INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
"Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
Moa, Holguín, Cuba

TESIS EN OPCIÓN AL GRADO CIENTÍFICO DE MASTER EN CIENCIAS TÉCNICAS

Mejora de la Eficiencia Eléctrica del Accionamiento en el Bombeo de Petróleo de la CTE de Felton.

MAESTRANTE*:* Ing. Leonel Rómulo Sánchez.

TUTOR: Dr. Luís Delfín Rojas Purón.

Moa 2008

RESUMEN.

En este trabajo se presenta el incremento de la eficiencia electro energética del sistema de bombeo de petróleo de II impluso para las calderas de la CTE de Felton.

En el capítulo 1 se analiza las fuentes y todo lo concerniente con el marco teórico de la investigación así como una breve explicación de los sistemas de bombeo de petróleo y sus características generales.

En el capítulo 2 se describe aspectos de la modelación y simulación del accionamiento eléctrico del sistema de bombeo, así como los resultados experimentales.

En el capítulo 3 proponemos el uso de variadores de velocidad, su impacto energético y su análisis técnico económico dentro del funcionamiento de las centrales eléctricas.

La eficiencia del accionamiento del bombeo de petróleo se puede mejorar en 8,92 % cuando se ponen a trabajar las bombas con el caudal requerido que necesita el sistema hidráulico y se evacuan las pérdidas eléctricas a través de la reducción de reactivos ocasionados por el exceso de flujos magnéticos en el entrehierro de la máquina de inducción con relación a su carga mediante el uso de variadores de velocidad.

Índice.

I.1- Introducción. 1

I.2-Descripción del Flujo tecnológico 6

1.3-Características generales del sistema de bombeo de petróleo. 12

I.4- Estado actual del control y evaluación de la eficiencia 18

1.5- Estudios precedentes (Estado del arte). 20

1.6-Conclusiones parciales. 22

Capitulo II Modelación del accionamiento de bombas

2.1-Introducción. 23

2.2-Aspectos a tener en cuenta para conectar variadores de velocidad en sistema de bombeo. 23

2.3-Planificación de los experimentos. 27

2.4 -Aspectos del modelo del accionamiento de bombas. 27

2.5- Simulación del modelo en matlaB. 39

2.6- Resultados de la simulación. 41

2.7-Conclusiones Parciales. 46

Capitulo III Análisis técnico económico del trabajo.

3.1-Introducción. 47

3.2-Selección del variador de velocidad. 47

3.3-Características del variador de velocidad. 53

3.4-Valoración económica del trabajo. 61

3.5-Impacto ambiental. 64

3.6 - Valoración social. 66

3.7-Conclusiones Parciales. 67

Conclusiones Finales. 69

Recomendaciones.

Bibliografía.

INTRODUCCION

El trabajo constituye un estudio de los sistemas de accionamientos de motores de inducción con bombas de tornillo, para indicar una vía factible en el mejoramiento de la eficiencia en la energía transferida con su menor costo posible.

Tomando en cuenta, que más del 60 % de la energía total que se consume en la industria es a través de los accionamientos eléctricos con motores de inducción y de estos más del 55 % lo constituyen los accionamientos de bombas ; se estima además que más del 20 % de la energía que se puede ahorrar está asociada con el mejoramiento del rendimiento en los motores y los subsistemas mecánicos ; por lo que es necesario atender cualquier medida que técnicamente se justifique y contribuya a mejorar los índices de rendimientos de estos sistemas.

Las centrales termoeléctricas en un creciente y constante ascenso en sus producciones, demanda cada vez más un apreciable ahorro de energía cuyos portadores deciden la rentabilidad de sus sistemas, que están entre las más grandes consumidoras de petróleo del país.

En la resolución económica del V Congreso del Partido Comunista de Cuba (1997), se plantea que para la recuperación y desarrollo de la economía cubana es necesario intensificar el desarrollo de la industria enfatizando en la necesidad de llevar a cabo una gran campaña de ahorro de energía y combustible e incrementar la utilización de las fuentes de energía renovables, aspecto que se ha agudizado después de la desaparición del campo socialista, haciéndose necesario la modernización de estas instalaciones para incrementar la productividad del trabajo,

Para cumplir estos lineamientos a mediano y largo plazo se requiere que paralelamente al crecimiento progresivo se perfeccionen los parámetros y regímenes de trabajo de las instalaciones tecnológicas para explotar de una forma más racional y eficiente el accionamiento del sistema de bombeo de petróleo de la CTE de felton lo que garantizará la existencia de un proceso productivo continuo.

El costo de producción de un 1kw/h de la CTE Lidio Ramón Pérez está incrementado en gran medida por el elevado consumo energético. En el trabajo irracional de los motores del sistema de bombeo de petróleo incide, además, una baja eficiencia de los accionamientos

eléctricos, por lo se requiere precisar la disminución de los costos para incrementar su fiabilidad. Estos factores tienen distintos grados de influencia y son muy variables e inciden con diferentes magnitudes, tanto en los indicadores económicos como en la eficiencia del proceso tecnológico.

SITUACIÓN PROBLÉMICA

Los motores del sistema de bombeo de petróleo operan con baja eficiencia porque están diseñados para trabajar en condiciones técnicas, de forma tal que garanticen que cada uno de los bloques trabaje a su máxima potencia, pero sucede que la variación de la potencia de generación cambia de acuerdo a la demanda del Sistema Eléctrico Nacional; si la generación de la CTE está al 50%, estos motores trabajan en iguales condiciones que si estuviesen generando el 100 % por lo que implica pérdidas energéticas, aspecto que económicamente no es ventajoso.

El petróleo bombeado que no es usado porque la generación está por debajo de los valores nominales es recirculado a través de las válvulas reductoras.

Por lo antes expuesto decidimos abrir la investigación con el siguiente problema científico

PROBLEMA CIENTÍFICO

La ausencia de una metodología para evaluar la eficiencia del sistema de bombeo de petróleo para condiciones de explotación de CTE de Felton.

HIPÓTESIS

Con la caracterización del sistema de accionamiento del bombeo de petróleo se puede establecer una metodología para evaluar y mejorar la eficiencia de esto accionamiento.

OBJETO DE ESTUDIO

Accionamiento del bombeo de petróleo de la CTE de Felton.

CAMPO DE ACCIÓN

Los accionamientos eléctricos con variadores de velocidad en el sistema de bombeo de petróleo de la CTE de Felton.

OBJETIVO GENERAL

Implementación de una metodología para establecer el régimen de trabajo más eficiente en los motores de inducción del sistema de bombeo de petróleo cuando operen a través de variadores de velocidad

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diagnosticar el sistema de bombeo de petróleo hacia las calderas de la CTE de Felton.

2. Establecer el régimen de trabajo más eficiente de los motores de inducción del sistema de bombeo de petróleo hacia las calderas de la CTE en correspondencia con el comportamiento de las cargas en los bloques.

3. Establecer los rangos de velocidades de los motores con variadores de velocidad en el bombeo de petróleo de la CTE de Felton.

4. Realizar la simulación del accionamiento del bombeo de petróleo CTE de Felton.

En el desarrollo de la investigación se aplican los siguientes **métodos:**

1. Método de investigación documental y bibliográfica para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Análisis y síntesis.
3. Método de la modelación.

El Método documental y bibliográfico

El Método documental y bibliográfico: es el método que se utiliza para fundamentar históricamente un problema, sus antecedentes, cientificidad, novedad, justificación, así como la lógica objetiva de su evolución. etc.

El método análisis y síntesis

El método análisis y síntesis: para analizar y sintetizar toda la información obtenida en el proceso de investigación.

El análisis y la síntesis son dos procesos cognoscitivos que cumplen funciones muy importantes en la investigación científica.

El análisis es una operación intelectual que posibilita descomponer mentalmente un todo complejo en sus partes y cualidades. El análisis, permite la división mental del todo en sus múltiples relaciones y componentes. La síntesis es la operación inversa, que establece mentalmente la unión entre las partes, previamente analizadas y posibilita descubrir relaciones y características generales entre los elementos de la realidad.

El análisis y la síntesis no existen independientemente uno del otro. En realidad el análisis se produce mediante la síntesis: el análisis de los elementos de la situación problémica se realiza relacionando estos elementos entre sí y vinculándola con la situación problema como un todo. A su vez, la síntesis se produce sobre la base de los resultados dados previamente por el análisis.
La unidad dialéctica existente entre las operaciones de análisis y síntesis supone que en el proceso de la investigación científica una u otra pueden predominar en una determinada etapa, atendiendo a las tareas cognoscitivas que esté realizando el investigador.

Método de modelación

El modelo científico es un instrumento de la investigación de carácter material o teórico, creado para reproducir el fenómeno que se está estudiando. Es una reproducción simplificada de la realidad, que cumple una función heurística, que permite descubrir y estudiar nuevas relaciones y cualidades del objeto de estudio. La modelación es el proceso mediante el cual creamos modelos para investigar la realidad.

El modelo teórico o de otra índole es un reflejo mediatizado de la realidad sobre la base del cual opera el científico en ausencia del objeto para estudiarlo, explicarlo, etc.

El modelo revela una determinada unidad entre lo objetivo y lo subjetivo.

Permite operar de manera práctica o teórica con un objeto o fenómeno, no de manera directa, sino utilizando el modelo como sustituto siempre que:

- Se encuentra en determinada correspondencia con el propio objeto.
- En determinadas etapas del conocimiento el modelo permite sustituir al objeto.
- Ofrece, en ausencia del objeto, información sobre el objeto.

Para garantizar el desarrollo exitoso de la investigación se proponen las siguientes **Tareas** a realizar:

1. Estudio bibliográfico del problema.
2. Obtener la valoración técnico-económica de los circuitos de funcionamiento y control de los motores de inducción del sistema de bombeo de petróleo de la CTE de Felton
3. Establecer los valores de velocidad mínima y maxima de los motores con el uso de variadores de velocidad en el bombeo de petróleo de la CTE de Felton.
4. Incrementar la eficiencia eléctrica en el sistema de bombeo de petróleo para las calderas de la CTE de Felton.
5. Terminación y discusión del trabajo de investigación

Resultados esperados en la investigación

Establecer el régimen de trabajo más eficiente de los motores de inducción del sistema de bombeo de petróleo hacia las calderas de la CTE de Felton en correspondencia con el comportamiento de las cargas en los bloques.

MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

El marco teórico del objeto de estudio permite detectar de forma preliminar las diferentes características e interacciones que existen entre los múltiples elementos que están presentes en la investigación.

El objetivo del presente capítulo es establecer el Marco Teórico-Metodológico de la investigación, a partir del estado del arte del tema basado en el análisis de los trabajos precedentes, la metodología seguida para su ejecución así como la base teórica que sustenta la investigación y una caracterización integral del estado actual del objeto de estudio: sistema de bombeo de petróleo “CTE” Felton.

1.2 Descripción del Flujo tecnológico simplificado de la “CTE”

- **Recepción y preparación del combustible**

El combustible llega a la Central Eléctrica por medio de barcos, los cuales con sus equipos de bombeo lo trasladan hasta los tanques de recepción y almacenamiento del mismo en tierra.

Existen dos tanques para la recepción; almacenaje y preparación del combustible que se utiliza en la CTE; estos tienen capacidad de 15000 m^3 cada uno, además, tienen dispositivos interiores y exteriores para el calentamiento del combustible con el fin de facilitar su bombeo.

Desde los tanques se succiona el combustible por dos bombas de engranes para cada unidad, situadas en la Casa de Bombas de Primer Impulso, las cuales transportan el mismo con una temperatura de 60-70 °C hasta el sistema de combustible interior de cada caldera, manteniendo la presión constante de 0.45 MPa en la succión de las bombas del **Segundo Impulso.**

En la Casa de Bombas de Segundo Impulso el combustible es bombeado por dos bombas de alta presión, estas elevan la presión hasta 3.2 MPa, existiendo dos calentadores de superficie que trabajan con vapor, ellos suben la temperatura del combustible hasta aproximadamente 145 °C. Con estas condiciones se facilita la pulverización del

combustible en los quemadores de las calderas.

La estación de válvulas de regulación de la potencia de la caldera es la que controla el suministro del combustible hacia los quemadores en dependencia de la producción de vapor que tengan las mismas.

Cada caldera consta de doce quemadores tangenciales, ubicados en tres niveles, en las esquinas del horno, cada uno puede suministrar hasta 5700 litros de combustible por hora para la pulverización; son auxiliados con vapor de agua a una presión de 1 MPa y 250 °C.

- **Generación de Vapor**

Además del combustible para el proceso de oxidación del mismo con el desprendimiento de gran cantidad del calor al horno de la caldera, se suministra la cantidad de aire necesaria para lograr la combustión completa, este aire es succionado de la atmósfera por dos ventiladores, se precalienta en los precalentadores de aire a vapor hasta 75 °C y finalmente se eleva su temperatura hasta 315 °C en los calentadores de aire regenerativos.

Por otra parte a la caldera se le suministra agua de alimentación, al absorber el calor desprendido por la combustión se transforma en vapor de agua con 13.7 MPa y 525°C.

- **Sala de Máquinas**

El vapor producido en la caldera llega a la turbina a través de las tuberías de alta presión con 13.24 MPa y 520 °C, este vapor entra al cuerpo de alta presión de la misma a través de 4 válvulas de regulación que controlan la cantidad de vapor en dependencia de la potencia mecánica demandada por el generador eléctrico. En la turbina de vapor se transforma la energía térmica del vapor en energía cinética en los alabes fijos de la misma y la energía cinética en energía mecánica del rotor a través de los alabes móviles.

El vapor sale desde el cilindro de alta presión hacia la caldera nuevamente con 3,4 MPa y 340 °C para volver a elevar su temperatura retornando al cilindro de media presión con 520 °C y 3.2 MPa; desde el cilindro de media presión pasa al cilindro de baja presión donde va hacia el condensador con 0.005 MPa, aquí se condensa al ceder su calor latente al agua de mar que circula como medio de enfriamiento del condensador.

El condensado que se produce en el condensador con una temperatura de 50 °C, es succionado por las bombas de primera etapa de condensado, las que lo hacen pasar por

una estación de filtros desmineralizadores con el fin de eliminar cualquier contaminación con agua del mar, luego este condensado es bombeado por las bombas de la segunda etapa del condensado a través de tres calentadores de baja presión los cuales tienen como función elevar gradualmente su temperatura para facilitar su preparación como agua de alimentación de la caldera.

Al condensador llega también el agua desmineralizada procedente de la planta de Tratamiento Químico del Agua que es utilizada para reponer las perdidas de masa que se producen en el ciclo térmico.

El condensado llega al Deareador con una temperatura de 110 °C donde por medio del calentamiento con vapor y productos químicos se le extraen los gases incondensables (fundamentalmente el oxígeno libre) que pueda contener, los gases incondensables escapan hacia la atmósfera y el condensado va al tanque de alimentación de la caldera desde donde es succionado por las Bombas de alimentar de la Caldera.

Las bombas de alimentar elevan la presión del agua hasta 15.7 MPa para incorporarla a la caldera pasándola antes a través de dos calentadores de alta presión donde sube la temperatura del agua hasta 235 °C; la cantidad de agua que se suministra a la caldera es controlada por una estación de válvulas reguladoras que garantizan que se mantenga el balance de masa entre la cantidad de vapor que sale de la misma y la cantidad de agua que se suministra con el fin de asegurar el funcionamiento correcto de la caldera.

Hasta aquí hemos visto el Ciclo Térmico de la Central Termoeléctrica, ahora veamos qué sucede después de convertir la energía térmica del vapor en energía mecánica en el eje de la turbina.

El rotor del Generador Eléctrico está directamente acoplado al eje de la turbina por lo que gira a la misma velocidad que esta (3600 r.p.m.), es un generador trifásico con una potencia activa nominal de 250 MW y máxima de 275 MW, la potencia aparente de 294.12 MVA, el factor de potencia de 0.85, voltaje nominal 15,7 kV; es enfriado por hidrógeno por la parte exterior de las bobinas y además de esto posee un sistema de enfriamiento con agua desmineralizada por el interior de varios conductores del estator.

Los conductores de salida del Generador Eléctrico están conectados a un Transformador de Voltaje trifásico con una potencia aparente de 325 MVA, la tensión de entrada al mismo es de 15.7 kV., la tensión en la parte secundaria es de 242 kV, este transformador es el

encargado de elevar el nivel de voltaje para la transmisión de la electricidad a largas distancias con el mínimo de pérdidas, la salida del mismo está conectada a través de interruptores al Sistema Electroenergético Nacional de Cuba.

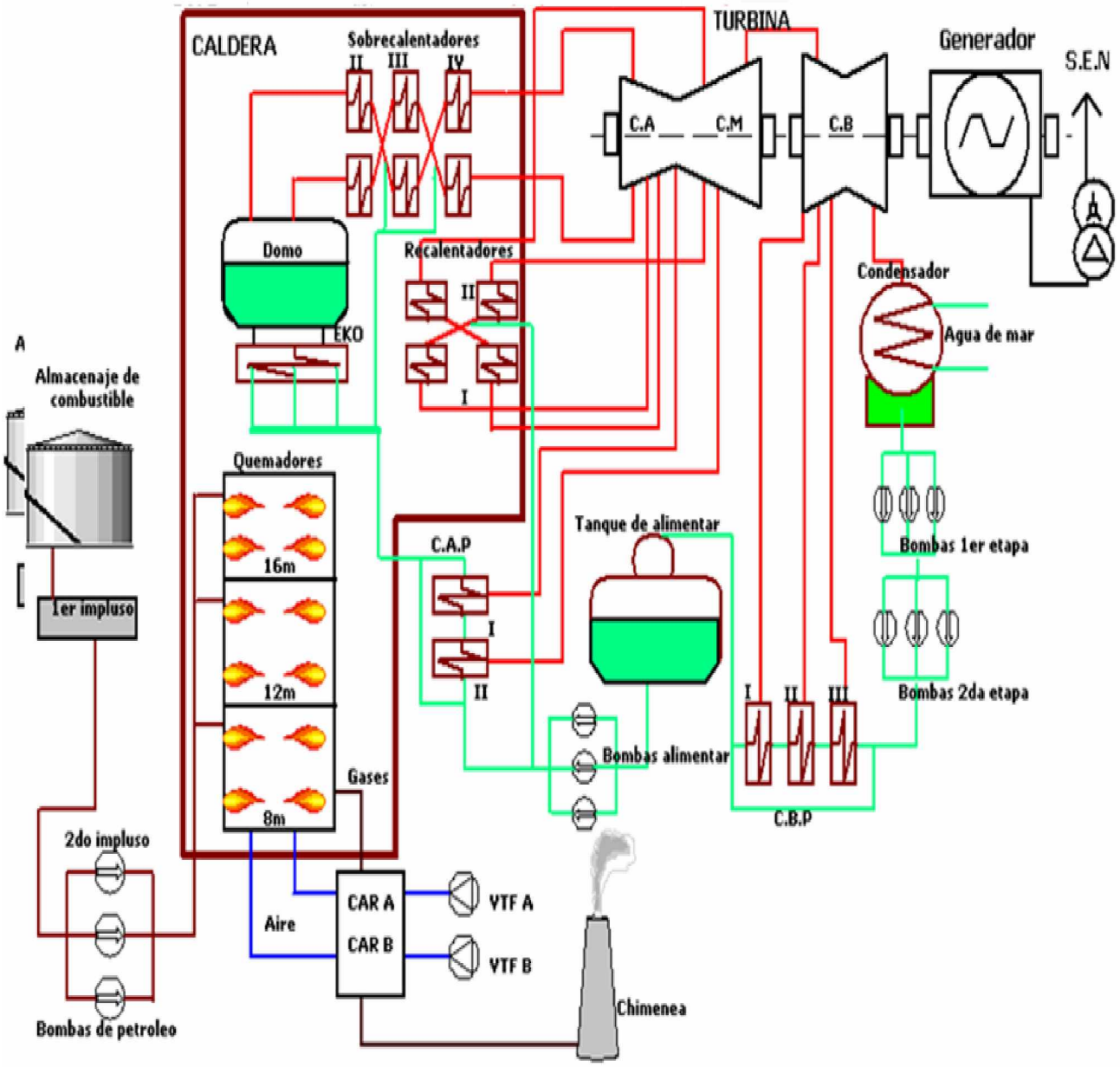


Figura (1.1). Esquema de la CTE de Felton donde se describe el flujo tecnológico.

1.3 Características del sistema de bombeo de petróleo de la “CTE” Lidio Ramón Pérez

El sistema de bombeo de petróleo de la CTE está dividido en dos, llamada primer impulso y segundo impulso respectivamente:

El primer impulso está situado más alejado del bloque generador donde se almacena el combustible, tanto de arranque como de trabajo. Como su nombre lo indica, las bombas de primer impulso bombean el petróleo con una temperatura de ignición de 60 ^{o}C (que es la temperatura a la cual debe estar almacenado el combustible) hasta el segundo sistema de bombeo segundo impulso.

El segundo impulso está ubicado cerca del bloque, donde se aditiva el combustible con un producto químico llamado Bycosin, con el fin de proteger la caldera; este neutraliza el contenido de Azufre del combustible.

El combustible procedente de primer impulso, llega a la estación de segundo impulso, pasando a través de los filtros, dos de ellos en operación y uno como reserva, luego pasa a las bombas donde se eleva su presión a 3 2 bar dos bombas en operación y una como reserva, de la descarga de las bombas se deriva una recirculación a la succión de las bombas para mantener constante la presión al valor descrito anteriormente, el combustible bombeado pasa por los calentadores, donde se eleva su temperatura al valor idóneo para quemarlo en la caldera.

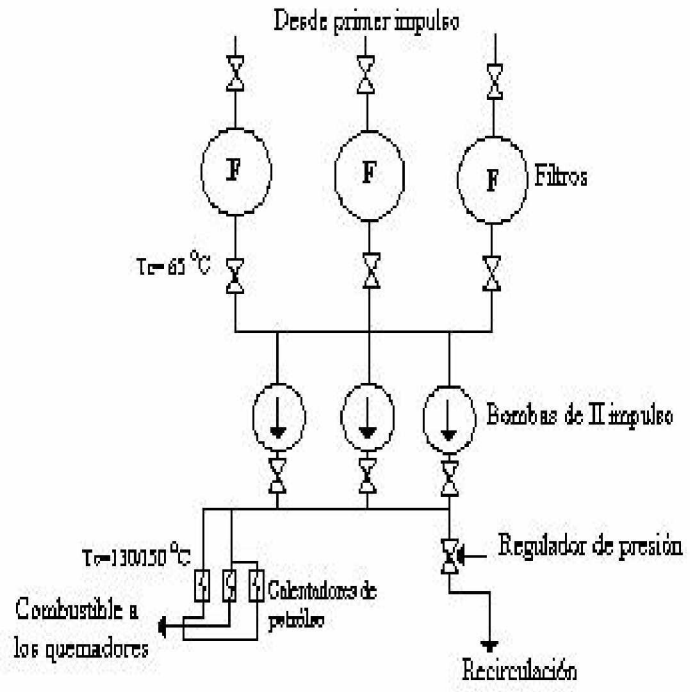


Fig. (1.2) Esquema simplificado de la casa de petróleo segundo impulso:

Este sistema está compuesto por:

- Los filtros de petróleo
- Las bombas de alta presión
- Las reguladoras de presión constante.
- Los calentadores de petróleo
- Las reguladoras de temperatura del petróleo.
- Los sistemas de evacuación y drenaje, de condensado y combustible.

Filtros de Petróleo

Los filtros cuentan con válvulas de entrada y de salida, para su llenado o vaciado, drenaje de combustible, además vapor de calentamiento y salida de condensado.

Estos filtros tienen la función de evitar el paso de cualquier partícula extraña que pudiera dañar la bomba.

v Parámetros de trabajo:

Filtro Js 300. Jt 16/I Modelo N3/4Bopp - Reuther - OP001, 02Q001.

Tabla (1.1) Variables y parámetros de trabajo del filtro de petróleo.

No	Variables	Parámetros
1	Temperatura:	60 / 80 ºC
2	Viscosidad	340 - 118 Cst
3	Densidad	991,2 - 979,7 kg/m^3
4	Cantidad:	176,7 l/s
5	Presión operacional	0,9 MPa
6	Sobrepresión máxima de trabajo	1.6 MPa
7	Potencia máxima del filtro	250 l/s
8	Temperatura máxima de trabajo	100 ºC
9	Volumen del cuerpo	0,18 m^3

Bombas de alta presión

Las bombas de alta presión conducen el petróleo a presión constante de 32bar a través de la estación calentadora a los quemadores de la caldera. La lubricación de las superficies de fricción de las bombas está resuelto directo por el medio transportado, por lo tanto durante la marcha no se requiere ninguna lubricación.

DATOS TÉCNICOS DE LAS BOMBAS

. Las características de estas bombas son las siguientes: Diferencia de presión 39.2bar v=velocidad 1750r/min. Q=flujo740-765L/min. P= potencia 55-58kW. Eficiencia 0.65%

DATOS TÉCNICOS DEL MOTOR.

Es un motor asincrónico jaula de ardilla que gira a una velocidad de 1750 rpm se alimenta con una tensión de 380V tiene un consumo en corriente nominal de162 A, trabaja con una frecuencia de 60HZ, un factor de potencia 0.88, eficiencia 0.88%, conexión delta

Calentadores de combustible

La planta consta de tres calentadores destinados para calentar el petróleo combustible desde la temperatura 75ºC hasta 150ºC, cuya superficie de calentamiento es de 220 m^2 cada uno a plena capacidad, dos en servicio y el tercero es la reserva del 50 %.

El cilindro calentador cuenta con el fondo y con la cámara de distribución la que está situada del lado opuesto. En el espacio interior del cilindro está situado el sistema de calentamiento que consta de los tubos en "U", el petróleo pasa por el espacio íntertubular y el vapor pasa por los tubos. El espacio entre los tubos se divide en secciones con ayuda de tabiques, los que sirven de soporte para el sistema tubular, estos además de guiar el flujo en su paso a través del equipo aumentan su velocidad y turbulencia, lográndose de esta forma mayores coeficientes peliculares de transferencia de calor.

El petróleo combustible entra en la planta calentadora por la tubería común y a través de las válvulas de cierre se alimenta a los cilindros calentadores. En los cilindros se calienta el petróleo combustible hasta la temperatura que responde a la viscosidad de 2-2.5 ºE. El petróleo caliente sale por las válvulas de cierre en la tubería común por la que se conduce fuera de la planta. En la salida de cada calentador se mide la temperatura y la presión de petróleo con ayuda de instrumentos de medición local. La evacuación de aire desde el espacio del petróleo combustible es facilitada con ayuda de la válvula de desaereación. La válvula de seguridad elimina un sobrepresión permanente de la presión de operación (39.2bar).

Tabla (1.2) Datos Técnicos de los calentadores.

No	Parámetros	Parámetros
1	Diámetro exterior del cilindro	600 mm
2	Largo total del cilindro	9100 mm
3	Peso del cilindro vacío	4400 kg
4	Superficie intercambiadora de calor	220 m^2
6	Presión de operación del petróleo	3.2 MPa
7	Presión protegida del petróleo	3.92 MPa
8	Temperatura del petróleo a la entrada	75 ºC
9	Temperatura del petróleo a la salida	150 ºC
10	Flujo nominal del petróleo	
11	Presión de operación del vapor	1.275 MPa
12	Presión protegida del vapor	1.45 MPa
13	Temperatura del vapor a la entrada	250 ºC
14	Temperatura del condensado	190 ºC
15	Cantidad necesaria del vapor	2750h

Poniendo en marcha la planta calentadora es preciso seguir el principio de que primero hay que dejar entrar al calentador el petróleo y después el vapor. En caso contrario la temperatura de vapor que es relativamente mayor provocaría una tensión térmica considerable con aglutinación posible del petróleo combustible sobre las superficies del calentador, lo que afectaría el aprovechamiento del coeficiente del intercambiador de calor y disminuye la eficiencia del calentador. El vapor empleado para el calentamiento procede del cabezal # 1 de servicio de planta, aunque existe una interconexión entre las dos unidades en la propia estación.

Sistema de drenaje de combustible

Existe un sistema de drenajes (purga) compuesto por un tanque (OPE70 B001) el cual tiene como objetivo evacuar todas las purgas procedente de todo el sistema de II Impulso, Del tanque succiona una bomba de engrane OPE70 M101 que bombea el petróleo a los tanques de combustible a través de la línea de recirculación general de petróleo, la misma entra y sale de servicio según el nivel del tanque, entra automáticamente cuando el nivel es mayor de 1,295 m y sale de servicio automáticamente cediendo el nivel bajo de 0,2 m.

El tanque está dividido en dos partes por una plancha vertical y la bomba succiona de una de las secciones, ambas secciones tienen un drenaje para evacuar el agua por lo que la bomba succiona petróleo.

Tabla (1.3) Datos técnicos del Tanque de Purgas

No	Parámetros	Parámetros
1	Capacidad del tanque	4.5 m^3
2	Temperatura	60 - 65 ºC

Datos técnicos del combustible crudo mejorado 650 son:

1. Viscosidad convencional..... 650 grado viscosidad
2. Contenido de cenizas máxima..... 0.044%
3. Impurezas mecánicas..... 10.76%
4. Humedad..... 1.02%
5. Temperatura de ignición..... 33/40%
6. Densidad..... 0.9896 g/cm^3
7. Temperatura de ignición..... 60 ^oC

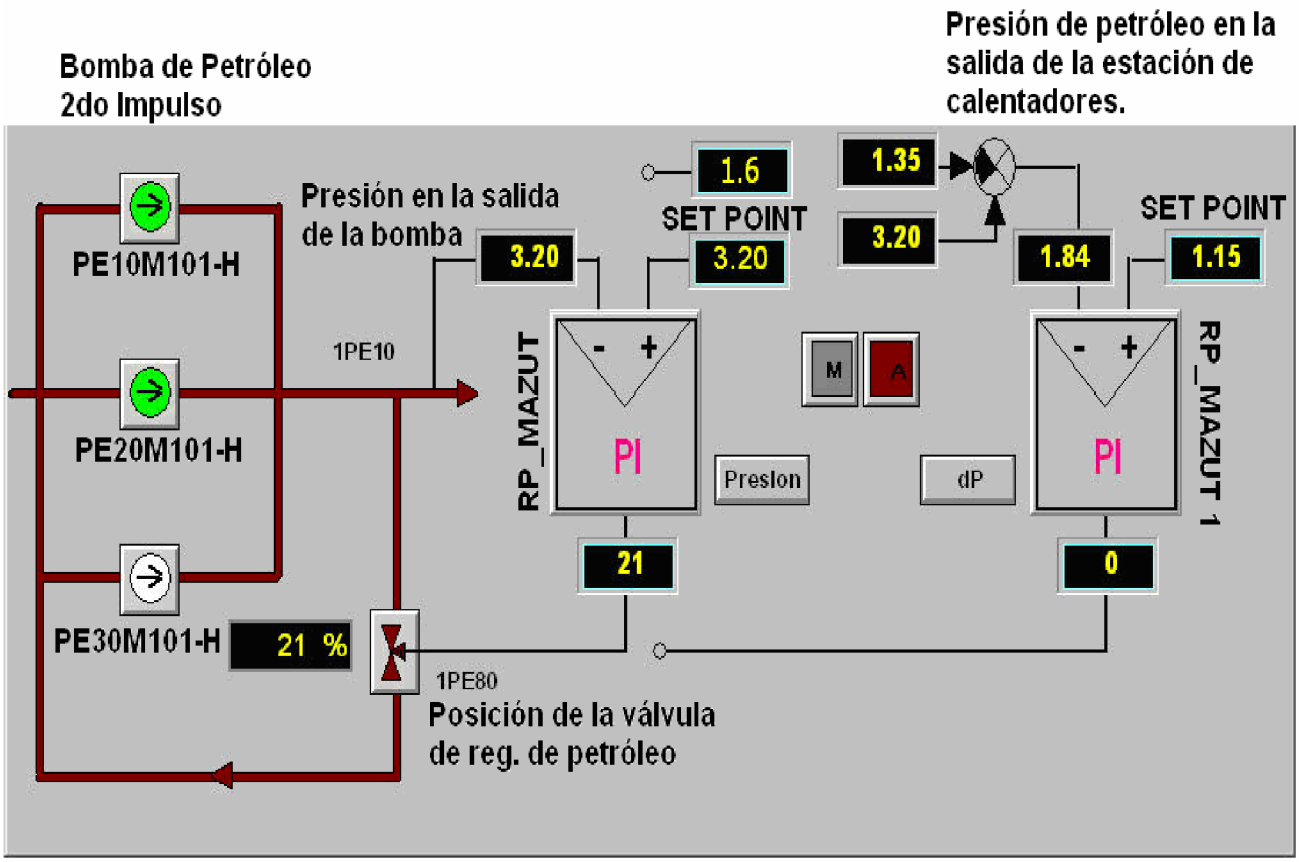


Fig. (1.3) Esquema de regulación de presión del combustible a la descarga de las bombas de alta presión.

El objetivo de este lazo de regulación es regular la presión en las descargas de las bombas de alta presión (PE10M101-H, PE20, PE30 máx. 3.2 MPa). Se mide el valor real en el sensor (PE10P203 (rango 0-4 MPa)) y se compara con el valor pedido en el regulador (RP-MAZUT). El resultado de esta operación es una señal que llega a la válvula PE14G201 que posibilita la recirculación del combustible hacia la succión de la bomba. Así se mantiene el valor de presión deseado. Cuando se produce la apertura del interruptor principal el valor deseado de presión conmuta a un valor fijo de 1.6 MPa en la descarga de las bombas de alta presión que debe ser un equivalente a 350 L/min del combustible a regular, esta acción se lleva a cabo para disminuir la presión del combustible y puedan salir los quemadores previstos para bajar el flujo de vapor y posibilitar que la caldera quede encendida después de la apertura del interruptor.

Otro método de la regulación de la presión de combustible puede realizarse manteniendo el valor del Δp entre la presión que existe en la descarga de las bombas y la presión de combustible a la entrada de los quemadores. Este valor es medido por el sensor PE10P805 (rango de 0-4 MPa) Y el sensor PE10P203 (rango de 0-4 MPa). Existe un set point que varía de acuerdo con la potencia que está desarrollando el bloque, el valor deseado es comparado con el real para corregir el error en el regulador RP-MAZUT1.

Cuando la regulación se está realizando por Δp y el valor de presión sube a 3.6 MPa automáticamente se pasa a regular por presión para evitar que suba la presión hasta 3.9 MPa y no permitir el disparo de la válvula de seguridad de los calentadores.

Datos técnicos del sensor PE10P203

Captador para la medición de la presión relativa 20886, rango de 0…551.58 kpa hasta 0…5,516 MPa señal de salida 4-20 ma DC/digital tipo1199, calibración 0-4 MPa, rotulado como PE10P203

Sensor: Es un dispositivo que recibe una señal o estímulo y responde con una señal eléctrica.

1.4 Estado actual del control y evaluación de la eficiencia

En el sistema de accionamientos eléctricos de bombas de tornillo que transportan petróleo en el sistema de segundo impulso de la Central termoeléctrica TE de Felton, existe un sistema supervisor montado en un software (Active Factory Trend) (anexos 2, 3 y 4) que cada cierto tiempo realiza un muestreo de algunas variables del proceso entre las que se encuentran; la potencia de la turbina, la presión en las descargas de las bombas , la presión en la succión de las bombas ,la corriente de los motores que accionan las bombas, flujo de petróleo hacia la caldera, posición de la válvula reguladora

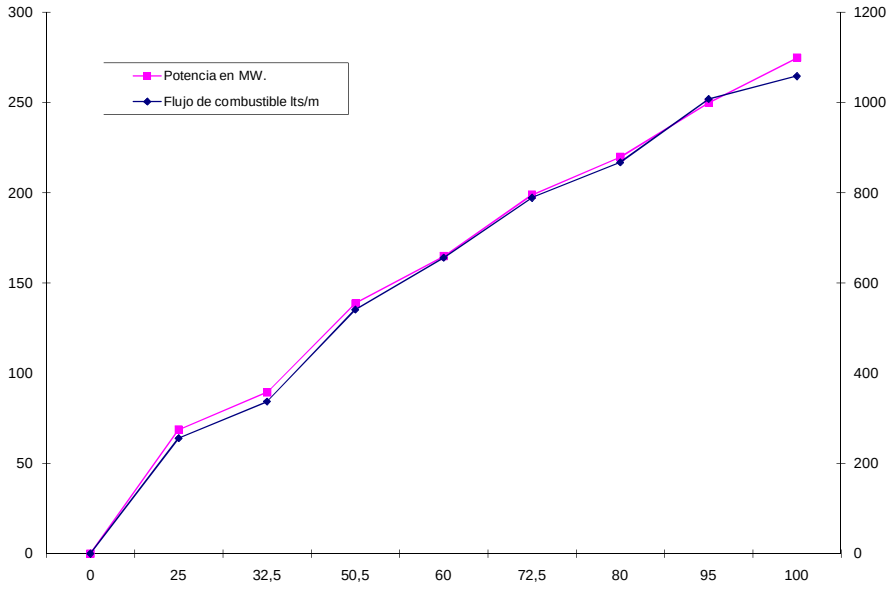


Figura (1.4). En la siguiente figura se muestra la relación de la potencia y el flujo de combustible hacia la caldera durante el trabajo del sistema

1.5- Trabajos Precedentes

Toda investigación científica en cualquier área del conocimiento debe estar sustentada por una investigación teórica y empírica, de ahí que sea necesario utilizar los métodos que caracterizan a cada una de ellas para desarrollar científicamente las mismas a partir de una clara caracterización del objeto investigado, del planteamiento del problema, los objetivos, la hipótesis y las tareas.

Durante el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes trabajos y estudios realizados en sistema de bombeo de petróleo, la revisión bibliográfica estuvo dirigida en dos líneas fundamentales: una, la información relacionada con el enfoque teórico - metodológico y otra, los trabajos que sobre el tema, desde el punto de vista científico, técnico y práctico se han efectuado en los últimos años.

Numerosos estudios se han realizado desde el punto de vista tecnológico para lograr mayor eficiencia en los motores de sistema de bombeo.

Así en cuanto a los avances técnicos se conoce que:

Miguel A Gómez Martínez y Alfredo Medina Flores de la faculta de Ingeniería Mecánica, Eléctrica Electrónica, Universidad de Guanajuato exponen los resultados de la aplicación de un variador de velocidad por frecuencia en los motores de inducción de un sistema de bombeo de la central termoeléctrica de salamanca, en España donde recomiendan el uso de variadores de velocidad en los motores de inducción utilizado en sistema de bombeo para el incremento de la eficiencia energética en la central termoeléctrica de Salamanca.

El Dr. Luís Delfín Rojas Purón**,** expone en su trabajo los resultados que se tienen en el mejoramiento de la eficiencia de los accionamientos de motores de inducción están relacionados con trabajos en el diseño y mejoras en la calidad de los aceros, y el establecimiento de algoritmos de control de variables de la máquina de inducción, sin tener en cuenta otros factores operacionales que aparecen debido al comportamiento específico del proceso de transferencia de energía desde la máquina hacia el mecanismo o proceso.

Se estima que más del 60% de la energía eléctrica generada en el mundo es consumida por las máquinas eléctricas [20] [Leonhard, 1996]; y se considera que por lo menos el 20

% del ahorro de energía está en el mejoramiento de los rendimientos de los motores y sistemas eléctricos, el otro 80 % puede ser tomado de cada una de las partes del accionamiento eléctrico, incluyendo sus cargas mecánicas y el propio proceso. Como indican las fuentes bibliográficas, existe una buena reserva de aspectos investigativos en las partes de los mecanismos de producción, las cuales no han sido suficientemente estudiadas desde su proceso. Es por esto que nuestro objeto de estudio es el motor de inducción y la bomba de tornillo.

Para minimizar las pérdidas en el motor es necesario adecuar su velocidad con los requerimientos que exigen las cargas mecánicas. Lo más avanzado, y perfeccionado que se tiene hasta ahora son los Accionamientos de Velocidad Ajustable (AVA), comercialmente llamados variadores de velocidad, que constituyen en sí convertidores de frecuencia o Inversores Sinusoidales de Voltajes con modulación por ancho de pulsos (VSI to PWM, sus siglas en inglés), aunque también pueden ser modulados por la amplitud de sus pulsos (VSI to PAM); también están los Inversores Sinusoidales de Corrientes (CSI, en inglés).

Esencialmente los AVA operan bajo el principio de rectificar el voltaje alterno de entrada desde la línea de la red, filtrar la señal, y entonces conmutan la potencia de corriente directa mediante válvulas (que hacen de interruptor abierto-cerrado) hacia una sección inversora que devuelve en la entrada de los terminales del motor un voltaje alterno con la misma frecuencia con que se conmutan las válvulas. Un bloque a microprocesador modifica las características de conmutación del inversor de tal forma que satisface los requerimientos exigidos por el proceso. El voltaje o corriente rectificada es directamente controlado con respecto a la frecuencia.

CONCLUSIONES PARCIALES

En el desarrollo de este capítulo se puede concluir:

- Al observar y describir el flujo tecnológico donde se desarrolla el accionamiento eléctrico; se aprecia que las variables que inciden en la eficiencia del sistema de accionamiento de bomba de tornillo son: la potencia de las bombas, la presión en la descarga de las bombas, la presión succión de las bombas, la corriente de los motores que accionan las bombas, flujo de petróleo hacia la caldera.

- Una parte apreciable de la energía que se transfiere desde el motor de inducción hacia la bomba se disipa en la red hidráulica en forma de pérdidas, donde es frecuente la aparición de pérdida de petróleo por recirculación, que exigen el desarrollo de un torque variable en el accionamiento eléctrico.

Capítulo 2

Modelación del accionamiento de bombas

2.1- Introducción

El objetivo del presente capítulo es establecer los rangos de velocidades que va a trabajar la carga, la potencia máxima y mínima que la carga demanda, la simulación del modelo en matlab y resultados experimentales.

2.2-Aspectos a tener en cuenta para conectar variadores de velocidad en el sistema de bombeo.

Para conectar variadores de velocidad en el lazo de regulación del sistema de bombeo de petróleo de la CTE de felton es importante conocer.

- El tipo de aplicación donde se va a instalar un VDF.
- Los rangos de velocidad en los que va a trabajar la carga.
- A qué porcentaje de carga se está trabajando.
- Si el VDF se utilizará en un proceso ya establecido o en una nueva industria o maquinaria dentro del proceso.
- La potencia máxima y mínima que la carga demanda.
- El par de arranque.
- Las relaciones de reducción si se utilizan reductores, engranes, poleas, bandas, etc. debido a las necesidades de velocidades bajas y pares altos.

Las bombas de petróleo de segundo impulso son maquina que trabajan en paralelo se conectan a cabezales comunes en la succión y descarga.

El sistema de bombeo de petróleo tiene la ventaja de mantener maquina de reserva que se ponen en servicio cuando el sistema demanda un gasto superior al que pueden ofrecer las maquina que ya están en funcionamiento, según [28] Ramos.

$$N_b = \frac{P_{com} * g * Q * H}{1000 * \eta_{bom}} \qquad (2.0)$$

1) ρ_{bom} = es la densidad del combustible en (989.6 kg/m^3),
2) g = aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2),
3) Q = caudal (m^3/s)
4) H= carga real o altura (m).

La potencia consumida se obtiene sumando la potencia que consume cada bomba.

Na+b=Na+Nb (2.1)

La potencia ahorrada se obtiene restando la potencia que consume cada bomba con la la potencia nominal total.

N ahorrada=N-Nnomial (2.2)

El caudal de la bomba según [28] Ramos

$$Q = \frac{d^3 n}{14500}\eta_v \quad (2.3)$$

Q: Caudal de La bomba.

d: Diámetro del sin fin.

N: Revoluciones por minuto.

η_v : Eficiencia volumétrica.

Despejando n de la expresión anterior se determina la velocidad de la bomba para el caudal requerido de

$$n = \frac{Q*14500}{d^3*\eta_v} \quad (2.4)$$

Cuando las bombas 1y 2 están trabajando y el bloque está generando 150 MW. las bombas tienen un caudal inicial de 45.15 m^3 / hora, que bombea a una altura de 16 metros a una velocidad de 1750 rpm para lo cual requiere una potencia de 55 kW. Sin embargo, se recirculan 22.15 m^3 / hora, es decir, se requiere solo un caudal de 21.45 m^3 / hora. De acuerdo a la expresión (2.0), (2.1), 2.2) y (2.4)

$$N_b = 26kW$$
$$N_1 + N_2 = 52kW$$
$$N_{ahorrada} = 110kW - 52kW$$
$$n = 867rpm$$

Cuando las bombas 1y 2 están trabajando y el bloque está generando 200 MW. Las bombas tiene un caudal inicial de 45.15 m^3 / hora, que bombea a una altura de 16 metros a una velocidad de 1750 rpm, requiriendo una potencia de 55 kW. Sin embargo, se recirculan 16.5m^3 / hora, es decir, se requiere se solo un caudal de 28.5 m^3 / hora.
Determinando el comportamiento de las bombas cuando trabaja únicamente con el caudal requerido y de acuerdo expresión (2.0) (2.1), (2.2) y (2.4)

$$N_b = 35kW$$
$$N_1 + N_2 = 70kW$$
$$N_{ahorrada} = 110kW - 70kW = 40kW$$
$$n = 1153rpm$$

Cuando las bombas 1y 2 están trabajando y el bloque esta generando 250 MW. Las bombas tiene un caudal inicial de 45.15 m^3/ hora, que bombea a una altura de 16 metros a una velocidad de 1750 rpm, para lo cual requiere una potencia de 55 kW. Sin embargo, se recirculan 2.6 m^3/ hora, es decir, se requiere solo un caudal de 42.55 m^3 / hora.
Determinando el comportamiento de las bombas cuando trabaja únicamente con el caudal requerido y de acuerdo expresión (2.0, (2.1)(2,2) y (2.4)

$$N_b = 52{,}9kW$$
$$N_1 + N_2 = 105{,}8kW$$
$$N_{ahorrada} = 110kW - 105{,}8kW = 4{,}2kW$$
$$n = 1721rpm$$

En la siguiente tabla se muestran los valores de potencia del bloque, los valores de velocidades y potencias de las bombas sin el variador, con el variador y los ahorros de potencia al conectar el variador de velocidad en el sistema de bombeo de petróleo.

Tabla (2.1) valores de potencias, velocidades del motor sin conectar el variador, conectando el variador de velocidad y el ahorro de energía

Potencia del bloque en MW	Velocidad del motor sin el variador en rpm	Velocidad del motor con el variador en rpm	Cantidad de bombas trabajando	Potencia de las bombas sin el variador en kW	Potencia de las bombas con el variador en kW	Ahorro total de potencia en kW
150	1750	867	2	55	26	58
200	1750	1153	2	55	35	40
250	1750	1721	2	55	52.9	4,2

2.3 Planificación de los experimentos:

Técnica experimental empleada

Para el desarrollo experimental de la investigación se utilizó un software mencionado anteriormente (Active Factory Trend) anexo (**2**, 3 y 4) que permite observar las mediciones de la presión en la salida de la bomba, la corriente de los motores de las bombas, el flujo de petróleo para la caldera, el flujo de petróleo que recircula, la potencia generada por los bloques, el flujo total y el funcionamiento de la válvula reguladora.

Para determinar el consumo de potencia activa de los motores de inducción del sistema de bombeo , se realizó un monitoreo continuo a período de 5 días en el horario desde las 8.59 AM hasta las 8.59AM del próximo día, los cuales correspondían a diferentes regímenes de consumo, con el fin de evaluar la influencia de los diferentes factores que inciden en la calidad del trabajo de las bombas de petróleo de segundo impulso, obteniendo los gráficos de demanda de petróleo por las calderas en diferentes horarios y días del año, para diferentes regímenes de producción.

2.4 Aspectos del modelo del accionamiento de bombas

Los sistemas de accionamientos eléctricos son componentes principales en los procesos industriales, su nivel de automatización y productividad depende de ellos.

Por otra parte, su comportamiento dinámico es usualmente representado por modelos matemáticos formulados desde postulados físicos que establecen sus variables y parámetros de operación que en muchas ocasiones no son suficientemente conocidas. En otros casos, la descripción física del fenómeno secundario no concuerda o es difícil introducir en el modelo, es decir, el sistema no puede ser modelado con suficiente exactitud porque no es posible tener en cuenta con precisión los efectos de determinados fenómenos (efectos de histéresis, saturación magnética, comportamiento termal del objeto, viscosidad estática y dinámica) y en ocasiones su relación con aspectos secundarios no son muy conocidos (por ejemplo la fricción, la zona muerta de trabajo); entonces en este contexto es necesario resolver con otros modelos que permitan una representación desde la observación directa de la funcionabilidad del sistema y de esta forma se realiza la incorporación de otras cualidades dentro del modelo sobre la base de los datos experimentales y de la información del universo en discusión.

Los sistemas de accionamientos eléctricos son usualmente modelados usando una caracterización matemática a partir de la interpretación de su marco físico.

Vamos a presentar una modelación sobre la base de una verificación experimental de un accionamiento eléctrico de bomba de tornillo, donde el problema de la selección de variables y la ejecución del sistema es conocido mediante el software (Active factory ttrend). Mencionado en el capitulo anterior

Teniendo en cuenta lo anteriormente planteado utilizaremos la técnica de MATLAB7.0 para desarrollar nuestro modelo.

Caracterización matemática

Para caracterizar el grupo Motor de Inducción – Bomba de tornilloTYP-SM660R46E6, vamos a mirar algunas indicaciones de las variables más relevantes en el funcionamiento del accionamiento. De acuerdo a eso, se establece en esta sección una simplificada caracterización matemática del accionamiento de bomba de tornillo, atendiendo a sus

elementos principales usando la teoría de circuitos eléctricos y la física de los circuitos hidráulicos.

El esquema de medición permite la adquisición de las siguientes señales: caudal o gasto de salida del fluido de la bomba (Q), diferencia de presión (Δps) medida en la salida de la bomba por el sensor PE10P203 y la que necesita la caldera por el sensor PE10P805.

El subsistema hidráulico consiste en una bomba hidráulica de tornillo y una línea de transmisión. La bomba es accionada por un motor asincrónico o de inducción trifásica de jaula de ardilla, alimentada por un inversor sinusoidal de tensión alterna por modulación de ancho de pulsos con transistores de potencia del tipo IGBT con limitación de corriente.

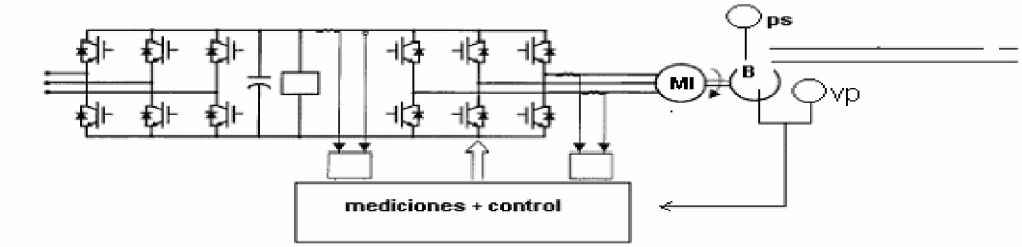


Figura (2.2) Subsistema hidráulico

Modelo matemático

Motor de inducción trifásico: Las ecuaciones del motor eléctrico MI basadas en la Teoría del Campo Orientado. La transferencia de potencia electromagnética en mecánica está asociada con las componentes activas y reactivas de la potencia desarrollada por el motor de inducción MI.

La componente activa de la potencia eléctrica que se convierte en trabajo útil (dado en W ó kW.) está determinada por:

$$P_{MI} = \sqrt{3}.U.I\cos\varphi \qquad (2.5)$$

Donde:

U es la tensión de alimentación de línea del motor de inducción, [V]

I es la corriente de alimentación de línea del motor de inducción, [A]

Cos φ es el factor de potencia del motor de inducción.

φ Es el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente, [º]

Y la potencia reactiva (dada en vAr o kVAr) es la encargada de intercambiar la energía electromagnética que se produce en la máquina de inducción con la fuente: el inversor sinusoidal de tensión por modulación de anchos de pulsos (VSI a PWM: siglas en inglés) y crea el campo magnético rotacional que gira de acuerdo a la frecuencia de la corriente de alimentación del motor (MI) y viene dada como:

$$Q_{MI} = \sqrt{3}.U.I.sen\varphi \tag{2.6}$$

Y partiendo que la eficiencia del motor de inducción está definida como la relación entre la potencia de salida P_S y la potencia de entrada P_e:

$$\eta_{MI} = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_s}{P_s + \Delta p} = \frac{P_e - \Delta p}{P_e} \tag{2.7}$$

Donde:

P_s – es la potencia de salida en el árbol del motor de inducción, [kW.].

P_e – es la potencia eléctrica de entrada del motor de inducción, [kW.].

Δp – son las pérdidas totales en el motor de inducción, [kW.].

Las pérdidas totales Δp del motor de inducción están determinadas principalmente por:

$$\Delta p = \Delta p_{cus} + \Delta p_{cur} + \Delta p_{ac} + \Delta p_{mec} + \Delta p_{ad} \tag{2.8}$$

Δp_{cus} - son las pérdidas del cobre en el devanado del estator del motor, [kW.].

Δp_{cur} - son las pérdidas del cobre en el devanado del rotor del motor, [kW.].

Δp_{ac} – son las pérdidas del acero en el núcleo del motor de inducción, [kW.].

Δp_{mec} - son las pérdidas mecánicas del motor de inducción, [kW.].

Δp_{ad} - son las pérdidas adicionales en el motor de inducción, [kW.].

La potencia electromagnética P_{em} y también llamada potencia en el entrehierro P_{AG} es la encargada de enlazar, la potencia eléctrica de entrada del motor P_e con la potencia mecánica de salida P_s que se manifiesta en el eje de la bomba, teniendo en cuenta las pérdidas Δp que va teniendo a través de las principales partes de la máquina eléctrica.

Desde la potencia electromagnética se genera el momento electromagnético M_{em} a una frecuencia angular sincrónica ω_s que entrega la potencia convertida P_{conv} en el árbol del motor con la frecuencia angular de rotación del rotor ω_r [3][Chapman, 2003], tal como se indica en la expresión (2.9):

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_s} = \frac{P_{conv}}{\omega_r} = \frac{P_{AG}}{\omega_s} \tag{2.9}$$

Donde:

M_{em} es el momento electromagnético del motor de inducción, [N.m]

P_{conv} es la potencia convertida por el motor existente en su árbol, [kW]

ω_r es la frecuencia angular de rotación del rotor, [rad/s]

ω_s es la frecuencia angular sincrónica del motor, [rad/s]

P_{AG} – es la potencia del entrehierro del motor, [kW]

La potencia del entrehierro P_{AG} es la que se transfiere del circuito del estator al circuito del rotor y es igual a la potencia que se disipa en la componente R_r/s en el conocido circuito equivalente por fase del motor de inducción (figura2. 3).

$$P_{AG} = I_r^2 . \frac{R_r}{s} \tag{2.10}$$

Donde:

s – es el deslizamiento del motor de inducción, [%].

I_r – es la corriente del rotor del motor de inducción, [A].

R_r – es la resistencia óhmica de los devanados del rotor, [ohm]

Y la potencia del entrehierro total será:

$$P_{AG} = 3.I_r^2.\frac{R_r}{s} \tag{2.11}$$

Que para regiones de bajos deslizamientos, esta potencia del entrehierro puede ser escrita en función de la tensión aplicada en los terminales del motor como:

$$P_{AG} = 3.s.\frac{U^2}{R_r} \tag{2.12}$$

Y el par producido por el motor se convierte en:

$$M_{em} = 3.s.\frac{U^2}{R_r.\omega_s} = 3.\frac{I_r^2.R_r}{\omega_s}.(\frac{1-s}{s}) \tag{2.13}$$

Y este par electromagnético, para condiciones de estado estacionario, se corresponde con el par resistivo de la carga mecánica M_c desarrollada por la bomba, y está relacionado con la potencia de salida P_s por la expresión (2.5):

$$P_s = M_c.\omega_r \tag{2.14}$$

El momento electromagnético tiene componentes activa y de magnetización por el lado de la corriente, que de acuerdo con [5 [Cerovski y Javurek, 1997] se escribe como la expresión (2.23):

$$M_{em} = p.\frac{m_1}{2}.\frac{L_m}{L_r}\Psi_r.I_M \tag{2.15}$$

Siendo:

p – es el número par de polos del motor.

m_1 – ese el número de fases del motor.

L_m – es la inductancia mutua del motor, [mH].

L_r – es la inductancia del rotor, [mH].

Ψ_r – es el flujo magnético del rotor, [Wb]

I_M – es la componente activa de la corriente del torque electromagnético del Motor, [A].

El módulo de la corriente del estator está dado como:

$$I = \sqrt{(I_M)^2 + (I_{mag})^2} \tag{2.16}$$

Donde:

I_{mag} – es la corriente de magnetización del torque electromagnético, [A]

En la expresión (2.23) el torque electromagnético está en función del flujo del rotor Ψ_r, el cual está determinado por la corriente de magnetización I_{mag}, como (2.17):

$$\psi_r = I_{mag}.L_m \tag{2.17}$$

Y de esta forma podemos controlar el torque electromagnético desarrollado por el motor de inducción a través del flujo magnético del rotor Ψ_r con un comando que maneje el módulo de la corriente de magnetización I_{mag} de la máquina; o mediante la tensión aplicada en los terminales de alimentación del motor de inducción, de acuerdo a la expresión (2.18) ofrecida por [31] [Romero, 2000].

$$\psi_r = \frac{U}{\omega_s} \tag{2.18}$$

Es decir, con el manejo de estas variables se puede ir adecuando la potencia del entrehierro de la máquina de tal forma que sean menores sus pérdidas. Las pérdidas del acero del motor Δp_{ac} están determinadas por (2.19):

$$\Delta p_{ac} = 3.\frac{E_1^2}{R_{mag}} \tag{2.19}$$

Donde:

E_1 – es la f.e.m. de respuesta del motor a la tensión aplicada, [V].

R_{mag} – es la resistencia magnética del circuito magnético del motor, [ohm].

Siguiendo las expresiones (2.17), (2.18) y (2.19); con cambios en la corriente de magnetización I_{mag}, esencialmente porque variando la frecuencia del motor se modifica su reactancia de magnetización X_m, y entonces varía la f.e.m. E_1 de la máquina, pudiéndose disminuirse así las pérdidas en el acero Δp_{ac}.

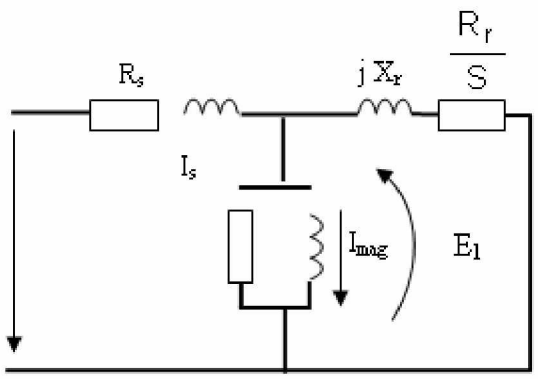


Figura (2.3) Circuito equivalente simplificado del motor de inducción.
FUENTE: [7] Costa Montiel y otros, 2004.

Con el uso del circuito equivalente simplificado del motor de inducción (fig 2.3), y a partir del cálculo de sus parámetros por datos de catálogo del motor [7][Costa Montiel y otros, 2004], se pueden evaluar las pérdidas.

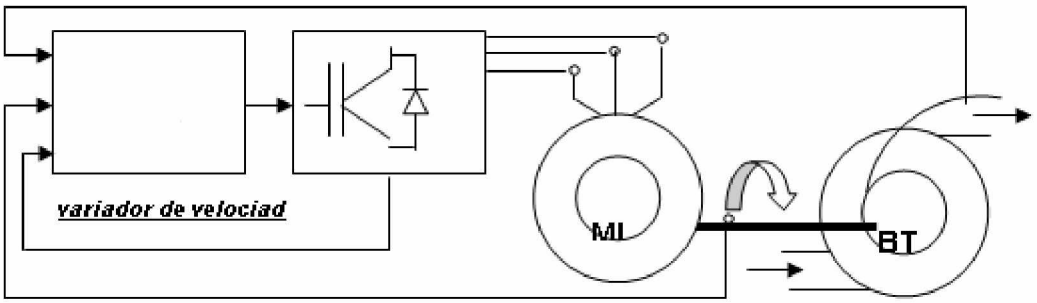


Figura (2.4). Esquema del accionamiento eléctrico MI–BT con el control
Variador de velocidad

Por otra parte, como el motor de inducción (ver figura 2.4) es alimentado a través de la fuente inversora de tensión sinusoidal la cual opera con los comandos elaborados desde el modelo de la Teoría de Campo Orientado (TCO) del motor, dado por sus componentes en los ejes de cuadraturas dd-qq, es conveniente explicar sus expresiones.
Para el control de las pérdidas del motor es de interés un esquema de control vectorial con el flujo del rotor orientado en su eje directo dd, tomando como referencia el sistema de coordenadas que gira a la velocidad angular sincrónica del campo del estator ω_e.

Las relaciones entre las corrientes y tensiones en los ejes dd-qq con sus componentes están definidas por las expresiones [1][Bose, Pestel y Kaushik1997] (2.20) y (2.21):

$$\sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} = -R_s i_{ds} + \omega_e \sigma L_s i_{qs} + U_{ds} \tag{2.20}$$

$$\sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} = -R_s i_{qs} - \omega_e \sigma L_s i_{ds} - \omega_e \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr} + U_{qs} \tag{2.21}$$

Donde:

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s . L_r}$: es el llamado coeficiente de Blonde.

ω_e – es la frecuencia angular sincrónica del campo del estator del motor, [rad/s].

U_{ds}, U_{qs} – son las tensiones en el estator del motor en los ejes dd-qq, [V].

i_{ds}, i_{qs} – son las corrientes en el estator en los ejes dd-qq, [A].

ψ_{dr}, ψ_{qr} – son los flujos magnéticos en el rotor en los ejes dd-qq, [Wb].

L_s, L_r – son las inductancias en los devanados del estator y rotor, [mH].

L_M – es la inductancia mutua del motor eléctrico, [mH].

R_s – es la resistencia óhmica de los devanados del estator,[ohm].

Con la orientación del flujo del rotor sobre su eje directo dd, donde se asume que la componente transversal $\Psi_{qr} = 0$; en estado estacionario se obtiene:

$$\psi_{dr} = L_m . I_{ds} \tag{2.22}$$

Siendo equivalentes la componente I_{ds} con la corriente de magnetización I_{mag}.

La componente total de la corriente del estator en los ejes de cuadratura tiene como módulo:

$$I_s = \sqrt{(I_{ds})^2 + (I_{qs})^2} \tag{2.23}$$

de tal forma que I_{ds}* y I_{qs}* sirven de comandos durante el control de las pérdidas.

La potencia de entrada del accionamiento es obtenida desde:

$$P_e = I_{ds} . U_{ds} + I_{qs} . U_{qs} \tag{2.24}$$

A partir de lo cual, con cambios en I_{ds} se controla el flujo del rotor Ψ_{dr} y con ello el torque del motor de inducción, que repercute en la potencia de entrada.

Se puede valorar la eficiencia del accionamiento eléctrico a través del momento de carga M_c desarrollado por la potencia mecánica de la bomba, por su velocidad angular de rotación ω_r y la potencia de entrada eléctrica del motor de inducción, según (2.25):

$$\eta_{MI} = \frac{M_c.\omega_r}{P_e} \qquad (2.25)$$

El momento mecánico o de carga desarrollado por la bomba (BT) está relacionado con la potencia mecánica N_b y la velocidad angular de rotación ω_r de acuerdo a la siguiente expresión (2.34):

$$M_c = \frac{N_b}{\omega_r} \qquad (2.26)$$

donde

M_C es el momento de carga mecánico de la bomba, [N.m]

N_b es la potencia mecánica desarrollada por la bomba, [kW]

ω_r es la velocidad angular de rotación del rotor, [rad/s]

Para el análisis se tiene en cuenta el tipo de transmisión entre la bomba y el motor eléctrico corrigiendo las relaciones correspondientes por el rendimiento de la transmisión η_{tr} de tal forma que trabajaremos con ω_r.

La potencia mecánica de la bomba según la expresión (2.27)

$$N_b = \frac{Q * P}{100 * n} \qquad (2.27)$$

Donde

P: Presión

Q: es el caudal o gasto desarrollado por la bomba, [m^3/s]

η_b: es el rendimiento de la bomba, [%]

$$Q = \frac{\pi * d^2}{4} * 2ezn * n_0 \tag{2.28}$$

$$n = n_0 * n_{mec} \tag{2.29}$$

η_{mec}: Pérdidas mecánicas

Poner a trabajar el sistema motor de inducción – bomba de tornillo MI-BT en zonas de mejores eficiencias es una tarea realizable cuando se evacuan las pérdidas eléctricas a través de la reducción de reactivos ocasionados por el exceso de flujos magnéticos en el entrehierro de la máquina de inducción con relación a su carga y por otra parte si se disminuyen las pérdidas en los elementos hidráulicos de la bomba de tornillo BT operando con adecuadas velocidades y gastos específicos.

La velocidad específica desarrollada por la bomba depende del número de revoluciones del motor MI, del caudal y la altura de carga desarrollada por la bomba y ofrece una medida de la capacidad productiva de la turbo-máquina BT para transportar el fluido:

El momento electromagnético puede ser obtenido como una función de las componentes de las corrientes del estator y los flujos en el rotor ψ_r a partir de las expresiones:

$$\psi_{qs} = L_m . i_{qr} + L_s . i_{qs} \tag{2.30}$$

$$\psi_{ds} = L_m . i_{dr} + L_s . i_{ds} \tag{2.31}$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r} \psi_{qr} - \frac{L_m}{L_r} . i_{qs} \tag{2.32}$$

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} \psi_{dr} - \frac{L_m}{L_r} . i_{ds} \tag{2.33}$$

Por lo que finalmente la ecuación del torque electromagnético M_{em} desarrollado por el motor puede ser obtenida como:

$$M_{em} = 1{,}5.p.\frac{L_m}{L_r} i_{qs}.\psi_{dr} \quad (2.34)$$

Donde:

p – es el número par de polos del motor eléctrico.

I_{qs} – es la componente de la corriente del estator en el eje qq, [A].

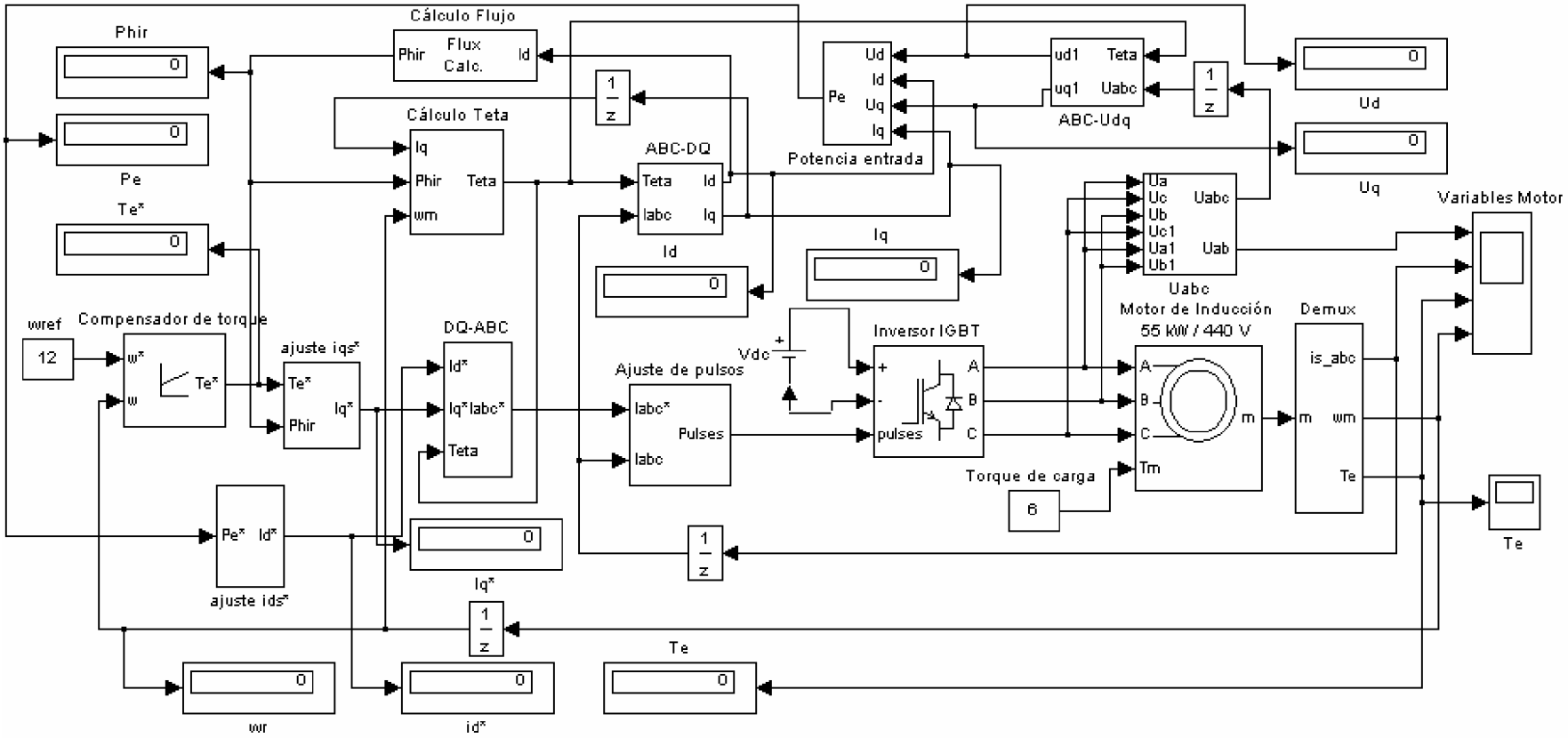
ψ_{dr} – es la componente del flujo magnético del rotor en el eje dd, [Wb].

Sustituyendo $\psi_{qr}=0$ y $\psi_{qr}= \psi_r$ el torque queda:

$$M_{em} = 1{,}5.p.\frac{L_m}{L_r} i_{qs}.\psi_{r} \quad (2.35)$$

$$M_c = f(\rho) \quad (2.36)$$

Teniendo en cuenta las expresiones anteriores se realizo el calculo del circuito equivalente del motor anexó (6)



Control de accionamiento eléctrico asincrónico

Figura (2.5). Simulación del modelo en matlaB

Figura (2.6) Modelo del accionamiento eléctrico de bomba

Accionamiento eléctrico asincrónico del sistema de bombeo de petróleo

Descripción del accionamiento eléctrico

El motor de inducción es alimentado por un inversor sinusoidal de tensión por modulación a PWM. La carga mecánica del accionamiento eléctrico lo constituye la operación de una bomba de tornillo que se caracteriza por una inercia J, el coeficiente de fricción B y el torque de carga Mc. El variador de velocidad opera bajo el principio del control vectorial con orientación del campo magnético del motor eléctrico donde recibe las variables en estado estacionario: ω_r (frecuencia angular del rotor), Pe (potencia de entrada del accionamiento), y densidad del fluido bombeado desde el bloque del subsistema hidráulico.

A su vez el variador de velocidad actúa como regulador de corriente generando la señal de mando ids* encargada de sintonizar los pulsos del inversor a IGBT que alimenta el motor eléctrico. El variador tiene lazos para regular el vector flujo magnético del rotor y con ello el torque electromagnético de la máquina eléctrica.

El bloque DQ-ABC es usado para convertir id* y iq* dentro las referencias de las corrientes ia*, ib*,y ic* en las mediciones para el trabajo del variador.

Los bloques para las mediciones de las corrientes, tensiones y potencia de entrada están para ver su comportamiento en estado estacionario. Un bloque con el modelo de la bomba de tornillo que representa la carga mecánica del accionamiento, suministra los diferentes estados de cargas.

Demostración

Al iniciar la simulación a través del scope se pueden observar las variables del motor eléctrico: corrientes, tensiones, torque electromagnético y frecuencia angular del rotor.

Al finalizar la simulación al término de 1.5 segundos, el sistema se encuentra en estado estacionario y se pueden obtener los valores de las variables para las condiciones iniciales prefijadas. El vector de estado inicial de la frecuencia angular se inicia con 120 rad/s.

Reemplazando los valores de la densidad del fluido bombeado por la bomba de tonillo, se obtienen distintos valores del torque de carga mecánico y el variador generará valores del comando ids* adecuados para adaptar el vector flujo magnético al nivel de carga mecánica que exige el subsistema hidráulico de la bomba.

El sistema de control para estas magnitudes se puede definir como: un sistema que compara el valor de una variable a controlar con un valor deseado y cuando existe una desviación se efectúa una acción de corrección sin que exista intervención humana, a este tipo de sistema se le denomina “lazo cerrado.

2.6 Resultados de la simulación

El esquema de control de eficiencia del accionamiento de bomba de tornillo basado en un variador de velocidad fue simulado utilizando el MATLAB7.0.

El esquema se inicia tomando un compromiso entre la convergencia de la velocidad angular de rotación del motor y las oscilaciones alrededor de la carga mecánica demandada por la bomba de tornillo

Como se observa existe una convergencia estable de la velocidad y la corriente I_{ds} ante las oscilaciones provocadas por las perturbaciones de la carga ante las cuales se repone el accionamiento del motor de inducción y se restablece en un valor menor de velocidad dada por las condiciones específicas de carga. Durante esto, el torque electromagnético busca equilibrarse al torque de carga y el flujo magnético ψ_{dr} gobernado por I_{ds} se adapta a un nuevo valor, tal como se presenta en la figura (2.7) siguiente:

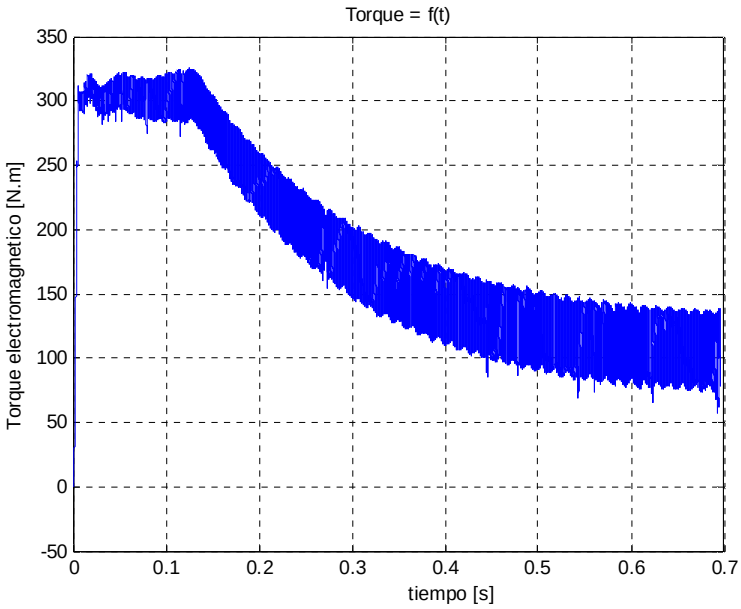


Figura (2.7) Momento electromagnético del motor.

En la figura (2.7) se observa que pasado 0.7s se estabiliza el momento electromagnético del motor a 100n/m.

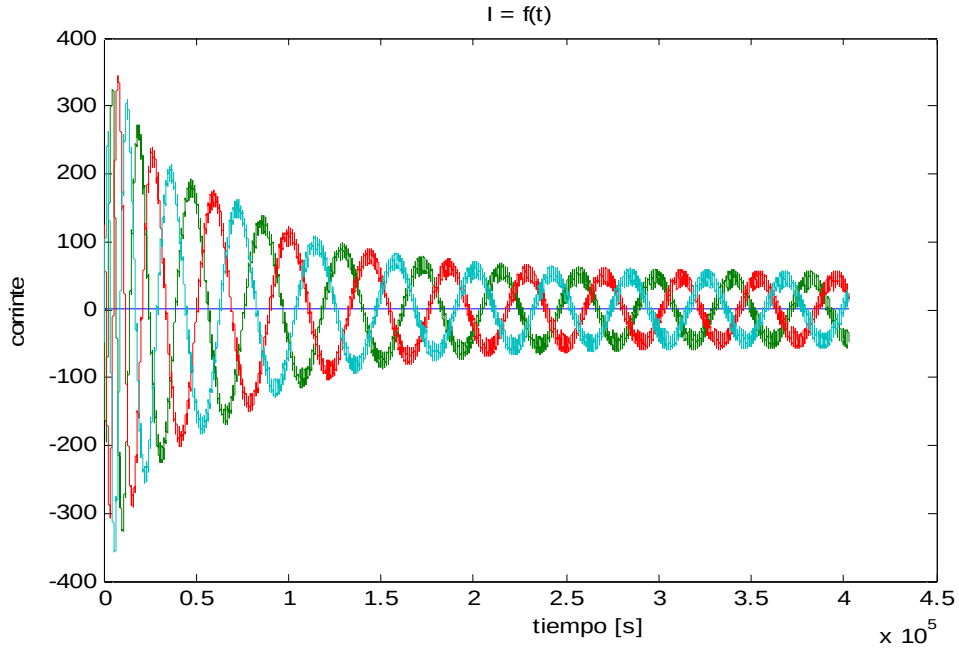


Figura (2.8) Corriente del motor.

En la figura (2.8) se puede observar que a los 2 segundos se estabiliza la corriente del motor a 80A

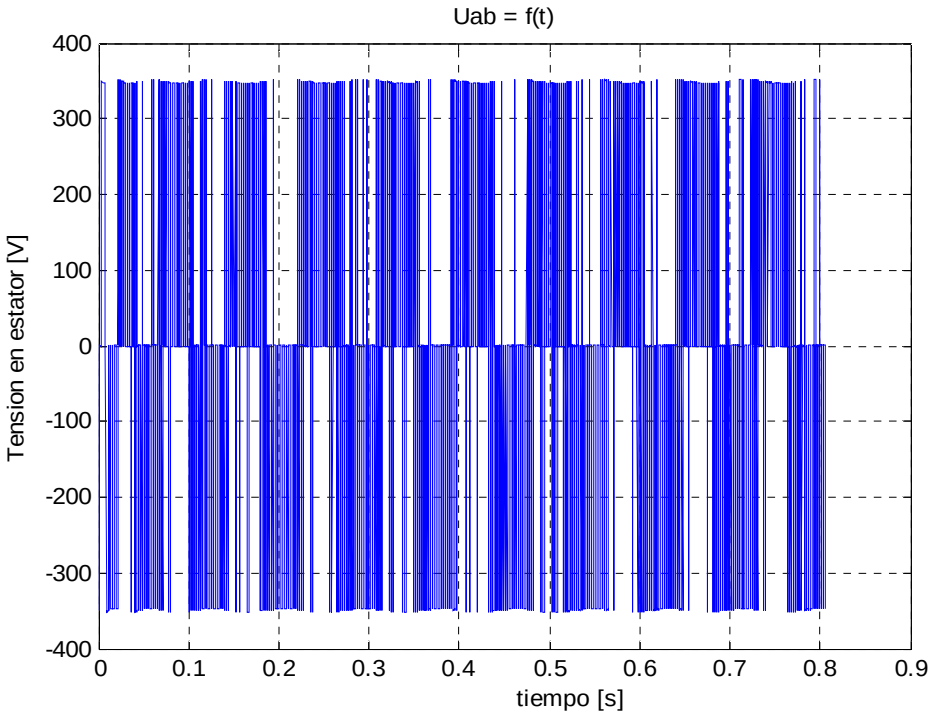


Figura (2.9) Tensión UAB del motor.

En la figura (2.9) se puede observar que la tensión UAB en el motor se mantiene constante.

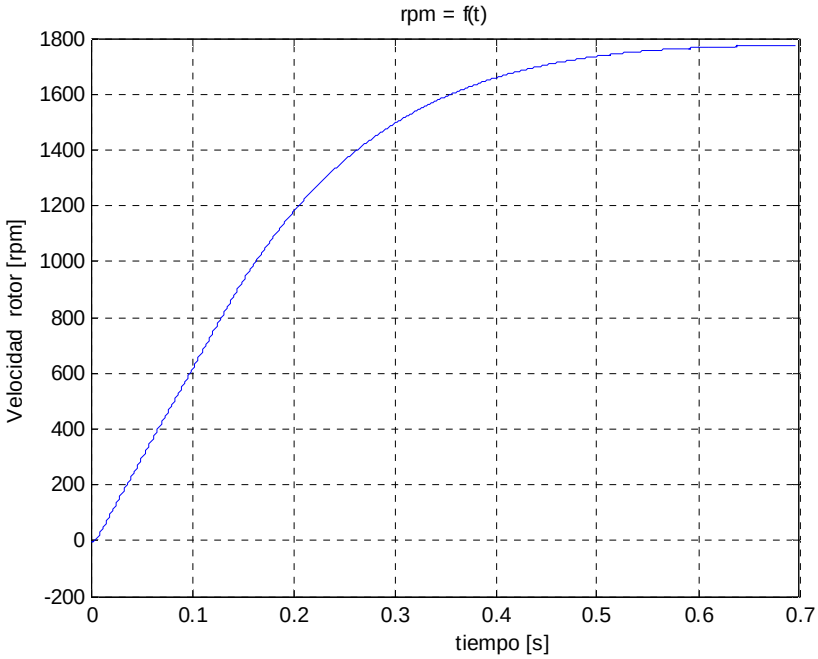


Figura (2.10) Velocidad del motor.

En la figura (2.10) se puede observar que el motor alcanza su velocidad nominal de 1750rpm a los 0.7 segundo.

Con las mismas condiciones de carga pero utilizando el variador de velocidad, se obtuvieron durante la simulación los valores de eficiencia en el motor.

En la figura (2.11) se ilustra el comportamiento de estas eficiencias del motor de inducción estudiado.

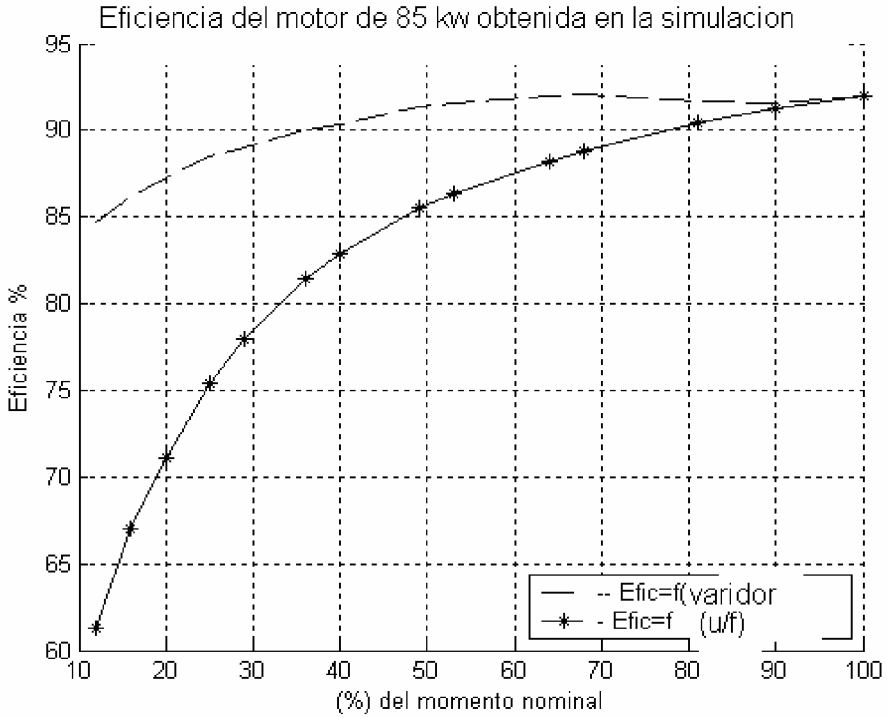


Figura (2.11) Curvas de eficiencias en el motor de 85 Kw., obtenidas durante la simulación a diferentes cargas mecánicas con algoritmo de control del variador de velocidad.

De la figura (2.11) se observa que a partir de casi un 40 % del momento nominal, es sostenida la eficiencia del accionamiento por encima del 90 %. Esto es resultado de adecuar la frecuencia angular de rotación de la máquina eléctrica al nivel de carga mecánica exigida por la bomba de tornillo, la Fem, desarrollada por el motor de inducción ha sido controlada en el sentido de ir reduciendo sus pérdidas del acero. Evaluando la eficiencia promedio se ha obtenido un incremento de un 8,92 % con el uso del variador de velocidad.

Estos resultados de las pérdidas indican que el controlador de eficiencia opera con mayor efectividad hasta el 70 ó 75 % de la carga nominal del motor.

Al mismo tiempo, la potencia de entrada se minimiza en la misma magnitud de las pérdidas.

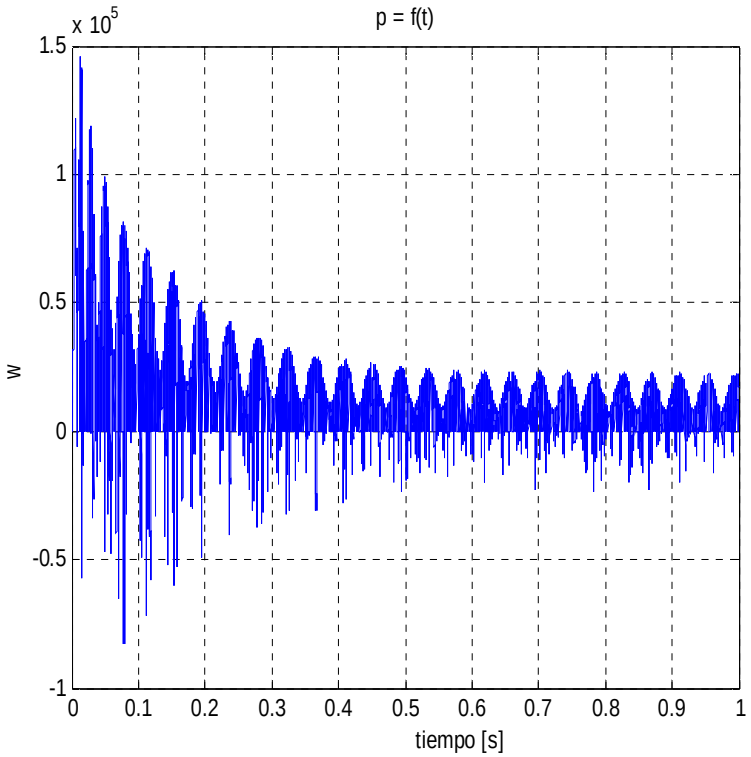


Figura (2.12) Potencias de entrada P_e.

Al irse adecuando por el variador de velocidad la potencia de entrada del motor de acuerdo a la carga mecánica de la bomba van teniendo lugar menores pérdidas totales en el motor a costa de tener el nivel de flujo magnético para la potencia activa útil en su árbol y que corresponde con la potencia mecánica desarrollada por la bomba de tornillo, mejorándose

la eficiencia.

De otro modo, al disminuirse las pérdidas en el motor eléctrico y en sintonía con esto, las pérdidas en el subsistema hidráulico, la bomba de tornillo trasporta el petróleo a velocidades que corresponden a las mínimas pérdidas hidráulicas, mejorando la eficiencia del sistema.

CONCLUSIONES PARCIALES

- Los rangos de velocidades de los motores con variadores de velocidad en el bombeo de petróleo son de 867 rpm a 1721 rpm.
- El esquema de control preparado sigue la búsqueda del menor módulo de potencia de entrada Pe en correspondencia al estado de carga mecánica exigida por la bomba de tornillo

Capitulo 3

Análisis técnico económico del trabajo

3.1-INTRODUCCION

En este capítulo se plantean las características del variador de velocidad, la valoración técnico económico, valoración social y el impacto ambiental.

El objetivo de este capítulo es seleccionar el variador de velocidad, determinar la característica del variador y realizar el análisis técnico económico del trabajo, así como una valoración del impacto ambiental en la CTE de felton.

3.2-SELECCIÓN DEL VARIADOR DE VELOCIDAD

El VDF ha llegado a ser uno de los métodos de control de motores que más han avanzado tecnológicamente en los últimos años, disminuyendo costos, tamaños y mejorando la simplicidad de operación y ha llegado a normalizarse tanto que casi todas las marcas ofrecen las mismas características de operación.

Las ventajas adicionales que ofrecen algunas marcas son mínimas con respecto a otras pero que deben ser consideradas al momento de hacer la elección: como el idioma de programación y lectura, facilidad de programación, datos que aporta el equipo como amperaje, % de par, potencia, voltajes, status, pantallas remotas, reactores de choque para disminuir armónicos, desconectadores internos, fusibles de acción rápida integrados, control PID, etc.

Lo que realmente hace la diferencia entre un equipo y otro es la calidad de los componentes que lo integran y el servicio de PRE y postventa del mismo.

Teniendo en cuenta los análisis realizados en el sistema de bombeo de petróleo y de acuerdo a las características de los motores de inducción se seleccionó el variador de velocidad modelos ATV71H D90N4.

Aplicaciones de los variadores de frecuencia.

La gama de variadores de velocidad Altivar 71 D90N4 permite satisfacer las mayores exigencias gracias a los diferentes tipos de control motor y las numerosas funcionalidades integradas. Está adaptada a los accionamientos más exigentes:

1- Par y precisión de velocidad a velocidad muy baja, dinámica elevada con control vectorial de flujo con o sin captador.
2- Gama de frecuencia ampliada para los motores de alta velocidad.
3- Puesta en paralelo de motores y accionamientos especiales gracias a la ley de Tensión/frecuencia.
4- Precisión de velocidad estática y ahorro energético para los motores asíncronos de lazo abierto.
5-Flexibilidad sin sacudidas para las máquinas excéntricas con el ENA System
(Energy Adaptation System).
Las funciones del Altivar 71 aumentan el rendimiento y la flexibilidad de uso de las máquinas para múltiples aplicaciones.

En máquinas de proceso.

Regulador PID.
1-Alta resolución de la consigna.
2-Control de velocidad o de par.
3-Conexión a las principales redes de comunicación.
4-Alimentación separada del control.
5-Unidad de frenado por reinyección en la red.
6-Conexión al bus de continua común.

. **Beneficios que reporta el uso de los VDF:**

- Un enorme potencial para el ahorro de energía disminuyendo la velocidad del motor en muchas aplicaciones
- Mejora el proceso de control y por lo tanto la calidad del producto.
- Se puede programar un arranque suave, parada y freno (funciones de arrancador progresivo).

- Amplio rango de velocidad, par y potencia. (velocidades continuas y discretas).
- Permiten el uso de lazos cerrados de velocidad.
- Pueden controlar varios motores.
- Factor de potencia unitario.
- Respuesta dinámica comparable con los sistemas de CD.
- Capacidad de by-pass ante fallos del variador.
- Protección integrada del motor.
- Marcha paso a paso (comando JOG).
- Se parte del conocimiento de las características de carga hidráulica contra caudal tanto de la bomba como del sistema hidráulico y de la eficiencia contra caudal de la bomba.
- Es necesario aplicar métodos de selección y operación de las bombas que garanticen que ellas operen la mayor parte del tiempo en los puntos de mayores eficiencias (deben ser concebidos y aplicados por los especialistas hidráulicos en trabajo común con los eléctricos).

Figura (3.1) variador de velocidad ATV71H D90N4

Este variador velocidad ATV71H D90N4 cuenta con un banco de rectificación propio, con el fin de disminuir los armónicos generados.

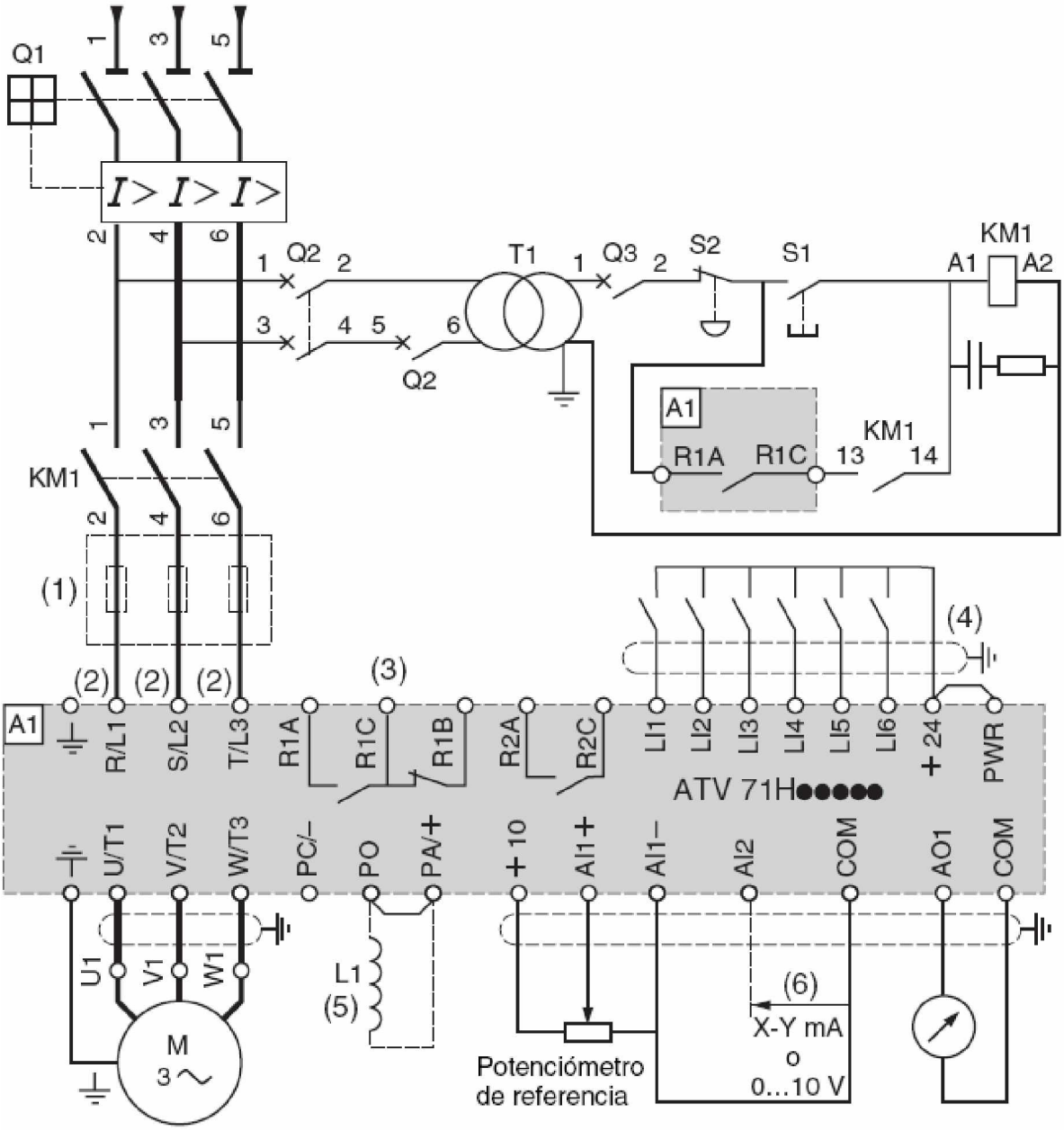


Figura (3.2) Esquema de control y fuerza del variador de velocidad Altivar 71

Aunque el variador de velocidad cuenta con un banco de rectificación propio, con el fin de disminuir los armónicos generados se puede conectar filtros pasivos.

El filtro pasivo permite reducir los armónicos de corriente con índices de distorsión de armónicos totales inferiores al 16% o al 10%. Estos índices pueden ser inferiores al 10% o al 5% asociándolos a una inductancia DC.

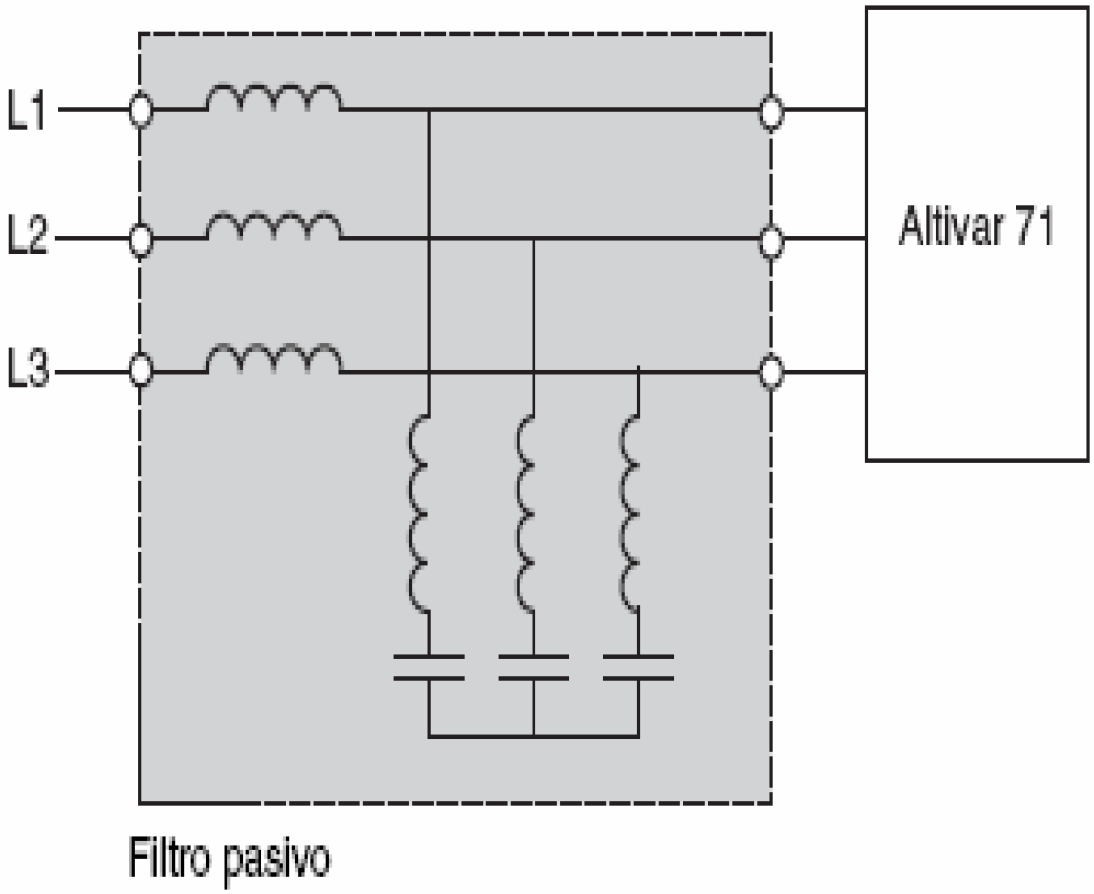


Figura (3.3) Filtro pasivo

Aplicaciones del filtro pasivo

Reducción de los armónicos de corriente para una utilización de los variadores en el primer entorno.

Oferta completa

Los Variadores de velocidad Altivar 71 cubre las potencias de motor comprendidas entre 380…480 V trifásica, de 0,75 kW. a 500 kW.

El variador Altivar 71 integra de forma estándar los protocolos Modbus y CANopen así como numerosas funciones.

Estas funciones pueden ampliarse por medio de tarjetas opcionales de comunicación,

Entradas/salidas e interfase de codificador,

El variador Altivar 71 cumple con las normas internacionales IEC-EN 61800-5-1, IEC-EN 61800-2, IEC-EN 61800-3, está certificada conforme a e, UL, CSA, DNV, C-Tick, NOM 117, GOST y ha sido desarrollada para responder a las directivas sobre la protección del entorno (RoHS, WEEE, etc.).

El variador Altivar 71 se inserta en la cadena de seguridad de las instalaciones, integra la función de seguridad “Power Removal” que prohíbe el arranque intempestivo del motor. Esta función cumple con la norma sobre máquinas EN 954-1 categoría 3, con la norma sobre instalaciones eléctricas IEC-EN 61508 SIL2 y con el proyecto de norma de accionamiento de potencia IEC-EN 61800-5-2. 532726

Protección térmica del motor

El variador Altivar 71 realiza la protección térmica especialmente estudiada para el funcionamiento del motor de velocidad variable autoventilado o moto ventilado. El variador calcula el estado térmico del motor incluso cuando está sin tensión.

Esta protección térmica del motor está prevista para una temperatura ambiente

Máxima de 40 ¢ªC en las proximidades del motor. Si la temperatura alrededor del motor supera los 40 ¢ªC, es necesario añadir una protección térmica directa por sondas de termistancias integradas en el motor (PTC). Las sondas se tratan directamente por el variador.

3.3 Característica del variador de velocidad

Potencia del motor inferior a la potencia del variador

El variador Altivar 71 puede alimentar todo tipo de motores cuya potencia sea inferior a la establecida para el variador utilizado. Esta asociación resulta idónea para las aplicaciones que requieran un elevado sobre par intermitente.

Aplicaciones típicas: máquinas con par de arranque muy importante, machacadoras, trituradoras, bombas.

(1) Entrada analógica configurable mediante software en corriente (0-20 mA) o tensión (0…10 V).

(2) Salidas analógicas configurables por software en corriente (0-20 mA) o tensión (± 10 V o 0…10 V), la selección es independiente para cada salida y se realiza por conmutador).

Las tablas que contienen variables de aplicación para controlar pueden crearse y guardarse.

En estas dos herramientas, además de la animación de datos, es posible:

1. Modificar y forzar el valor de los datos sea cual sea su tipo.
2. Cambiar el formato de visualización (binario, hexadecimal, etc.).

Osciloscopio.

La función osciloscopio del software de programación PS 1131 permite controlar en forma de curvas hasta 20 variables.

Pantallas de explotación

Una herramienta integrada en el software de programación PS 1131 permite el diseño y el uso de pantallas de explotación para la aplicación:

1. Creación de fondos de pantalla.
2. Animación de objetos gráficos asociados a variables.
3. Visualización de mensajes.

Simulación.

La función Simulación del software de programación PS 1131 permite probar el programa sin necesidad de instalar el variador.

Tabla (3.1) Datos nominales del variador

Potencia indicada en la placa en kW**)**	Corriente de línea	Potencia aparente	ICC de línea permisible Máx. kA	Corriente máxima permanente	Corriente transitória máx. durante 60s
90	166	109.3	35	179	269

Tabla (3.2) Datos nominales del variador

Variador	ICC/kA	Valor de la Ind.	Corriente nominal	Corriente saturación	Perdida W	referencia	Peso Kg.
ATV71HD90N4	35 kA	0.155 Mª	184 A	370 A	220 w	VAA558	31

Control del variador

A través de las entradas/salidas del variador

1. Las señales de control se transmiten por cable a las entradas/salidas.

2. Las funciones se asignan a entradas lógicas, entradas analógicas, etc.

Una entrada lógica puede asignarse a varias funciones, es posible controlar dos funciones por una única señal que limite el número de entradas necesarias.

3. Las entradas/salidas del variador Altivar 71 se configuran independientemente unas de otras:

4. La consideración de las entradas lógicas puede temporizarse para evitar los fenómenos de rebote de determinados conmutadores.

5. El formato de las señales entrantes en las entradas analógicas permite adaptarse perfectamente a los órganos de control y a las aplicaciones:

– Valor mínimo y valor máximo de la señal de entrada.

– Filtrado de la entrada para eliminar las perturbaciones no deseadas de las señales recibidas.

– Funciones de graduado y limitación de cresta de señales para evitar un funcionamiento de baja velocidad que resultaría muy negativo para la aplicación.

– Función de punto medio que permite, a partir de una señal de entrada unipolar obtener una señal de salida bipolar para controlar la velocidad y el sentido de la rotación.

6. El formato de las salidas analógicas que transmiten la información emitida por el variador a otros aparatos (visualizadores, variadores, autómatas, etc.):

– Señal de salida en tensión o en corriente.

– Valor mínimo y valor máximo de la señal de salida.

– Filtrado de la señal de salida.

Las salidas lógicas pueden retrasarse para la activación y la desactivación.

7. El estado de salida cuando la señal está activa también se puede configurar.

8. El variador también admite señales de pulsos:

Valor mínimo y valor máximo de la frecuencia de la señal (30 kHz en la entrada RP de la tarjeta de entradas/salidas extendida, 300 kHz máx. En la entrada de la tarjeta de interfase del codificador).

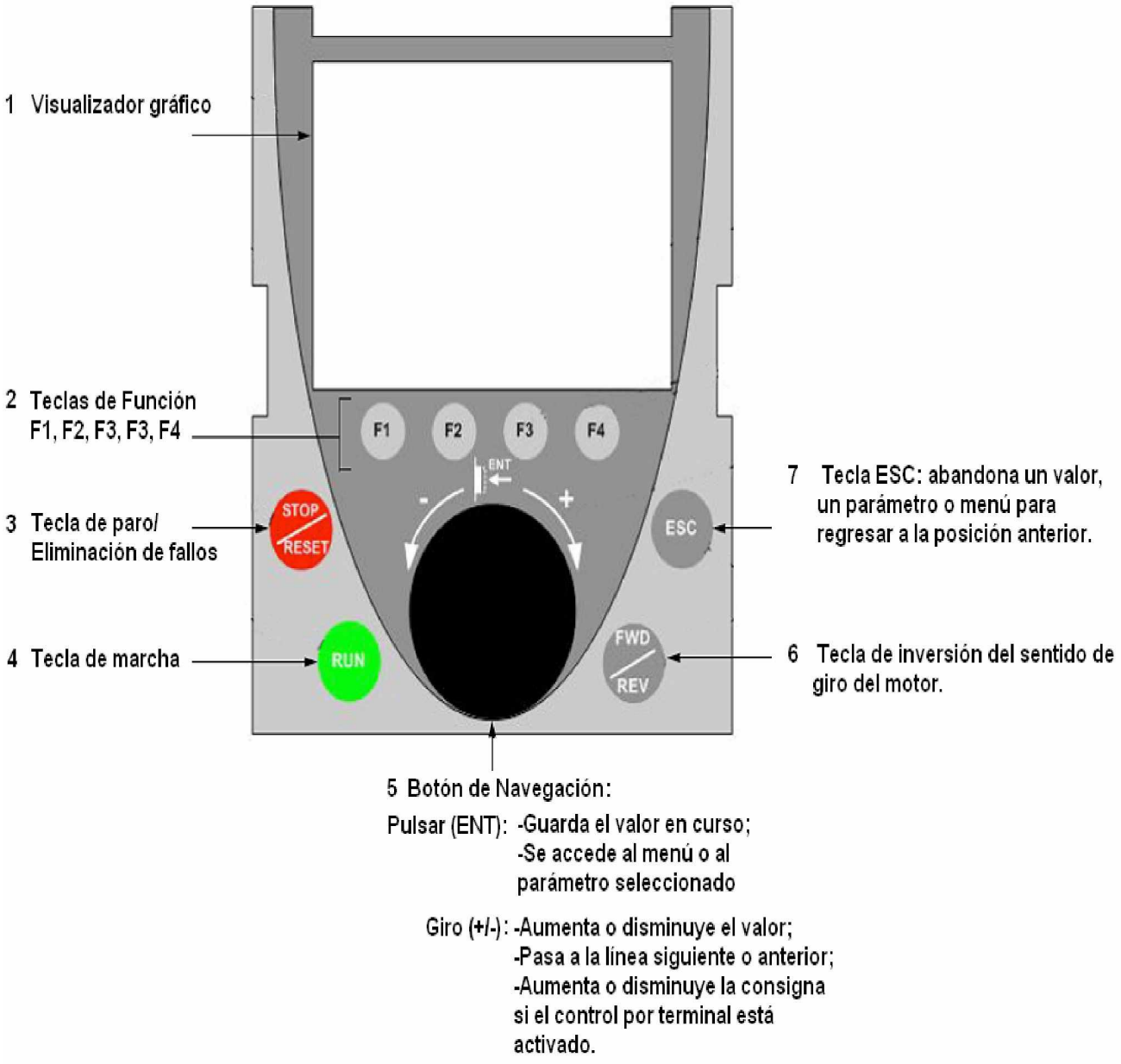


Figura (3.4) Terminal grafico

Nota: las teclas **3**, **4**, **5** y **6** permiten controlar directamente el variador, si el control por terminal está activado.

A través del terminal gráfico extraíble

Los controles de giro y las consignas (par, velocidad o PID) pueden ser controlados por el terminal gráfico. Algunas funciones de aplicación también pueden asignarse a las teclas de funciones F1, F2, F3, F4 del terminal gráfico. Se puede gestionar de diferentes formas un cambio de canal de control /o de consigna (función Bumpless).

Ejemplo: al pasar de un control por bornero a un control a través del terminal gráfico, se ofrecen dos posibilidades:

1- Parada del variador Altivar 71.

2-Continuidad del funcionamiento con copia del sentido de rotación y de la consigna.

Guía de parámetros de comunicación

En esta guía se describen:

• Los parámetros del variador con los elementos específicos para utilizarlos mediante un bus o una red de comunicaciones;

• Los modos de marcha específicos de la comunicación (gráfico de estado);

• La interacción entre la comunicación y el control local.

Preajustes del variador

El Altivar 71 se entrega preajustado de fábrica para las condiciones de uso más habituales:

• Macro configuración: Marcha/paro.

• Frecuencia del **motor**: 60 Hz.

• Aplicación de par constante, control vectorial de flujo sin captador.

• Modo de paro normal en rampa de deceleración.

• Modo de paro por fallo: rueda libre.

• Rampas lineales de aceleración y deceleración: 3 segundos.

• Velocidad mínima: 0 Hz.

• Velocidad máxima: 60 Hz.

• Corriente térmica del motor = intensidad nominal del variador.

• Corriente de frenado por inyección en la parada = 0,7 x corriente nominal del variador, durante 0,5 segundos.

• Sin rearranque automático después de un fallo.

• Frecuencia de corte: 2,5 o 4 Khz. según el calibre del variador.

• Entradas lógicas:

- LI1: marcha adelante, LI2: marcha atrás (2 sentidos de la marcha), control 2 hilos por transición.

- LI3, LI4, LI5, LI6: inativa (no asignadas).

• Entradas analógicas:

- AI1: consigna de velocidad 0 + 10 V.

- AI2: 0-20 mA, inactiva (no asignada).

• Relé R1: el contacto se abre en caso de fallo (o si el variador está sin tensión).

• Relé R2: inactivo (no asignado).

• Salida analógica AO1: 0-20 mA, inactiva (no asignada).

En caso de que los valores anteriores sean compatibles con la aplicación, utilice el variador sin modificar los ajustes.

Preajustes de las tarjetas opcionales

Las entradas y las salidas de las tarjetas opcionales no están asignadas en ajustes de fábrica.

Funciones de las aplicaciones.

• **Inercia elevada:** centrifugadoras, mezcladoras, máquinas excéntricas (bombas de balancín, prensas)

Motor de Inducción alimentado con Convertidor de Frecuencia.

El suministro de voltaje de un VDF puede realizarse a frecuencias que van desde 0 Hz hasta 300 o más Hz.

La velocidad del motor es variable en la misma proporción que varia la frecuencia, así el motor puede girar lento o muy rápido, dependiendo de la frecuencia que le suministra el VDF. al mismo tiempo el voltaje también es variable en la misma proporción de la variación de la frecuencia,

$$V = \frac{60 * F}{P} \qquad (3.1)$$

F: Frecuencia suministrada por el variador al motor.

P: Pares de polos.

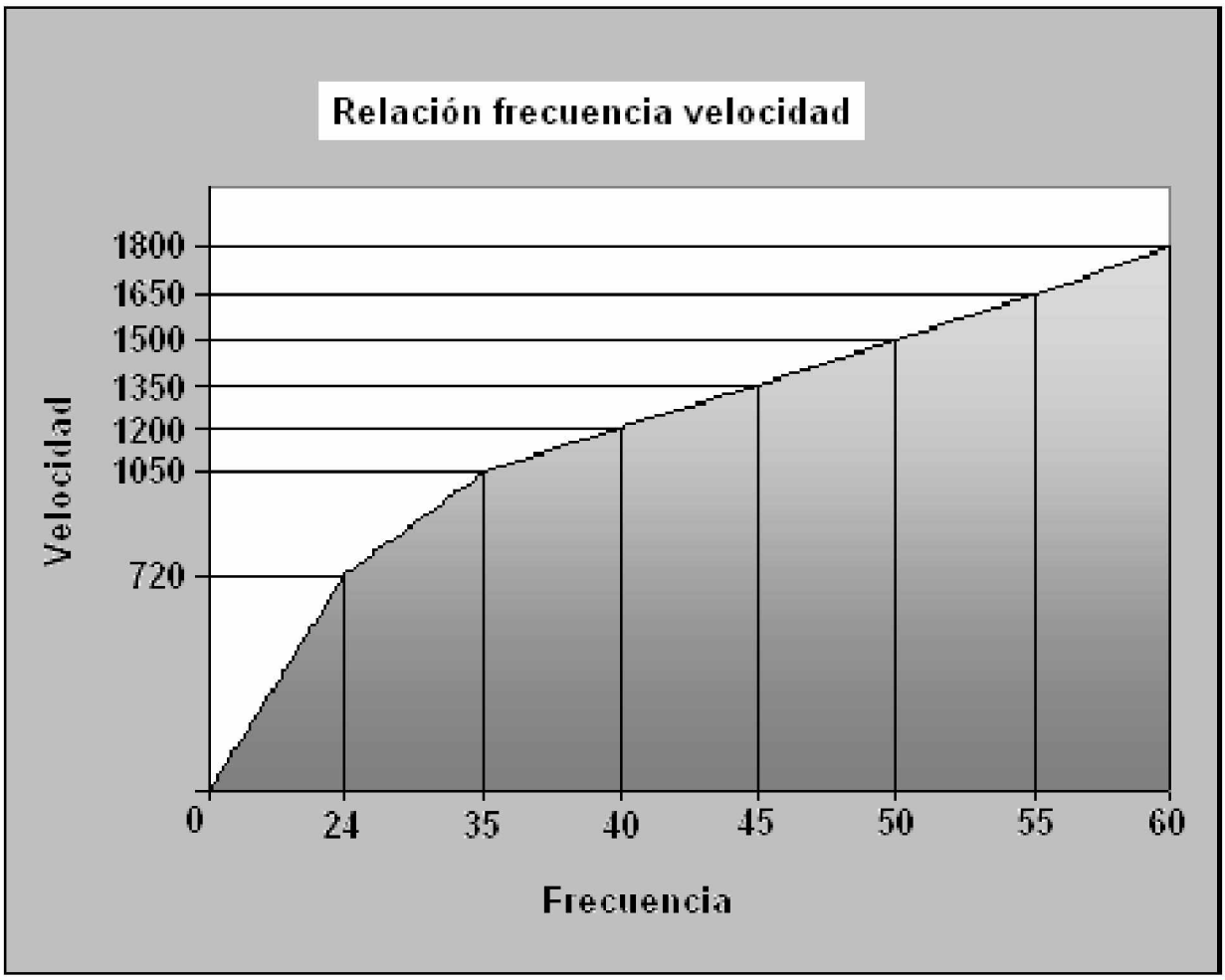
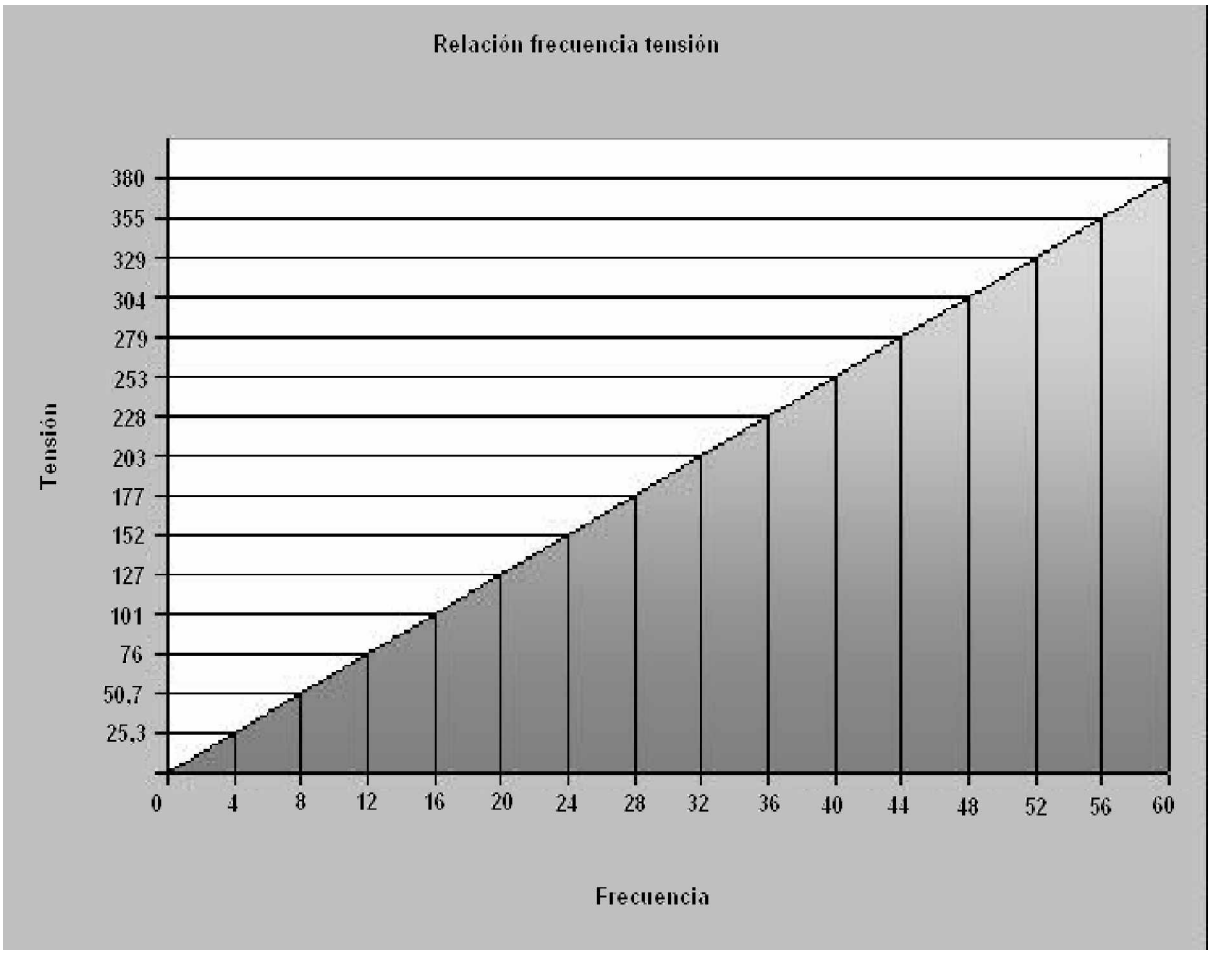


Figura (3.5). En esta figura se muestra la relación de la frecuencia suministrada por el variador y la velocidad de motor



En figura (3.6) se muestra la relación de tensión y frecuencia que suministra un variador para un motor de asincrónico de 380V.

3.4 Valoración económica

En las mediciones de demanda eléctrica sin el variador, se puede observar que cuando la unidad estaba generando 125 MW el flujo total de petróleo 1505 L/min. y el flujo de recirculación era de 442.5 L/min. Observándose perdida en el trabajo de los motores de las bombas.

La producción de energía eléctrica constituye uno de los métodos de mayor consumo petróleo en el país. Actualmente un barril de petróleo tiene un valor de 22 CUC en el mercado, la CTE Lidio Ramón Pérez consume 285 gramos de petróleo para producir un 1kW, y esto se refleja en el nivel de vida de la población. Es por esto que la eficiencia en el uso de la energía eléctrica tiene un impacto tanto económico como social.

En las centrales termoeléctricas se precisan que los mayores consumidores de energía eléctrica lo representan los accionamientos eléctricos de las bombas y los ventiladores.

Los accionamientos de bombas están entre los accionamientos más empleados en el proceso de generación de la CTE Lidio Ramón Pérez, los cuales se caracterizan por una dependencia entre la carga de presión (H) y el caudal (Q), H=f(Q), que corresponde a una potencia P=f(Q) y una eficiencia η=f(Q) dada en su punto de operación donde se interceptan con la característica de la red hidráulica y que determina el punto de trabajo del motor de inducción con un deslizamiento dado.

Por la exigencia del proceso tecnológico, frecuentemente se hace necesario variar el caudal Q, lo que en la mayoría de los casos, se realiza abriendo o cerrando la válvula PE14G201 que posibilita la recirculación del combustible hacia la succión de la bomba, así se mantiene el valor de presión deseado donde existe pérdida de petróleo por recirculación y disminuye el rendimiento de la instalación. El caudal disminuye y la carga de presión aumenta, pero parte de esta energía ΔH_{val} se pierde en la válvula de impulsión.

Si el número de revoluciones de la turbo-máquina se disminuye de tal manera que pase por el punto de funcionamiento H-Q necesario, el rendimiento se mantiene aproximadamente constante y la instalación se regula sin pérdidas adicionales; llevar el número de revoluciones al necesario se puede conseguir con un variador de velocidad (ATV71H D90N4) adecuadamente seleccionado.

En la práctica en la CTE Lidio Ramón Pérez se suele estrangular por la succión logrando el mismo efecto hasta que la caída de presión en la línea de succión alcanza la temperatura de vapor del fluido y aparece el fenómeno de la cavitación.

En esencia la introducción del esquema de control con los variadores de velocidad en el sistema de bombeo de petróleo mejora la eficiencia en el accionamiento, permite la disminución de las pérdidas de energía y aumenta el tiempo de vida útil o empleo de las bombas.

Es bueno indicar que con el aumento de las pérdidas no sólo disminuye el rendimiento sino también empeora el factor de potencia del motor eléctrico.

En el sistema de bombeo de petróleo de cada bloque se encuentran trabajando dos motores y uno de reserva, la CTE consume 285 g para producir un kW, a continuación se realiza el siguiente análisis:

Ahorro = 24 (h/día) * X (kW.) * 285 (grm/kWh) * 328 (día/año) (3.2)

Un barril vale en el mercado 22 CUC

Un barril tiene 160 Litros

1litrode petróleo = 1020grm

Costo del petróleo = 0.13 CUC el litro.

Ahorrando 29kW en cada motor, se ahorran 58kw.

Ahorro en litros de petróleo = 24 h* 58 kW * 285g = 388,94 Lts (3.3)

Ahorro en CUC = 388,94 Lts *0.13 CUC *328dias = **16 584,45** (3.4)

Inversión (de dos VDF Altivar 71 en dos motores de 85 kW en el bombeo de petróleo de la CTE de Felton) y su instalación en el bloque #1:

Inversión = 25 000 CUC

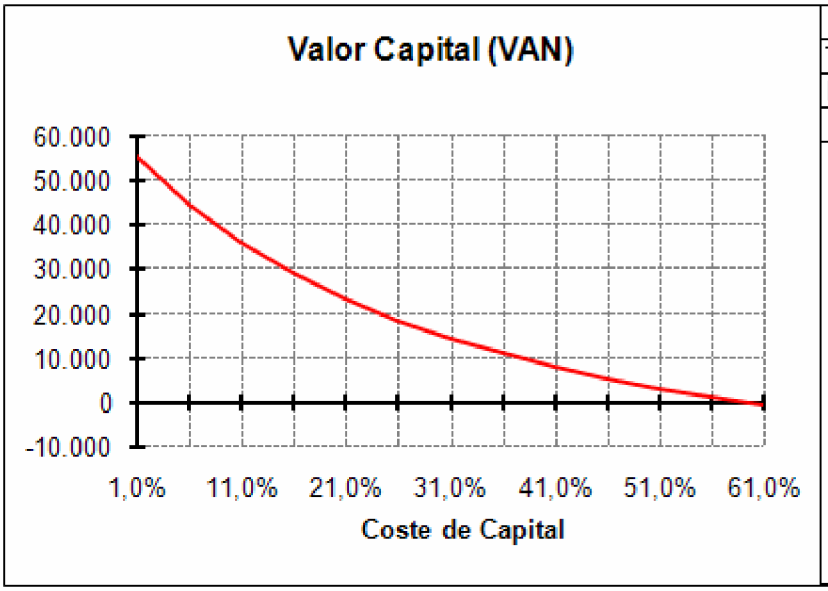
Ahorro económico = 16 584,45 CUC / año

ANALISIS FINANCIERO DEL VARIADOR DE VELOCIDAD ALTIVAR 71

Tasa de descuento	12%

AÑO	GASTOS	INGRESOS	RESULTADO	VA
0	25.000		-25.000	-25.000
1	0	16.584	16.584	14.808
2	0	16.584	16.584	13.221
3	0	16.584	16.584	11.804
4	0	16.584	16.584	10.540
5	0	16.584	16.584	9.410
	25.000	82.922	57.922	##########

Resumen de la inversión 1	
Rto. contable	3,31689
Rto. contable medio	0,663378
Plazo de recuperación	2,00
VAN	**34.783**
TIR	**60,01%**



Datos para análisis del VAN	
Tasa de dto.	1%
Incremento	5,0%

Coste del Capital	*VAN*
1,0%	55.491
6,0%	44.860
11,0%	36.294
16,0%	29.302
21,0%	23.526
26,0%	18.701
31,0%	14.631
36,0%	11.166
41,0%	8.192
46,0%	5.618
51,0%	3.376
56,0%	1.410
61,0%	-326

3.5 IMPACTO AMBIENTAL

El petróleo que circula por el sistema de bombeo de la “CTE”, no constituye un problema de afectación al medio ambiente de forma directa, sin embargo para la producción de energía eléctrica es necesario quemar gran cantidad de petróleo. Este proceso constituye uno de los mayores problemas de contaminación ambiental por la emisión de gases a la atmósfera, dentro de los cuales se encuentra el dióxido de carbono (CO_2), que constituye el elemento fundamental que interviene en el llamado Efecto Invernadero causante de la elevación gradual de la temperatura de la atmósfera terrestre.

Veamos a continuación algunos elementos referentes al mecanismo de ocurrencia del Efecto Invernadero.

Los habitantes de regiones climáticas frías saben desde hace cientos de años que en el interior de un invernadero, pueden cultivarse, flores, plantas ornamentales, hortalizas, frutas y un sinfín de productos vegetales característicos de zonas templadas del planeta. Ello se debe a que en el interior se consigue, sin aportación adicional de energía, una temperatura superior a la que se logra en el exterior. Un invernadero es un recinto cerrado situado al aire libre cuyos cerramientos están hechos de vidrio o material transparente o traslúcido. La energía solar directa (rayos del sol), como si es difusa (radiación transmitida por las nubes o por el cielo despejado), pasa a través de las paredes y techo y una vez dentro del recinto es retenida y calienta todo el interior del invernadero, aire y plantas.

En la tierra a nivel planetario, tiene lugar un efecto de captación de energía similar al que ocurre en los invernaderos. La radiación solar que alcanza la superficie de la Tierra es parcialmente absorbida por ella, parcialmente reflejada y reradiada, es decir, emitida nuevamente por la propia superficie pero con longitudes de ondas distintas a las de las radiaciones incidentes. El espectro de radiación emitido por la superficie terrestre abarca longitudes de onda comprendidas entre 4000 y 100000 NM, correspondiendo fundamentalmente a radiaciones infrarrojas; ello es debido a que la temperatura de la superficie de la Tierra es mucho menor que la del Sol. La superficie de la Tierra se convierte, pues, en un emisor de radiaciones que deben atravesar la atmósfera en sentido contrario al de las radiaciones incidentes y que en su camino hacia el espacio atraviesan primero la troposfera, donde se encuentran con una serie de gases que absorben gran parte de ellas y después la estratosfera donde el Ozono absorbe una parte de la radiación

infrarroja emitida. La radiación proveniente del Sol que alcanza la superficie terrestre eleva la temperatura de esta l radiación reradiada que escapa de la atmósfera enfría la Tierra. La temperatura media de la superficie terrestre es el resultado de un equilibrio entre las ganancias y pérdidas de energía en forma de radiación. Por lo tanto, cuanta más radiación reradiada sea retenida por la atmósfera, más elevada será la temperatura superficial de la Tierra; es el mismo efecto que tiene lugar en un invernadero, pero a escala global o planetaria.

La utilización de variadores de velocidad en el sistema de bombeo de petróleo de la "CTE" de felton, es un requisito básico para una política de ahorro de energía y protección del medio ambiente adecuada. Basta decir que por cada Kw.-h de energía eléctrica consumida por un equipo se descarga a la atmósfera 0.94 Kg. de CO_2. Fernando. J. (1996)

Un aspecto a destacar es que precisamente las Bombas, están dentro de los equipos más consumidores de energía en una planta industrial, por lo que la implementación de nuevas tecnologías con un alto grado de automatización es un aspecto al que se debe prestar un máximo de atención.

El estado de la técnica no ha permitido aún encontrar soluciones suficientemente satisfactorias que aseguren un desarrollo sostenible y minimicen las consecuencias indirectas de este consumo de energía: el efecto invernadero, el agujero de la capa de ozono, la lluvia ácida, los residuos radiactivos, etc. Actualmente la forma más eficaz e inmediata es el ahorro de energía.

Parecer general es que el dióxido de carbono contribuye aproximadamente en un 50% al problema del calentamiento global y el metano del 10% al 20%. Los beneficios de dicho programa son ambientales y económicos. Aún con reducidos niveles de costo del combustible, la cantidad gastada en consumo de energía es extremadamente elevada y los ahorros potenciales pueden justificar muchos proyectos. La contaminación del aire: está dado por emisiones de gases a la atmósfera que se producen como resultado de la utilización de productos químicos en su proceso de generación de energía,

Estas afectaciones producen efectos indirectos y negativos como incremento de la presión sanguínea, aceleración del ritmo sanguíneo, la contracción de los capilares de la piel y la disminución en la capacidad de trabajo físico y mental del hombre, expuestos también a enfermedades respiratorias y de la piel.

3.6 Valoración social

La introducción de estos resultados permite humanizar la labor de los operadores que están expuestos a las emisiones gaseosas de **CO_2**, letales para la vida en altas concentraciones. Al mismo tiempo esto permite mejorar el entorno de trabajo, disminuyendo las emisiones gaseosas hacia los barrios residenciales de la comunidad, impidiendo en gran parte la aparición de problemas respiratorios en los niños y adultos.

CONCLUSIONES PARCIALES

- Usando el variador de velocidad ATV71H D90N4, el sistema de bombeo de petróleo donde opera la bomba de tornillo tiene menos pérdidas, ahorrando 26 kW en cada motor.
- Con la introducción del variador de velocidad ATV71H D90N4 en el accionamiento eléctrico de la bomba de tornillo del sistema de bombeo de petróleo de la CTE se logra un efecto económico anual de unos 16 584.45 CUC por concepto de energía dejada de consumir en forma de pérdidas.

CONCLUSIONES

En la presente investigación se llegaron a las siguientes conclusiones:

- La eficiencia del accionamiento con el uso del esquema de variador de velocidad, se mejora 8.92 %, sobre la base del control de sus pérdidas, para las condiciones de explotación en el sistema de bombeo de la CTE de felton.
- Las variables principales que participan en la evaluación de la eficiencia del accionamiento del motor de inducción son: la velocidad y el caudal
- El uso del esquema del variador de velocidad permite un efecto económico anual, 16 584 CUC por concepto de energía dejada de consumir en forma de pérdidas. Esta valoración económica, es partiendo de las pérdidas actuales del sistema.

RECOMENDACIONES

En la presente investigación se proponen las siguientes recomendaciones:

- Utilizar el variador de velocidad ATV71DN904 en el accionamiento eléctrico de las bombas de petróleo de la CTE para incrementar la eficiencia eléctrica contribuyendo a bajar el factor de insumo de la central.
- El esquema de control del variador de velocidad puede servir como programa tutorial para la automatización integral del proceso de transporte de petróleo, en el sistema de bombeo de petróleo de la planta de la CTE de felton, garantizando la regulación eficiente del proceso.
- Continuar la investigación con el uso de la técnica de lógica difusa o redes neuronales con el fin de profundizar en los resultados.
- Implementar este trabajo en las demás centrales termoeléctrica del país

Bibliografía

1. Bose B. K., Pestel N. y Kaushik R. (Abril 1997). *A neuro-fuzzy based on line efficiency optimisation control of a stator flux oriented direct vector controlled induction motor drive*: IEEE vol 44. no.2
2. Campbell, Sylvester J. (1987). *Solid-State AC Motor Controls*: New York: Marcel Decker, Inc.. ISBN 0-8247-7728-X.
3. Chapman, S. (2003). *Máquinas Eléctricas*. New York: Editorial McGraw Hill.
4. CHERKASSKI, V.M. (1986). *Bombas, Ventiladores y Compresores.* Moscú: Editorial Mir.
5. Cerovski Z., Javurek J. (september. 1997). *Converter control of asynchronous motor drive with minimum current consumption*. EPE European Power Electronic Conference. Groendheim, Norway. Vol 3. p807-812. 2-10

6. Costa Branco, P.J. y Dente, J.A., (1999)."*Noise effects in fuzzy modelling systems*,": in Mastorakis, ed: *Computational Intelligence and Applications*, World Scientific and Engineering Society Press, Danvers, USA, pp. 103-108,
7. Costa Montiel A., Galan N., Ciumbulea G. y López X. M. (2004). *Cálculo de los Parámetros del motor de inducción a partir de datos de catálogo.*

8. Cowie, Charles J, (2001). *Adjustable Frequency Drive Application Training*. PowerPoint

9. Econosto, Royal. (marzo 2000). *General Catalogue Valves*, fitting and related equipment. Rotterdam,

10. Fernández García Sergio J. Dr. (1996) ”*Diagnostico Integral*”, Folleto.

11.Fernández García Sergio J. Dr. (1998) “*Mitología para la introducción del diagnóstico Integral en las Centrales y Subestaciones Eléctricas*”. Folleto.

12.González, Alicia e Irma, Nocedo. (2000*). Los métodos, técnicas y procedimientos de la investigación*. ISPEJV-CELAEE La Habana, Cuba..

13.G Hicks, Tyler. *Bombas su selección y aplicación*. Editorial CECSA.

14.G. Pesse, P. de Arizón y R. Alves. (Agosto 1994). *Reducción de la contaminación armónica en el sistema de distribución de campos petroleros*. IV Seminario de ingeniería de potencia IEEE y 1er. Seminario de distribución de energía eléctrica, Chile.

15. Harper, Enríquez. *El ABC de la instrumentación industrial en el control de procesos*. Editorial: Limusa Noriega editores.

16. Hsu J., Kueck J., Olszewski M., Casada D., Otaduy J. y Tolberg L. (Feb. 1998). *Comparasion of induction motor field efficiency evaluation methods.* IEEE Trans. On Ind. Applications. Vol. 34. No.1. pp 117-125.

17. KENNETH, J.YCOL. (1998). *Bombas Selección , uso y mantenimiento*. Mexico: Editorial. ceucei mcgraw.

18. KOSTENKO, A. PIOSTROKI. (1990). *Máquinas eléctricas y transformadores*. Ciudad de la Habana: Editorial. pueblo y educación.

19. Kusko A. y Galler D., (July – august 1983). *Control means for minimizationof losses in ac and dc motor drives*. IEEE Transactions on Industry Aplications, Vol 19, No. 4. pp 561 – 570.

20. Leonhard, W. *(*1996). *Control of Electrical Drives*, Berlin Heidelberg: 2nd edition, Springer-Verlag.

21. Leiva Castro Arelys Batista, Garrido ,Liver. Chaviano Silvino, Bernal y Gómez Rafael. (1996). "*Metodología y Diseño para la implantación del sistema alterno de mantenimiento a equipos rotatorios en la CTE Carlos Manuel de Céspedes*". Cienfuegos: Universidad de Cienfuegos, departamento de CEE, Cuba.

22. Mataix, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Ediciones del Castillo. 2ª edición.

23. Mcnaughton, Kenneth. *Bombas selección, uso y mantenimiento*. Editorial Mc. Graw Hill.

24. Mott, Robert L. *Mecánica de Fluidos aplicada*. Editorial Prentice Hall.

25. Nekrasov B. (1968). *Hidráulica*. Moscú: Editorial Mir.

26. Patiño, L., Espinosa, H. y Merchan, (2002). "*Estudio de Transferencia de Calor Transitoria en el Flujo de Fluidos a Través de Medios Porosos*, ". Caracas: VI Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas.

27. Perez, F. (1983). *Equipos de Bombeo*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.

28. Ramos, P.N. (1989*). Bombas, Ventiladores y compresores*. La Habana: Ediciones ISJAE.

29. Robert, L. Boylestad*. Análisis introductorio de circuitos*. Editorial Trillas.

30. Rojas Purón Luis Delfín, (2005). *Accionamiento eléctrico asincrónico para transporte eficiente de pulpa laterítita*, Moa,.

31. Romero Rueda I. (Junio del 2000). *Estudio del motor de inducción de rotor de jaula de ardilla sujeto a la Teoría del Campo Orientado*. Tesis de Maestría. ISMM.

32. Stephen, J.Chapman. *Máquina eléctrica* - Editorial Mc Graw-Hill.

33. Thomson, W.T. y Gilmore, R. J. (2003). *Motor Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives- Fundamentals, Data Interpretation, and Industrial Case Histories*. Proceedings of 32 rd Turbo machinery Symposium,

34. Thomson, W.T. y Fenger, M. Case (Junio 2003). *Histories of Current Signatura Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives. Electrica Machines and Drives*, IEMDC IEEE, Volumen 3.

ANEXOS

AVA: Accionamiento de velocidad ajustable.

GENERALIDADES SOBRE LOS ACCIONAMIENTOS ELECTROMECANICOS.

CONCEPTO:

Es el sistema formado por el conjunto de dispositivos y aparatos que sirven para llevar a cabo la conversión de energía eléctrica en mecánica y viceversa, controlando el proceso de conversión de acuerdo a los requerimientos del mecanismo accionado.

BOMBA:

Máquina hidráulica que convierte la energía mecánica en energía de presión transferida al petróleo.

CARGA:

Es la cantidad de energía mecánica que requiere la bomba para mover el petróleo desde el nivel dinámico hasta el punto final del sistema.

CAVITACIÓN:

Es la formación y aplastamiento de burbujas en la corriente del líquido.

CORRIENTE ELÉCTRICA:

Su unidad práctica es el ampere. Es la intensidad de corriente que pasa a través de un conductor con resistencia, R y cuya diferencia de potencial entre sus extremos es, V.

FACTOR DE POTENCIA:

Relación entre la potencia activa y potencia aparente.

FRECUENCIA DE ROTACIÓN:

Es el número de revoluciones por unidad de tiempo a las que gira el conjunto motor-bomba, expresada en la práctica en rpm (revoluciones por minuto).

FLUJO, CAPACIDAD O GASTO:

Razón a la cual el volumen del petróleo cruza la sección transversal del tubo en la unidad de tiempo, es expresada en (L/min).

MOTOR ELÉCTRICO:

Máquina que transforma la energía eléctrica en energía mecánica.

NIVEL DE REFERENCIA:

Es el plano inferior de la placa base y es la referencia para todas las mediciones hidráulicas.

NIVEL DINÁMICO (ND)*:*

Es la distancia vertical que existe entre el nivel de referencia hasta la superficie del petróleo cuando el equipo se encuentra en operación; se mide en metros (m) a través de una sonda eléctrica.

SISTEMA DE BOMBEO:

Es el conjunto motor eléctrico, bomba y conductos que se instalan para la extracción y manejo de cualquier tipo de líquido.

TENSIÓN ELÉCTRICA (V):

Diferencia de potencial medida entre dos puntos de un circuito, expresado en volts.

CONDICIONES ESTABLES:

Es cuando las señales indicadas por los instrumentos de medición cumplen con las oscilaciones y variaciones permitidas en los métodos de prueba.

Potencia de salida de la bomba:

Es la potencia en Wat, transferida al petróleo por la bomba, medida lo más cerca posible del cabezal de descarga.

Eficiencia de la bomba:

Es la proporción de la potencia de salida de la bomba entre la potencia de entrada a la bomba, se expresa en porcentaje.

Eficiencia del conjunto motor – bomba:

Es la proporción de la potencia de salida de la bomba entre la potencia de entrada al motor. La eficiencia se expresa en porcentaje.

Variador de Velocidad (VSD, por sus siglas en inglés Variable Speed Drive) :
Es en un sentido amplio un dispositivo o conjunto de dispositivos mecánicos, hidráulicos, eléctricos o electrónicos empleados para controlar la velocidad giratoria de maquinaria, especialmente de motores. También es conocido como Accionamiento de Velocidad Variable (ASD, también por sus siglas en inglés Adjustable-Speed Drive). De igual

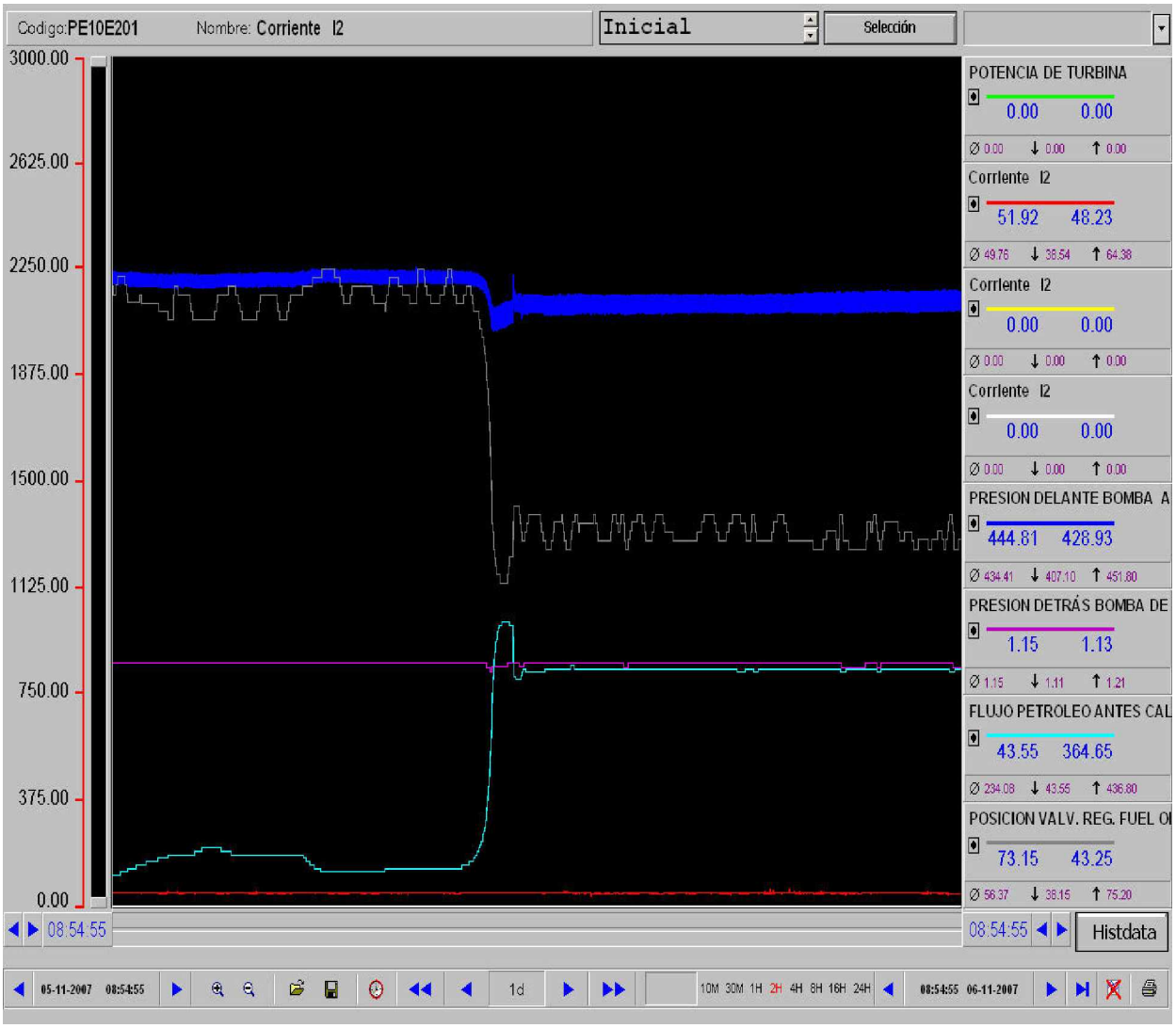
manera, en ocasiones es denominado mediante el anglicismo Drive, costumbre que se considera inadecuada

Sistemas de control a lazo cerrado:

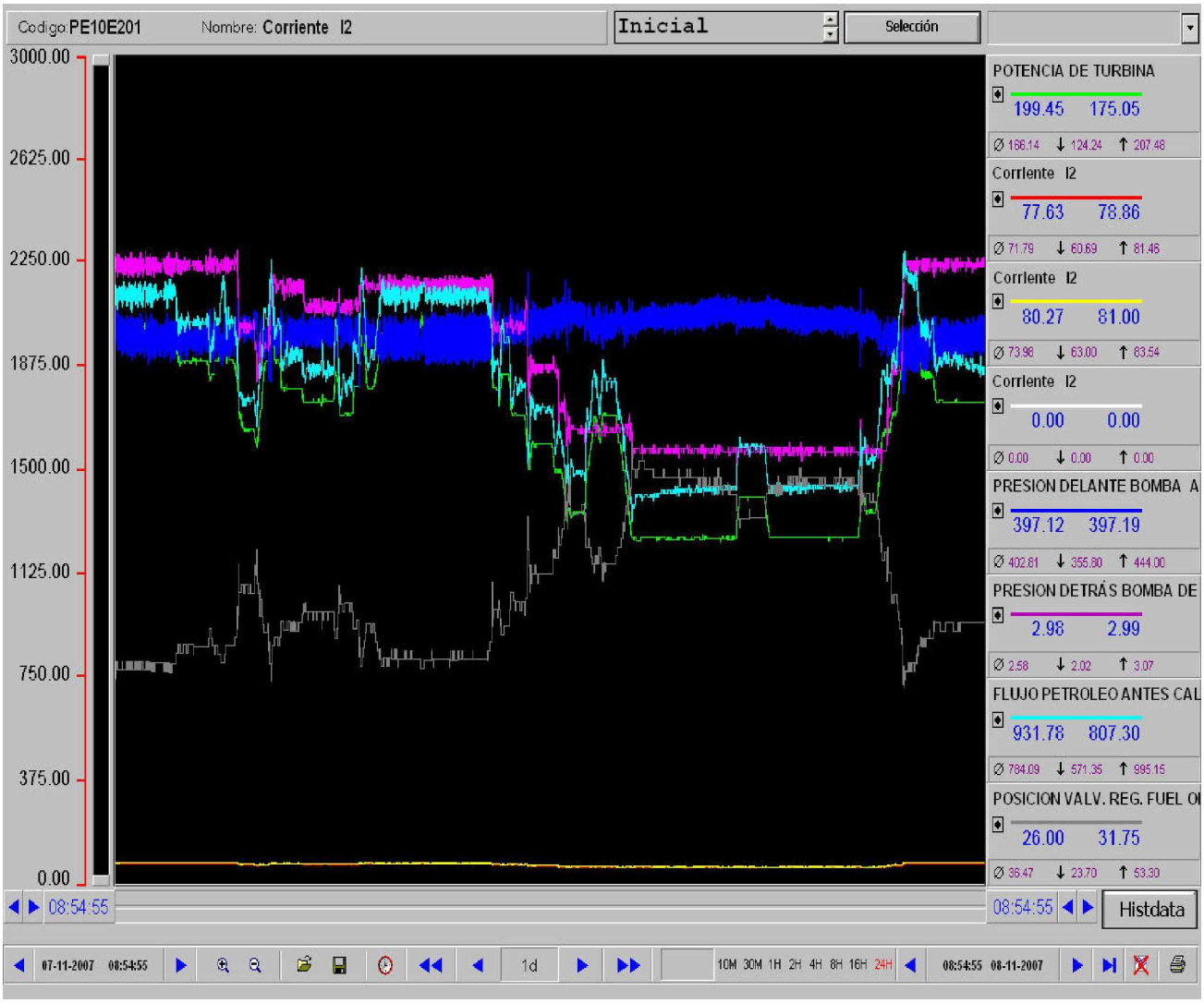
El conjunto de dispositivos y elementos (que pueden ser tanto de hardware como de software) cuyo objetivo es hacer que las variables de estado mecánicas describan en el espacio de estados la trayectoria que imponen los requerimientos del mecanismo accionado.

VARIABLES DE ESTADO:

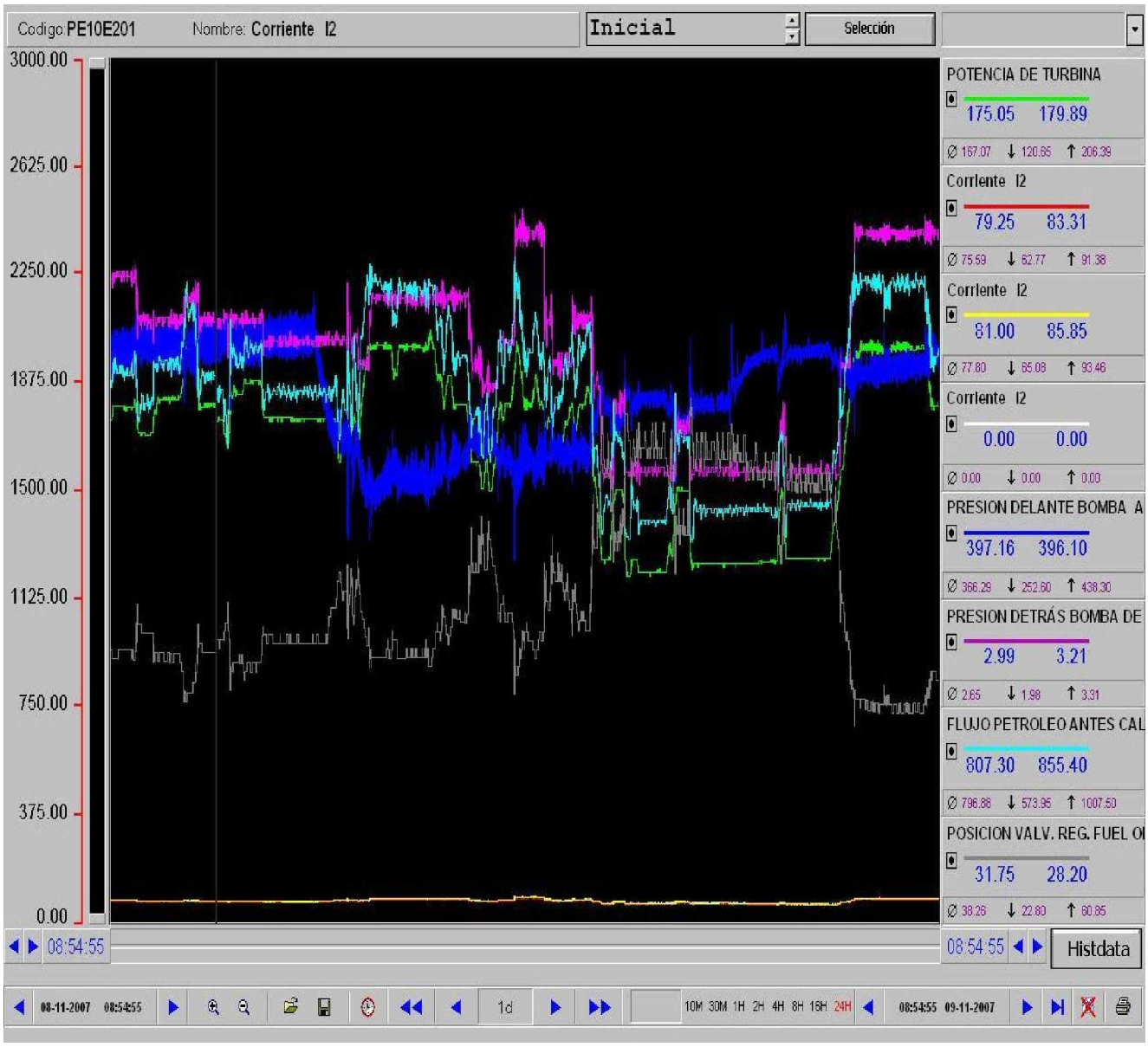
Son el conjunto mínimo de variables que describen el comportamiento de un sistema y el espacio de estados es el espacio *n* dimensional en que dichas variables se mueven. El número de variables de estado a considerar en un sistema electromecánico depende de la complejidad de los requerimientos del sistema. En general, pueden ser la posición, la velocidad o frecuencia de rotación y la aceleración.



Anexo- 2 software (active factory trend). En este anexo se puede observar la potencia de la turbina, la corriente de los motores que accionan las tres bombas, la presión delante de las bombas, en la descarga de las bombas, el flujo de petróleo hacia la caldera la posición de la válvula reguladora.



Anexo- 3 software (active factory trend). En este anexo se puede observar la potencia de la turbina, la corriente de los motores que accionan las tres bombas, la presión delante de las bombas, la presión en la descarga de las bombas, el flujo de petróleo hacia la caldera la posición de la válvula reguladora.



Anexo- 4 software (active factory trend). En este anexo se puede observar la potencia de la turbina, la corriente de los motores que accionan las tres bombas, la presión en la succión y descarga de las bombas, el flujo de petróleo hacia la caldera la posición de la válvula reguladora.

Anexo-5 Tabla 1. En esta tabla se puede observar la potencia de la turbina, la corriente de los motores, la presión en la succión y descarga de bombas, el flujo de petróleo hacia la caldera la posición de la válvula reguladora, flujo total y flujo que recircula.

	Potencia (Mw)	Corriente motor m1 (A)	corriente del M2 (A)	Corriente del M3 (A)	Flujo ante de la bomba (L/min)	Presión descarga de la bomba (MPa)	Flujo a caldera (L/min)	posición valv. (%)	Flujo de Bomba (L/min)	Cant bomba	Flujo total (L/min)	Flujo rec.
	120	67	69	0	365,1	2,084	577,85	55,7	752,5	2	1505	927,2
	121	67	69	0	364,5	2,066	612,95	53,7	752,5	2	1505	892,1
	125	67	69	0	369,9	2,114	618,8	55,3	752,5	2	1505	886,2
	125	68	70	0	358,5	2,088	619,45	55,5	752,5	2	1505	885,6
	125	65	67	0	396	2,094	620,75	53,45	752,5	2	1505	884,3
	126	64	67	0	396	2,102	627,9	51,8	752,5	2	1505	877,1
	142	64	65	0	389,7	2,08	708,5	46,45	752,5	2	1505	796,5
	150	75	77	0	339,6	2,482	711,75	43,7	752,5	2	1505	793,3
	150	74	77	0	352,5	2,492	715	43,4	752,5	2	1505	790
	169	74	78	0	408,6	2,804	783,25	33,45	752,5	2	1505	721,8
	165	77	80	0	327,3	2,602	794,95	40	752,5	2	1505	710,1
	175	72	75	0	385,8	2,71	806,65	32	752,5	2	1505	698,4
	175	73	75	0	407,1	2,712	807,3	32	752,5	2	1505	697,7
	179	74	77	0	419,4	2,81	819,65	31,45	752,5	2	1505	685,4
	173	78	80	0	314,1	2,686	839,8	36,25	752,5	2	1505	665,2
	184	74	77	0	410,4	2,788	856,05	30,25	752,5	2	1505	649
	180	83	84	0	324,6	2,876	856,7	35,5	752,5	2	1505	648,3
	179	88	91	0	315,9	3,206	866,45	32,45	752,5	2	1505	638,6
	188	75	76	0	406,2	2,804	878,15	29,5	752,5	2	1505	626,9
	199	82	85	0	318,9	2,9	943,15	31,9	752,5	2	1505	561,9
	199	82	84	0	310,5	2,864	950,95	31,65	752,5	2	1505	554,1
	199	83	85	0	394,2	3,224	956,8	25	752,5	2	1505	548,2
	201	84	86	0	384,3	3,208	969,15	24,7	752,5	2	1505	535,9
	250	84	87	0	379,8	3,208	1008	24,75	752,5	2	1505	
Minimo	120	64	65	0	310,5	2,066	577,85	24,7	752,5	2	1505	497
Maximo	250	88	91	0	419,4	3,224	1008	55,7	752,5	2	1505	927,2
Promedio	166,625	74,75	77,0833333	0	368,2875	2,62516667	789,58125	38,74375	752,5	2	1505	715,45
Desv estandar	32,9516279	7,12771687	7,27064776	0	35,2378911	0,4043842	130,432756	10,6837067	0	0	0	130,433301

Anexo-6. Calculo del circuito equivalente utilizando MatlaB

```
>> %==========================================
Conexión ='delta'
Pn=85000;   %  hp (W)
Un=380;      % Tensión [V]
In=167;              % A
nn=1750;     % rev/min
n1=1800;     % Velocidad sincrónica [rev/min
f=60;        % Frecuencia nominal [Hz]
Rend=0.88;   % rendimiento
cosFi=0.88;  % factor de potencia
ks=2.4;      % Coeficiente de sobrecarga
rest=;   % resistencia de estator
% ====================================================
    % Selección de conexión del estator
          switch (Conexión)
             case 'Estrella'
                   Ufn=Un/sqrt(3);% Tensión de fase nominal
                   Ifn=In;
             case 'Delta'
                   Ufn=Un;% Tensión de fase nominal
                   Ifn=In/sqrt(3);
          end

>> %====================================================
>> Fin=acos(cosFi);
>> P1n=sqrt(3)*In*Un*cosFi; % Potencia de entrada nominal [W]
>> Zin=(Un/sqrt(3))/Ifn; % Impedancia nominal
>> Rin=Zin*cosFi;       % Resistencia equivalente del motor
>> Xin=Zin*sin(Fin)     % Reactancia equivalente del motor
>> Sn=(n1-nn)/n1; % Deslizamiento nominal
>> n1=1800;     % Velocidad sincrónica [rev/min
```

```
>> nn=1750;     % rev/min
>> p=60*f/n1;
>> wn=2*pi*nn/60;
>> w1=2*pi*f/p;
>> Mn=Pn/wn
>> %Mn=1083
>> Mm=ks*Mn
>> rest=0.2636;   % resistencia de estator
>> k=0;
>> while 1
k=k+1
x1dxm = 0.048;
r1(1)=rest
Uth=1/(1+x1dxm)*Ufn    % Ecuación (1)
Uth=1/(1+x1dxm)*Ufn;    % Ecuación (1)
        Rth=1/(1+x1dxm)^2*r1(k);  % Ecuación (2)
        zm=3*Uth^2/(2*w1*Mm)-Rth; % Ecuación (3)
        xcc=sqrt(zm^2-Rth^2);  % Ecuación (4)
        zn=3*Uth^2/(2*w1*Mn)-Rth; % Ecuación (5)
        r2=Sn*(zn+sqrt(zn^2-zm^2)); % Ecuación (6)
Xth=0.4*xcc;
        x2=0.6*xcc;
   x1(k)=(1+x1dxm)*Xth;

   I2=Uth/(Rth+r2/Sn+xcc*j);
        I1s=Ifn*exp(-Fin*j);
        Im=I1s-I2;

   Umag=Ufn-I1s*(r1(k)+x1(k)*j);
        Zm=Umag/Im;
        rm=real(Zm);
        xm=imag(Zm);
```

```
    if rest ~= 0
        r1(k+1)=rest;
    else
        r1(k+1)=Rin-(r2/Sn*(rm^2+xm^2)+rm*((r2/Sn)^2+x2^2))/((rm+r2/Sn)^2+(xm+x2)^2);
    end
 x1(k+1)=Xin-(x2*(rm^2+xm^2)+xm*((r2/Sn)^2+x2^2))/((rm+r2/Sn)^2+(xm+x2)^2);
R1=r1(k); % Valor final de la resistencia del estator
    X1=x1(k);

    Rmp=(rm^2+xm^2)/rm;     Xmp=(rm^2+xm^2)/xm;  % Para la rama en paralelo

    N(k)=[k+1];

    if abs(r1(k+1)-r1(k))/r1(k+1) <= 1e-6 | k >=1000
        break
    end
end

>> %  N=[1 N]; % por si se quiere graficar r1 o x1 en función de la aproximación
>> Ls=X1/(2*pi*f);
Lr=x2/(2*pi*f);
Lm=xm/(2*pi*f);
Res=[R1 X1 r2 x2 rm xm Ls Lr Lm];       % Resultados circuito serie
Res1=[R1 X1 r2 x2 Rmp Xmp];   % Resultado rama de magnetización paralelo
Dat_nom=[Pn Un In nn cosFi ks];  % Datos nominales
disp('  ')

>> fprintf('   Principales datos nominales del motor escogido\n')
fprintf('            Pn(W)      Un(V)     In(A)   nn(rpm)      cosFi     ks\n')
fprintf(['           ',num2str(Dat_nom,'%10.2f'),'\n'])
disp('  ')
```

```
fprintf('   Parámetros del Circuito Equivalente en Ohm\n')
fprintf('          Rs      Xs      Rr      Xr      Rm      Xm      Ls      Lr      Lm\n' )
fprintf(['   Serie   ',num2str(Res,'%10.4f'),'\n'])
fprintf(['  Paralelo ',num2str(Res1,'%10.4f'),'\n'])
```

Principales datos nominales del motor escogido

Pn(W)	Un(V)	In(A)	nn(rpm)	cosFi	ks
85000.00	380.00	162.00	11750.00	0.88	2.40

Parámetros del Circuito Equivalente en Ohm

	RS	XS	XR	RM	XM	LS	LR	LM
Serie	0,0515	0,109	0,1574	0,2323	3,6865	0,0003	0,0004	0,098
Paralelo	0,0515	0,109	0,1574	58,7120	3,7008			