadas y otros cambios no previstos.

Con el presente trabajo a partir de las mediciones de las variables presentes en los sistemas de impulsión de agua fría y caliente, se muestran los resultados del comportamiento energético de los motores de inducción implicados para diferentes condiciones de operación. Se analizan algunos aspectos termohidráulicos de las instalaciones que tienen relación con el aspecto energético de los motores.

Siempre ha sido una problemática dentro de cualquier investigación decidir un objeto de estudio acorde con los objetivos propuestos. En este caso particular, se escogió un hotel con Variadores de Velocidad en los Circuitos Secundarios de Agua Fría (CSAF). A pesar de no trabajar el sistema en régimen automático, nos auxiliamos de un Sistema de Medición capaz de prefijar valores de operación en este accionamiento.

Se hace necesaria la generalización del empleo de los variadores de velocidad en los sistemas de Climatización Centralizado, ya que tienen probada efectividad, pero los casos prácticos que demuestren las bondades energéticas de esta aplicación son insuficientes.

Por todo lo antes expuesto se presenta como **problema** de esta investigación:

El Insuficiente conocimiento del comportamiento energético del motor de inducción bajo condiciones reales de explotación en los sistemas de impulsión de agua fría y caliente en hoteles con climatización centralizada, imposibilita establecer una relación con los aspectos termohidráulicos.

Hipótesis:

Conociendo el comportamiento energético de los motores de inducción, empleados en la impulsión del agua fría y caliente de la climatización centralizada en hoteles, de conjunto con los parámetros de explotación de los sistemas se pueden proponer estrategias de operación que permitan un uso más racional de la energía eléctrica en estos accionamientos.

Objetivo general:

Evaluar el comportamiento energético de los motores de inducción en los circuitos de impulsión de agua fría y caliente en hoteles con climatización centralizada.

Objeto de estudio:

Motores de inducción en bombas centrifugas de la climatización centralizada.

Campo de acción:

Eficiencia Energética.

Tareas:

1. Análisis bibliográfico.
2. Levantamiento de las características del sistema en el hotel caso de estudio.
3. Planificación y ejecución de los trabajos de campo en relación a las mediciones.
4. Procesamiento y análisis de los resultados de las mediciones.
5. Conformación y empleo de aplicaciones informáticas para evaluar los regímenes energéticos de los motores de inducción.
6. Evaluación técnica de los regímenes de operación de los motores de inducción.
7. Redacción del informe.

Capítulo I. Marco Teórico.

1.1 Introducción.

En este capítulo se hace un análisis de estudios precedentes, donde se señalan los aspectos relacionados con el uso más eficiente el motor de inducción y las posibilidades de ahorro de energía eléctrica. Se describen las medidas a tomar en relación a mejorar la eficiencia. Se exponen un conjunto de expresiones validas para analizar los regímenes operación de estos motores. Se detallan los elementos componentes del circuito equivalente en T debido a la necesidad de tener un modelo circuital adaptable a las simulaciones del objeto de estudio.

1.2 Estudios precedentes.

En el sector hotelero existen pérdidas de energía eléctrica que pueden ser minimizadas, ya que existen posibilidades de ahorro energético mediante la aplicación de medidas que permitan un trabajo más eficiente de las máquinas eléctricas y el mejoramiento de los sistemas de impulsión de agua en general.

Los costos energéticos oscilan entre el 3 % y el 10 % de los costos globales del hotel, siendo a su vez la partida de presupuesto más elevada tras los gastos de personal y de alimentación [8].

Debido a que los motores son grandes consumidores de energía, constituyen un objetivo importante para el ahorro. Existen sistemas como es el caso de la climatización centralizada en los cuales se acentúa la necesidad de un trabajo más eficiente por los consumos elevados de electricidad que representan.

En los motores, existe la posibilidad de ahorro de hasta un 70 % de la energía. Para lograr en parte la disminución del consumo, es necesario frecuentemente que

se tome un enfoque de los sistemas que funcionan con motores, de forma particular, las cargas y procesos [7].

Por otra parte, los accionamientos de velocidad variable en motores de inducción están siendo utilizados desde hace unos cuantos años con el objetivo de ahorrar energía en mecanismo tales como bombas y ventiladores centrífugos.

La utilización de variadores de velocidad en el control del caudal de los mecanismos de circulación de fluidos en comparación con la estrangulación provoca un importante ahorro de la energía eléctrica consumida [6].

La carga de este tipo de mecanismos es proporcional, aproximadamente, al cuadrado de la velocidad, al reducir ésta última para disminuir el caudal, se provoca una sustancial disminución de la carga que trae como consecuencia una menor circulación de corriente tanto por el rotor como por el estator, con la consecuente disminución de las pérdidas de cobre.

En estas condiciones de operación son predominantes las pérdidas en el acero, pudiendo aumentarse la eficiencia con la reducción de las mismas. Esta opción existe en muchos variadores de velocidad industriales los cuales utilizan una ley de mando en que la tensión es proporcional al cuadrado de la frecuencia. Esta ley garantiza menores pérdidas que la conocida tensión/frecuencia constante, pero debido a la distribución no lineal de las pérdidas con respecto a las variables de operación de la máquina no se puede asegurar que las pérdidas sean las mínimas posibles, o sea, no se optimiza la eficiencia [19].

Para lograrlo es necesario determinar, para cada punto de operación del motor dado por su valor de momento y velocidad, los valores de las variables de control de las pérdidas que garanticen consumo mínimo de potencia. Estas variables pueden ser de dos tipos: la tensión y la frecuencia en el caso del control escalar del motor y las componentes productoras de momento y de flujo para el control vectorial.

Como es conocido, más del 60 % de los motores de inducción trifásicos accionan bombas, compresores y ventiladores centrífugos [1]. En este tipo de mecanismos suele necesitarse regular el caudal de fluido que se circula y se aplican cada vez más los accionamientos de velocidad variable con este objetivo. Al disminuir la velocidad disminuye apreciablemente el momento o par resistivo de la carga y, por tanto, la corriente que solicita el motor.

Este tipo de accionamiento suele controlarse manteniendo constante la relación entre la tensión y la frecuencia para mantener el flujo constante. En ese caso, al reducir la velocidad para reducir el caudal se produce una disminución importante de las pérdidas de cobre, en tanto las de acero permanecen prácticamente constantes, siendo estas últimas entonces las predominantes. Estas pérdidas dependen del cuadrado del flujo magnético existiendo, por tanto, la posibilidad de disminuirlas si este flujo a su vez se disminuye, lo cual depende del tipo de control utilizado en el variador de velocidad. Esto permite minimizar las pérdidas optimizando la eficiencia [19].

Si se trabaja con un control escalar y se realiza una ley de mando no lineal entre la tensión y la frecuencia en la cual, para una misma frecuencia, la tensión es inferior a la correspondiente al caso lineal, se obtiene la disminución de flujo que se buscaba. Las variables de control de las pérdidas son la tensión y la frecuencia.

Cada vez son más los fabricantes que construyen variadores de velocidad con Control Vectorial [3]. En este caso, se controlan por separado las dos componentes de la corriente del estator: la productora de la excitación I_{sx} y la productora del par I_{sy} . La primera es la que provoca el flujo magnético caracterizado por la denominada corriente magnetizante I_{mr} . En este caso, las variables de control de las pérdidas son la corriente productora de par y la corriente magnetizante (que en estado estacionario es igual a la productora de la excitación). Disminuyendo ésta última se disminuye el flujo y por consiguiente las pérdidas de acero. Al disminuir el flujo,

aumenta algo la corriente para vencer el mismo valor de momento, por lo cual aumentan las pérdidas de cobre.

Existe un punto de pérdidas mínimas que es al que debe ajustarse el controlador. Puede decirse entonces que para cada valor de carga definido por dos variables: la velocidad y el par o momento, existe un valor de corriente de excitación que da lugar a pérdidas mínimas y, por tanto, eficiencia máxima. A este valor de corriente de excitación corresponde también un valor de corriente productora del par que garantiza el valor de par o momento solicitado por la carga.

Puede decirse que para un punto de operación de la carga existe un valor de cada una de las componentes de corriente en el caso del control vectorial y un valor de tensión y otro de frecuencia en el caso del control escalar, que dan eficiencia máxima. Se hace necesario disponer de algún medio para poderla identificar durante la operación del accionamiento, con el objetivo de garantizar que éste opere siempre en condiciones de eficiencia máxima. Ahora bien, es difícil modelar matemáticamente esta relación debido a que depende de muchos factores internos de diseño de las máquinas que tienen una fuerte característica no lineal. Para resolver este tipo de problemas se ha venido utilizando cada vez más la Lógica Difusa, la cual constituye una potente herramienta [19].

Se han realizado estudios que abordan el tema de los variadores de velocidad en la climatización centralizada. Leon (2002), establece una metodología para el análisis del empleo de variadores de velocidad en sistemas de bombeo, pero solo se relacionan las interacciones entre las características de la bomba, la red y el motor de inducción. A partir de las ecuaciones de proporcionalidad y las ecuaciones del motor de inducción, estas leyes de afinidad tienen su análisis para sistemas de carga estática. A pesar de que se evalúa el comportamiento energético del accionamiento no se observa una dinámica amplia del objeto de análisis y no se incluyen en los modelos variables.

Por otra parte, Beeckmans (2003) [2], concluye que las bombas de velocidad variable en las redes hidráulicas en la climatización, ofrecen un gran potencial de ahorro energético. Para esto es necesario optimizar la consigna. El procedimiento más seguro y fiable es hacerlo en la propia instalación durante la fase de puesta en marcha. El método de Compensación y el método Balance proporcionan una técnica fácil y eficaz para equilibrar una red de distribución de agua, generando las mínimas pérdidas de carga posibles. Además señala que los costos de bombeo pueden reducirse entre un 15 % y un 25 %. Esto representa una fracción importante del costo global de explotación de una instalación de climatización, los costos de bombeo no son nada despreciables. No obstante no aborda el carácter térmico de la red y habla de un modelo matemático pero no expone las expresiones.

En investigaciones, se ha obtenido un modelo aproximado del sistema de Climatización Centralizado de un Hotel, en específico el Hotel Santiago [18]. Para esto se utilizó la identificación experimental, el modelo paramétrico obtenido es de estructura ARMAX de segundo orden, pero es muy simplificado ya que solo tiene en cuenta: el control del número de cilindros de los compresores de las enfriadoras a partir del comportamiento de la temperatura de retorno del agua fría, la temperatura de envío y como variable perturbadora la temperatura ambiente. En este caso, las acciones de control se realizan sobre parámetros de las enfriadoras y no sobre el sistema de impulsión de agua fría que a la vez es a caudal constante.

Se realizó una evaluación mediante una metodología del comportamiento energético de los Sistemas de Impulsión de Agua Fría (SIAF) exponiendo por separado parámetros del climatizador central, las redes hidráulicas, la carga térmica y del conjunto motor bomba, así como, algunas variables climatológicas [14]. Para este caso solo se establecieron modelos del conjunto motor- bomba mediante técnicas estadísticas y se proponen soluciones para la modificación de las condiciones de explotación sin el establecimiento de modelos matemáticos a partir de todos los aspectos analizados. Las soluciones planteadas son sobre la base de SIAF a caudal variable que es la tendencia que deberían seguir los hoteles en Cuba. Aparecen

además un conjunto de expresiones que permiten evaluar el costo, caudal y energía adicional que ocasionan las principales deficiencias termoenergéticas en la red, carga térmica y el accionamiento de los SIAF. A pesar de estos resultados no se profundiza en el comportamiento del motor de inducción de conjunto con el sistema.

En ocasiones, cuando se intenta mejorar la eficiencia en los accionamientos que utilizan motores, las acciones a realizar se centran en el motor, y tal vez su controlador. Este enfoque puede ser producto de la creencia de que el motor es el usuario final de la energía suministrada. De hecho, el motor es simplemente otro dispositivo en la cadena de conversiones de energía, desde la fuente de suministro de electricidad hasta el usuario final de la cadena de energía, que es en realidad el agua bombeada o espacio ventilado [7].

Un estudio realizado por la Oficina de Tecnologías Industriales del Departamento de Energía (DOE) de EEUU estima que el 20 % de los ahorros de la energía están asociados con las mejoras en la eficiencia de los motores y los sistemas de suministro eléctrico. Para tener el otro 80 %, es necesario que se tome un enfoque de los sistemas, teniendo en cuenta todas las partes que los conforman, incluyendo la carga impulsada y el proceso.

Los sistemas con motores se pueden desglosar en cuatro partes interrelacionadas:

1. Un sistema de suministro eléctrico de una instalación que entrega energía desde la empresa eléctrica hasta un determinado sistema, impulsado por motores.
2. Un subsistema de motor/controlador que consta de un dispositivo o dispositivos para el control del motor.
3. Un subsistema mecánico para vincular el motor a la carga impulsada.
4. El proceso mismo, como es el bombeo de agua.

A continuación se identifica los tipos de oportunidades de ahorro de energía disponible en los motores y también subraya el enfoque que hay que utilizar para lograrlas [7].

Las oportunidades para mejorar la eficiencia están disponibles en cada uno de estos componentes como se muestra en la **figura 1.1**.

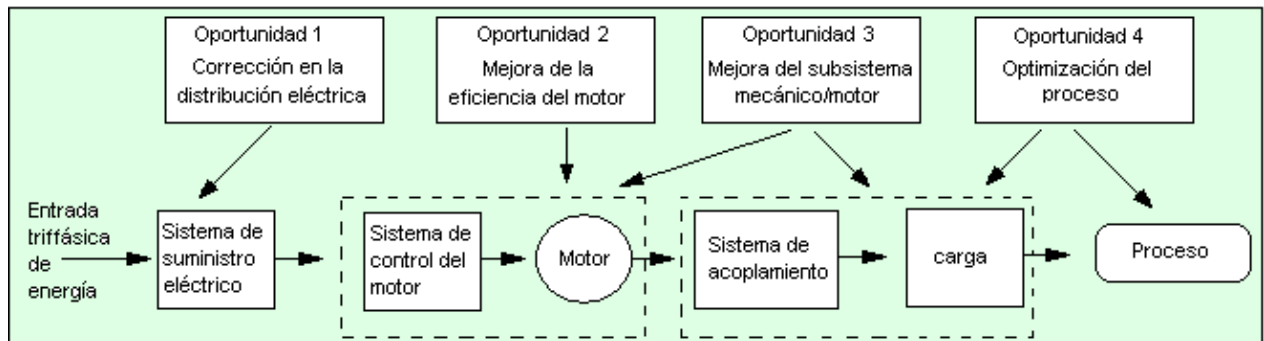


Figura 1.1. Sistema Impulsado por Motor y Oportunidades de Mejora de la Eficiencia.

Oportunidad 1.

Las oportunidades que se encuentran en el sistema de distribución eléctrica incluyen lo siguiente:

- Garantizar que los niveles de voltaje estén tan cerca de las características de chapa del motor como sea posible, con un máximo de desviación sugerido de 5 %. (A 5 % de bajo voltaje, las pérdidas de cobre aumentan un 10 %).
- Minimizar el desbalance de la fase hasta dentro de una tolerancia de 1 %. (3.5 % De desviación del voltaje de una fase a partir de los voltajes promedio de la fase aumenta la temperatura del motor en 14 % y reduce rendimiento).
- Mantener un factor de potencia alto para reducir las perdidas del sistema de distribución.
- Evitar un contenido armónico excesivo.
- En una nueva instalación, usar cables de distribución de mayor calibre para reducir la pérdida en los conductores.

Oportunidad 2.

Las oportunidades para mejorar la eficiencia del motor incluyen lo siguiente:

- Especificar el nuevo o los nuevos motores con eficiencia mejorada en situaciones nuevas o de quemado. La eficiencia de los nuevos motores (0.75 hasta 200kW) ha sido controlada por una Norma de Rendimiento de Energía Mínima obligatoria (MEPS) desde el 2001 y los niveles subieron en el 2006. Por consiguiente, los motores más viejos serán de una eficiencia más baja. La eficiencia con frecuencia cae más si los motores existentes son enrollados nuevamente.
- Controlar las temperaturas de los motores garantizando que estén limpios y correctamente ventilados.

Oportunidad 3.

Las oportunidades para lograr una mejora del subsistema mecánico-motor incluyen lo siguiente:

- Instalar un sistema de control de encendido y apagado utilizando conmutadores de tiempo, PLCs y otros controladores para suministrar energía al motor solo cuando se necesite.
- Instalar un controlador de velocidad variable donde la demanda varíe, permitiendo una mejor armonía del motor y subsistema mecánico para los requerimientos del proceso. Este puede incluir el reemplazo del regulador, válvula de control u otro dispositivo ineficiente. Se debe tener cuidado para evitar que los controladores de velocidad variable causen voltajes armónicos excesivos sobre el sistema de distribución. La asistencia técnica con la selección de motores y la predicción de los niveles armónicos y los ahorros que se esperan, está disponibles en la mayoría de los vendedores de motores.
- Motores dimensionados para evitar ineficiencia. Los motores deben funcionar desde 50 % hasta 100 % de su máxima capacidad. (Un estudio en nueva Zelanda encontró que el 50 % de los motores operan a menos del 65 % de carga). Algunos procesos puede que requiera de motores que estén ociosos por un largo periodo de

tiempo, con breves momentos de operación a, o por encima del 100 % de su capacidad. Esto puede que sea inevitable, pero puede que sea posible cambiar el proceso y cambiar esta pobre operatividad. De forma alternativa dichos casos pueden mejorarse simplemente conectando o desconectando controles como los mencionados anteriormente.

Oportunidad 4.

Oportunidades para lograr mayor conducción de cargas y optimización de procesos incluyendo lo siguiente:

- Cambiando o reconfigurando el proceso o aplicación de manera que se necesite menor entrada de energía. Miremos a los conductos o diámetros de tuberías, si se puede mejorar el proceso y si en realidad necesita esa cantidad de energía.
- Bombas sobredimensionadas o pequeñas, ventiladores, compresores u otros conductores de cargas.
- Instalando subsistemas mecánicos más eficientes. Los textos de normas y catálogos de fabricantes dan mayor información acerca de las eficiencias en sistemas de conducción.

Dimensiones relativas de Oportunidades.

Estudios realizados por DOE, cuantifican el potencial de ahorro de las oportunidades que han sido identificadas.

La corrección en la distribución eléctrica representa el 8 % del total del ahorro posible, la eficiencia del motor representa el 13 %, el sistema mecánico el 44 % y la optimización del proceso el 44 %.

La mejora de la eficiencia del proceso es siempre la más efectiva, ya que la energía ahorrada al final de un proceso se multiplica por las eficiencias de energía de cada

componente del sistema. Consideremos un sistema de bombeo típico (ver **figura 1.2**).

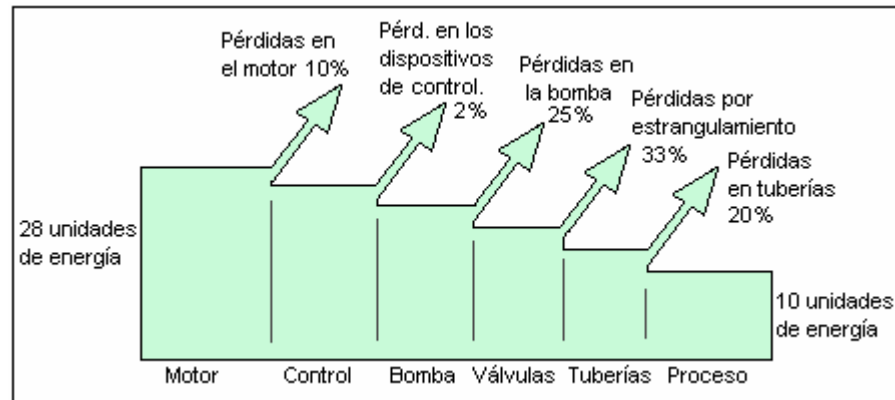


Figura 1.2 Un kWh ahorrado en el proceso, representa cerca de 3kWh ahorrados a la entrada de la planta.

Las bombas ventiladores, y compresores desempeñan la mayor clase de transportación de cargas y cuentan con alrededor del 55 % de la energía que consumen los motores. Todos los fluidos en movimiento requieren de energía para superar las fricción de las descarga de la bomba, esta energía es proporcional al cubo de la velocidad. Consecuentemente una bomba a media velocidad puede utilizar tan poco como un octavo de la energía. Esto significa que si un fluido es bombeado a la mitad del ritmo por dos veces el tiempo el mismo volumen es transportado por 25 % de las perdidas de fricción (la energía para superar la presión de descarga es la misma) y esto es antes de considerar si realmente tenemos que bombear o ventilar este volumen [7].

1.3 Expresiones fundamentales que caracterizan el motor de inducción.

Cando el motor está en funcionamiento, el estator se alimenta de la red y absorbe potencia como se muestra en la **figura 1.3**, la potencia de entrada P_1 está dada por:

$$P_1 = m V_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (1.1)$$

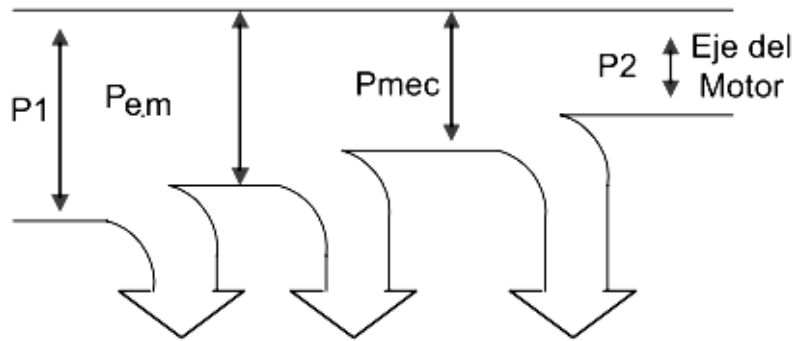


Figura 1.3 Diagrama energético del motor de inducción.

Como es conocido, en el motor de inducción existen cuatro tipos de pérdidas [11]:

1. Las pérdidas en el cobre.
2. Las pérdidas de acero.
3. Las pérdidas mecánicas.
4. Las pérdidas adicionales.

Parte de la P_1 se consume en la resistencia R_1 del devanado del estator ocasionando una pérdida eléctrica p_{cob1} , así como una pérdida en el acero del estator p_{ac} que en comparación con las del rotor son pequeñas, deduciendo dichas componentes, al rotor se le aplica una potencia electromagnética, que se expresa mediante la siguiente ecuación de balance energético:

$$P_{em} = P_1 - p_{cob1} - p_{ac} \quad (1.2)$$

Parte de esta potencia se disipa en cubrir las pérdidas eléctricas del rotor p_{cob2} en su devanado, la potencia resultante es aquella que va a ser convertida en potencia mecánica, expresado por:

$$P_{mec} = P_{em} - p_{cob2} \quad (1.3)$$

La potencia mecánica obtenida en el árbol del eje del rotor, se obtiene luego de vencer su inercia y otras pérdidas adicionales, obteniéndose una potencia P_2 :

$$P_2 = P_{mec} - p_{mec} - p_{ad} \quad (1.4)$$

Las pérdidas de cobre son provocadas por efecto Joule y constituyen entre el 50 % y el 60 % del total siendo, por tanto, las más importantes. Se dividen en las pérdidas de cobre en el rotor que dependen del cuadrado de la corriente del rotor y las pérdidas de cobre del estator que dependen a su vez, del cuadrado de la corriente del estator. El valor de la corriente del rotor depende directamente de la carga mecánica que debe vencer el motor y el del estator es la suma vectorial de esta corriente y la de vacío siendo, por tanto, también dependiente de la carga.

Las pérdidas de acero se deben a las corrientes parásitas que circulan por el acero activo de la máquina, fundamentalmente el del estator, y a las pérdidas por histéresis magnética que ocurren en este mismo lugar. Dependen aproximadamente del cuadrado del flujo y del cuadrado de la frecuencia. En una máquina que trabaja conectada directamente a la red estas variables no dependen de la carga y estas pérdidas pueden considerarse constantes.

Las pérdidas mecánicas, por otra parte, son de tres tipos: las debidas a la fricción en los rodamientos, las de batimiento del aire y las del ventilador que climatiza la máquina, si la ventilación no es forzada. Estas pérdidas son una función no lineal de la velocidad.

Finalmente, las pérdidas adicionales son aquellas que no están consideradas en ninguno de los rubros anteriores y se deben a diversas causas tales como las pérdidas superficiales debidas al ranurado del estator y el rotor, las corrientes parásitas que circulan por los conductores y la deformación del campo magnético, son muy difíciles de evaluar y suelen considerarse constantes e iguales a un 0,5 % de la potencia nominal de entrada según el Comité Electrotécnico Internacional (CEI) o a un valor comprendido entre el 1 % y el 1,5 % de la potencia nominal de entrada según las normas NEMA y de la IEEE.

Influencia del voltaje en la rama de magnetización.

Como se conoce la velocidad (n) con que rota el eje de un motor asincrónico es:

$$N = n_0 (1-s) \quad (1.5)$$

Por lo que para variar la misma partiendo de la expresión (1.5) para el caso de un motor de jaula de ardilla, solo será posible, si influimos en la velocidad sincrónica n_0 :

$$n_0 = (120 \cdot f_1) / \text{polos}. \quad (1.6)$$

Está claro que para variar la velocidad de la máquina de inducción debemos influir en la tensión de entrada y en la frecuencia. Cuando el motor es alimentado con una tensión diferente a su valor nominal, se aprecia una dependencia lineal y directamente proporcional del flujo con respecto a la tensión de entrada, lo que se observa al analizar la ecuación (1.7), lo cual trae aparejado que cualquier variación en la tensión de entrada de la máquina, provoca una variación en el flujo en la misma proporción. Esto origina que el valor de la inducción electromagnética en el entrehierro, que es proporcional al flujo establecido en la máquina, varíe en la misma relación. Si se sigue el análisis, las inducciones electromagnéticas en los dientes del estator y del rotor varían en la misma proporción. Todo esto trae consigo variaciones en las respectivas fuerzas magnetomotrices, lo que provoca una variación en la corriente de magnetización, ya que esta última depende directamente de la fuerza magnetomotriz que se origina en un par de polos de la máquina.

$$U_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{dev} \Phi_1 \quad (1.7)$$

Si se tiene un aumento de la tensión de entrada, se origina un aumento del flujo, provocando a su vez una elevación en las inducciones electromagnéticas y con ellas la intensidad del campo y por lo tanto las fuerzas magnetomotrices y la corriente de magnetización. Si la elevación de la fuerza magnetomotriz total en un par de polos se hace muy grande, puede ocurrir la saturación del circuito magnético de la máquina.

En cambio, si la variación de la tensión es en sentido contrario, o sea, una disminución muy grande, ocurre un descenso considerable en el valor del flujo de la máquina, y por lo tanto, en los valores de la inducción e intensidad del campo electromagnético, por lo que la fuerza magnetomotriz disminuye. Al disminuir esta última, disminuye también la corriente de magnetización, pudiendo alcanzar valores con los cuales no se logre llegar a una magnetización adecuada del circuito magnético de la máquina, trayendo como consecuencias un mal funcionamiento de la misma.

Las pérdidas fundamentales en el acero, al aumentar el nivel de la tensión de entrada, elevan su valor, debido a que dependen de la inducción electromagnética en el inducido de la máquina y en los dientes del estator, y estas experimentan un incremento al aumentar el flujo en la máquina. De la misma forma ocurre con las pérdidas adicionales, por lo que las pérdidas totales en el acero aumentan considerablemente con un aumento de la tensión de entrada. Como la potencia de salida de la máquina es constante y las pérdidas aumentan con el aumento de la tensión la eficiencia de la máquina disminuye.

En cambio, con una disminución de la tensión por debajo de su valor nominal, las pérdidas totales de la máquina disminuyen, por lo que la eficiencia tiende a aumentar.

Los parámetros de marcha en vacío de la máquina se ven afectados también por la variación de la tensión de entrada, ya que la componente activa de la corriente de vacío es inversamente proporcional a la tensión, por lo que un aumento de la tensión de entrada provoca una disminución en esta componente, y una reducción en la tensión de entrada trae consigo un efecto contrario al anterior. Como la corriente de vacío está dividida en dos componentes, activa y reactiva, al variar la componente activa varía la corriente de vacío de la máquina, pero de una forma más lenta que la componente activa de ésta.

Al contrario de lo que sucede con la las pérdidas de la máquina que aumentan al aumentar la tensión de entrada, la resistencia y la reactancia representativas del núcleo de la máquina, sufren una disminución considerable, ya que son inversamente proporcionales a la corriente de magnetización, y al aumentar la tensión de entrada esta última aumenta, debido al aumento del flujo total de la máquina y el consiguiente aumento de la fuerza magnetomotriz total generada en un par de polos de la máquina. Sin embargo, al disminuir la tensión de entrada por debajo de su valor nominal, la resistencia y la reactancia de magnetización, experimentan un rápido crecimiento, lo cual es debido a que la máquina al disminuir la tensión de entrada, no alcanza una saturación adecuada, la corriente de magnetización disminuye debido a la poca intensidad del campo magnético en la zona de los dientes y del núcleo de la máquina, provocando una disminución en la fuerza magnetomotriz total en un par de polos, por lo que las pérdidas de acero y adicionales se hacen más grandes.

Para mantener el flujo constante debe ser variada simultáneamente la tensión de tal forma que U_1/f_1 permanezca constante. A frecuencias por debajo y próximas a la nominal el momento máximo permanece prácticamente constante. En el caso de cargas mecánicas en las cuales el momento disminuye rápidamente con la disminución de la velocidad como es el caso de las bombas, cargas en las cuales el momento depende del cuadrado de la velocidad. En estos casos es conveniente una disminución más rápida de U_1 en comparación con f_1 para bajas velocidades como se muestra en la **figura 1.4**, lo que provocará una disminución del flujo que en este caso mejora la eficiencia y el factor de potencia en el motor.

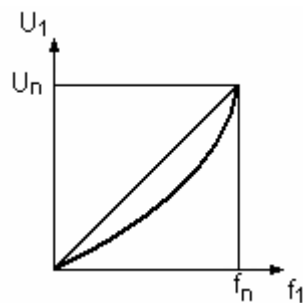


Figura. 1.4 Tensión y frecuencia, para bajas velocidades.

1.3.1 Modelo del Motor de inducción.

Existen varios modelos que pudieran utilizarse para representar al motor de inducción [12] [13], pero el de mayor relevancia ha sido por mucho tiempo el circuito equivalente en T con los parámetros de la rama de magnetización en paralelo o su equivalente serie, cuando se consideran las pérdidas en el acero a través de una resistencia. La **figura 1.6**, muestra el circuito equivalente donde los parámetros del rotor están referidos al estator.

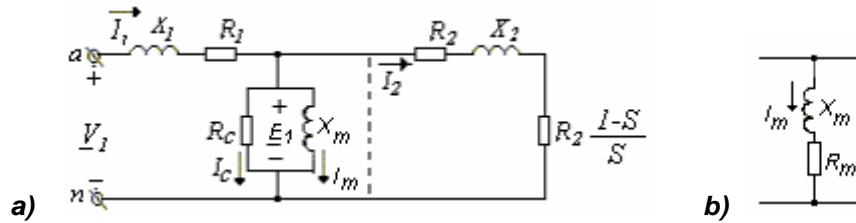


Figura 1.6 Circuito equivalente en T, a) rama de magnetización en paralelo, b) en serie.

El modelo del circuito equivalente se basa en la solución del circuito equivalente de estado estable, deducido en la modelación de la máquina asíncrona. Su ventaja fundamental radica en que la eficiencia y el comportamiento del motor se pueden determinar para diferentes estados de carga. No es invasivo y muy sencillo de aplicar. Su precisión depende de la exactitud de medición o estimación de los parámetros. Es necesario tener en cuenta que el circuito equivalente para el caso de tensión desbalanceada requiere de un circuito para la secuencia positiva y uno de secuencia negativa. La medición del consumo mediante un analizador de redes es el método más exacto para determinar la potencia de entrada del motor. También puede leerse la corriente y la potencia reactiva y determinar el factor de potencia. Es poco invasivo y a menos que el instrumento esté conectado permanentemente, es necesario detener el motor para su instalación.

A continuación se analiza una forma de hallar el circuito equivalente [17], el mismo se logra partiendo de los datos nominales del motor y utilizando el equivalente de Thevenin, estas ecuaciones se utilizarán en el cálculo que hace internamente una aplicación de Matlab, a la que se recurrirá en el capítulo dos.

Partiendo del modelo general se obtiene el circuito equivalente de Thevenin (ver **figura 1.7**), del cual se deduce que dicha tensión representa una magnitud compleja, y está asociada con la impedancia del mismo nombre.

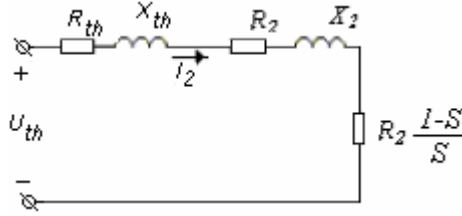


Figura 1.7 Circuito equivalente de Thevenin.

Sin considerar la resistencia de la rama de magnetización se tiene las siguientes expresiones:

Tensión de Thevenin, U_{th} :

$$U_{th} = \frac{X_m}{(X_1 + X_m)} \cdot V_1 \quad (1.15)$$

Resistencia de Thevenin, R_{th} :

$$R_{th} \equiv \left[\frac{X_m}{(X_1 + X_m)} \right]^2 \cdot R_1 \quad (1.16)$$

Reactancia de Thevenin, X_{th} :

$$X_{th} = \frac{X_m}{(X_1 + X_m)} \cdot X_1 \quad (1.17)$$

donde:

V_1 , X_1 , y R_1 , son la tensión de alimentación, resistencia y reactancia del devanado del estator respectivamente y X_m reactancia de magnetización.

Para la aplicación de esta metodología se necesitan datos nominales de potencia, tensión, corriente, velocidad en el eje, frecuencia, factor de potencia, coeficiente de sobrecarga y resistencia del estator (r_1) si se dispone, de lo contrario se inicia con valor cero.

Adicionalmente se necesitan otros datos que se obtienen de los anteriores como son: tensión de fase de acuerdo a la conexión del devanado de estator, ángulo del factor de potencia, resistencia y reactancia nominal, número de par de polos, deslizamiento nominal, velocidad angular, par nominal y máximo.

Principales ecuaciones utilizadas:

Partiendo de la expresión de torque obtenida del circuito equivalente de Thevenin se calcula la impedancia, en valor absoluto, para régimen de máximo (Z_m) como sigue:

$$Z_m = \frac{3 \cdot p \cdot U_{th}^2}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot M_m} - R_{th} \quad (1.18)$$

Donde: p es número de pares de polos, f frecuencia en Hz , M_m torque máximo en Nm .

La reactancia de cortocircuito (x_{cc}) se calcula por:

$$x_{cc} = \sqrt{Z_m^2 - R_{th}^2} \quad (1.19)$$

La división de las reactancias inductivas se realiza considerando la clase del motor de acuerdo a las normas NEMA. Para un motor clase B:

$$X_1 = 0.4 \cdot x_{cc} \quad y \quad X_2 = 0.6 x_{cc} \quad (1.20)$$

La impedancia para régimen nominal (Z_n), en valor absoluto, toma la forma de la ecuación:

$$Z_n = \frac{3 \cdot p \cdot U_{th}^2}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot M_n} - R_{th} \quad (1.21)$$

Donde: M_n es el torque nominal en Nm .

La resistencia del rotor (R_2) se obtiene despejando de la expresión de par nominal:

$$R_2 = s_n \cdot \left(Z_n + \sqrt{Z_n^2 - Z_m^2} \right) \quad (1.22)$$

Donde: s_n es el deslizamiento nominal o a plena carga en valores relativos. Utilizando el CE de Thevenin, la corriente del rotor (I_2), en forma compleja, se calcula por:

$$I_2 = \frac{U_{th}}{R_{th} + \frac{R_2}{s_n} + j \cdot x_{cc}} \quad (1.23)$$

La corriente por el estator, en forma compleja (I_{1s}), para el régimen nominal:

$$I_{1s} = I_n \cdot e^{-j\varphi}, \quad (1.24)$$

donde: I_n es el valor efectivo de la corriente nominal en A , φ es el ángulo del factor de potencia.

La corriente de la rama de magnetización (I_m), también en forma compleja:

$$I_m = I_{1s} - I_2 \quad (1.25)$$

La tensión en la rama de magnetización (U_{mag}), también en forma compleja:

$$U_{mag} = V_1 - I_{1s} \cdot (R_1 + jX_1) \quad (1.26)$$

Donde: R_1 y X_1 significan resistencia y reactancia del devanado del estator en Ohm y la impedancia de la rama de magnetización (Z_n) en forma compleja es:

$$Z_m = \frac{U_{mag}}{I_m} \quad (1.27)$$

Luego se realiza la separación de la reactancia (x_m) y resistencia de magnetización (r_m):

$$r_m = \text{parte rereal de } (Z_m) \quad (1.28)$$

$$x_m = \text{parte imaginaria de } (Z_m) \quad (1.29)$$

Es importante resaltar que la resistencia de magnetización puede resultar negativa cuando por alguna razón existe un factor de potencia no acertado como nominal en tal sentido la componente activa de la corriente del estator se hace menor que la del rotor y es necesario una corrección del factor de potencia, dentro de las variaciones aceptadas según fabricantes.

1.3.2 Regulación de la velocidad en motores de inducción.

- A momento constante: $M = \text{constante}$;
- A potencia constante, cuando: $P_2 = \text{constante}$;
- Cuando el momento es proporcional al cuadrado de la frecuencia, es decir:

$$M \sim f_1^2.$$

La investigación de este problema, demuestra que si se desea que el motor trabaje con distintas frecuencias, con los valores del rendimiento, del factor de potencia, de la capacidad de sobrecarga y del deslizamiento absoluto prácticamente constantes, entonces cuando el acero no está saturado simultáneamente con la variación de la frecuencia se debe regular también la tensión U_1 en dependencia de la frecuencia y el momento. La siguiente expresión que da idea de de cómo debe ser variada la tensión y la frecuencia en relación con la carga mecánica a mover:

$$\frac{U_1'}{U_1} = \frac{f_1'}{f_1} \sqrt{\frac{M'}{M}} \quad (1.8)$$

Aquí U_1' y M' son la tensión y el momento correspondientes a la frecuencia f_1' , U_1 y M , correspondientes a la frecuencia f_1 .

Para $M = \text{constante}$, tenemos:

$$\frac{U_1'}{U_1} = \frac{f_1'}{f_1}, \quad (1.9)$$

es decir, la tensión aplicada al motor debe variar proporcionalmente a la frecuencia. Cuando la potencia es constante, el momento del motor varía inversamente proporcional a la velocidad y, por lo tanto, también a la frecuencia, es decir:

$$\frac{M'}{M} = \frac{f_1}{f_1'}, \quad (1.10)$$

de donde:

$$\frac{U_1'}{U_1} = \sqrt{\frac{f_1'}{f_1}}. \quad (1.11)$$

Si $M \sim f_1^2$, entonces:

$$\frac{U_1'}{U_1} = \left(\frac{f_1'}{f_1} \right)^2 \quad (1.12)$$

la tensión aplicada al motor debe variar proporcionalmente al cuadrado de la frecuencia.

En la práctica hay que apartarse algo de estas deducciones en primer lugar, porque el acero de la máquina siempre está en cierto grado saturado y, en segundo lugar, porque las condiciones de refrigeración de la máquina varían con la variación de la velocidad.

Dependencia del momento M_{em} de la frecuencia f_1 siendo $U_1/f_1 = \text{constante}$.

La variación de U_1 y f_1 sucede de tal modo que U_1/f_1 es constante. Para responder la pregunta de que representan en estas condiciones las curvas de $M_{em} = f(s)$ siendo iguales las frecuencias, valgámonos de las fórmulas simplificadas:

$$s_m \approx \frac{R_2}{X_{c.c}} = \frac{R_2}{X_1 + X_2} \quad (1.13)$$

$$M_{m\acute{a}x} = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{4\pi f_1 \sigma_1 \left(r_1 + x_1 + \sigma_1 x_2' \right)} \quad (1.14)$$

De acuerdo con la primera de estas fórmulas el deslizamiento s_m , siendo R_2 constante, varía inversamente proporcional a la frecuencia. Con otras palabras, en las condiciones indicadas el momento M_{em} pasa por el máximo con tanto mayor deslizamiento, cuanto menor es la frecuencia f_1 . Por otro lado, en la magnitud $M_{m\acute{a}x}$ influyen tres variables: U_1 , f_1 y $X_{c.c} = \sigma_1 x_1 + \sigma_1^2 x_2'$. Si despreciamos a R_1 entonces como se ve de la fórmula de $M_{m\acute{a}x}$ anteriormente vista, la variación de U_1 se compensaría con la variación proporcional de f_1 y $X_{c.c}$. En este caso el momento $M_{m\acute{a}x}$ permanecería constante. En realidad disminuye algo con la disminución de la frecuencia.

Lo dicho se ilustra con tres curvas de momentos para $f_1 = 50, 25$ y 10 Hz, dadas en la **figura 1.5**.

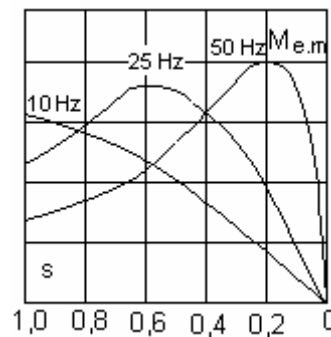


Figura 1.5. Curvas de $M_{em}=f(s)$ siendo $U_1/f_1=\text{constante}$.

1.6 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se describieron las generalidades del motor de inducción, pero no se encuentra en la bibliografía analizada una representación o un estudio específico del comportamiento de estos en la climatización centralizada por agua helada mediante el uso del modelo del motor de inducción y el análisis de condiciones reales de explotación. El estudio de estas máquinas se ha realizado con mayor énfasis en los sistemas de producción industrial, no así en el Sector de los Servicios como es el Turismo, específicamente en la Climatización Centralizada de hoteles. Los circuitos de impulsión son de carácter térmico e hidráulico, pero todavía no se han profundizado en como eso influye en el comportamiento energético del motor.

Capítulo II. Comportamiento del motor de inducción en las bombas de la climatización centralizada

2.1 Introducción.

En el presente capítulo se toma como referencia un hotel caso de estudio, y a partir de las variables de los motores empleados en la impulsión de agua fría y agua caliente, se determinan sus principales características teniendo en cuenta los diferentes estados de trabajo. Se emplearon aplicaciones desarrolladas en Matlab, que permiten en primer lugar, determinar los circuitos equivalentes de los motores implicados y a partir de los mismos introducir esta información en otra aplicación para evaluar el comportamiento del motor ante distintas condiciones reales de operación.

2.2 Características de los motores de inducción en conjunto con el sistema de climatización del hotel Blau Costa Verde.

El Sistema de Climatización Centralizada del Hotel Blau Costa Verde en la actualidad cuenta con una enfriadora de la marca Frioclima que utiliza dos compresores, y dos enfriadoras de la marca GREE con un compresor cada una. Estas deben ser capaces de enfriar toda el agua que se necesita para lograr el confort en todos los locales a climatizar.

El bombeo del agua fría hacia las enfriadoras y hacia los lugares a climatizar se logra a través del Circuito Primario de Agua Fría (CPAF) y el Circuito Secundario de Agua Fría (CSAF) respectivamente. El circuito primario, (ver **figura 2.1**), está compuesto por un conjunto de 4 bombas, las cuales toman el agua de un colector situado por encima del nivel de la bomba a 1,60 m, donde llega el retorno de cada una de las zonas de bombeo a una temperatura promedio de 12 °C. Este primer conjunto de bombas posee las siguientes características:

- Bomba: caudal $50 \text{ m}^3/\text{h}$ y $H = 12\text{m}$.
- Motor: 460V, 6.3A, 3.45 KW, 60 Hz, 1720 rpm, FP 0.84.



Fig.2.1 Bombas del circuito primario de agua fría.

El agua de retorno que se suministra a las enfriadoras para que estas ejecuten su función debe tener un flujo sostenido de aproximadamente 1 minuto para comenzar a proporcionar el cambio de temperatura al agua de retorno que se incorporara al envío. En la actualidad por requerimientos técnicos de las enfriadoras están trabajando las 4 bombas y mediante regulación por válvulas se suministra el agua a los evaporadores. Esto se debe a que las enfriadoras GREE exigen un determinado caudal constante de entrada si no se apagan por protección. Situación distinta tienen la enfriadora Frioclima que tienen un amplio diapason de caudal en la entrada. Anteriormente existía una bomba para cada una de las tres enfriadoras y otra bomba de reserva. Las mismas operaban cuando la enfriadora correspondiente estaba en funcionamiento.

El Circuito Secundario de Agua Fría (CSAF) lo componen 14 bombas, las cuales se encuentran ubicadas en pareja por cada zona a las que se envía el agua, a una de ellas se le denomina principal y a la otra reserva. Estas alternan su funcionamiento al cabo de 7 días de trabajo continuo. En la siguiente tabla se exponen las características de estos dispositivos.

Tabla.2.1 Características de las bombas del circuito secundario de agua fría.

BOMBAS DEL CSAF	ZONA	POTENCIA	CARACTERISITICAS
Bomba 1 y 14	2	12.5 kW	Q = 43m ³ /h H = 50m
Bomba 2 y 13	1	12.5 kW	Q = 28m ³ /h H = 50m
Bomba 3 y 12	3	8.6 kW	Q = 28m ³ /h H = 47m
Bomba 4 y 11	4	6.3 kW	Q = 28m ³ /h H = 44m
Bomba 5 y 10	6	12.5 kW	Q = 28 m ³ /h H = 70m
Bomba 6 y 9	5	8.6 kW	Q = 28m ³ /h H = 60m
Bomba 7 y 8	7	12.5 kW	Q = 42m ³ /h H = 60m

Las bombas del CSAF se encuentran conectadas a variadores de velocidad de la marca Telemecanique (Altivar 28) los cuales son del tipo PI, pero el sistema no se encuentra trabajando de forma automática, sino que se ajusta manualmente mediante una resistencia variable hasta imponer la frecuencia de salida deseada.

Anteriormente estas bombas trabajaban a presión constante lo que significa que al disminuir la carga térmica, el sensor de presión se encargaba de emitir una señal al variador de velocidad encargado de variar el régimen de trabajo de la bomba, manteniéndose así el equilibrio hidráulico de la red.



Figura 2.2 Bombas del circuito secundario de agua fría.

En la **figura 2.2** se muestran las bombas del CSAF, las mismas son centrífugas, de eje vertical con las bocas de aspiración e impulsión en línea, y motor normalizado. El fluido se succiona desde el colector, en el que se produce un intercambio de fluidos para garantizar que el agua de retorno alcance una temperatura adecuada.

Por otra parte el sistema de Agua Caliente Sanitaria (ACS) del Hotel Blau Costa Verde recupera calor actualmente de la enfriadora Frioclima y de una de las GREE. Estas enfriadoras poseen condensación por aire y por agua con 100 % de recuperación de calor vinculado a la producción de ACS.

Para el aprovechamiento del calor de los condensadores, el sistema de ACS cuenta con dos intercambiadores de calor a placas de la marca Alfa Laval. Estos dispositivos tienen una potencia calorífica de 560 000 Kcal/h y un caudal en el primario de 82 m³/h y en el secundario de 20.7 m³/h, con una presión de trabajo de 6.9 bar. La temperatura de diseño es de 110 °C con 48 placas de un espesor de 5mm. El área de transferencia es de 6 m² a 9 m². La longitud total de las placas es de 120 mm. En los intercambiadores a placa es donde ocurre el intercambio térmico, es decir una transferencia de calor entre el circuito primario y el secundario.

Para el calentamiento de apoyo se utiliza un calentador, el mismo tiene acoplados sensores de temperatura. Cuando la temperatura del agua a la entrada es inferior a la fijada, el sensor manda una señal y la caldera se conecta automáticamente, hasta que es adecuada para realizar la transferencia de calor en los intercambiadores, luego sensor que está a la salida manda una señal y se desconecta el calentador. Este cuenta con un metro contador en la entrada del gas licuado para obtener el consumo de GLP por días.

El sistema posee además con 4 tanques de almacenamiento de agua caliente sanitaria con una capacidad de 5 m³ por cada tanque para un total de 20 m³, pero solo se están utilizando dos de ellos. El agua almacenada en los tanques es impulsada a las diferentes áreas del hotel y la que no se consume retorna al sistema mediante la

bomba de recirculación. Al agua caliente de retorno se le incorpora el agua a temperatura ambiente equivalente al agua caliente que se consume.

La impulsión de ACS se realiza a través de bombas centrífugas verticales (ver **Figura 2.3**) dispuestas una en operación normal y otra de reserva para cada uno de los tres circuitos, el Circuito Primario de Agua Caliente (CPAC), Circuito Secundario de Agua Caliente (CSAC) y el Circuito de Recirculación (CR). En la **tabla 2.2** aparecen los datos fundamentales de las de estas bombas.

Tabla 2.2 datos de las bombas de ACS.

	Bomba CPAC	Bomba CSAC	Bomba CR
Q (m3/h)	28	7	7
(m)	27	20	20
P (kW)	4.6	2.6	2.6
I (A)	7.5	4.4	4.4
V (r.p.m)	3500	3440	3420
fp	0.89	0.88	0.86
U (Volt)	460	460	460

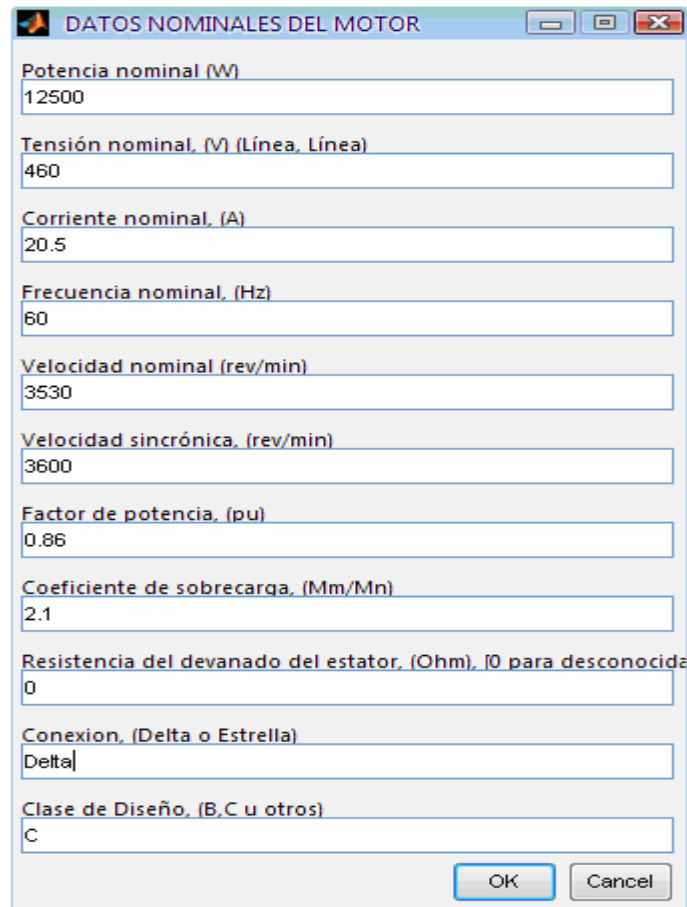


Figura 2.3 Ejemplo de las bombas centrífugas instaladas en los CPAC, CSAC Y CR.

2.2.1 Determinación del circuito equivalente de los motores de inducción.

Mediante una aplicación en Matlab (Ver **figura 2.4**), a partir de los datos nominales de los motores se obtienen los parámetros del circuito equivalente de varios motores que intervienen en la impulsión de agua fría y caliente del hotel, para ello introducimos una serie de datos del motor que generalmente aparecen en la chapa y de necesitar algún otro como la relación entre (Mm/Mn) entonces, es necesario apoyarse en los catálogos.

El modelo del motor que como base toma el software, es el circuito equivalente en T y en la **tabla 2.3** se reflejan los valores para el cálculo de este circuito con la rama de magnetización en serie, aunque también mediante esta aplicación se obtiene los valores del circuito equivalente para la rama de magnetización en paralelo.



Parámetro	Valor
Potencia nominal (W)	12500
Tensión nominal (V) (Línea, Línea)	460
Corriente nominal (A)	20.5
Frecuencia nominal (Hz)	60
Velocidad nominal (rev/min)	3530
Velocidad sincrónica (rev/min)	3600
Factor de potencia (pu)	0.86
Coeficiente de sobrecarga (Mm/Mn)	2.1
Resistencia del devanado del estator (Ohm), [0 para desconocida]	0
Conexion (Delta o Estrella)	Delta
Clase de Diseño (B, C u otros)	C

Figura 2.4 Aplicación en matlab, para la obtención del circuito equivalente.

Luego de introducir cada uno de los datos necesarios de los motores a analizar, el algoritmo de Matlab realiza los cálculos de los circuitos equivalentes de los motores, que aparecen en la **tabla 2.3**. En el **Anexo 1** se muestra la forma en que Matlab visualiza los resultados.

Tabla 2.3. Parámetros del circuito equivalente de los motores.

Bomba	$R_s (\Omega)$	$X_s (\Omega)$	$R_r (\Omega)$	$X_r (\Omega)$	$R_m (\Omega)$	$X_m (\Omega)$
CSAF	2.0461	2.6584	0.7700	6.2030	5.1657	108.1883
CPAC	5.4995	7.1672	2.9642	16.7235	63.8909	380.0538
CSAC	12.8932	12.0710	7.9735	28.1656	41.4913	553.1521
CRAC	9.5345	12.3814	9.2220	28.8898	23.6889	504.1346

2.3 Comportamiento de los motores de inducción en la impulsión de agua fría a caudal variable y constante.

Para analizar el comportamiento de los motores utilizamos un programa elaborado en Matlab. La **figura 2.5** muestra algunas de las características del motor reflejadas en valores por unidad de las nominales.

Datos de chapa del motor la zona seis del CSAF.

Modelo: AM160

$f=50-60$ Hz, $U=440 - 480$ V,

$P=12.5$ kW, $U_n=460$ V,

Conexión Δ , $I_n=20.5$ A,

$n = 3530$ rpm, $\cos \varphi=0.86$.

Por catálogo se tienen los siguientes datos:

$\eta=89.5$ %

$T_{arr}/T_n=2.1$

$I_{arr}/I_n=2.9$

$J=0.034$ kg/m²

No tuvimos la oportunidad de utilizar un analizador de redes lo suficientemente sensible para obtener las mediciones de potencia, que en este caso sería lo más conveniente, por ese motivo estas mediciones se obtuvieron con un Amperímetro de Gancho de alta sensibilidad, marca CIAMPETER, de esta forma se midió corriente para conocer la potencia.

Las mediciones de caudal se realizaron con un flujómetro ultrasónico marca PARAMETRIC, mediante el mismo se obtiene además del caudal, la cantidad de agua consumida en el período de medición.

Los datos se tomaron de forma manual, ya que no se pudo enlazar el flujómetro con el sistema automático, para ello dos compañeros se colocaron en cada área de trabajo y ambos obtuvieron los valores al unísono, mientras que el sistema automático registraba los datos de temperaturas, frecuencia y presión.

Con la ayuda del siguiente programa, a partir de los datos nominales de los motores, las mediciones que se realizaron y el circuito equivalente hallado en el epígrafe anterior podemos representar las características de los diferentes motores (ver **figura 2.5**).

Programa en Matlab.

```
%Datos del motor
clear
Umed = 460; % tensión en volt
p = 1; % Número de pares de polos
fn = 60;
% Principales datos nominales del motor escogido
% Pn (W)   Un (V)   In(A)   nn (rpm)   cos (Fi)   ks   Eficiencia
Pn = 12500; Un = 460; In = 20.5; nn = 3530; fpn = 0.86; ks = 2; Efn = 0.89;
% Parámetros del Circuito Equivalente en Ohm
Rs = 2.0461; Xsn = 2.6584; Rr = 0.7700; Xrn = 6.2030; Rm = 5.1657; Xmn = 108.1883;

%=====
ns = 60*fn/p;

Qn = 28; % Caudal nominal 28 m^3/h
P1 = [2458.1492 2621.6162 2797.0382 3269.969 3312.8522 2946.3362 2956.3362 3269.969...
3676.2074 3822.0422 3973.277 4130.0252 4403.8322 4237.643 4292.4002 4937.7482...
4937.7482 4753.7714 4937.7482 5527.0682 5192.6462 6025.6922 5807.573];
```

```

f = [34.6 34.8 35.2 35.7 35.4 35.4 35.3 35.2 36 36.1 36.5 36.6 37.1 37.4...
37.4 37.4 37.4 37.7 37.7 37.7 37.7 37.7 37.7]; % Frecuencia de medición

Q = [10.08 10.38 10.68 11.4 11.46 10.92 10.92 11.4 11.94 12.12 12.3 12.48...
12.78 12.6 12.66 13.32 13.32 13.14 13.32 13.86 13.56 14.28 14.1]; % m^3/h

n1 = 60*f/p; % Velocidad del campo
sn = (ns-nn)/ns; % Deslizamiento nominal

nv = (1-sn)*n1; % Velocidad considerando deslizamiento constante

Ur = Umed*(f/fn).^2; % Tensión para la frecuencia f

Xs = Xsn*(f./fn); Xr = Xrn*(f./fn); Xm = Xmn*(f./fn);
sr = sn.*(Un./Ur).*(f/fn); % Deslizamiento real
Zs = Rs+Xs*j; Zr = Rr./sr+Xr*j; Zm = Rm+Xm*j; % Impedancias
Zeq = Zs+Zr.*Zm./(Zr+Zm); % Impedancia equivalente

% Corriente I1 compleja a partir de la potencia de entrada
Isc = sqrt(P1./Zeq/3);
% Isc = Ur./Zeq; % Corriente I1 compleja

Irc = Isc.*Zm./(Zm+Zr); % Corriente del rotor en forma compleja
Imc = Isc-Irc; % Corriente de magnetización
Ise = abs (Isc); Ire = abs (Irc); Ime = abs (Imc); % Valores efectivos de Is, Ir, Im

Urn = Isc.*Zeq; % Tensión por recalcu del Circuito Equivalente
Urne = abs (Urn); % Valor efectivo

pel1 = 3*Ise.^2*Rs; pel2 = 3*Ire.^2.*Rr; pmag = 3*Ime.^2*Rm; % Pérdidas eléctricas
pad = 1.8/100*Pn*(Ise/In).^2; pfb = 0.052*Pn.^0.6704; % Pérdidas por fricción y batimiento del aire
Pmec = P1-pel1-pel2-pmag; % Potencia mecánica
Psal = Pmec - pfb - pad; % Potencia de salida

Sum_perd1 = P1-Psal; % Sumatoria de pérdidas
Perdn = Pn*(1/Efn -1);
Sum_perd = Sum_perd1./Perdn; % Pérdidas en valores por unidad de las nominales

Eff = Psal./P1; % rendimiento

% Datos de
Red_guardar = [f' Urne' P1' Psal' Eff' Ise' nv' Sum_perd1']; % Resultados desorganizados
Reo_guardar = sortrows(Red_guardar,4);

Red = [(f/fn)' (Urne/Un)' (P1/Pn)' (Psal/Pn)' Eff' (Ise/In)' (nv/nn)' Sum_perd']; % Resultados
desorganizados
Reo = sortrows(Red,4); % Resultados organizados de acuerdo a la potencia de salida

save Datos_Motor Reo_guardar Reo -ascii % Salva de datos reales y en valores por unidad
% Reo_guardar es valores reales, Reo es valores en valores por unidad

figure(1)
plot(Reo(:,4),Reo(:,2),Reo(:,4),Reo(:,5),Reo(:,4),Reo(:,3),...
Reo(:,4),Reo(:,6),Reo(:,4),Reo(:,7),Reo(:,4),Reo(:,8)),grid
xlabel ('Psal/Pn')
legend ('U. variador','Eficiencia','P. entrada','I. estator',...

```

```
'Velocidad','Perd. Totales','Location','EastOutside')
figure(2)
subplot(321)
plot(Reo(:,4),Reo(:,1)),grid
title('Frecuencia')
subplot(322)
plot(Reo(:,4),Reo(:,2)),grid
title('Tensión')
subplot(323)
plot(Reo(:,4),Reo(:,5)),grid
title('Eficiencia')
subplot(324)
plot(Reo(:,4),Reo(:,3)),grid
title('Potencia')
subplot(325)
plot(Reo(:,4),Reo(:,6)),grid
title('Corriente')
subplot(326)
plot(Reo(:,4),Reo(:,7)),grid
title('Velocidad')
```

Comportamiento del motor de la zona seis del (CSAF), a lazo cerrado y carga térmica variable, desde 1 hasta 59 habitaciones.

Este experimento se realizó con el motor trabajando a lazo cerrado, haciendo variar la carga térmica del edificio (número de habitaciones con la climatización en funcionamiento), en el momento de realizar este ensayo la zona no tenía clientes por esto fue posible establecer diferentes estados de la carga, mediante el encendido y apagado de los fancoils en las diferentes habitaciones, esto permitió que aumentara el consumo de agua fría a medida que se conectaban los fancoils lo que obligaba al control automático a aumentar la frecuencia del motor para mantener una presión constante.

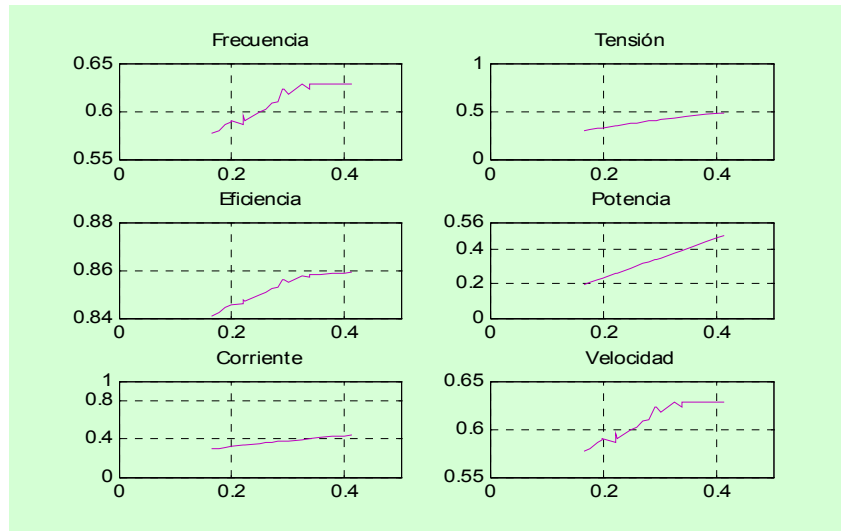


Figura 2.5. Características del motor, en valores por unidad, zona 6, del CSAF variando la carga térmica del edificio.

En la **figura 2.6** se representa la relación que existe entre las pérdidas totales del motor y el caudal que está suministrando la bomba, se puede observar que con una ecuación lineal podemos tener un coeficiente de determinación de 0.9439:

$$y = 4,4843x - 481,8 \quad R^2 = 0,9439$$

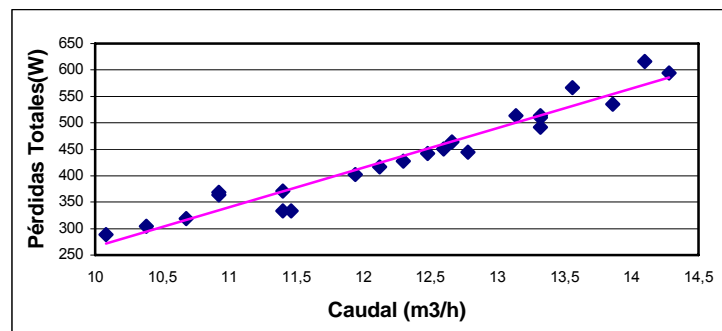


Figura 2.6. Gráfico de dispersión de las pérdidas totales en función del caudal.

Se demostró que para estas condiciones de trabajo, es decir variando la carga térmica del edificio, existe una relación lineal entre el caudal y la frecuencia de trabajo de la bomba. En la **figura 2.7** aparece el gráfico de dispersión de la frecuencia en función del caudal, de donde se obtiene la ecuación lineal:

$$y = 2,4833x - 0,4719 \quad R^2 = 0,9964$$

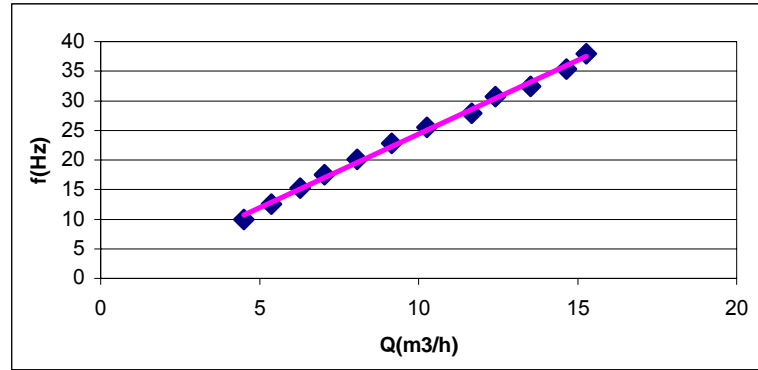


Figura2.7 Gráfico d dispersión de la frecuencia en función del caudal.

Otra relación importante es la que se establece entre el caudal y la potencia en el caso de una bomba. En la **figura 2.8** es apreciable que la relación entre estas dos magnitudes es una función polinómica de tercer orden, por lo que, para pequeños cambios del caudal existen cambios significativos en la potencia. Para este caso la expresión resultante es:

$$y = 0,0012x^3 - 0,0151x^2 + 0,1561x + 0,1364$$

$$R^2 = 0,995$$

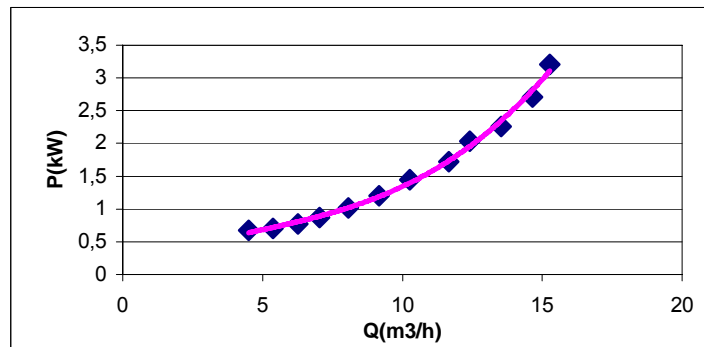


Figura2.8. Gráfico de dispersión de la potencia en función del caudal, a diferentes estados de la carga térmica.

De todo lo anterior se puede decir que a medida que aumenta el caudal de agua que necesita impulsar la bomba para mantener una presión constante en la descarga, también aumentará la potencia que demandará el motor, y que además aumentarán las pérdidas del mismo, por lo que es necesario que el consumo de agua fría para la climatización del hotel sea el mínimo.

Comportamiento del motor de la zona seis del (CSAF), a lazo cerrado con un set point 5 bar y ocupación constante.

También se realizó una simulación a partir de los datos del sistema trabajando a lazo cerrado, a presión constante con un set point de 5 bar. La **figura 2.9** muestra las características energéticas del motor de inducción en la zona seis del SIAF trabajando a este régimen.

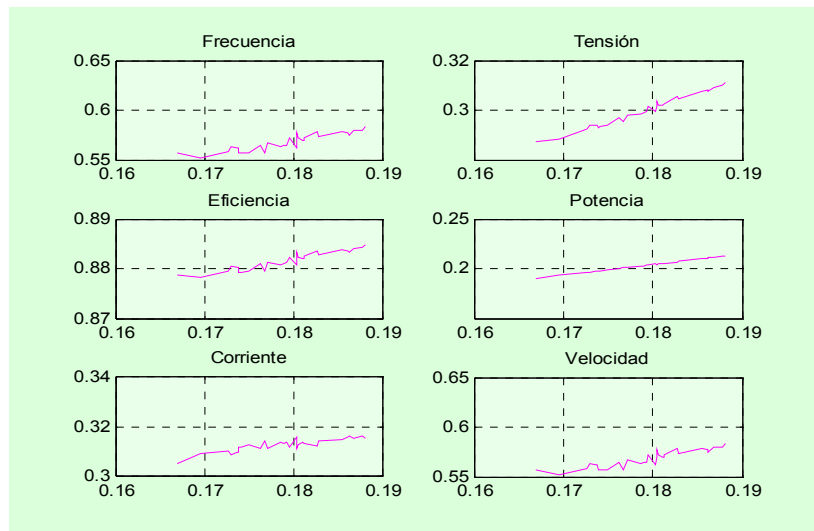


Figura 2.9 Características del motor en valores por unidad, zona 6, del CSAF, a set point de 5 bar.

En el momento en que se hicieron estas mediciones la temperatura ambiente se mantuvo a 25.9 °C como promedio que es muy aproximada a la temperatura media anual de esta región. El hotel se encontraba con un nivel ocupacional alto, y la zona seis donde se realizó la prueba tenía el siguiente esquema de ocupación: una habitación con 4 clientes, 5 habitaciones con 3, 42 habitaciones con 2 y 6 con uno, respectivamente, para un total de 54 habitaciones lo que representa un nivel ocupacional de 91.5 %. En la **figura 2.10** se muestra consumo de potencia para estas condiciones en un intervalo de cuatro horas.

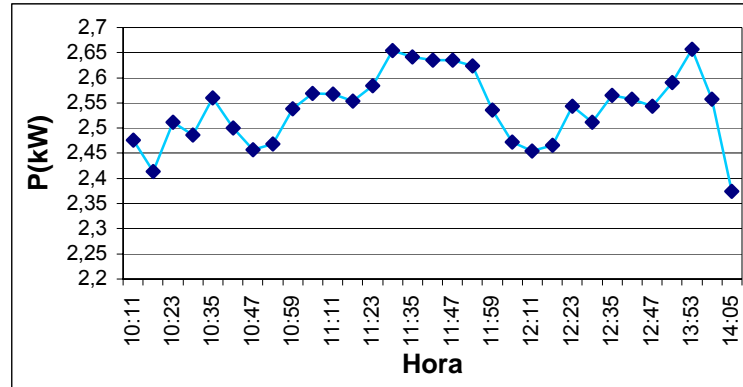


Figura2.10 Gráfico de Potencia.

En la figura anterior se demuestra que la potencia tiene variaciones a pesar de que la ocupación se mantuvo prácticamente constante en el tiempo de medición. La gráfica demuestra que a pesar de que los clientes dejan los fancoils conectados para realizar sus actividades según las entrevistas realizadas a las camareras, existen variaciones de la potencia demandada por el accionamiento. Este elemento corrobora la eficiencia del empleo de los variadores de velocidad aun cuando la carga térmica tiene pequeñas variaciones.

Resultados obtenidos mediante la variación de la frecuencia en el accionamiento, a lazo abierto y ocupación constante.

También obtuvimos resultados de algunos experimentos como es el que seguidamente se analiza, en el cual, el lazo de control estaba abierto. En la **figura2.10** aparece la potencia y el caudal que le corresponde a diferentes frecuencias, podemos percatarnos de que existe una relación lineal entre estas variables.

$$y = 1,8976x - 6,3776 \quad R^2 = 0,9835$$

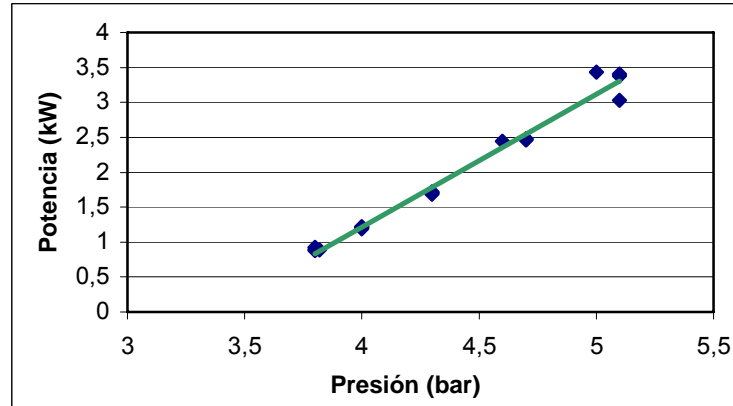


Figura 2.10 Gráfico de dispersión de la Potencia en función de la Presión.

En las horas que se desarrolló este experimento la temperatura ambiente se mantuvo a 22 °C, con una humedad relativa de 52 %. Estas mediciones se hicieron cuatro veces cada cinco minutos, variando la frecuencia en intervalos de 5 Hz y esperando la estabilización del sistema nuevamente ante la perturbación de cada cambio de frecuencia.

Otro resultado que se obtuvo con la situación anteriormente descrita es la ecuación de la potencia en función de la frecuencia, en la **figura 2.11** se muestra la curva, con la cual se comprueba que a medida que la frecuencia se acerca a su valor nominal, la potencia aumenta mucho más rápido en comparación con la frecuencia, la ecuación correspondiente a esta curva es:

$$y = 0,0038x^2 - 0,0696x + 1,0744 \quad R^2 = 0,9925$$

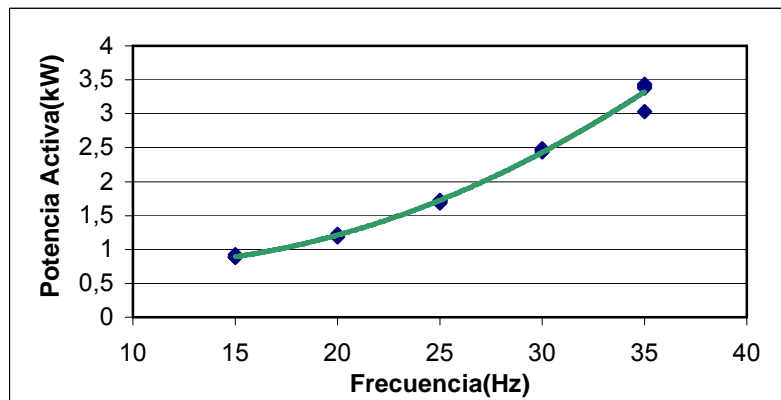


Figura 2.11 Gráfico de dispersión de la Potencia en función del Caudal.

Comportamiento del motor de la zona seis del (CSAF), a lazo cerrado, set point a 4.5 bar y ocupación constante.

El sistema secundario de agua fría, trabajando a una presión de 4.5 bar, se manifestó como se expone en la **figura 2.12**, en la misma podemos apreciar algunas de las variables del motor. Cuando se analizaron algunas variables del sistema, pudimos percatarnos de que el mismo se comporta de manera más estable y con menor cantidad de perturbaciones, al trabajar a esta presión de envío, que cuando lo hace a 5 bar.

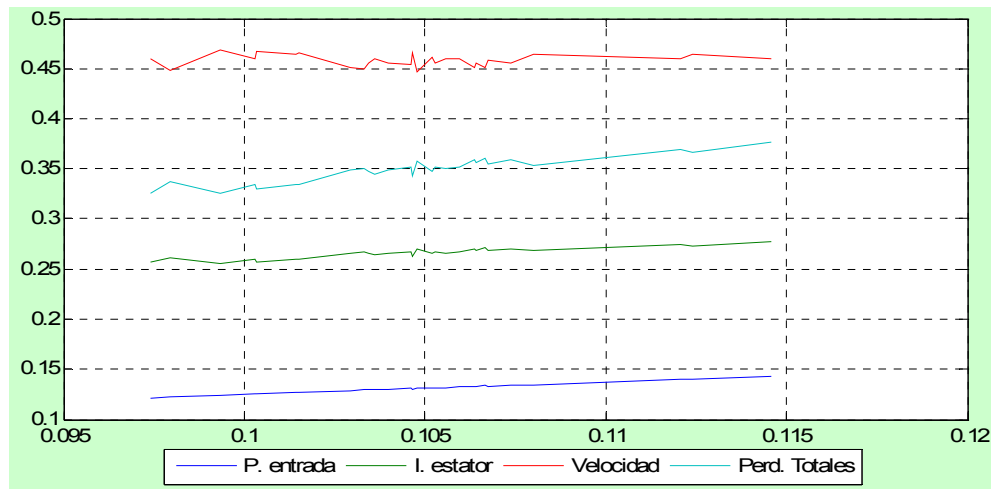


Figura 2.12 Variables del motor de la zona seis en valores por unidad, a 4.5 bar.

La **figura 2.13** representa el consumo de potencia del sistema en las horas de las 10 de la mañana a 2 de la tarde, la curva A, pertenece al experimento que se hizo variando la presión a 5 bar para una ocupación de 91.5 % como se analizó anteriormente y la curva B, representa la potencia que se consume con el sistema trabajando a 4.5 bar, para ese día la ocupación fue de 144 clientes en un total de 55 habitaciones ocupadas lo que representa un 93.2 %.

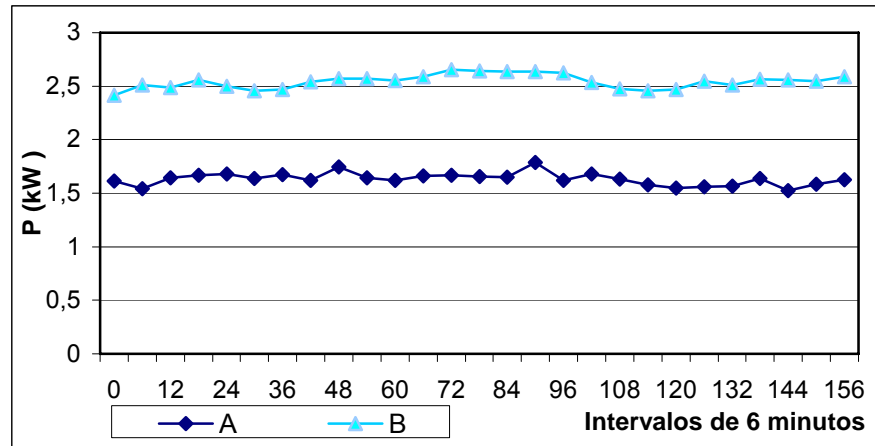


Figura 2.13 Gráfico de Potencia a una presión de 4.5 bar (A), y a 5 bar (B).

La potencia media del motor trabajando a una presión constante de 5 bar a lazo cerrado fue de 2.54 kW y a un régimen de 4.5 bar fue de 1.64 kW. Durante el período en que se realizó este experimento no hubo quejas de ningún cliente por lo que se mantuvo el confort a pesar de la disminución de la presión en el envío, esto demuestra que el sistema trabajando a una menor presión cumple con las exigencias de demanda de agua fría.

Por otra parte, para las mismas condiciones de ocupación, cuando motor trabaja a lazo abierto (caudal y frecuencia constante, $Q=13.99 \text{ m}^3/\text{h}$ y $f = 35 \text{ Hz}$) la potencia media que consume el motor es de 2.74 kW, en este caso trabaja a una potencia prácticamente constante durante todo el día incluso cuando la temperaturas de envío y retorno disminuyen en diferentes horarios del día. Esto significa que si estas temperaturas bajan, el caudal de agua que demanda la red hidráulica para el intercambio de calor en los fancoils no será el mismo en todos los horarios, por lo que podemos decir que el SIAF puede ser utilizado de manera más eficiente con el uso de los variadores de velocidad de forma automática. De esta manera el consumo de potencia será solo el necesario para establecer el confort en los locales a climatizar.

En los resultados de las encuestas realizadas para saber la permanencia de los clientes dentro de las habitaciones, se definió que los clientes mayores de 45 por lo general toman la siesta entre la 1:00 y las 3:00 y se dirigen al dormitorio entre las 10: y las 11:00 de la noche, los que tienen niños lo hacen alrededor de una hora antes. Los clientes menores de 45 por lo general pasan todo el día fuera y regresan a la hora de comida, y luego están fuera de las habitaciones hasta aproximadamente las 12:00 de la noche o más tarde, los que permanecen más tiempo en las habitaciones son los clientes mayores de 60 años. Por lo general al salir de las habitaciones los clientes dejan los fancoils conectados y entre el 40 y 50 % los deja encendido y los pone a baja velocidad.

2.4 Comportamiento de los motores de inducción en la impulsión de agua caliente a caudal variable y constante.

Como se ha dicho la impulsión de ACS se realiza por bombas centrífugas verticales, las mismas se encuentran trabajando a frecuencia constante, lo que significa que se está consumiendo una potencia fija en estas bombas, aún cuando el consumo de agua caliente varíe.

A este régimen de trabajo, las bombas del sistema de ACS utilizan una potencia promedio de 3.8 kW para el CPAC y de 1.7 kW para el circuito secundario y el de recirculación.

En el sistema de ACS se realizaron pruebas de estrangulamiento para conocer el comportamiento de los motores. La regulación por estrangulamiento no es eficiente, y sin embargo es una de las más usadas. Esta regulación consiste en aumentar la resistencia del sistema, la misma se realiza mediante una válvula en la descarga, ya que en la succión no se recomienda.

Cuando se hace este tipo de regulación el punto de operación de la bomba se traslada desde A hasta B, como se muestra en la **figura 2.14** el rendimiento de la bomba disminuye a medida que se estrangula la válvula.

En esta figura N_u es la potencia útil que entrega al fluido en kW y se expresa por:

$$N_u = \frac{\rho g Q H}{1000} \quad (2.1)$$

Donde ρ es la densidad del fluido en kg/m^3 , Q es el caudal en m^3/h , g es la gravedad y H es la carga real que entrega la máquina y se expresa en m .

El rendimiento η es la relación entre la potencia útil y la que es necesario entregarle al eje de la máquina:

$$\eta = \frac{N_u}{N_e} \quad (2.2)$$

Por otra parte cuando se quiere evaluar el rendimiento de la máquina y el motor se emplea el criterio de rendimiento de la instalación:

$$\eta_{int} = \eta \eta_m \quad (2.3)$$

Donde η_m es el rendimiento del motor dado por:

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_m} \quad (2.4)$$

Donde N_m es la potencia consumida por el motor.

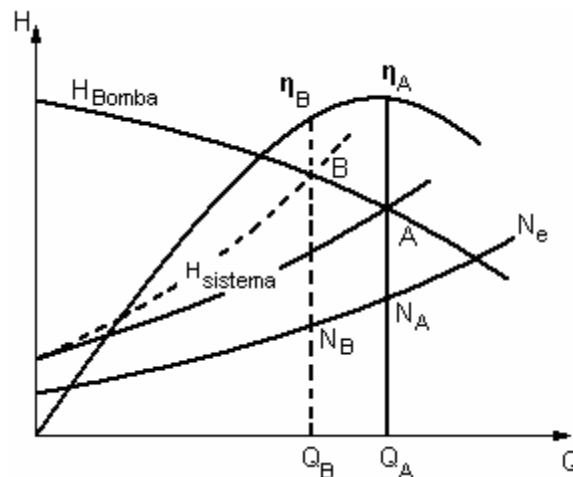


Figura 2.14 Características de la bomba.

En la bomba del CPAC se realizó una prueba de estrangulamiento, para ello la válvula que se encuentra en la descarga de la bomba se colocó de cuatro formas diferentes, primero se tomaron los datos de las variables con una apertura de 100 % de la válvula lo que significa un caudal de 28 m³/h, luego con una apertura de 75 %, 50 % y 25 % para un caudal de 21 m³/h, 14 m³/h y 7 m³/h respectivamente.

Este experimento también se hizo con las bombas de los CSAC y el CR y a continuación en la **figura 2.15** podemos observar como se comportó la potencia de entrada para cada uno de los casos al hacerle la prueba por estrangulamiento a diferentes estados de apertura de la válvula.

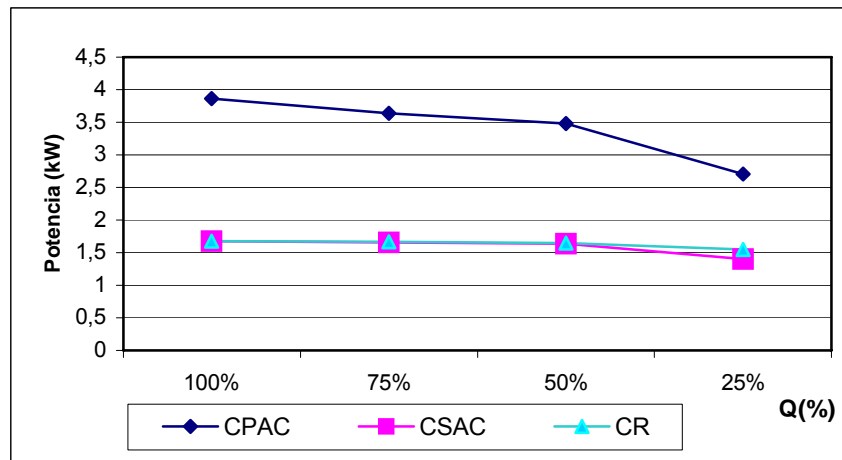


Figura 2.15 Gráfico de las curvas potencia de los motores del CPAC, CSAC y CR

A continuación se muestra como se comportan algunas variables de la bomba del CPAC, para una frecuencia constante, estrangulando el caudal de agua de la bomba. Estos están reflejados en valores por unidad, podemos percatarnos que la velocidad aumenta con la disminución de la potencia (ver **figura 2.16**), esto se debe a que al estrangular el caudal la potencia de salida del motor disminuye por lo que aumenta la velocidad del motor acercándose a la velocidad en vacío.

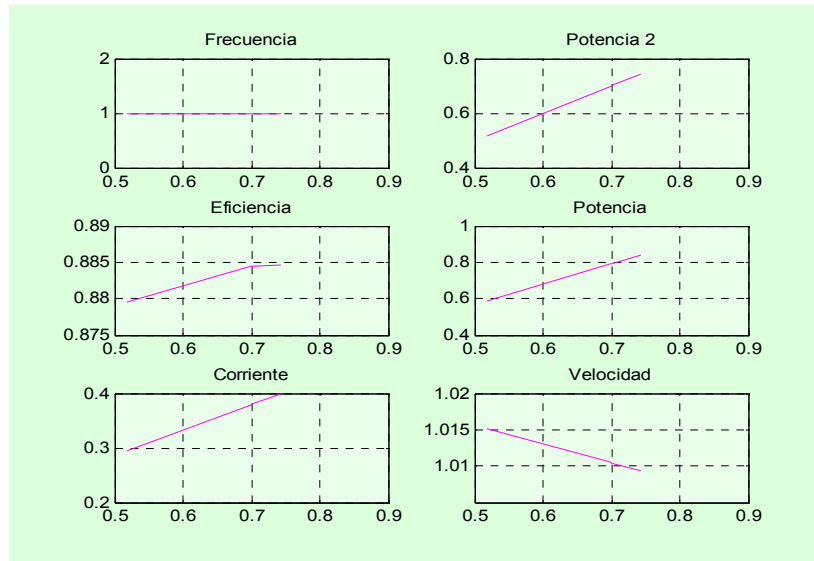


Figura 2.16 Características del motor del CPAC.

En el CPAC se recupera calor de los compresores mediante los intercambiadores de calor, pero sucede que las enfriadoras no se encuentran trabajando todas al unísono, sino que lo hacen en dependencia de la temperatura del agua del CPAC, por lo que no es necesario mantener la bomba trabajando a una potencia constante cuando no siempre se necesita el máximo caudal para la recuperación de calor en los compresores de las enfriadoras.

En el CR también es posible un ahorro considerable de energía ya que el consumo de agua caliente del hotel varía significativamente con la hora del día y con la cantidad de habitaciones que estén ocupadas, por lo que es posible en este circuito un uso más racional de la potencia que consume la bomba.

Para tener una idea del consumo de agua caliente del hotel, se hizo el cálculo teórico del mismo y en la **tabla 2.4** se muestra el caudal necesario en m³/h para satisfacer la demanda máxima de agua caliente a diferentes porcentajes ocupacionales del hotel.

En este cálculo se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$C_A = f \cdot N \cdot C_i + C_x \quad (2.5)$$

Donde:

C_A es el consumo total de agua caliente (l/h),

$N = 309$ número total de habitaciones,

$f = 0.7$ cuando el número de habitaciones es mayor o igual a 25 y se denomina coeficiente de simultaneidad,

C_x consumo promedio en servicios auxiliares, se toma un 25% del producto $N \cdot C_i$ (lavandería, cocina y otros),

C_i consumo promedio de agua caliente en una habitación (l/h),

El consumo promedio de agua caliente en una habitación se determina por la expresión:

$$C_i = 4.17 \cdot n \quad (2.6)$$

Donde 4.17 es el consumo promedio en litros de agua caliente por turistas hora, y n representa el número de ocupantes por habitación. Para los cálculos se escoge el valor de $n = 2.5$.

Tabla 2.4 Consumo de agua caliente.

Cant. Habitaciones	% Ocupacional	Q(m³/h)
309	100%	3.062
250	80,9%	2.4759
200	64,72%	1.9807
150	48,54%	1,4855
100	32,36%	0.9903

Esto demuestra que el caudal puede ser variable, no es necesario que se mantenga un flujo constante de agua caliente en el CR cuando el consumo de esta varía en dependencia de la hora del día, de la ocupación del hotel y el clima.

La **figura 2,15** muestra una medición real de del consumo de ACS del hotel en un horario donde prácticamente no se consume agua caliente en las habitaciones, sino que el mayor gasto es en al área de cocina y restaurantes. Así se demuestra que se

está recirculando una cantidad de agua innecesaria. La bomba del CR se mantiene trabajando a una frecuencia constante de 60 Hz y una potencia de 1.67 kW, cuando la demanda de agua caliente no es la misma en todos los horarios.

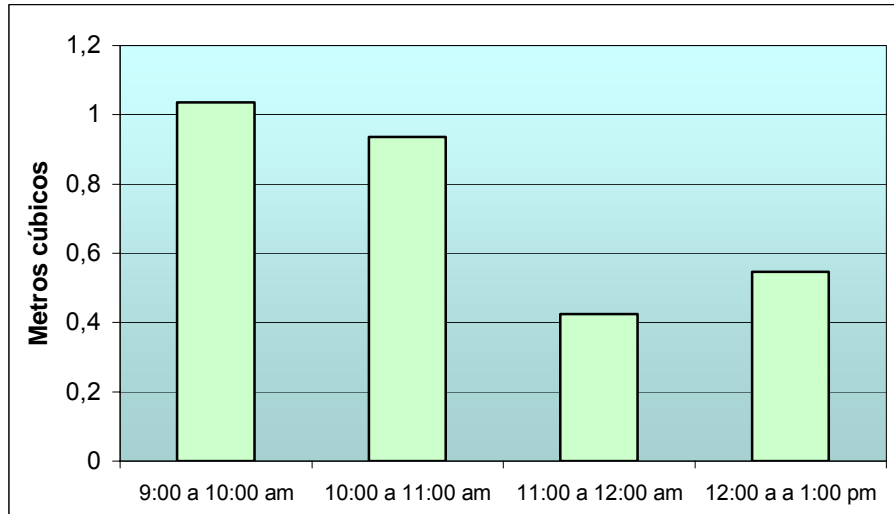


Fig. 2.15 Gráfico del volumen de agua caliente consumido cada hora en (m³).

2.4.1 Variador de velocidad y su integración con el accionamiento de la impulsión de agua fría.

Como se mencionó anteriormente el sistema de impulsión de agua fría tiene conectado variadores de velocidad (Altivar 28), funcionando en forma manual, estos dispositivos no están siendo usados de manera óptima, puesto que los mismos presentan una gran gama de opciones que pueden ser utilizadas con el objetivo de hacer más eficiente el sistema. El control PI que tienen incorporado se está utilizando con los parámetros de fábrica y no se adaptan a plenitud a los requerimientos del sistema.

Estos variadores presentan funciones de aplicación de salidas lógicas configurables de 0 a 20 mA o de 4 a 20 mA. Un relé de protección que se cierra en caso de alcanzar el umbral de corriente o frecuencia del motor cuando es mayor que la prefijada. Una función muy importante es que tiene la posibilidad de poder configurar

las salidas análogas AO para proporcionar la corriente eficaz del motor, frecuencia estimada por el variador, el Par del motor, y la potencia del mismo. En estos momentos no se puede obtener una señal que me permita enlazar todos estos parámetros a un sistema de medición debido a que la configuración actual no lo permite.

La **figura 2.16** muestra el esquema de conexión para el preajuste de fábrica que tiene el Altivar 28, y a continuación se reflejan las condiciones de uso más habituales de operación que tiene programado:

- Frecuencia nominal del motor: 50 Hz.
- Tensión de motor: 230 V ó 400 V, según el modelo.
- Rampas: 3 segundos.
- Mínima velocidad: 0 Hz.
- Máxima velocidad: 50 Hz.
- Ajustes de la corriente de protección térmica motor que es igual a la intensidad nominal del variador.
- Funcionamiento a par constante con control vectorial de flujo sin captador.
- Adaptación automática de la rampa de deceleración cuando hay sobretensión en el frenado.
- Frecuencia de corte 4kHz.
- Potencia de 15 kW.

En caso de que los valores mencionados sean compatibles con la aplicación puede utilizarse el variador sin modificar los ajustes de fábrica, pero si estos no son adecuados se puede preajustar por el menú Set:

- Es posible configurar rampas de aceleración o desaceleración.
- Ajustes de velocidad mínima y máxima.
- Ajustes de la corriente de protección térmica del motor, a la intensidad nominal que figura en la placa de característica del motor.

- Ganancia proporcional del regulador.
- Ganancia integral del regulador.

La ganancia proporcional del regulador y la ganancia integral se pueden ajustar entre los valores de 0.01 a 100 y de 0.01 a 100 1/s respectivamente, mediante ajustes en el menú Set, normalmente se encuentra preajustado de fábrica para una ganancia proporcional de 1 e integral de 1 1/s.

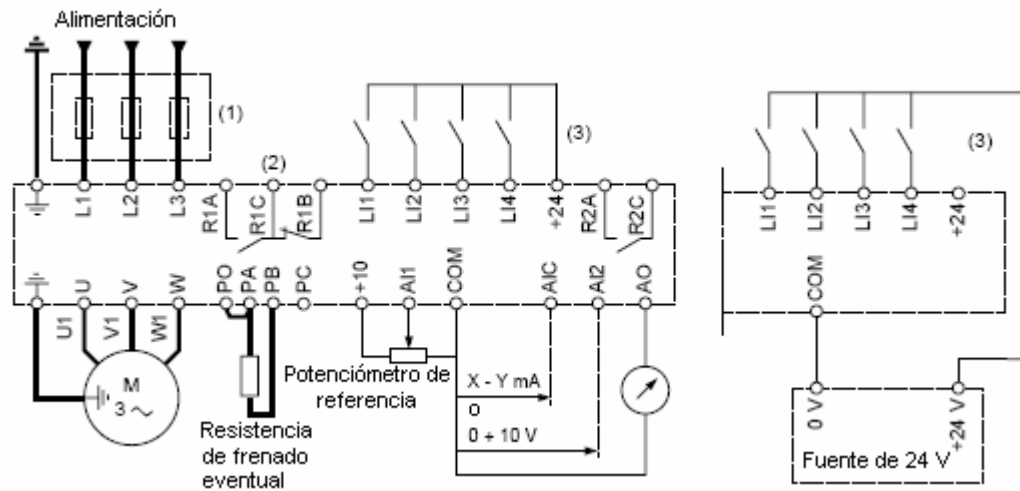


Figura 2.16 Esquema de conexión para el preajuste de fábrica.

En esta figura:

- (1) es la inductancia de línea eventual (monofásica o trifásica),
(2) contactos del relee de seguridad, para señalar a distancia el estado del variador,
y (3) + 24 V interno.

Este variador que se utiliza en el (SIAF) a pesar de tener muchas ventajas se encuentra obsoleto, pues se conoce que ya existen de la generación altivar mas avanzadas, con cualidades superiores a las que vienen integradas controladores con mejores prestaciones.

2.5 Conclusiones del capítulo

Los motores de inducción en el Sistema de Impulsión de Agua Fría se encuentran trabajando por debajo del 50 % de su potencia nominal, no obstante mantienen una eficiencia bastante alta, pero es posible disminuir el consumo de estos, si se conectan los variadores de velocidad de forma automática. En las pruebas que se realizaron se demuestra, que es posible utilizar variadores de velocidad para disminuir el consumo de potencia de las bombas en el Circuito de recirculación de Agua Caliente, ya que el consumo de agua caliente es muy variable en dependencia de la hora del día y de la ocupación.

Capítulo III. Interacción de las variables del proceso y el clima en los motores.

3.1 Introducción.

Se ha demostrado en estudios que abordan el tema de la climatización el influjo de las variables climatológicas en el gasto de energía eléctrica. Esto se debe a que el consumo depende en gran medida de los ciclos de refrigeración instalados para la climatización y el calentamiento de agua sanitaria. Por su importancia, en este capítulo se hará un análisis de la influencia de las variables del sistema de climatización y la temperatura ambiente en las bombas de la climatización centralizada. Además se hace una valoración técnica y se demuestra que a partir de los resultados obtenidos se pueden establecer estrategias para la disminución del consumo de energía en instalaciones hoteleras.

3.2 Influencias de las variables del proceso y el clima en las bombas de la climatización centralizada.

Como se conoce la red hidráulica en malla es muy cambiante y el agua no permanece con el mismo sentido en dependencia del nivel de utilización de la red. Estos comportamientos aleatorios a lazo abierto demuestran que el lazo de control cuando está cerrado tiene una alta dinámica pero es la base del ahorro del consumo de energía eléctrica.

En la **figura 3.1**, se reflejan diferentes presiones en el envío de la bomba para la zona seis del (CSAF). Así se demuestra el carácter aleatorio que hay en la red hidráulica y la imposibilidad de conocer la carga térmica del edificio a menos que funcione la automática de todos los locales climatizados.

Esta medición se realizó a lazo cerrado, cada tres minutos con una frecuencia constante de 35 Hz y una ocupación 94.9 y 91.5 %. Las presiones se obtuvieron con un sistema de medición automático, capaz de reflejar las variables de presión y temperaturas a través de sensores situados en los diferentes puntos a medir.

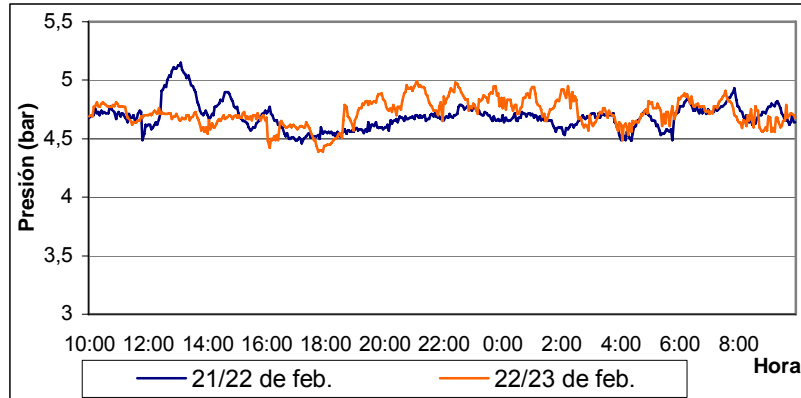


Figura 3.1 Gráfica de presión.

En trabajos precedentes se ha demostrado la influencia de la temperatura ambiente en la climatización de espacios. A continuación en la **figura 3.2** se muestra la temperatura ambiente durante un día. Esta variable climatológica influye directamente en el comportamiento de las variables energéticas del motor de inducción ya que a medida que esta aumenta, mayor será la demanda de agua fría para el intercambio térmico en los lugares a climatizar. Por lo que la bomba tendrá que aumentar la cantidad de fluido que envía a los locales, para lograr una climatización adecuada, y esto lleva a un aumento de la potencia de entrada en las bombas centrífugas y los compresores situados en las enfriadoras.

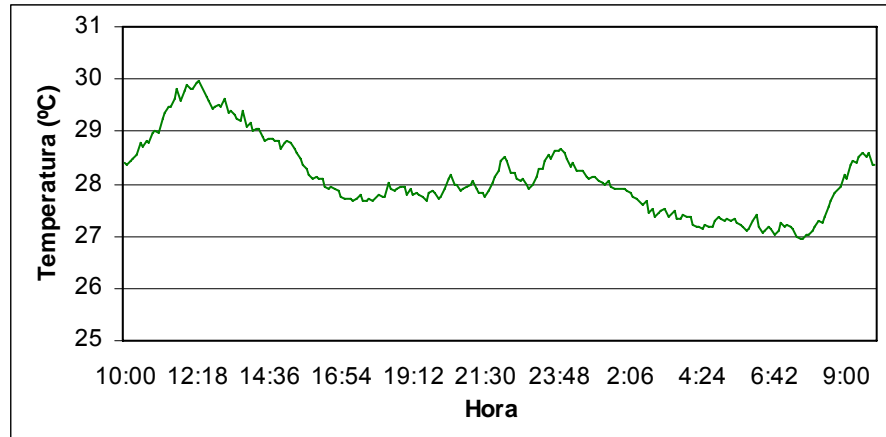


Figura 3.2 Temperatura ambiente, 28 al 29 de marzo.

Una vigilancia de esta variable es de mucha importancia ya que en los sistemas a caudal variable no solo se debe adaptar el fluido para la convección forzada que se produce en los fancoils, sino también que estos fluidos deben estar en proporción a la cantidad de calor que extraen de los edificios.

A continuación se muestra como varía la absorción de calor que se produce en el edificio. En la **figura 3.3** se representa la cantidad de calor absorbida para las condiciones de temperatura ambiente que se analizó anteriormente. Estos datos fueron tomados con el sistema trabajando a lazo abierto.

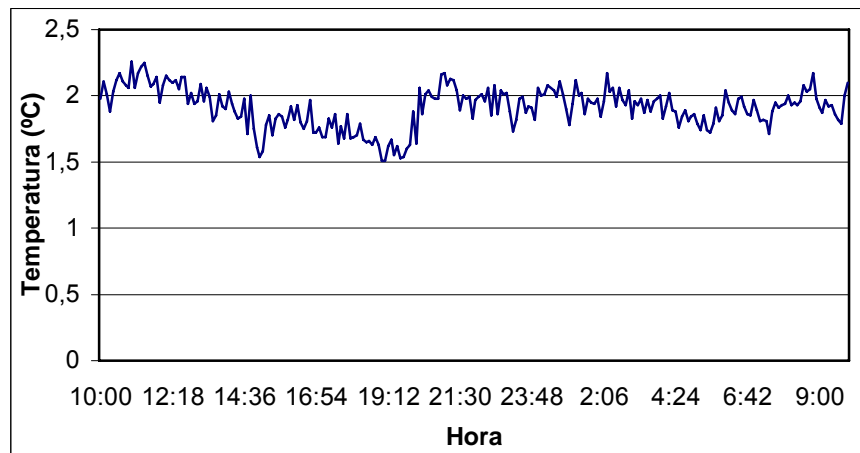


Figura 3.3 Intercambio térmico, lazo abierto.

Las diferencias de temperatura entre el envío y el retorno de agua fría reflejan el grado de intercambio térmico con el edificio. Como se conoce la carga térmica del edificio es variable durante todas las horas del día y es influenciada por las condiciones ambientales.

Seguidamente se muestra el intercambio térmico con el edificio (**figura 3.4**), esta vez con el control a lazo cerrado. Estos datos pertenecen al experimento que se analizó en el capítulo anterior, con un set point de 4.5 bar y una temperatura ambiente media de 27.6 °C en el tiempo que duró el ensayo.

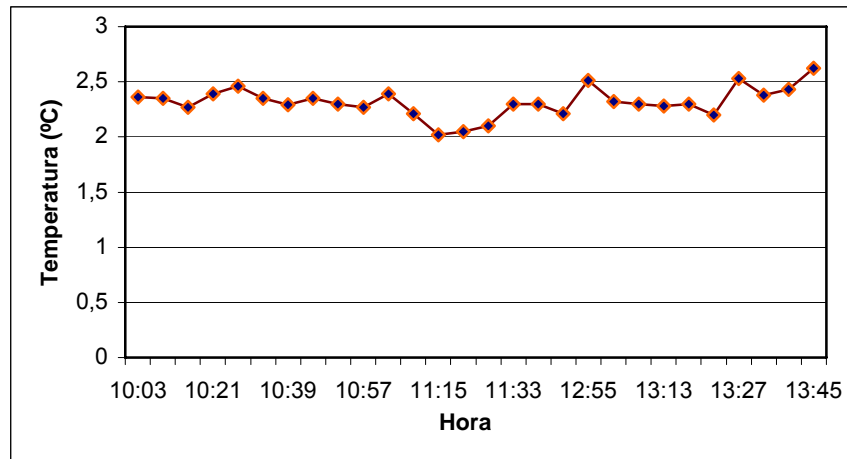


Figura 3.4 intercambio térmico, lazo cerrado.

En este resultado se demuestra la influencia de la temperatura ambiente en el proceso de climatización. Para ambos casos el intercambio con el edificio fue aproximadamente de 2 °C, pero en el primero la temperatura ambiente, de envío y retorno promedio fueron de 28, 18 y 20 °C respectivamente y para el segundo 27, 14 y 18 °C. Esto significa que a medida que las temperaturas aumentan, las bombas del CPAC y el CSAF deben aumentar el flujo de agua hacia las enfriadoras y la carga térmica, para lograr establecer el confort deseado en la instalación.

Por otra parte se realizó un experimento con el lazo de control a varios set point de presión. Primeramente la frecuencia se encontraba a 35.5 Hz y la presión en 5 bar,

luego esta última se fue disminuyendo gradualmente. Esto demuestra la adaptabilidad del sistema a cualquier presión que se le imponga.

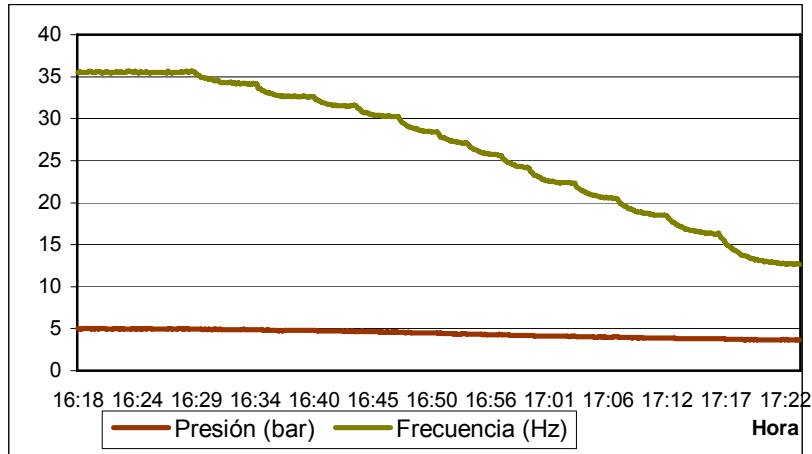


Figura 3.5 Curvas de frecuencia y presión.

Además tenemos en la **figura 3.6** las curvas de frecuencia y la potencia que consume el motor. En el capítulo anterior se pudo ver que la relación entre la potencia y la frecuencia es cuadrática, y entre la potencia y la presión es lineal. Esta representación y la anterior constituyen muestra de ello.

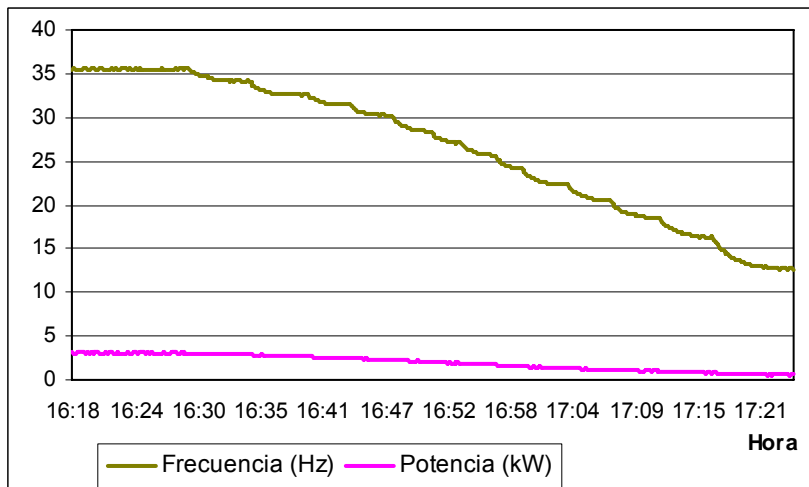


Figura 3.6 Curvas de Frecuencia y potencia.

3.3 Valoración técnica.

Por su importancia se consideró necesario realizar una valoración técnica, ya que a partir de los resultados obtenidos en este proyecto, queda demostrada la posibilidad de fomentar mejoras en el Sistema de Impulsión de Agua Fría (SIAF) y el sistema de impulsión de Agua Caliente Sanitaria (ACS). El consumo de energía eléctrica en los sistemas de climatización centralizada, se refleja de manera directa, en el motor de inducción, que acciona la bomba centrífuga, y los compresores en las enfriadoras.

En este trabajo se evalúa el comportamiento de las variables energéticas del motor de inducción en la climatización centralizada en las instalaciones hoteleras, partiendo de esto se demostró que se puede hacer un uso más eficiente de estos dispositivos. De aquí la posibilidad de llevar este conocimiento a otros hoteles, para así disminuir el consumo de los motores de inducción en estas empresas.

Queda probado que el uso de variadores de velocidad en los motores de estos accionamientos, logaran reducir el consumo de energía. En el sistema de impulsión de (ACS) en específico las bombas del Circuito de Recirculación (CR), se demostró que el consumo de agua es muy variable en dependencia de la hora del día y la ocupación, por lo que no es necesario mantener la bomba consumiendo una potencia fija.

En el Circuito Primario de Agua Fría (CPAF) también se puede fomentar el uso de los variadores de velocidad, ya que la cantidad de agua que se necesita enviar a las enfriadoras no siempre es el mismo.

Por otra parte el Circuito Secundario de Agua Fría (CSAF), posee grandes posibilidades de ahorro, puesto que actualmente se encuentra consumiendo una potencia fija, para impulsar un caudal constate. Se pudo constatar la variabilidad del flujo de agua, y esto está influenciado por la ocupación, la hora y las condiciones ambientales.

Teniendo en cuenta todo esto, a continuación se muestran un conjunto de medidas que permitirán el uso más eficiente de estos sistemas:

1. Realizar un mantenimiento adecuado de las máquinas según especificaciones de diseño y sustituir los accesorios cuando estos lleguen a su tiempo de vida útil y no cuando se deterioren.
2. Aplicar tecnología avanzada en los mantenimientos.
3. Balancear correctamente el Sistema de Impulsión de Agua Fría (SIAF), pues han ocurrido cambios desde su puesta en marcha y esto ha traído como consecuencia, que se han tenido que conectar las cuatro bombas del Circuito Primario de Agua Fría, para abastecer las enfriadoras, cuando anteriormente solo se ponían en marcha tres y una de reserva. Esto puede ser producto del mal funcionamiento de algunas válvulas.
4. Sustituir todos los sensores defectuosos y conectar las bombas del (SIAF) aun sistema automático de adquisición de datos y control, que permita a través de los variadores de velocidad, la regulación automática de la potencia de los motores de acuerdo con la demanda de agua fría para la climatización.
5. Establecer un set point de presión más pequeño que el actual, para el control de velocidad en las bombas del (SIAF). Esto permitirá disminuir la potencia de los motores. Se demostró que en la zona seis es posible reducir la presión de 5 a 4.5 bar.
6. Utilizar variadores de velocidad en el Circuito de Recirculación de Agua Caliente, ya que se demostró que el consumo de agua caliente del hotel es variable.
7. Conectar nuevos autómatas en las habitaciones y enlazarlos con el sistema automático.

Al hacer un pequeño análisis del consumo de energía, cuando se reduce la presión de 5 a 4.5 bar, en 4 horas que duró el experimento se dejaron de consumir 3.6 kWh que equivale a 0.34 CUC, en un mes se ahorrarían 62.1 CUC, según el precio del kWh determinado por la empresa eléctrica. Para el horario de verano el kWh es pagado por el hotel a \$ 0.095 CUC, entre las 6:00 y las 18:00 horas, a \$ 0.17 CUC

entre las 18:00 y 22:00 horas y desde las 6:00 hasta las 22:00 a \$0.06 CUC. Las otras medidas no se tuvieron en cuenta para este análisis pues no se contó con los datos necesarios para ello.

3.4 Conclusiones del capítulo

Podemos concluir que conviene mantener una vigilancia de las condiciones ambientales pues estas influyen de manera directa en el sistema de climatización. En las instalaciones turísticas, se debe hacer un uso más eficiente de los sistemas de climatización, para ello es necesario que se utilice la tecnología que está disponible en el mercado como es el uso de variadores de velocidad y sistemas automáticos de medición y control. Lo que llevará a una utilización más precisa de la potencia que consumen los motores de inducción, para mantener el confort deseado. Así se reducirá el consumo de energía eléctrica en estas instalaciones.

Conclusiones

- Mediante la utilización y elaboración de aplicaciones en Matlab. Se determinaron los parámetros de los circuitos equivalentes y las características energéticas de los motores de inducción que intervienen en la impulsión de agua fría y caliente en la climatización centralizada en el hotel caso de estudio.
- Con los resultados obtenidos se demostró que es posible hacer un uso más eficiente de los motores que utilizan los Sistemas de Impulsión de Agua Fría y de Agua Caliente Sanitaria, lo que posibilita un ahorro considerable de energía eléctrica en la climatización de estas instalaciones turísticas.
- Se demostró que es necesario una vigilancia de las variables del sistema y el clima, ya que estas intervienen en el comportamiento energético de los motores que accionan las bombas centrífugas y los compresores de la climatización centralizada.

Recomendaciones

- Sustituir los sensores defectuosos y conectar los variadores de velocidad a un sistema automático de medición y control en el Circuito Secundario Agua Fría, que permita la regulación automática de la velocidad de estas bombas.
- Implementar el uso de variadores de velocidad en El Circuito Primario de Agua Caliente (CPAC) y en el Circuito de Recirculación (CR), pues se demostró que en ambos casos el flujo de agua puede ser variable.
- Conectar nuevos autómatas en las habitaciones y enlazarlos con el sistema automático, esto permitirá conocer de manera detallada el estado de la carga térmica.

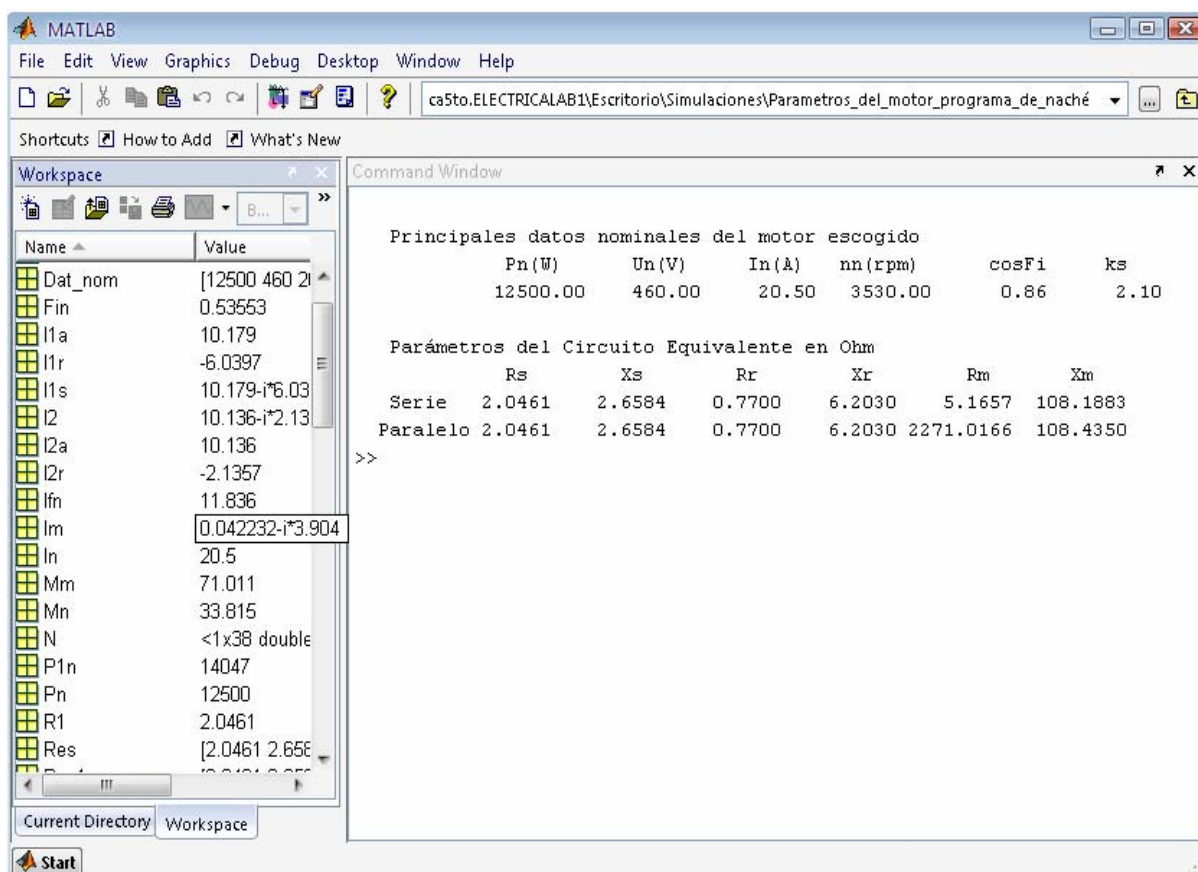
Referencias Bibliográficas

1. A. T. De Almeida, [et. al.]. Improving the Penetration of Energy Efficient Motors and Drives. European Commission, 2000.
2. Beekans, V.; J. De Lara. Optimización de la altura manométrica de la bomba y ahorro energético. [2003-3-3].
3. Boldea, I.; Nasar, S. Electric Drives, Editorial CTRL, 2000.
4. Brito Socarrás, H.; Bermelo, E.; Arafet Padilla, P. Influencia del Voltaje de Alimentación en los Parámetros de la Rama de Magnetización del Motor Asíncrono Jaula de Ardilla. CIE'2007. 4p.
5. Calzadilla García, O. Estudio del Sistema de Climatización Centralizado del hotel LTI Costa Verde Beach Resort. Reineris Montero, tutor. Trabajo de Diploma. Moa: ISMMM, 2002. 120h
6. Costa, A.; Bonne, F. Principios fundamentales del Accionamiento Eléctrico. Editorial Pueblo y Educación, Habana, Cuba, 1988.
7. Energy Audit Manual. New Zealand: 2007. 177p.
8. Ferrán, A. Energy Management in Hotels and Implanting. Environmental Labels. Spain: ICAEN, 2003.
9. Góngora Ruiz, Y.; Alfonso Tamayo, Y. R. Análisis de los regímenes de explotación de los sistemas de Impulsión de Agua Fría y Caliente en el Hotel Blau Costa Verde. Reineris Montero Laurencio, tutor. Trabajo de diploma. Moa: ISMM, 2007. 61 h.
10. Johannesen, R. Energy Savings in Hotels and Motels. Florida Energy Extension Service, Miami, USA, 2005. p 8.
11. Kostenco, M.; Piotrosky, L. Máquinas Eléctricas, Tomo II. Editorial Mir, Moscú, 1976.
12. Lehtla, T...[et.al.]. Parameter identification and comparison of an induction motor models, Tallinn Technical University, Estonia.
13. Martinez J, A.; Johnson, B.; Grande-Moran, C. Parameter Determination for Modeling System Transients, Part IV: Rotating Machines. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, July 2005 pp. 2063-2072.

14. Montero Laurencio, R... [et.al.]. Diagnóstico Energético Hotel Playa Pesquero. Grupo de Eficiencia Energética de Moa, ISMMM, 2003. 79p.
15. Oficina Nacional de Estadísticas. Estadísticas Seleccionadas en Cuba. Anuario Estadístico de Cuba, 2004.
Disponible en: <http://www.energuia.com>.
16. Ramos Páez, N. Bombas Ventiladores y Compresores. Editora ISPJAE, La Habana, 1995.
17. Romero Rueda, I.; Pérez Mena, B.; Guerrero Rojas, Y. Nuevo Enfoque para la Determinación de los Parámetros del Motor de Inducción por Datos Nominales. CIE'2007. 4p.
18. Urbazo Arzuaga, E. R... [et.al.]. Identificación del sistema de climatización de un hotel. Centro de Estudios de Automatización (CEA). 2004.
19. Vilaragut Llanes, M.; Costa Montiel, A. Análisis y simulación de accionamientos de velocidad variable con optimización de la eficiencia utilizando lógica difusa. Convención Internacional de Ingeniería en Cuba, 2008. 10p.
20. Voldek, A. I. Máquinas Eléctricas. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1974.

Anexos

Anexo #1. Ventana en Matlab que refleja las características del circuito equivalente de los motores.



Anexo # 2. Datos de las mediciones y características del motor de la zona 6 del CPAF, a lazo cerrado, haciendo variar la carga térmica.

F(Hz)	U. Variador (V)	P1 (W)	P2 (W)	Eff	I. Estator (A)	rpm	Pérdidas(W)	Q(m³/h)
34,6	130,91	2458,15	2169,96	0,88	6,26	2036	288,19	10,08
34,8	135,6	2621,62	2317,66	0,88	6,44	2047	303,96	10,38
35,2	140,88	2797,04	2477,76	0,89	6,62	2071	319,27	10,68
35,3	144,8	2946,34	2612,37	0,89	6,78	2077	333,97	11,4
35,4	145,01	2946,34	2613,17	0,89	6,77	2083	333,17	11,46
35,2	152,32	3269,97	2901,62	0,89	7,16	2071	368,35	10,92
35,7	153,43	3269,97	2906,01	0,89	7,1	2100	363,95	10,92
35,4	153,76	3312,85	2941,85	0,89	7,18	2083	371,01	11,4
36	163,37	3676,21	3273,55	0,89	7,5	2118	402,66	11,94
36,1	166,82	3822,04	3405,56	0,89	7,64	2124	416,48	12,12
36,5	171,05	3973,28	3545,56	0,89	7,74	2147	427,72	12,3
36,6	174,63	4130,03	3687,63	0,89	7,88	2153	442,4	12,48
37,4	178,86	4237,64	3792,91	0,9	7,9	2200	444,73	12,78
37,4	180,01	4292,4	3842,3	0,9	7,95	2200	450,11	12,6
37,1	181,58	4403,83	3939,55	0,89	8,08	2183	464,28	12,66
37,7	190,21	4753,77	4261,86	0,9	8,33	2218	491,91	13,32
37,4	193,07	4937,75	4424,33	0,9	8,53	2200	513,42	13,32
37,4	193,07	4937,75	4424,33	0,9	8,53	2200	513,42	13,14
37,7	193,86	4937,75	4427,92	0,9	8,49	2218	509,83	13,32
37,7	198,8	5192,65	4658	0,9	8,71	2218	534,65	13,86
37,7	205,1	5527,07	4959,86	0,9	8,98	2218	567,21	13,56
37,7	210,24	5807,57	5213,05	0,9	9,21	2218	594,53	14,28
37,7	214,15	6025,69	5409,93	0,9	9,38	2218	615,77	14,1

Anexo #3. Datos de las mediciones y características del motor de la zona 6 del CPAF, a lazo cerrado, a 5bar y una ocupación constante.

F(Hz)	U. Variador (V)	P1 (kW)	P2 (kW)	Eff	I. Estator (A)	rpm	Q (m3/h)
33,4	134,6624	2,4755	2,0694	0,84	6,1277	1965	13,32
33,1	132,4208	2,4141	2,0143	0,83	6,0769	1947,4	13,32
33,4	135,6443	2,5118	2,1001	0,8361	6,1724	1965	13,38
33,4	134,9711	2,4869	2,079	0,836	6,1418	1965	13,32
33,7	137,5231	2,5602	2,1444	0,8376	6,2056	1982,7	13,56
33,9	136,2905	2,5006	2,0959	0,8381	6,116	1994,4	13,62
33,8	134,8977	2,4566	2,0574	0,8375	6,0703	1988,6	13,8
33,7	135,0177	2,4678	2,066	0,8372	6,0926	1982,7	13,86
33,9	137,3255	2,5388	2,1283	0,8383	6,1624	1994,4	14,04
34,2	138,7085	2,5688	2,1569	0,8397	6,1732	2012,1	14,16
34,3	138,881	2,5682	2,1574	0,8401	6,1639	2018	14,22
34,6	139,0742	2,5543	2,1487	0,8412	6,1222	2035,6	13,74
34,7	140,0914	2,5848	2,1757	0,8417	6,1503	2041,5	13,86
34,8	142,1674	2,6548	2,2364	0,8424	6,2245	2047,4	13,92
34,8	141,7984	2,641	2,2247	0,8423	6,2084	2047,4	14,4
34,6	141,2397	2,6345	2,217	0,8415	6,2175	2035,6	14,28
34,5	141,0814	2,6357	2,217	0,8411	6,2275	2029,7	13,74
34,7	141,1344	2,6234	2,2086	0,8419	6,1961	2041,5	13,86
33,8	137,0535	2,5357	2,1247	0,8379	6,1673	1988,6	13,44
33,4	134,5756	2,4723	2,0667	0,8359	6,1238	1965	13,38
33,5	134,2767	2,4545	2,0526	0,8363	6,0931	1970,9	13,74
33,7	134,9651	2,4659	2,0643	0,8372	6,0902	1982,7	13,98
33,9	137,4461	2,5432	2,1321	0,8383	6,1678	1994,4	13,98
34	136,7962	2,5123	2,1068	0,8386	6,1217	2000,3	14,04
34,2	138,6237	2,5657	2,1543	0,8396	6,1694	2012,1	13,62
34,3	138,6043	2,5579	2,1487	0,84	6,1516	2018	13,8
34,3	138,2044	2,5432	2,1362	0,84	6,1339	2018	13,68
34,4	139,6646	2,5901	2,1771	0,8406	6,1818	2023,9	14,7
35	142,6204	2,6574	2,2407	0,8432	6,2108	2059,2	13,74
34,2	138,3997	2,5574	2,1472	0,8396	6,1594	2012,1	13,38
33,4	131,8682	2,3739	1,9832	0,8354	6,0006	1965	12,2

Anexo #4. Datos de las mediciones y características del motor de la zona 6 del CPAF, a lazo cerrado, a 4.5bar y ocupación constante.

F(Hz)	U. Variador (V)	P1 (kW)	P2 (W)	Eff	I. Estator (A)	rpm	Q (m3/h)
27,86	104,0043	1,7484	14051	0,8037	5,6035	1639,1	11,361
27,08	98,6026	1,6132	12867	0,7976	5,4537	1593,2	10,856
26,86	95,9612	1,5395	12245	0,7954	5,3476	1580,3	10,825
26,82	99,1134	1,6446	13096	0,7963	5,5309	1577,9	10,872
27,1	100,2223	1,6655	13296	0,7983	5,5395	1594,4	11,23
27,32	100,9824	1,6783	13423	0,7998	5,54	1607,3	11,261
27,28	99,6446	1,6364	13076	0,7991	5,474	1605	11,293
27,06	100,3067	1,6706	13333	0,7981	5,5517	1592	10,836
27,3	99,1191	1,6181	12928	0,799	5,4415	1606,2	11,079
27,55	103,433	1,7472	14009	0,8018	5,6307	1620,9	11,38
27,36	100,0686	1,6459	13161	0,7997	5,4825	1609,7	11,498
27,02	98,6991	1,6197	12914	0,7973	5,4702	1589,7	10,973
27,3	100,5049	1,6636	13300	0,7995	5,5175	1606,2	11,032
27,53	100,9668	1,666	13343	0,8009	5,5001	1619,7	11,106
27,57	100,6569	1,6536	13245	0,801	5,4759	1622	11,171
27,63	100,5528	1,6468	13196	0,8013	5,4593	1625,6	11,441
27,6	104,6353	1,7851	14325	0,8025	5,6866	1623,8	11,416
27,61	99,6163	1,6174	12953	0,8008	5,412	1624,4	10,911
27,85	101,967	1,6811	13498	0,8029	5,4956	1638,5	11,063
27,98	100,5822	1,6287	13081	0,8031	5,3977	1646,2	11,124
27,88	98,9192	1,5805	12676	0,802	5,326	1640,3	10,922
28,14	98,2482	1,5458	12415	0,8031	5,2447	1655,6	10,904
28,04	98,6155	1,5626	12543	0,8027	5,2817	1649,7	10,988
27,63	98,0609	1,5662	12536	0,8004	5,324	1625,6	10,958
27,72	100,4946	1,64	13148	0,8017	5,4397	1630,9	11,21
27,6	96,6427	1,5228	12177	0,7997	5,2522	1623,8	11,218
27,92	99,0258	1,5819	12691	0,8023	5,3247	1642,6	11,347
27,31	99,3959	1,6266	12999	0,7991	5,4548	1606,7	11,408

Anexo #5. Datos obtenidos mediante la variación de la frecuencia en el accionamiento, a lazo abierto y ocupación constante.

F(Hz)	Presión (bar)	P(kW)
15	3,82	0,88754674
15	3,8	0,89781893
15	3,8	0,88139196
15	3,8	0,92226079
20	4	1,18767517
20	4	1,20374563
20	4	1,21665973
20	4	1,22062309
25	4,3	1,70258075
25	4,3	1,68123614
25	4,3	1,71347587
25	4,3	1,71979051
30	4,6	2,44123649
30	4,7	2,48143491
30	4,7	2,46829895
30	4,7	2,46476768
35	5,1	3,03384758
35	5	3,43138884
35	5,1	3,40912582
35	5,1	3,3752992

Anexo #6. Datos de los experimentos en el sistema de agua caliente sanitaria.**a) Datos de la medición y de las características obtenidas de la bomba de Circuito Primario de Agua Caliente.**

P1 (kW)	P2 (kW)	Eff	I. Estator (A)	rpm	Q (m ³ /h)
3,8623	3,4168	0,8847	2,9961	3532,8	28
3,6372	3,2167	0,8844	2,8409	3536,7	21
3,649	3,2273	0,8844	2,849	3536,5	14
2,708	2,3817	0,8795	2,2001	3552,9	7

b) Dato de las mediciones en el Circuito Secundario de Agua caliente (CSAC) y el Circuito de Recirculación (CR).

Apertura de la válvula	CSAC		CR	
	P1 (KW)	Q(m3/h)	P1 (KW)	Q(m3/h)
100%	1675,56069	7	1677,25318	7
75%	1655,25087	1256,67052	1663,71329	1257,93988
50%	1641,71098	837,780347	1648,48092	838,62659
25%	1401,37803	418,890173	1553,70173	419,313295