ISMMM
Dr. Antonio Núñez Jimenez

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
FACULTAD METALURGIA Y ELECTROMECÁNICA
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA
MOA – HOLGUÍN

Trabajo de Diploma

En Opción al Título de Ingeniero Eléctrico,

Título: EFICIENCIA ENERGÉTICA DE ACCIONAMIENTOS EN LA PLANTA DE LIXIVIACIÓN DE LA EMPRESA CMDTE ERNESTO CHE GUEVARA

Autor: Marianela Sánchez Romero

Tutor. MSc: Gabriel Hernández Ramírez
Dr. Luís Delfín Rojas Purón
Dpto. Ingeniería Eléctrica .ISMM, Moa, Holguín
Empresa Ernesto Guevara de Moa.

Agradecimientos

En especial a mi esposo por su amor y apoyo en todo momento.

A mis hijas Yaima y Mariacarla que en los momentos más difíciles siempre tienen un beso, o alguna travesura para alegrar.

A Wilson calzadilla y todas aquellas personas que me inspiraron para que yo realizara esta carrera y me dieron el camino a seguir.

A mi mama martha que siempre me dio palabras de aliento para seguir a mis hermanas ,mis sobrinos en resumen a toda mis familia y no podía dejar de agradecer a mis compañeros de estudios y de trabajo quienes siempre estuvieron a mi lado en los momentos más difíciles.

A mi tutor Dr. Luís Delfín Rojas Purón con su enseñanzas, confianza, apoyo, sugerencias, y lucha para conmigo a MSc.Gabriel Hernández Ramírez que también me brindo su apoyo

A todos los profesores, por los conocimientos y experiencia que me trasmitieron, su incuestionable nivel científico unido a su pedagogía y humildad, hago llegar mi más sincero respeto y gratitud.

A todas aquellas personas que de una u otra forma hicieron posible la culminación de este trabajo, a quien siempre o en ocasiones creen en mi.

Pensamiento

¨…Edúquese en el hábito de la investigación, en el roce de los hombres y en el ejercicio constante de la palabra, a los ciudadanos de una república que vendrá a tierra cuando falten a sus hijos esas virtudes… ¨

José Julián Martí Pérez.

Resumen

Este trabajo consiste en diseñar un regulador PI para el control de eficiencia energética del accionamiento de bombeo de los enfriadores de licor en la planta de Lixiviación y Lavado, mediante la regulación de las variables de trabajo del motor de inducción basado en el modelo vectorial.

Se tiene el estado actual de la eficiencia en los motores de inducción en la planta de lixiviación de la Empresa Comandante Che Guevara, donde se establecen los parámetros adecuados para el trabajo eficiente de los accionamientos gobernados por el regulador PI.

El criterio utilizado para la sintonización del regulador sigue la función objetivo de eficiencia en función de las pérdidas en los subsistemas eléctricos y mecánicos y se proponen las medidas de mejoramiento para el ahorro de energía.

Para esto, se hace un estudio de los variadores de velocidad en aras de sintonizarlos usando un regulador PI a las frecuencias más económicas para el hidro-transporte del licor por los accionamientos de bombas centrífugas.

Summary

In the present work,

Índice

Resumen
Introducción
Capítulo I: Estado del arte sobre eficiencia en accionamientos de bombeo.
1.1 Breve descripción del proceso productivo
1.2 Teoría relacionada con los accionamientos eléctricos con bomba
1.3
….
1.4 Conclusiones parciales del capítulo

Capítulo II: Descripción del sistema de accionamiento eléctrico de bombeo.
2.1 Introducción
2.2
2.3

2.4 Conclusiones parciales del capítulo

Capítulo III: Fundamentos sobre reguladores PI.

Capítulo IV :Modelación de accionamientos de bombeo en MATLAB
4.1 Introducción
4.2 : Modelación de accionamientos de bombeo.
4.3
4,4

Capítulo V: Análisis de eficiencia energética en accionamientos de bombas de licor.

Conclusiones y recomendaciones.

Conclusiones y recomendaciones

Introducción General

Este trabajo constituye un estudio de los sistemas de accionamientos de motores de inducción con bombas centrífugas, en aras de indicar una vía factible para mejorar la eficiencia de la energía transferida con su menor costo posible.

Si tomamos en cuenta, que más del 60 % de la energía total que se consume en la industria es a costa de los accionamientos eléctricos con motores de inducción, y de estos más del 55 % lo constituyen los accionamientos de bombas centrífugas; 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, entonces tiene importancia atender cualquier medida que técnicamente se justifique y contribuya a mejorar los índices de rendimientos de estos sistemas. Para esto se diseña un estimador de eficiencia inteligente para regir un motor de inducción dentro de un sistema de accionamiento eléctrico sin usar sensor de velocidad, utilizando Realizar el ajuste de un regulador PI para el control de pérdidas en un variador de velocidad de accionamiento de bombeo de licor.

Situación problémica

Como es conocido en el marco de La Revolución Energética existe la necesidad de diseñar un estimador de eficiencia mediante la regulación de la velocidad de un accionamiento con motor de inducción en ausencia de su sensor de medición, y que se auto-ajuste ante cualquier condición de carga en su árbol.

Hipótesis

Mediante la caracterización de las variables que intervienen en la eficiencia del accionamiento eléctrico con motor de inducción, es posible diseñar y realizar el ajuste de un regulador PI para el control de pérdidas en un variador de velocidad de accionamiento de bombeo de licor con dos variables de entrada, la potencia de entrada del motor y la corriente, y como variable de salida la velocidad del rotor, con muy buenas cualidades de regulación, capaz de aprender para un amplio diapasón de carga mecánica en su árbol, , usando las cualidades del sistema inteligente.

Objeto: Planta de Lixiviación de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Objetivo General

Realizar el ajuste de un regulador PI para el control de pérdidas en un variador de velocidad de accionamiento de bombeo de licor.

Resultados esperados:

- Describir el sistema de accionamiento eléctrico con motor de inducción.
- Ofrecer el diagrama de bloque para el control del motor eléctrico accionamiento de bombeo de licor.
- Brindar un observador de torque de carga para el control del motor eléctrico.
- Realizar el ajuste de un regulador PI para el control de pérdidas en un variador de velocidad de accionamiento de bombeo de licor. bloque estimador de velocidad a partir de la medición de
  la corriente y potencia de entrada del motor.
- Montar el esquema de control de eficiencia del accionamiento con motor de inducción, sin sensor de velocidad.
- Ofrecer la modelación del esquema de control inteligente del accionamiento con motor de inducción asistida por MATLAB.

Capítulo I

Capítulo I: Descripción del accionamiento con motor de inducción

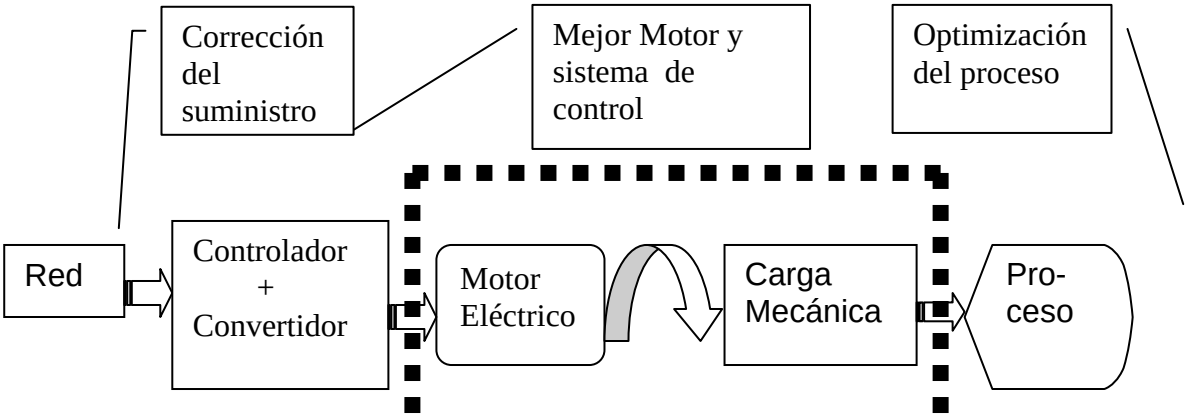
1.1 Introducción

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: Descripción del accionamiento con motor de inducción. También se abordaran los fundamentos básicos de los accionamientos eléctricos para motores de inducción con variadores de velocidad.

En el que se le realizaran diferentes tipos de pruebas tanto a los motores como a los variadores de velocidad con mando PWM, con el objetivo de comprobar el estado físico para su futuro empleo en la industria.

1.2 Accionamiento con motor de inducción para un sistema de bombas centrífuga para el transporte de pulpa laterítica

Los accionamientos eléctricos con bombas centrífugas para el transporte de pulpas lateríticas están presentes en diversas secciones del proceso tecnológico que sufre el mineral en las plantas de procesamiento de níquel cubano. Una de estas plantas es la de lixiviación de la Empresa Comandante Ernesto che Guevara . El objetivo de esta planta en dicha empresa es



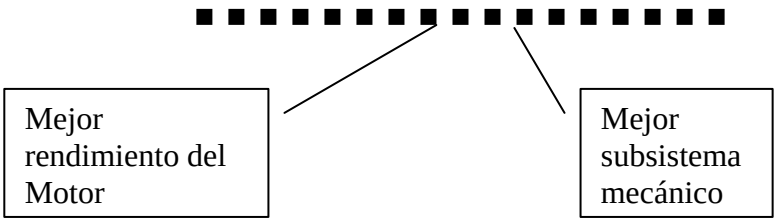


Figura 1.2 Sistema de accionamiento eléctrico y oportunidades de mejoramiento de sus rendimientos

El sistema de accionamiento eléctrico puede ser estudiado en busca del mejor uso de la energía transferida desde la red de potencia trifásica en sus cuatro principales componentes:

Fuente de suministro de potencia trifásica, usualmente los análisis parten de un sistema trifásico estable simétrico, con tensiones y corrientes sinusoidales con determinado contenido de armónicos de hasta de un quinto orden. [Abrahamsen, 2000].

Subsistema: Controlador + Convertidor + Motor Eléctrico, cuyos estudios basan sus resultados en la simulación de modelos matemáticos linealizados, pero que en ocasiones presentan serias restricciones en el objeto del convertidor, funcionan bajo condiciones iniciales de trabajo limitadas en el objeto Motor, es por esto que el empleo de técnicas difusas facilitan el estudio con potencialidades de observar el comportamiento del sistema en base a la adecuada identificación del proceso.

Subsistema Mecánico: constituye la carga mecánica rotacional del accionamiento y está determinado por el enlace del árbol del motor con el mecanismo, que en este caso es la bomba centrífuga. En él existen posibilidades reales de estudio accediendo a las relaciones mecánicas del subsistema y su concatenación con la máquina eléctrica.

Subsistema Proceso: es en nuestro caso la instalación hidráulica de transporte de pulpa sin incluir la bomba centrífuga que constituye la carga mecánica rotacional; y este subsistema proceso (tuberías, codos, accesorios, recipientes, hidromezclas, etc.) tiene una de las mayores reservas de oportunidades para obtener elevados rendimientos.

Una idea integral con la apreciación que se tiene en términos de rendimiento de un accionamiento de bombas centrífugas, se muestra en la figura 1.3, siendo este muy típico en cualquier instalación industrial.

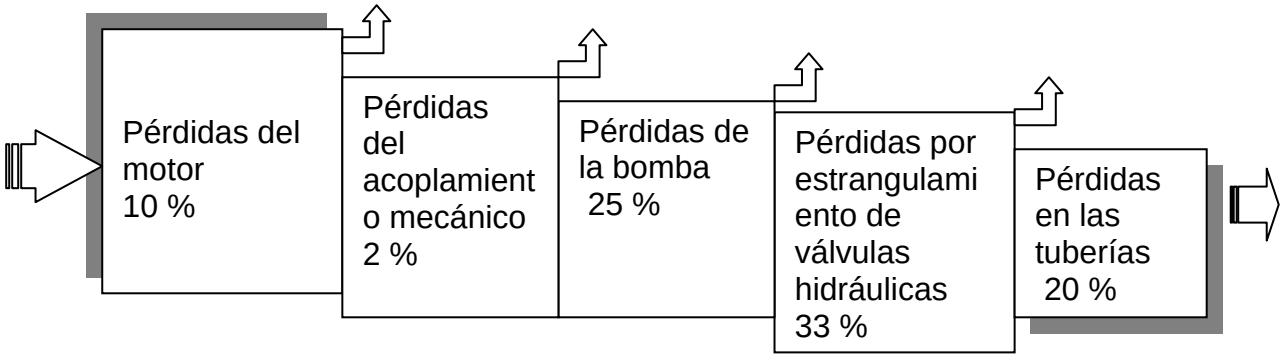


Figura 1.3 Diagrama de pérdidas en un sistema de accionamiento eléctrico de bombas centrífugas

Como se conoce; los motores de inducción tienen una elevada eficiencia cuando operan con sus cargas y torques nominales [Bodson, 1994]. Así mismo operando con cargas ligeras, las pérdidas del hierro se incrementan dramáticamente, reduciendo considerablemente la eficiencia [Kusko y Galler, 1983]. Este hecho lo explicamos más adelante, y nos parece bueno utilizarlo en nuestro estudio porque es una forma evidente de disminuir las pérdidas en el motor de inducción mediante el control del flujo magnético de acuerdo a la demanda de la carga mecánica en el árbol del motor.

Por otra parte, muchas de las aplicaciones de los motores de inducción corresponden a bombas, ventiladores y compresores y en la mayoría de las cuales, los motores operan significantemente por debajo de sus valores nominales de carga; el voltaje aplicado al estator, crea un campo magnético rotatorio que induce corrientes en el rotor, generándose par en el eje; si no se requiere el par nominal, el máximo campo magnético tampoco se requerirá; la corriente que produce, el campo magnético adicional aumenta las pérdidas del acero, disminuyendo el rendimiento del motor. Uno de los aportes desde el punto de vista práctico, alcanzado por los investigadores anteriores, es la obtención experimental en los motores de inducción de la curva U/f que permite aproximarse a los estados de carga del accionamiento.

Esto parte de la idea de que en muchos complejos industriales, los motores de inducción son controlados mediante convertidores de frecuencia con la técnica de control U/f, la cual se basa en el mantenimiento de una relación Volts-Hertz (U/f) apropiada para la demanda de par exigido por la carga; estos accionamientos tienen flexibilidad de configuración para adaptarse a las necesidades de la carga pudiendo el usuario especificar la curva U/f deseada. Sin embargo, la mayoría de las veces no se conocen los criterios prácticos de

ajuste de la curva U/f, lo que no permite explotar al máximo las posibilidades del accionamiento. La mejora del rendimiento de los accionamientos para bombas se ha tratado con el uso de un accionamiento a velocidad variable por control del caudal de la bomba centrífuga, a cambio de velocidad constante y válvula de estrangulación, lo cual muestra mejoras en el consumo de energía; la mejora se obtiene en el aumento del rendimiento de la bomba; para la mejora del rendimiento del motor en régimen estacionario varios autores han buscado los puntos de operación óptimos por diferentes técnicas; [D.S. Kirschen y otros, 1984] propusieron un método heurístico para variar el flujo en línea, buscando disminuir la potencia total de entrada para controles de tipo vectorial; [P. Famouri y otros, 1991] utilizan las ideas de Kirschen para obtener el deslizamiento óptimo para un control U/f; [M.H. Park y S.K. Sul, 1984] obtienen, experimentalmente, los deslizamientos óptimos para diferentes puntos de operación en controles U/f; otros autores han atacado el problema de manera analítica;[A. Kusko y. D. Galler 1983] calculan el deslizamiento óptimo que minimiza las pérdidas por efecto Joule de la máquina; [S.I. Seleme Jr. y. C. Canudas de Wit, 1992] consideran adicionalmente la energía magnética almacenada en las inductancias;[García y otros, 1992] estimando adicionalmente las pérdidas en el núcleo. La mayoría de los algoritmos heurísticos fueron validados en bancos de prueba de laboratorio; estos algoritmos resultan relativamente complejos para su aplicación en un accionamiento industrial comercial con control U/f. A pesar de presentarse un resultado que permite calcular una curva óptima U/f que mejora el rendimiento del motor cuando éste acciona bombas centrífugas o ventiladores, donde el par varía con el cuadrado de la velocidad [Ramírez, 1998]; y además se aplica la condición de flujo óptimo obtenida por S.I. Seleme Jr. y C. Canudas de Wit (1992), adaptado a bombas y ventiladores con resultados experimentales realizados en el Laboratorio de Accionamientos Eléctricos de la Universidad del Valle; no se tiene en cuenta, las fluctuaciones de carga mecánica debido por ejemplo a posibles vibraciones provocadas por la cavitación en la bomba centrífuga.

La mayor parte de los trabajos en busca del mejoramiento de la eficiencia del motor de inducción basan sus razonamientos sobre el estudio de sus principales pérdidas, las cuales están usualmente comprendidas dentro de cinco componentes: las pérdidas del cobre del estator, las pérdidas del cobre del rotor, las pérdidas en el hierro, las pérdidas mecánicas y las pérdidas adicionales. El mejoramiento ha sido obtenido mediante el balance entre las pérdidas del cobre y el hierro de la máquina manteniendo constante el flujo. En esto se ha

llegado a establecer una estrategia de control de pérdidas en base a un analizador óptimo de energía que opera mediante el manejo escalar del accionamiento [Abrahamsen, 2000]. Parece más completo llevar acabo este propósito con un enfoque vectorial del algoritmo, y que atienda de manera combinacional el modelo de pérdidas. Resultan meritorios los trabajos aportados por P. Van Roy, B. Slaets y Ronnie Belmans, en ICEM-2000, en cuanto a detectar el grado de imprecisiones que contienen las diferentes normas (IEC, IEEE, NEMA, JEC) para establecer standars de rendimientos. Ellos concluyen que para motores de una misma capacidad y tipo (ver la tabla 1.3), la diferencia puede llegar a ser de hasta de un 2 % de la potencia de entrada en la determinación de las pérdidas adicionales de la máquina, y el rendimiento con carga parcial es tan importante como a plena carga con respecto a la energía consumida.

Tabla 1.3 Rendimientos con carga nominal de cuatro motores del mismo diseño

Carga parcial	Motor A	Motor B	Motor C	Motor D	Promedio
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
50	91.95	92.07	91.75	91.77	91.88
75	92.98	92.86	92.53	93.00	92.84
100	93.75	93.39	93.11	93.84	93.53
125	93.88	93.22	93.19	93.62	93.48

Fuente: Artículo, Induction motor efficiency: a number with many meanings, [Van Roy, Slaets y Belmans, 2000].

En cuanto a los métodos y cálculo del rendimiento en los diferentes motores eléctricos John S. Hsu y otros, en 1998 ofrecen un detallado estudio en el que explican ocho formas diferentes de evaluar el rendimiento en estas máquinas, desde la inclusión de las pérdidas mediante el uso de un circuito equivalente, el método estadístico, el método de la medición de la corriente, del deslizamiento y hasta el método del torque en el entrehierro que permite conocer las asimetrías y contenidos de armónicos desde el sistema. Pero estos autores no tienen en cuenta las especificidades de carga del mecanismo industrial.

1.2.2 Optimización de eficiencias de los motores desde sus diseños

Si observamos algunos estudios realizados en la eficiencia de los motores eléctricos atendiendo al costo desde su etapa de diseño y montaje, es significativo el hecho de que para entregar motores eléctricos preparados para operar con elevadas eficiencias, se necesita para incrementos desde un 92 % a un 95,5 % un costo productivo desde 1000 a 8000 USD, con gastos en inversiones de hasta 2,8 USD por cada kW[Appelbaum, Khan y Fuch, 1987], y entre más grandes son las máquinas mayor es su costo. Se establecen correlaciones en las que se incluyen ηmax = f(costos (USD)), ηmax = f(Cos φ), ηmax = f(Δp), así como los efectos del cambio de voltaje en el rendimiento y el factor de potencia. Es decir, la mejor eficiencia puede venir desde la etapa de diseño, pero la máquina eléctrica una vez puesta en explotación va teniendo su propio rendimiento determinado también por las condiciones operacionales asociadas al proceso productivo de las plantas.

1.2.3 Mejoramiento de la eficiencia desde esquemas de control

El rendimiento de los accionamientos de motores eléctricos ha estado enmarcado en función del estudio de las pérdidas en relación con la potencia de entrada del sistema, la velocidad, el torque, el flujo en el entrehierro, la corriente del estator, el factor de potencia y el cálculo por diferentes métodos del rendimiento del motor, tal como lo reflejan las publicaciones de diferentes autores como. Hsu y otros, 1998] y [Slaets, Van Roy y Belmans, 2000].

Usualmente en los accionamientos eléctricos, los motores operan manteniendo el flujo en sus valores nominales o con radio de tensión / frecuencia (V/Hz) sostenidamente constante para las condiciones de cargas de diseño.

Ofreciendo un favorable trabajo con respuestas rápidas ante los transitorios del sistema. Pero cuando el accionamiento pasa a trabajar con cargas más bajas o ligeras, estas aproximaciones causan pérdidas en el núcleo o pérdidas en el hierro que pueden llegar a ser excesivas comparadas con las pérdidas en el cobre de la máquina, comportándose en condiciones de rendimientos mucho menores.

Varios esquemas de control de motores eléctricos a lazo abierto y cerrado son implementados basándose en:

- Control del deslizamiento del motor.
- Control de la tensión o corriente mediante una fuente inversora.
- Control combinado de tensión y frecuencia.

- Control vectorial.
- Control de la perturbación de la velocidad del rotor.

Por otra parte se ha avanzado en el estudio de la eficiencia de los accionamientos por la vía de efectuar la dirección del motor de inducción por variación del flujo magnético, en aras de un menor consumo de corriente del estator con poca distorsión, muy rápida respuesta del flujo y el torque a los cambios repentinos en los procesos transitorios. Este aspecto va ser utilizado en nuestro algoritmo de control, teniendo en cuenta las especificidades de cambios que ocasiona la carga mecánica del proceso. Por otra parte, durante el trabajo de la máquina de inducción se aprecia como rasgo característico su comportamiento oscilatorio, aspecto motivado por las variaciones de voltajes desde la red, o por los efectos de la energía reactiva de intercambio entre el motor de inducción y la fuente o convertidor de frecuencia. Pero hasta la fecha no se reflejan en los modelos de pérdidas, las incidencias que ocasionan los cambios de magnitudes de los parámetros del mecanismo y que de forma casi cíclica exigen al motor, es decir, se separa o se excluye en los modelos la sección de carga mecánica rotacional del mecanismo de producción, que una vez puesto en marcha el accionamiento, es éste el que rige de forma permanente el comportamiento de todo el sistema. En tal sentido, los últimos estudios se han centrado en el grupo Convertidor – Motor de Inducción. [Moreno Eguilaz, 1997] [Harnerfors, 1997] [Abrahamsen, 2000], [Vas, 2001], que aunque se han establecido límites en su manipulación, el problema de mantener elevados rendimientos en la transferencia de energía del accionamiento para diferentes niveles y regímenes todavía no está suficientemente resuelto como para estar satisfecho en bases a estos enfoques. Nuestro análisis sigue el comportamiento del accionamiento, a partir de la incidencia de las variables en la transferencia de potencia electromagnética en mecánica rotacional, observando los cambios u oscilaciones de la carga por causas de origen electromagnéticas y mecánicas.

El Motor de Inducción es capaz de reponerse a gran parte de estas oscilaciones, y si son de origen electromagnético y de aceptable intensidad casi siempre las absorbe y las comparte en pequeños transitorios con la red, y este aspecto está contemplado en la fase de diseño de la máquina; pero cuando éstas son más intensas y vienen desde el eje mecánico, por mucho estado inercial que tenga el sistema, al motor le resulta más difícil reponerse a los cambios, y es aquí donde aspiramos profundizar para ampliar la capacidad de respuesta del accionamiento en base a trabajar en zonas de mejores rendimientos.

Estos trabajos se enfocan a la determinación de las pérdidas en estado estático del motor de inducción, dentro de las cuales se sitúan restricciones. Todos ellos están enmarcados bajo las condiciones de una máquina de inducción ordinaria operando con frecuencias normalizadas (50 ó 60 Hz).

Las bombas trabajan con eficiencias más bajas que los motores de inducción, determinadas una parte por las limitaciones que le impone el diseñador y otra por las restricciones que le ofrece la red hidráulica donde va operar. Aunque de forma empírica se ponen coeficientes dentro de las expresiones analíticas que intervienen en el cálculo de las potencias y dimensiones de la bomba y sus instalaciones, todavía no es suficiente las especificidades que exigen los sistemas de transporte de hidromezclas, es por esto que adquiere importancia correlacionar todas aquellas variables que inciden de manera sensible en el comportamiento eficiente relacionado con la distribución de la energía que se transfiere desde el Motor hasta el mecanismo.

Todos estos estudios basan su análisis en minimizar las pérdidas de las máquinas de inducción para cargas de tipo ventilador, que con aproximación simulan las condiciones de explotación mecánicas, pero no alcanza tener en cuenta con exactitud los diferentes regímenes de trabajo que exigen los mecanismos de transporte.

1.3 Características de operación del motor de inducción

Son los de mayor uso en la industria, por lo tanto son los de mayor análisis Cuando aplicamos una corriente alterna a un estator, se produce un campo magnético giratorio, este campo de acuerdo a las leyes de inducción electromagnéticas, induce corriente en las bobinas del rotor y estas producen otro campo magnético opuesto según la ley de Lenz y que por lo mismo tiende a seguirlo en su rotación de tal forma que el rotor empieza a girar con tendencia a igualar la velocidad del campo magnético giratorio, sin que ello llegue a producirse. Si sucediera, dejaría de producirse la variación de flujo indispensable para la inducción de corriente en la bobina del inducido. A medida que se vaya haciéndose mayor la diferencia entre la velocidad de giro del campo y la del rotor, las corrientes inducidas en él y por lo tanto su propio campo, irán en aumento gracias a la composición de ambos campos se consigue una velocidad estacionaria. En los motores asincrónicos nunca se alcanza la velocidad del sincronismo, los bobinados del rotor cortan siempre el flujo giratorio del campo inductor.

1.3.1 Motores asincrónicos, jaula de ardilla

Es sin duda el más común de todos los motores eléctricos, por su sencillez y forma constructiva. Elimina el devanado en el rotor o inducido. Las planchas magnéticas forman el núcleo del rotor, una vez ensambladas dejan unos espacios cilíndricos que sustituyen a las ranuras de los rotores bobinados, por estas ranuras pasan unas barras de cobre (o aluminio) que sobresalen ligeramente del núcleo, estas barras o conductores están unidos en ambos lados por unos anillos de cobre. Se denomina Jaula de Ardilla por la similitud que tiene con una jaula. En los motores de jaula de pequeña potencia, las barras son reemplazadas por aluminio inyectado igual que los anillos de cierre, a los que se les agregan unas aletas que actúan a su vez en forma de ventilador. Las ranuras o barras pueden tener diferentes formas y lo que se pretende con ello es mejorar el rendimiento del motor, especialmente reducir las corrientes elevadas que producen los motores de jaula en el momento de arranque. Cuándo el inducido está parado y conectamos el estator tienen la misma frecuencia que la que podemos medir en la línea, por lo tanto, la autoinducción en el rotor será muy elevada, lo que motiva una reactancia inductiva que es mayor donde mayor es el campo. De la manipulación de las ranuras y en consecuencia las barras dependerán que las corrientes sean más o menos elevadas, lo que en definitiva es el mayor problema de los motores de jaula. Si analizamos el siguiente cuadro, se podría pensar en un motor que abarca las dos alternativas. Este motor existe, es el motor asincrónico sincronizado, su construcción es muy parecida a la del motor asincrónico con el rotor bobinado con anillos rozantes, con la diferencia de que una de la tres fases está dividida en dos partes conectadas en paralelo. ¿Cuál es el inconveniente que presenta este motor por lo que sólo es utilizado en grandes instalaciones? Que para pasar de asíncrono a síncrono, necesita una serie de equipos tales como: Resistencia para el arranque como motor asíncrono, conmutador que desconecta esta resistencia y conecta la C.C. a los anillos rozantes cuando trabaja como síncrono.

La potencia del accionamiento

Potencia en kW = 0,736 * Potencia en HP

Potencia en HP = 1,36 * Potencia en kW

La potencia está definida en dos factores: La fuerza en Kg y la velocidad en metros por segundo.

Potencia = F * V = Kgm/Seg.

El par del motor es una magnitud decisiva hasta el punto de determinar las dimensiones de un motor. Motores de igual par tienen aproximadamente las mismas dimensiones aunque tengan diferentes velocidades. En el arranque de un motor, es decir, en el intervalo de tiempo que pasa de la velocidad 0 a la nominal, el par toma distintos valores independientemente de la carga. La potencia nominal debe ser lo más parecida posible a la potencia requerida por la máquina a accionar. Un motor de potencia excesiva da lugar a una mayor intensidad de corriente durante el arranque.

1.3.2 Aplicaciones industriales de los motores

El motor de inducción, en particular el de tipo de jaula de ardilla, es preferible al motor de corriente continua para trabajo con velocidad constante, porque el costo inicial es menor y la ausencia de conmutador reduce el mantenimiento. También hay menos peligro de incendio en muchas industrias, como aserraderos, molinos de granos, fábricas textiles y fábricas de pólvoras. El uso del motor de inducción en lugares como fábricas de cementos es ventajoso, pues, debido al polvo fino, es difícil el mantenimiento de los motores de corriente continua. Para trabajo de velocidad variable, como es grúas, malacates, elevadores y para velocidades ajustables, las características del motor de corriente continua son superiores a las del motor de inducción. Incluso en este caso, puede convenir y ser deseable utilizar motores de inducción ya que sus características menos deseables quedan más que compensadas por su sencillez y por el hecho de que la corriente alterna es más accesible y para obtener corriente continua, suelen ser necesarios los convertidores. Cuando haya que alimentar alumbrados y motores con el mismo sistema de corriente alterna, se utiliza el sistema trifásico, de cuatro conductores de 208/120 V. Esto permite tener 208 V trifásico para los motores y 120 V de fase a neutro para las lámparas. La velocidad a plena carga, el aumento de temperatura, la eficiencia y el factor de potencia, así como el aumento máximo de torsión y la torsión al arranque, han sido desde hace mucho tiempo los parámetros de interés en la aplicación y compra de motores. Otras consideraciones es el factor de servicio. El factor de servicio de un motor de corriente alterna es un multiplicador aplicable a la potencia nominal en caballos. Cuando se aplica en esa forma, el resultado es una carga permisible en caballos en las condiciones especificadas para el factor de servicio. Cuando se opera a la carga del factor de servicio, con un factor de servicio de 1,15 o mayor, el aumento permisible en la temperatura

ocasionado por resistencia es el siguiente: aislamiento clase A, 70 °C; clase B, 90 °C; clase F, 115 °C. Se requieren alojamientos, conexiones, sellos, sistemas de ventilación, diseño electromagnético, etc, especiales cuando el motor va a funcionar en condiciones inusitadas de servicio, como la exposición a:

1.3.3 Propulsiones eléctricas

Grúas y malacates: El motor de corriente continua excitadora en serie es el que mejor se adapta a grúas y malacates. Cuando la carga es pesada, el motor reduce su velocidad en forma automática y desarrolla un momento de torsión creciente, con el cual se reducen las cargas picos en el sistema eléctrico. Con cargas ligeras, la velocidad aumenta con rapidez, con el cual se logra una grúa que trabaja con más rapidez. El motor en serie también está bien adaptado para impulsar el puente de las grúas viajeras y también al carro que se mueva a lo largo del puente. Cuando solo se dispone de corriente alterna y no resulta económico convertirla, el motor de inducción del tipo de anillo deslizante, con control de resistencia externa, es el mejor tipo de motor de corriente alterna. También se utilizan motores de jaula de ardilla con anillos extremos de alta resistencia, para producir un elevado momento de torsión al arranque (Motores clase D).

Aplicaciones de los momentos de torsión constante. Las bombas de pistón, molinos, extrusores y batidoras pueden requerir un momento de torsión constante en toda su variedad de velocidad. Estas requieren un motor de inducción jaula de ardilla, diseño clase C o D que tienen un alto momento de torsión de arranque, para alcanzar su velocidad nominal. Cuando debe variarse la velocidad estando ya en movimiento el motor, puede usarse un motor de C.C de voltaje de armadura variable o un motor de inducción jaula de ardilla de frecuencia variable, bombas centrífugas. El bajo WK2 y el bajo momento de torsión de arranque hacen que los motores jaula de ardilla diseño B de propósito general sean los preferidos para esta aplicación. Cuando se requieren de un flujo variable, el uso de una fuente de potencia de frecuencia variable para variar la velocidad del motor, será favorable desde el punto de vista de la energía respecto al cambio de flujo por cierre de la válvula de control con el fin de incrementar la carga. Un WK2 alto requiere un motor de caja de ardilla diseño C o D de alto momento de torsión de arranque para que el ventilador adquiera su velocidad de trabajo en un periodo razonable de tiempo. Motores conectados a la red.

Variaciones de la tensión V y de la frecuencia de la tensión f, en Hz, en la red de un motor trifásico de devanado normal:

a) Variaciones de la tensión a frecuencia constante, el par de arranque y el par motor máximo varía con el cuadrado de la tensión. La intensidad de arranque varía proporcionalmente con la tensión, con variaciones de ± 5 % se obtiene la potencia nominal.

b) Variaciones de la frecuencia con tensión constante, los valores absolutos de los pares de arranque y motor máximo varían en forma inversamente proporcional con el cuadrado de la frecuencia. La intensidad de arranque varía inversamente proporcional con la frecuencia, con variaciones de ± 5 %, se puede entregar la potencia nominal.

c) Variaciones de la tensión y la frecuencia, si varía la tensión y la frecuencia en el mismo sentido y proporción, varían las revoluciones y la potencia proporcionalmente con la frecuencia.

Pueden conectarse por lo tanto motores con arrollamiento normal, aún en redes cuyas características se apartan en ± 5 % de la placa de características.

1.3.5 Eficiencia en los motores eléctricos

Los métodos para determinar la eficiencia son: Por medición directa o por pérdidas segregadas. Estos métodos están expuestos en el Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, Std 112-1978, ANSI/IEEE; en el Standard Test Code for DC Machines, Std 113-1973, IEEE; en el Test Procedure for Single-Phase Induction Motors, Std 114-1982, ANSI/IEEE y en el Test Procedure for Synchronous Machines, Std 115-1965, IEEE. Las mediciones directas pueden hacerse usando motores, generadores o dinamómetros calibrados para la entrada a generadores y salida de motores y, motores eléctricos de precisión para la entrada a motores y salida de generadores. Las pérdidas segregadas en los motores se clasifican como sigue:

- Pérdidas $I^2 * R$ en el estator (Campo en derivación y en serie $I^2 * R$ para corriente continua).
- Pérdidas $I^2 * R$ en el rotor ($I^2 * R$ en la armadura, para corriente continua).
- Pérdidas en el núcleo.
- Pérdidas por cargas parásitas.
- Pérdidas por fricción y acción del viento.
- Pérdidas en el contacto de las escobillas (Rotor devanado y corriente continua).

- Pérdidas en el excitador (Sincrónico y corriente directa).
- Pérdidas por ventilación (Corriente directa).

Las pérdidas se calculan en forma separadas y luego se totalizan.

Donde,

Pe: Potencia entregada.

P: Potencia absorbida.

R: Rendimiento.

α: Angulo del factor de potencia.

Marco teórico de la investigación

El estudio consiste en utilizar el modelo del motor de inducción (MI) y las relaciones más relevantes en el funcionamiento de la bomba centrífuga (BC), para demostrar una de las vías de mejorar la eficiencia del accionamiento eléctrico por el control de variadores de velocidad que adapta la potencia de entrada del sistema a la carga mecánica exigida por la bomba centrífuga en su transporte eficiente de hidromezclas de mineral laterítico.

Para esto buscamos el vínculo entre la potencia eléctrica de entrada del accionamiento, su desarrollo como potencia electromagnética en los devanados del motor, hasta que es convertida en forma de potencia mecánica rotacional en el eje de la bomba centrífuga.

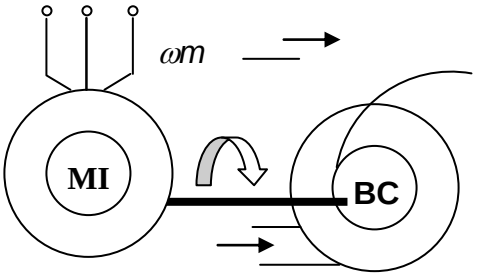


Figura 1.4 Grupo Motor de inducción (MI) con Bomba Centrífuga (BC)

La transferencia de potencia electromagnética en mecánica rotacional 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:

$$P_{MI} = \sqrt{3}.U.I\cos\varphi \qquad (1.1)$$

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:

$$Q_{MI} = \sqrt{3}.U.I.sen\varphi \qquad (1.2)$$

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

$$\eta_{MI} = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_s}{P_s + \Delta p} = \frac{P_e - \Delta p}{P_e} \qquad (1.3)$$

Donde:

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

Pe – 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:

$$\Delta p = \Delta p_{cus} + \Delta p_{cur} + \Delta p_{ac} + \Delta p_{mec} + \Delta p_{ad} \qquad (1.4)$$

Δpcus - son las pérdidas del cobre en el devanado del estator del motor, [kW].

Δpcur - son las pérdidas del cobre en el devanado del rotor del motor, [kW].

Δpac – son las pérdidas del acero en el núcleo del motor de inducción, [kW].

Δpmec - son las pérdidas mecánicas del motor de inducción, [kW].

Δpad - son las pérdidas adicionales en el motor de inducción, [kW].

La potencia electromagnética Pem y también llamada potencia en el entrehierro PAG es la encargada de enlazar, la potencia eléctrica de entrada del motor Pe con la potencia mecánica rotacional de salida Ps que se manifiesta en el eje de la bomba centrífuga, 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 Mem a una frecuencia angular sincrónica ωs que entrega la potencia convertida Pconv en el árbol del motor con la frecuencia angular de rotación del rotor ωr [Chapman, 2003], tal como se indica en la expresión (1.5):

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_s} = \frac{P_{conv}}{\omega_r} = \frac{P_{AG}}{\omega_s} \qquad (1.5)$$

Donde:

Mem es el momento electromagnético del motor de inducción, [N.m]

Pconv es la potencia convertida por el motor existente en su árbol, [kW]

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

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

PAG – es la potencia del entrehierro del motor, [kW]

La potencia del entrehierro PAG 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 Rr/s en el conocido circuito equivalente por fase del motor de inducción (figura 1.5).

$$P_{AG} = I_r^2 . \frac{R_r}{s} \qquad (1.6)$$

Donde:

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

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

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

Y la potencia del entrehierro total será:

$$P_{AG} = 3.I_r^2 . \frac{R_r}{s} \qquad (1.7)$$

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:

$$P_{AG} = 3.s.\frac{U^2}{R_r} \qquad (1.8)$$

Y el par producido por el motor se convierte en:

$$M_{em} = 3.s.\frac{U^2}{R_r.\omega_s} = 3.\frac{I_r^2.R_r}{\omega_s}.(\frac{1-s}{s}) \qquad (1.9)$$

Y este par electromagnético, para condiciones de estado estacionario, se corresponde con el par resistivo de la carga mecánica Mc desarrollada por la bomba centrífuga, y está relacionado con la potencia de salida Ps por la expresión (1.10):

$$P_s = M_c.\omega_r \qquad (1.10)$$

El momento electromagnético tiene componentes activa y de magnetización por el lado de la corriente, que de acuerdo con [Cerovski y Javurek, 1997] se escribe como la expresión (1.11):

$$M_{em} = p.\frac{m_1}{2}.\frac{L_m}{L_r}.\psi_r.I_M \qquad (1.11)$$

Siendo:

p – es el número par de polos del motor.

m1 – es el número de fases del motor.

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

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

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

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

El módulo de la corriente del estator está dado como:

$$I = \sqrt{(I_M)^2 + (I_{mag})^2} \qquad (1.12)$$

Donde:

Imag – es la corriente de magnetización del torque electromagnético, [A]

En la expresión (1.11) el torque electromagnético está en función del flujo del rotor Ψr, el cual está determinado por la corriente de magnetización Imag, como (1.13):

$$\psi_r = I_{mag}.L_m \qquad (1.13)$$

Y de esta forma podemos controlar el torque electromagnético desarrollado por el motor de inducción a través del flujo magnético del rotor Ψr con un comando que maneje el módulo de la corriente de magnetización Imag de la máquina; o mediante la tensión aplicada en los terminales de alimentación del motor de inducción, de acuerdo a la expresión (1.14) ofrecida por [Romero, 2000].

$$\psi_r = \frac{U}{\omega_s} \qquad (1.14)$$

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 Δpac están determinadas por (1.15):

$$\Delta p_{ac} = 3.\frac{E_1^2}{R_{mag}} \qquad (1.15)$$

Donde:

E1 – es la f.e.m. de respuesta del motor a la tensión aplicada, [V].

Rmag – es la resistencia magnética del circuito magnético del motor, [ohm].

Siguiendo las expresiones (1.13), (1.14) y (1.15); con cambios en la corriente de magnetización Imag, esencialmente porque variando la frecuencia del motor se modifica su reactancia de magnetización Xm, y entonces varía la f.e.m. E1 de la máquina, pudiéndose disminuirse así las pérdidas en el acero Δpac.

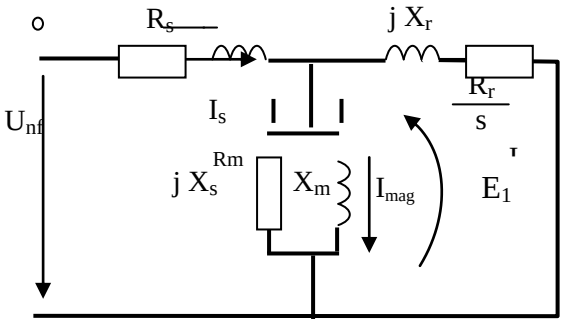


Figura 1.5 Circuito equivalente simplificado del motor de inducción.

Con el uso del circuito equivalente simplificado del motor de inducción (fig 1.5), y a partir del cálculo de sus parámetros por datos de catálogo del motor [Costa Montiel y otros, 2004], se pueden evaluar las pérdidas.

Por otra parte, como el motor de inducción (ver figura 1.6) es alimentado a través de la fuente inversora de tensión sinusoidal (VSI a PWM), 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 indirecto 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 ωe. Las relaciones entre las corrientes y tensiones en los ejes dd-qq con sus componentes están definidas por las expresiones [Bose, Pestel y Kaushik1997] (1.16) y (1.17):

$$\sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} = -R_s i_{ds} + \omega_e \sigma L_s i_{qs} + U_{ds} \qquad (1.16)$$

$$\sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} = -R_s i_{qs} - \omega_e \sigma L_s i_{ds} - \omega_e \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr} + U_{qs} \qquad (1.17)$$

Donde:

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

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

Uds, Uqs – son las tensiones en el estator del motor en los ejes dd-qq, [V].

ids, iqs – son las corrientes en el estator en los ejes dd-qq, [A].

ψdr, ψqr – son los flujos magnéticos en el rotor en los ejes dd-qq, [Wb].

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

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

Rs – 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 Ψqr = 0; en estado estacionario se obtiene:

$$\psi_{dr} = L_m . I_{ds} \qquad (1.18)$$

Siendo equivalentes la componente Ids con la corriente de magnetización Imag [Bose y otros, 1997].

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

$$I_s = \sqrt{(I_{ds})^2 + (I_{qs})^2} \qquad (1.19)$$

de tal forma que Ids* y Iqs* sirven de comandos durante el control de las pérdidas.

La potencia de entrada del accionamiento es obtenida desde:

$$P_e = I_{ds} . U_{ds} + I_{qs} . U_{qs} \qquad (1.20)$$

A partir de lo cual, con cambios en Ids se controla el flujo del rotor Ψdr y con ello el torque del motor de inducción, que repercute en la potencia de entrada.

Se puede entonces, valorar la eficiencia del accionamiento eléctrico a través del momento de carga Mc desarrollado por la potencia mecánica de la bomba centrífuga, por su velocidad angular de rotación ωr y entre la potencia de entrada eléctrica del motor de inducción, según (1.21):

$$\eta_{MI} = \frac{M_c.\omega_r}{P_e} \qquad (1.21)$$

El momento mecánico o de carga desarrollado por la bomba centrífuga (BC) está relacionado con la potencia mecánica Nb y la velocidad angular de rotación ωr de acuerdo a la siguiente expresión (1.22):

$$M_c = \frac{N_b}{\omega_r} \qquad (1.22)$$

Donde

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

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

ωr 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 ηtr de tal forma que trabajaremos con ωr.

La potencia mecánica de la bomba centrífuga es válida para cualquier tipo de fluido según la expresión (1.23) [62][B. Nekrasov, 1968]:

$$N_b = \frac{\rho.H.Q}{102.\eta_b\eta_{tr}} = \frac{\rho.H.v.A}{102.\eta_{b_{tr}}\,\eta_{tr}} \qquad (1.23)$$

Donde

ρ Es la densidad del fluido transportado por la bomba, [kg/m^3]

H es la altura de carga desarrollada por la bomba, [m]

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

ηb es el rendimiento de la bomba, [%]

ηtr - es el rendimiento de la transmisión, tiene en cuenta el tipo de transmisión en el acoplamiento mecánico entre la bomba y el motor eléctrico, [%]

Para expresar la potencia de la bomba en [kW], se debe utilizar en el denominador de la expresión (1.23) 3600, ya que el gasto Q debe estar dado en [m^3/s].

El caudal desarrollado por la bomba centrífuga está determinado por:

$$Q = v.A \qquad (1.24)$$

Donde

v es la velocidad lineal de transporte del fluido, [m/s]

A es el área de la sección transversal de la tubería de impulsión de la bomba, [m^2] ó [mm^2]

Poner a trabajar el sistema motor de inducción – bomba centrífuga MI-BC 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 centrífuga BC operando con adecuadas velocidades y gastos específicos.

La velocidad específica desarrollada por la bomba centrífuga 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 BC para transportar el fluido:

$$n_{esp} = \frac{n_b \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \qquad (1.25)$$

Donde

nb es el número de revoluciones de la bomba centrífuga, [rpm]

H es la altura de carga desarrollada por la bomba, [m]

Con este parámetro nesp y el caudal Q desarrollado por la bomba, se puede estimar la eficiencia de la turbo-máquina a través de un gráfico ofrecido por el fabricante. [B. Nekrasov, 1968].

La altura de carga que desarrolla la bomba centrífuga, dado en metros [m] se identifica por la carga neta de succión positiva según el término dado por sus siglas en inglés NPSH y se calcula por la expresión (1.26):

$$NPSH = 10\left(\frac{n\sqrt{Q}}{c}\right)^{\frac{3}{4}} \qquad (1.26)$$

Donde

c es un coeficiente que depende la velocidad específica, dado en tablas.

Y este NPSH de cálculo se acostumbra comparar con la carga neta de succión positiva requerida NPSHreq, que está relacionada con la energía cinética y la energía de presión que se gasta en el transporte del fluido según la expresión (1.27):

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{v^2}{2g} = NPSH_{req} - \Delta p_{pre} \qquad (1.27)$$

Donde

po es la presión en el punto de medición del fluido en [Pa]

ρ es la densidad del material transportado, en [kg/m3]

NPSHreq es la carga neta de succión positiva requerida.

Δppre son las pérdidas de presión en la tubería [Pa].

Con esta expresión (1,27), se puede también valorar las pérdidas de presión en las tuberías, y estimar la capacidad productiva de la turbo-máquina.

1.4 Conclusiones parciales del capítulo

- Una parte apreciable de la energía que se transfiere desde el motor de inducción hacia la bomba centrífuga se disipa en la red hidráulica en forma de pérdidas, donde es frecuente la aparición de regímenes de cavitación por la presencia de gases en el fluido transportado y que provoca vibraciones mecánicas adicionales en el sistema.
- El flujo tecnológico donde se desarrolla el accionamiento eléctrico se caracteriza por una variabilidad de la carga mecánica que representa la bomba centrífuga, lo cual necesita un regulador para garantizar que el accionamiento opere con eficiencia alta y estable a diferentes condiciones de explotación.

Capítulo II

Capítulo II: Descripción del variador de velocidad Yaskawa

2.1 Introducción

La utilización de variadores de velocidad en el control del caudal de los mecanismos de circulación de fluidos en comparación con la estrangulación provoca un importante ahorro de energía eléctrica consumida. Por otra parte, la carga de este tipo de mecanismos es proporcional, aproximadamente, al cuadrado de la velocidad, luego, al reducir ésta última para reducir el caudal, se provoca una sustancial disminución de la carga que trae como consecuencia una menor circulación de corriente tanto por el rotor como por el estator, con la Consecuente disminución de las pérdidas de cobre. En estas condiciones de operación son predominantes las pérdidas de acero, pudiendo aumentarse la eficiencia con la reducción de las mismas. Esta opción existe en muchos variadores de velocidad industriales los cuales utilizan una ley de mando en que la tensión es proporcional al cuadrado de la frecuencia. Esta ley de mando garantiza menores pérdidas que la conocida tensión/frecuencia constante, pero debido a la distribución no lineal de las pérdidas con respecto a las variables de operación de la máquina no se puede asegurar que las pérdidas sean las mínimas posibles, o sea, no se optimiza la eficiencia. Para lograrlo es necesario determinar, para cada punto de operación del motor dado por su valor de momento y velocidad, los valores de las variables de control de las pérdidas que garanticen consumo mínimo de potencia. Estas variables pueden ser de dos tipos: la tensión y la frecuencia en el caso del control escalar del motor y las componentes productoras de momento y de flujo para el control vectorial. Debido a la relación funcional no lineal existente entre la potencia consumida y las variables de control de las pérdidas, se recomienda la utilización de aproximadores funcionales basados en técnicas modernas como. La Lógica Difusa que facilita la realización de algoritmos de control apropiados. Al utilizar una estrategia de optimización basada en la minimización de las pérdidas puede deteriorarse la calidad del comportamiento transitorio, por lo cual debe tenerse en cuenta en la síntesis de los algoritmos de control el trabajar con un controlador convencional durante los procesos transitorios. Ello dificulta la síntesis de los controladores pues deben tenerse en cuenta requerimientos aparentemente contradictorios. En este trabajo se describe y justifica la posibilidad de llevar a cabo una disminución del consumo de energía en accionamientos eléctricos de cargas tipo ventilador empleando Lógica Difusa y se describen los resultados obtenidos en la elaboración de un sistema de simulación dinámica

basado en el SIMULINK que permite realizar de una forma más sencilla la síntesis de los reguladores.

2.2 Descripción del variador

Variador de Frecuencia F7 *De 0.5 a 500 HP*

Figura 2.1 Variador de velocidad

El modelo F7 de Yaskawa es un variador compacto y de muy alto desempeño capaz de adaptarse a cualquier tipo de aplicación industrial desde una típica y convencional red de bombeo a la más sofisticada línea de producción y acarreo de mercadería gracias a su diseño de plataforma flexible e inteligente. Previsto para Servicio Normal o Pesado, 4 modos de control, opciones de comunicación (Modbus como Standard), Device-net, Profibus entre otras. Software especializado para aplicaciones específicas y un arreglo de opciones para entradas y salidas muy completo. El variador de frecuencia F7 viene pre-programado de fábrica y listo para operar. Con un ajuste de gran simplicidad. Incorpora un novedoso operador digital con display alfanumérico de cristal líquido de 5 líneas x 16 caracteres que permite ver su estatus en 7 idiomas diferentes (incluyendo el español). Su sistema de teclado

es intuitivo e incluye funciones de copiado si la aplicación lo permite para, trasladar fácilmente un ajuste de programación de un variador a otro. Los parámetros de programación están agrupados para un ajuste amigable y opciones de programación rápida o avanzada. Para mejorar el manejo de datos y parámetros desde una PC está disponible sin cargo adicional el Software" Drive Wizard" con funciones de carga, descarga monitoreo y gráfica de variables. Su hardware cuenta con múltiples entradas y salidas análogas y digitales que pueden ser programadas para diferentes configuraciones de control externo y permitir la automatización y la incorporación a un sistema de producción .Su nuevo sistema de frenado dinámico "high slip braking "patentado por Yaskawa, puede eliminar la necesidad de resistor de frenado en muchas aplicaciones, descargas de alta inercia. El FT es compacto y confiable y está diseñado para operar en los rudos ambientes industriales, con una MTBF (Mean Time before fault) de 28 años, sin embargo se puede proveer con una variedad de protecciones ambientales y grados de hermeticidad para aplicaciones especiales. Con un rango de tensión que es desde los 208 hasta 480V, su operación de doble rango "Normal Duty" y "Heavy duty" posibilita la selección más económica de acuerdo a las necesidades de sobrecarga, torque de arranque y la potencia real adecuada a la aplicación. Incorpora una reactancia de choque DC, terminales para transformador de 12 pulsos (30 HP o más), autotuning estático y dinámico y opciones de regeneración. Para proveer el método de control óptimo el F7puede operar con el método V/f convencional, V/f con realimentación por encoder, método vectorial de lazo abierto y vectorial de lazo cerrado. Además la performance del drive puede ser notablemente mejorada mediante un software especial para aplicaciones específicas. La coordinación con otros equipos se simplifica por sus entradas y salidas normalizadas de tren de pulsos, 4-20 mA, -10a 1OVy salidas de relay programables.

2.2.1 Características de Diseño

- Microprocesador lógico32- BIT tecnología desmontaje sobre superficie.
- Teclado digital con función manual/automático, Display: 5 líneas x16caracteres.
- Operador digital removible.
- Función de copiado de parámetros. Función de temporizadores de arranque y parada. Puertos Rs485/Rs422 metasys /apogee/ .modbus.
- Indicación de diagnóstico de fallas.

- 8 entradas multifunción programables.
- Relays de contacto programable1amp.250vac/30vdc.
- Ajuste de parámetros para dos motores.
- Actualización de parámetros para aplicaciones específicas "flashmemory".
- Parametrización por grupos de funciones.
- Control lógico de 24vdc compatible en salidas PNP / npn.
- Frecuencia portadora ajustable.15 khz.max.
- Multivelocidades ajustables más velocidad jog (17).
- Referencia de velocidad remota: 0-10 vdc (20kohms)o 4 20ma(250ohms) y tren de pulsos.
- Ganancia de referencia de velocidad inversa o directa.
- Salidas análogas programables 0- 10vdc/4-20may tren de pulsos.
- Salida análoga de señal, proporciona la frecuencia o la corriente.
- Función de indicadores en: voltios, amperios, kilovatios, tiempo de funcionamiento transcurrido y comando de velocidad.
- Reactor bus dc 3%. Incorporado en modelosde30hp en adelante.
- Control con ajuste PID.
- Frenado por inyección de CC con nivel ajustable.
- Frenado dinámico con unidad de frenado incluida (opcional para 30HP y mayores).
- Frenado mediante software HSB (frenado por alto deslizamiento).
- Rampa programable de frenado.
- Arranque sincronizado con motor girando.

2.2.9 Otros modelos de variadores Yaskawa

Figura 2.3 ***Modelo V7***

V/Hz o Vectorial de Lazo abierto,
NEMA 1 1/8 a 10 Hp

Figura 2.4 ***Modelo V74X***

Hermeticidad
NEMA 4X/12 1/8 a 15 Hp

Figura 2.5 ***Modelo V7N***

Hermeticidad NEMA 1
Software Device Net 1/8 a 10 Hp

Figura 2.6 ***Modelo J7***
V/f, 1/8 - 5 HP

2.3 Esquema de potencia. Circuito de mando

El variador de velocidad cuenta básicamente con tres secciones (figura 2.1). Sección de entrada, sección de salida y sección de control. Las secciones de entrada y salida se muestran en un esquema común el cual se denomina esquema de potencia (figura 2.2.2). Este esquema está constituido por un convertidor CA-CD construido generalmente con diodos en la sección de entrada y un inversor a IGBT en la sección de salida.

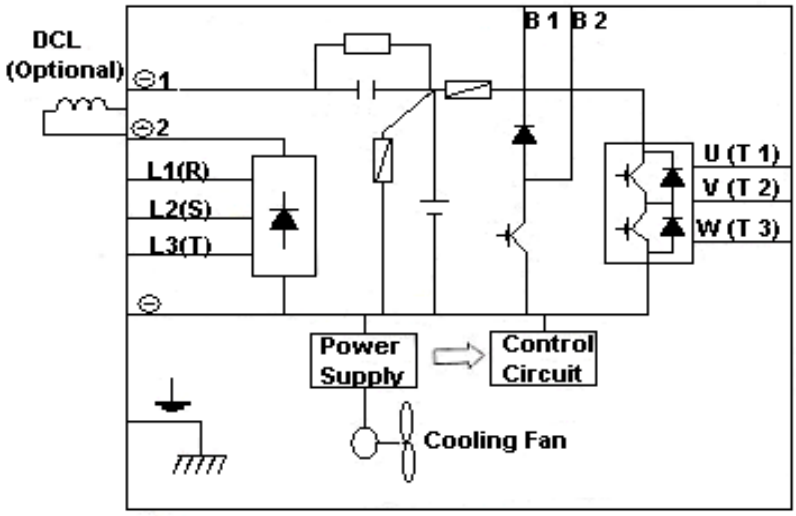


Figura 2.2.1 Diagrama en bloques del variador de velocidad

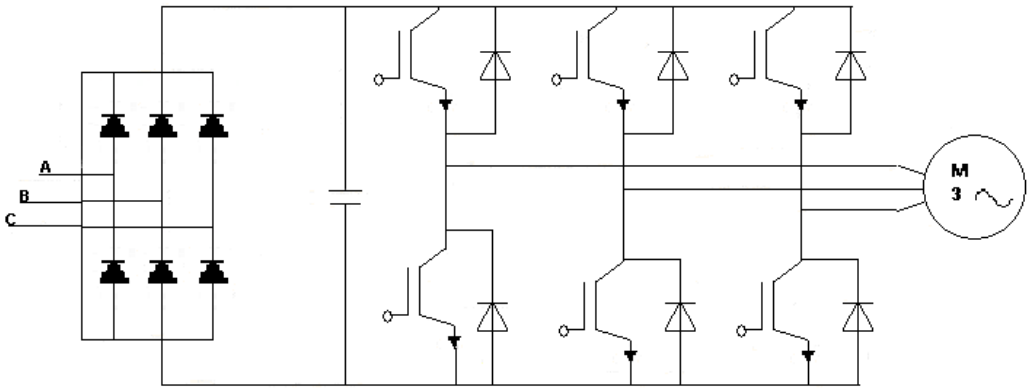


Figura 2.2.2 Esquema de potencia del variador de velocidad Yaskawa

2.3.1 Instrucciones y normas para su uso

A continuación se ponen las instrucciones a tener en cuenta y las normas que se exigen para el uso del variador de velocidad: Es importante que todos los equipos de control (ejemplo: un PLC) conectados al convertidor estén puestos a tierra en el mismo punto que el convertidor a través de un cable corto y de gran sección. El conductor de tierra de los motores alimentados por los convertidores deberá conectarse directamente al terminal de tierra (PE) del convertidor asociado. Siempre que sea posible se debe usar cable apantallado para las conexiones.

Los conductores de mando o control deben estar lo suficientemente separados de los conductores del circuito de potencia para evitar las interferencias y el ruido que le pueden provocar a los primeros. Se debe seleccionar la frecuencia de pulsación más baja posible para reducir la cantidad de interferencias generadas por el convertidor.

2.4 Protocolos de comunicaciones

El convertidor de frecuencia yaskawa está dotado de inteligencia gracias a la tarjeta opcional de autómata que puede ser incorporada al equipo. De esta manera aprovecha los recursos comunes del convertidor y del PLC: transparencia en las comunicaciones y entradas/salidas para su integración en redes DeviceNet (compoBus D) y compoBus S, además de aumentar las posibilidades del control de más de 3 motores.

2.5 Aplicaciones en motores eléctricos

La preferencia actuar por la regulación a frecuencia variable de la velocidad se debe a la posibilidad de utilizar el sencillo y robusto motor de jaula de ardilla; cuyo mantenimiento es mucho más fácil que el de un motor de contactos deslizantes, lo que resulta muy importante en máquinas que operan bajo condiciones ambientales difíciles. Además este tipo de motor eléctrico resulta más económico y compacto que los restantes.

Asimismo, este método permite transformar fácilmente un equipo de velocidad fija en un accionamiento de velocidad variable, sin realizar grandes modificaciones. Con este tipo de regulación se puede obtener un amplio control de velocidades. Con el máximo par disponible en todas las frecuencias con un elevado rendimiento. Si se prolonga la característica al cuadrante generador se puede obtener un frenado muy eficiente por reducción de frecuencia, con una recuperación de energía hacia la red de alimentación.

Si bien pueden utilizarse distintos tipos de convertidores de frecuencia rotativos (semejantes al sistema Ward-Leonard), en la actualidad la modificación de la frecuencia se realiza fundamentalmente por medio de variadores estáticos electrónicos que ofrecen una regulación suave, permitiendo un aumento en la vida útil de todas las partes involucradas y originando un ahorro en el mantenimiento por ausencia de partes en movimiento que sufran desgastes. Los variadores de velocidad ofrecen una transformación simple de energía de buen rendimiento, permite la inversión del flujo de potencia para la regeneración y la transmisión de la corriente reactiva, proporcionando una gama de frecuencias de trabajo que va desde valores cercanos a cero hasta casi la mitad de la frecuencia de alimentación, con fácil inversión de fase para invertir el sentido de rotación. La tensión y frecuencia de salida se controlan por la duración relativa de las conexiones con las distintas polaridades (modulación del ancho de pulso) de manera de conservar constante la relación tensión / frecuencia para mantener el valor del flujo magnético en el motor. Aunque la onda de tensión obtenida no es sinusoidal, la onda de corriente tiende a serlo por efecto de las inductancias presentes. Además, de este modo se obtiene una amplia gama de frecuencias por encima y por debajo de la correspondiente al suministro logrando con esto añadirle un valor agregado a los motores de inducción ya que variando la frecuencia se está variando como ya se conoce la velocidad. Asimismo digamos que los variadores de velocidad

generalmente también sirven para arrancar o detener progresivamente el motor, evitando por ejemplo, los dañinos golpes de ariete que pueden aparecer en los sistemas de tuberías durante arranque y parada de las bombas.

Estos variadores poseen protecciones contra asimetría, falla de tiristores, sobrecalentamientos y sobrecarga; además de vigilancia del tiempo de arranque con limitación de la corriente, control de servicio con inversión de marcha, optimización del factor de potencia a carga parcial, maximización del ahorro de energía durante el proceso.

2.5.1 Aplicaciones específicas en las que se utiliza

- Transportadores
- Elevadores
- Lavadoras comerciales
- Ventiladores y bombas
- Rectificadoras
- Sopladores
- Máquinas de procesamiento de alimentos
- Impresión y textiles
- Aire acondicionado
- Secadoras
- Máquinas enrolladoras
- Aplicaciones especiales.

2.5.2 Otras aplicaciones

- Izaje
- Bobinadores
- Sistemas sincronizados
- Máquinas impresoras
- Máquinas extrusoras
- Máquinas textiles
- Bombas
- Ventiladores

- Molinos
- Manejo robotizado de cargas
- Husillos
- Máquinas herramientas
- Procesamiento de madera
- Aplicaciones en minería
- Aplicaciones en petroquímicas
- Aplicaciones médicas

2.6 Conclusiones parciales del capítulo

- El uso del variador de velocidad Yaskawa en el accionamiento de bombas centrífugas es de carácter energético, y aporta mejoras en el uso racional de la energía, consiguiéndose al mismo tiempo, otras consideraciones tecnológicas importantes que también están a favor de la utilización de este tipo de accionamiento.
- La característica de arranque suave elimina la caída de tensión asociada a los arranques de los motores suavizando el choque de arranque en motores, acoplamientos, engranajes y el equipamiento en general del accionador.

Capítulo III

Capítulo III: Fundamentos sobre regulador PI para accionamiento con variador de velocidad.

3.1 Introducción

Los accionamientos de velocidad variable en motores de inducción están siendo utilizados desde hace unos cuantos años, con el objetivo de ahorrar energía en mecanismos tales como bombas centrífugas y ventiladores. Ahora bien, en mecanismos de este tipo, en los cuales el par mecánico de la carga varía con la velocidad, existe la posibilidad de un ahorro adicional de la energía consumida mediante un control separado de la tensión y la frecuencia aplicada al motor, minimizando sus pérdidas. La aplicación de este principio lleva aparejada la realización de algoritmos de optimización de la eficiencia que son difíciles de realizar por métodos convencionales, pues suelen perjudicar el comportamiento transitorio del accionamiento. Para resolver este problema se utiliza La Lógica Difusa con gran éxito. A continuación se muestran los esquemas utilizados en MATLAB para posibilitar las simulaciones de un motor asincrónico. Se realiza también el diseño de un regulador difuso de la velocidad el cual actualiza la consigna del regulador de un controlador **PI** enviándole la señal con velocidad necesaria para obtener una buena eficiencia en el motor y se brinda un observador de eficiencia para el control del motor eléctrico sin sensor de velocidad solo midiendo la potencia de entrada y la corriente.

Ajustes de controladores

Métodos de Ziegler Nichols

Se utilizan para el ajuste de controladores PID. Se definen dos métodos, de acuerdo a los lazos de control:

- **Método de la curva de reacción.**
- **Método de las oscilaciones mantenidas.**

Método de la curva de reacción

Se utiliza para un sistema a lazo abierto:

Figura 1. Sistema a lazo abierto.

Donde la señal de respuesta a un paso unitario (step) tiene la siguiente forma:

Figura 2. Respuesta ante un paso unitario de un sistema a lazo abierto.

En función de las acciones de control se aplica una de las siguientes fórmulas de la tabla 1.

Tabla 1

Tipo de control	K	Ti	Td
P	T / L	∞	0
PI	0.9 T / L	L / 0.3	0
PID	1.2 T / L	2 L	0.5 L

Método de las oscilaciones mantenidas

Se aplica a un sistema a lazo cerrado, figura 3:

Figura 3 Sistema de control a lazo cerrado

Procedimiento:

1. Se prepara el controlador tipo proporcional (P), asumiendo Ti = ∞ y Td = 0.

2. Se aumenta gradualmente la ganancia del controlador hasta que se tengan las oscilaciones de la señal de salida sostenidamente estables, figura 4.

Figura 4 Señal de salida y(t) del sistema en oscilaciones sostenidas.

3. Se determina:

a). La ganancia crítica Kc , que es el valor colocado en el controlador y donde se obtienen las oscilaciones mantenidas estables.

b). Se obtiene el período de las oscilaciones obtenidas del gráfico de la señal de salida Tc (figura).

4. En función de las acciones de control se aplica una de las siguientes fórmulas de la tabla 2.

Tabla 2

Tipo de control	KP	Ti	Td
P	0.5 Kc	∞	0
PI	0.45 Kc	Tc / 1.2	0
PID	0.6 Kc	0.5 Tc	0.125 Tc

Un sistema ajustado por Ziegler – Nichols tiene una respuesta de la forma siguiente figura 5:

a / b = 0.25

Cuya ecuación general de control tiene la forma de:

Y(t) = Kp . E(t) + 1 / Ti . ∫ E d(t) + Td (dE / d(t)).

CAPÍTULO IV: Modelación de accionamiento con motor de inducción con variadores de velocidad

4.1 Introducción

4.2 Esquemas utilizados para el accionamiento con variador de velocidad en el bombeo de licor

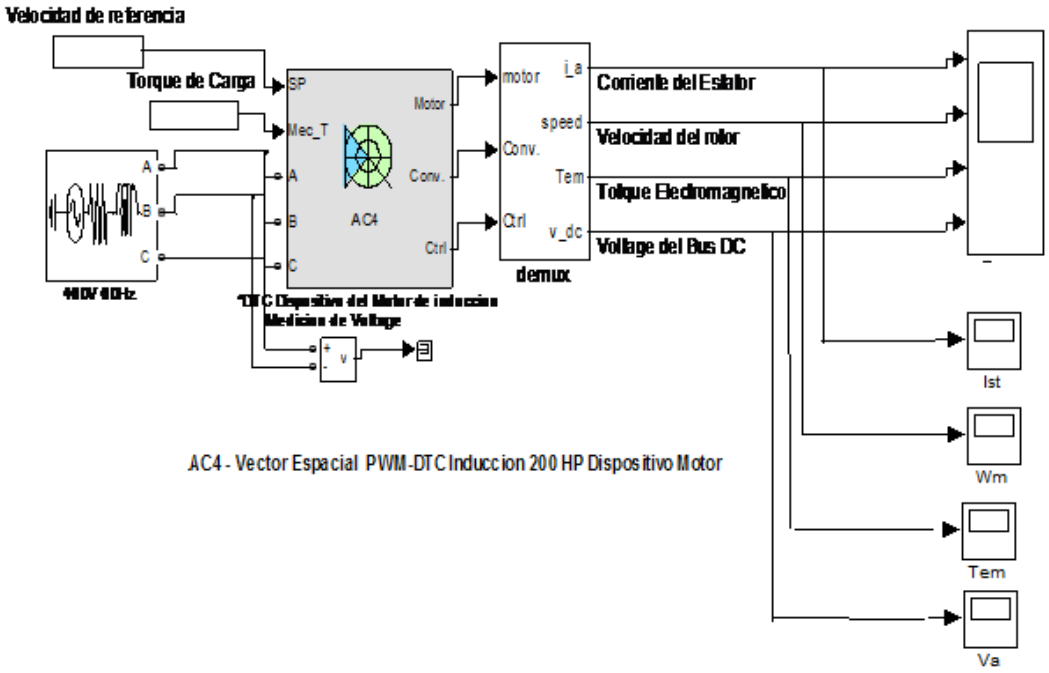


Figura 4.1 Esquema del modelo del accionamiento con variador de velocidad

Esquema general utilizado para obtener las mediciones de los distintos parámetros

Esquema de control de eficiencia en accionamiento de motor de inducción que acciona bomba centrífuga, usando un regulador PI. Aquí es donde se realizan las mediciones de la corriente del estator, velocidad del rotor, torque electromagnético y la tensión, además se muestra en él la velocidad de referencia para el variador de velocidad y el torque de carga.

Figura 3.2 Esquema donde se muestra el diagrama del variador de velocidad con el regulador PI

En este esquema es donde se observan las mediciones del regulador difuso el cual actualiza la consigna del regulador **PI** con la señal de la velocidad necesaria, luego este manda la señal al control DTC para así gobernar el flujo y para mantener una alta eficiencia en los distintos estados de carga. Conjuntamente se mide en variables como Id y Ud mediante las cuales se obtiene la potencia de entrada.

Figura 3.3 Esquema del regulador PI

Aquí se muestra el regulador difuso el cual es de tipo mamdani y se observan las mediciones de este las cuales son la potencia de entrada y la corriente del estator para obtener a la salida la velocidad óptima manteniendo así una alta eficiencia.

Figura 3.4 Esquema de mediciones del regulador PI

Mediante esta figura se muestran las variables que el regulador difuso evalúa para obtener la potencia de entrada, estas son corriente directa y tensión directa.

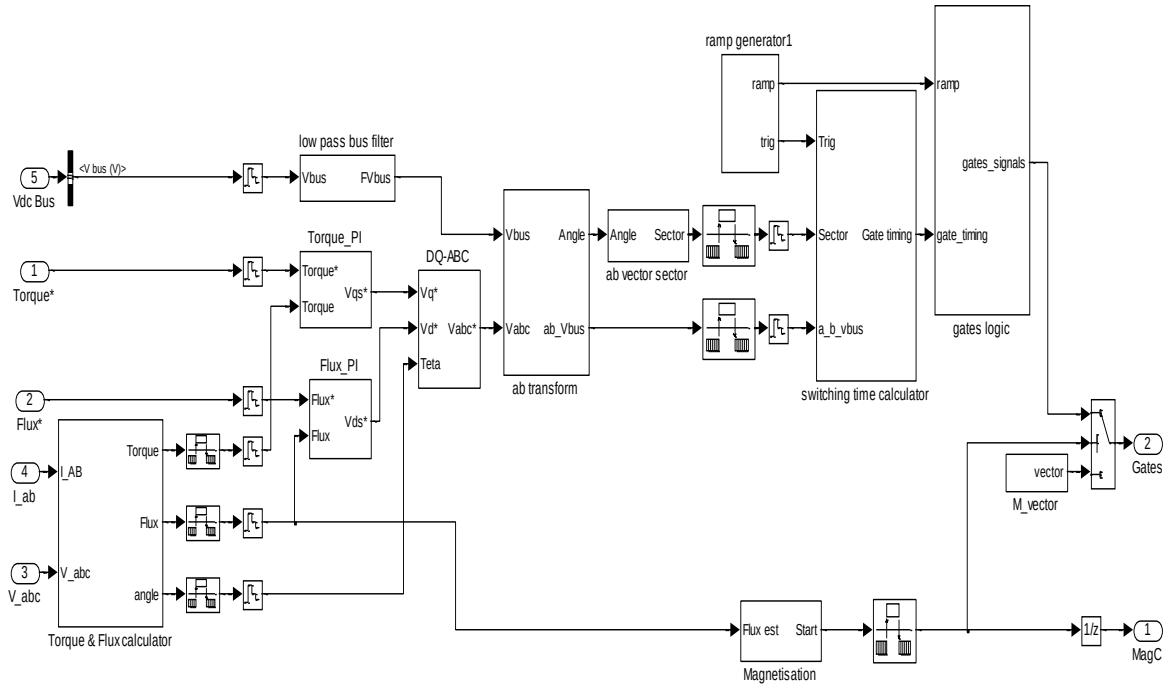


Figura 3.5 Esquema de mediciones de Vqs y Vds

Este es el esquema donde se realizan las mediciones de las variables Vqs y Vds y se observa su comportamiento para los distintos estados de carga.

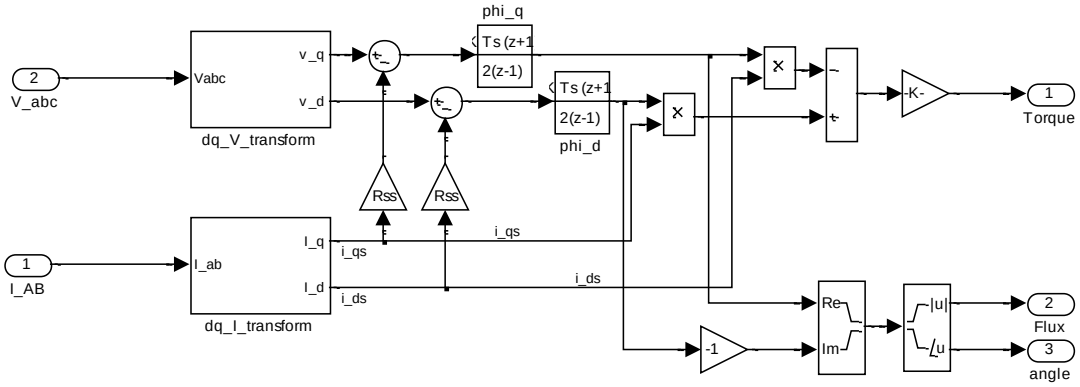


Figura 3.6 Esquema de mediciones de Iqs e Ids

En este esquema se realizan las mediciones de las variables Iqs e Ids y se observa su comportamiento para los distintos estados de carga.

Figura 3.7 Regulador PI

Aquí se muestra el tipo de regulador utilizado, los parámetros que se tienen en cuenta a la hora de realizar las mediciones y lo que se logra a la salida.

Figura 4.2.1 Comportamiento de la eficiencia con y sin el regulador PI

Aquí se observa que a partir de un 39% del momento nominal la eficiencia es sostenida por encima del 90% con el regulador difuso, esto es resultado de adecuar la frecuencia angular de la máquina al nivel de carga exigida por la bomba centrífuga. (Ver anexo 1)

Figura 4.2.2 Comportamiento de la velocidad con y sin el regulador PI

Figura 4.9 Visualizador de los ajustes del regulador PI

Aquí se muestra como funcionan los ajustes difusos observándose como al aumentar la potencia de entrada o la corriente del estator aumenta la velocidad de rotor y viceversa.

Tabla 4.1 Valores de las variables sin el regulador PI

Estados de carga (%)	T_{em}(Nm)	Ps(W)	Pe(W)	η (%)	ω_m(rad/s)	Factor de Potencia
100	496	33782,4	36720	0.92	68	0.90
75	419	28512	35640	0.80	68	0.88
50	260	17732.21	33457	0.62	68	0.80
25	131	8900.92	31789	0.35	68	0.60

4.5 Conclusiones parciales del capítulo

- Resultó adecuado el diseño del regulador PI para mejorar la eficiencia mediante el control de las pérdidas magnéticas en el motor de inducción y las pérdidas de altura de presión en la bomba centrífuga.
- El regulador PI oper con dos variables de entrada (Potencia de entrada y corriente) y una variable de salida (velocidad).

CAPÍTULO V

Capítulo V: Análisis de la eficiencia energética en accionamientos de bombas de licor

5.1 Introducción

Para esto se establece una comparación entre el comportamiento de la eficiencia del accionamiento con el uso del variador de velocidad bajo sus condiciones nominales de trabajo, y su posible comportamiento cuando el variador actúe bajo el control del regulador PI Como se conoce la eficiencia en los motores de inducción está dada por la relación entre la potencia de salida Ps o potencia mecánica en su árbol y la potencia de entrada o eléctrica Pe que puede ser tomada en los terminales del estator o desde el eslabón de corriente directa del inversor sinusoidal de tensión (VSI a PWM).

$$\eta = \frac{P_s}{P_e}$$

y puede ser determinada también a partir de la medición de una de estas potencias y el cálculo de las pérdidas totales; expuestas en las expresiones (1.25a) y (1.25b):

$$\eta = \frac{P_s}{P_s + \Delta p}$$

$$\eta = \frac{P_e - \Delta p}{P_e}$$

En esta figura se observa como el regulador difuso supone la velocidad necesaria para los distintos estados de carga, para mantener así la eficiencia elevada, mientras por otro lado se muestra como la velocidad sin el controlador difuso se mantiene constante para todos los estados de cargas, por lo que el rendimiento a bajas cargas disminuye.

Al establecer una comparación entre las tablas 5.1 y 5.2 se puede observar que el uso de el regulador difuso mejora notablemente la eficiencia de el motor de inducción principalmente a bajas cargas, lo cual significa ahorro de dinero para el país y no solo eso; también mejora el factor de potencia, el cual también libraría a la Empresa Ernesto Che Guevara de una penalización por tener este bajo.

El mejoramiento de la eficiencia de la bomba centrífuga determinada por el ahorro de energía en ella, se determina como (5.10):

$$E_{bcahoor} = N_{b1}(1 - \frac{\eta_{acc1}}{\eta_{acc2}}).h_{totales} \qquad (5.10)$$

donde:

η_{acc1} – es la eficiencia del accionamiento sin el controlador, [%].

η_{acc2} – es la eficiencia del accionamiento con el controlador, [%].

Ahorro de energía mediante la utilización del variador de velocidad en el accionamiento de equipos de bombeo.

Las bombas son mecanismos de amplia utilización en la industria, es casi imposible encontrar un proceso tecnológico donde no jueguen un papel más o menos importante una o varias bombas. Las bombas se dividen en dos grupos: centrífugas y reciprocantes. En las bombas reciprocantes la potencia que se demanda en el eje del motor varía en función del ángulo de giro del rotor, normalmente estos mecanismos poseen biela y manivela. Por otro lado, los mecanismos centrífugos poseen una dependencia de la potencia entregada con el cubo de la velocidad debido a que su operación está vinculada con la fuerza centrífuga que se ejerce sobre el fluido. En este epígrafe sólo se tendrán en cuenta las bombas centrífugas.

En la figura 2.26 se muestra un sistema hidráulico típico, en el cual se eleva un líquido de un nivel a una presión p_1, a otro nivel a una presión p_2. Para el estudio de un sistema hidráulico es necesario tener en cuenta dos variables fundamentales: el caudal (Q) y la carga hidráulica (H). Por caudal se define la cantidad o volumen de líquido suministrado por unidad

de tiempo y se da en m^3/s. Por carga hidráulica se define la energía que debe suministrarse al líquido por unidad de peso y se da en m.

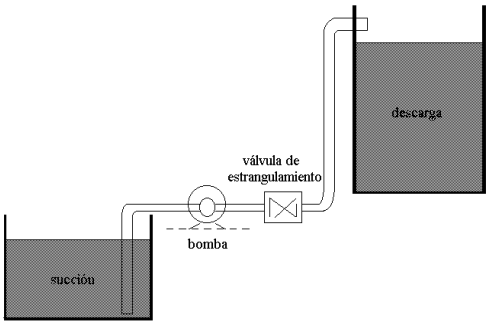


Figura 2.26. Sistema de bombeo típico.

La instalación hidráulica, al igual que la bomba, posee sus propias características H vs Q, esto se explica fácilmente si entendemos que toda instalación requiere determinada energía por unidad de peso para hacer circular por ella determinado caudal de líquido. De la misma forma, toda bomba puede suministrar determinado caudal de líquido contra una carga hidráulica dada. La intersección entre las características de la bomba y la carga hidráulica determina el punto de operación del sistema.

Una bomba centrífuga puede descargar un caudal limitado de líquido en función de la carga hidráulica que deba vencer la bomba para una velocidad dada, a esta dependencia se le denomina característica de carga, que no es más que la relación entre caudal y carga hidráulica de la bomba. Estas características dependen del tamaño y diseño de la bomba y de sus condiciones de succión, y como puede apreciarse a través de la figura 2.27 dependen también de la velocidad de rotación del impelente.

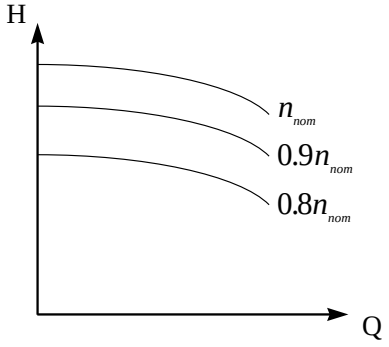


Figura 2.27. Característica de la bomba centrífuga para diferentes valores de velocidad.

La carga hidráulica total está compuesta, en una instalación real, de las componentes siguientes:

- Carga estática.
- Carga de presión.
- Carga de fricción.
- Carga de velocidad.

La carga estática está compuesta por la carga estática de succión Hs y la carga estática de descarga Hd, siendo la primera función de la altura entre la bomba y el lugar de donde se succiona y la segunda, función de la altura entre la bomba y el lugar donde se descarga el líquido bombeado.

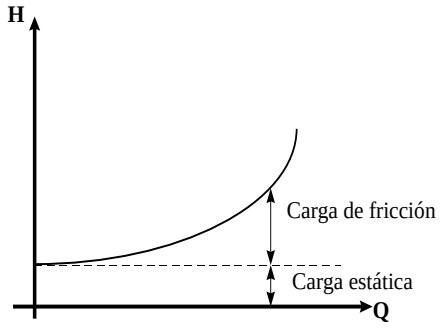
La carga de presión tiene que ver con la energía que debe ser suministrada al líquido para que pueda vencer la diferencia de presiones entre la entrada y la salida.

La carga de fricción incluye las pérdidas que ocurren al circular el líquido por las tuberías y otros dispositivos de la instalación, las mismas dependen del caudal y la naturaleza del líquido bombeado, así como de las características de las tuberías y demás accesorios.

La carga de velocidad se relaciona con la energía cinética que debe suministrarse al líquido, para las bombas esta carga tiene muy poca importancia.

Para muchas instalaciones hidráulicas la presión de entrada y la de salida son iguales, por lo tanto, para este tipo de instalaciones sólo se tendrán en cuenta la carga estática y la de fricción. Para estos sistemas la carga hidráulica total toma la forma de la figura 2.28.

Otra característica muy importante es la de eficiencia vs caudal del líquido bombeado, esta característica tiene la forma que se muestra en la figura 2.29. En la figura 2.30 se muestran las características de la bomba, el sistema y la eficiencia, en un sólo gráfico, mostrando cómo se obtiene el punto de operación del sistema.



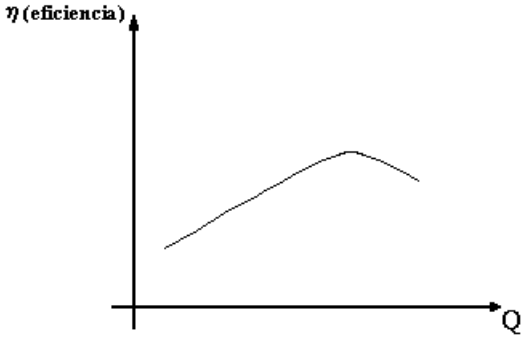


Figura 2.28. Carga hidráulica total. Figura 2.29. Característica de eficiencia de la bomba.

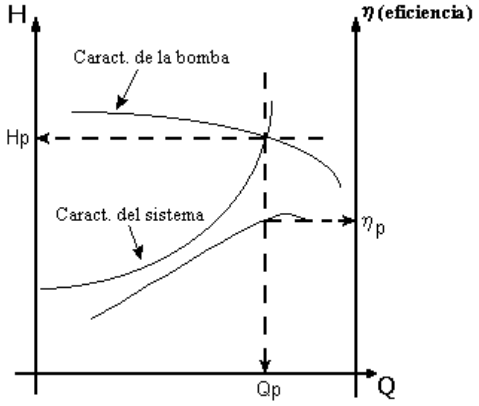


Figura 2.30. Características conjuntas de la bomba y la instalación hidráulica.

Para determinar la potencia que debe tener el motor eléctrico que mueve la bomba debe plantearse inicialmente la potencia que debe entregarse al líquido Ph, la cual es igual a la energía entregada por unidad de tiempo. Por otra parte, se tiene que la carga hidráulica es energía por unidad de peso y, como es conveniente expresar la potencia en función de la carga hidráulica, se determinará primeramente ésta.

Se sabe que: $H = \dfrac{W}{m.g}$ (5.1)

donde W es la energía entregada al líquido y m.g, su peso.

Esta energía es la suma de la energía cinética, la potencial, la necesaria para vencer la diferencia de presiones y la necesaria para vencer la fricción.

$$W = \frac{m.v^2}{2} + m.g.(H_s + H_d) + (p_2 - p_1).\Delta V + W_f \qquad (5.2)$$

donde m es la masa del líquido, v la velocidad del líquido y W_f la energía necesaria para vencer la fricción. Combinando (5.1) y (5.2) se obtiene la expresión de la carga hidráulica total, o sea:

$$H = \frac{v^2}{2.g} + H_s + H_d + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + H_f \qquad (5.3)$$

El primer término es la carga de velocidad, el segundo y el tercero la carga estática, el cuarto la carga de presión y el quinto la de fricción, ρ es el peso específico del líquido.

Para determinar la potencia entregada al líquido se aplica la expresión:

$$P_h = \frac{W}{t} = \frac{W}{m.g}.\frac{m.g}{t} = H.\frac{m.g}{t} \qquad (5.4)$$

Si se tiene en cuenta que m.g=V.ρ , o sea, que el peso es igual al volumen por el peso específico, se obtiene la expresión:

$$P_h = H.\frac{V}{t}.\rho \qquad (2.62)$$

pero se sabe que el caudal Q es igual a: $Q = \frac{V}{t}$ (5.5)

Por tanto, (2.58) queda como: $P_h = H.Q.\rho$ (2.64)

Esta es la potencia que debe entregarse al líquido, para hallar la potencia que debe entregar el motor debe tenerse en cuenta la eficiencia de la bomba y la eficiencia de la transmisión mecánica:

$$P = \frac{H.Q.\rho}{\eta_t.\eta_b} \qquad (2.65)$$

donde η_t es la eficiencia de la transmisión y η_b la eficiencia de la bomba que se calcula a partir de la determinación del punto de trabajo.

En las industrias procesadoras, la industria de generación de energía eléctrica, los acueductos y otras aplicaciones es necesario regular el caudal de fluido que entrega la bomba.. Para ello existen dos métodos fundamentales:

- El método de estrangulación de la salida (con su variante de recirculación de fluido).
- El método de variación de la velocidad de la bomba.

El método de estrangular la salida consiste en situar en la salida de la bomba una válvula de estrangulación la cual se encarga de variar el caudal entregado, las características que se obtienen para este tipo de control se muestran en la figura 2.31.

El método de control del caudal variando la velocidad de la bomba consiste en hacer que la bomba varíe su velocidad en función del caudal requerido en cada momento, las características que se obtienen al utilizar este método se muestran en la figura 2.32

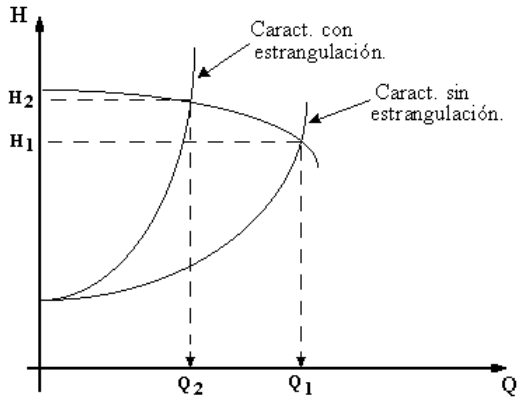
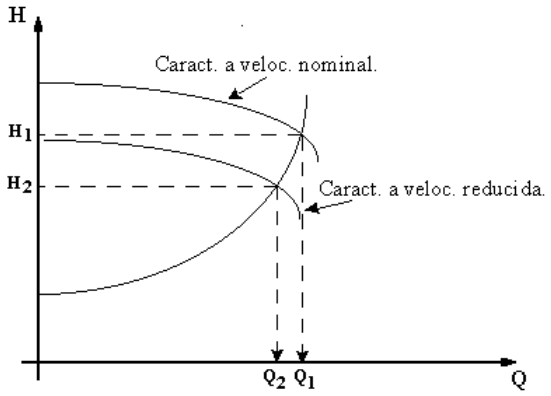


Figura 2.31. – Características de la bomba y la instalación con control por estrangulación. .



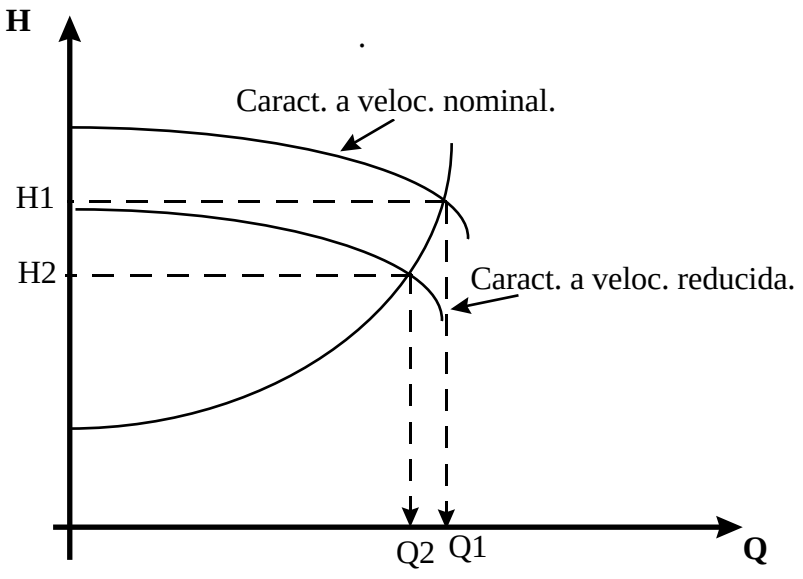


Figura 2.32. – Características de la bomba y la instalación con control por variación de la velocidad. .

De los gráficos anteriores podemos llegar a la conclusión que el método de control de caudal a partir de la estrangulación de la salida introduce pérdidas considerables en el sistema, ya que, como puede apreciarse, la disminución de caudal se logra a expensas de aumentar las pérdidas por fricción que ocurren en la válvula, mientras que la utilización del método de control variando la velocidad de la bomba es mas eficiente, por esta razón en la actualidad cuando se requiere controlar el caudal en un amplio rango de variación del mismo se utiliza el control por variación de la velocidad de la bomba. Un método muy utilizado antes de los años sesenta consistía en introducir resistencias en el circuito del rotor del motor con rotor bobinado para variar la velocidad del mismo, como se sabe este método es muy ineficiente y solo logra controlar el caudal de forma discreta, esto último se traduce en una mala gradación del control, que en algunos casos es inadmisible debido fundamentalmente a la imposibilidad de automatizar el proceso. Otro método utilizado hasta hace unos años para bombas de poca potencia era el control por variación de la tensión aplicada al estator, mediante la utilización de chopper de C.A. Este método posee dos desventajas fundamentales que consisten en la disminución de la capacidad de sobrecarga y la eficiencia al disminuir la tensión aplicada y el estrecho margen de regulación de la velocidad que el mismo brinda. Se debe señalar que para cargas del tipo de las bombas centrífugas estas desventajas no son tan notables pues la eficiencia no disminuye tanto y no se reduce en

extremo el diapasón de control de velocidad pues no se limita tanto la capacidad de sobrecarga. Ahora bien, debido a que en la actualidad, la forma de conseguir esta disminución de tensión es mediante un chopper de CA en el estator, a las desventajas antes planteadas se le añade el elevado contenido de armónicas de corriente y el empeoramiento del factor de potencia.

Entre los métodos que aparecieron hace no muchos años se encuentran la cascada asincrónica a tiristores y el motor doblemente alimentado, para potencias elevadas estos accionamientos permiten realizar un control del caudal de una elevada eficiencia y exactitud en la regulación, aunque tienen el inconveniente de aumentar el consumo de potencia reactiva..

Cuando los requerimientos del diapasón de regulación y la eficiencia son altos se utilizaba el sistema generador-motor que en la década de los sesenta se fue cambiando por el sistema rectificador controlado-motor.

Desde hace unos años se viene utilizando para el control del caudal por variación de la velocidad de bombas de menos de 3500 kW el control de variación de la frecuencia del motor asincrónico jaula de ardilla debido a sus conocidas ventajas. Para potencias mayores se utiliza el motor sincrónico alimentado por un inversor a tiristores controlado por la carga o la mencionada cascada asincrónica a tiristores.

Podemos concluir que en la actualidad cuando se requiere regular el caudal entregado por la bomba en un amplio margen de regulación y a una alta eficiencia es muy utilizado y casi no se entran a analizar otras variantes, el control por variación de la frecuencia, ahora bien esta decisión se refiere a los métodos de control por variación de la velocidad y no es tan categórico cuando la cuestión es decidir entre aplicar el método de variación de la velocidad y el método de estrangulación. La selección óptima del método de regulación del caudal se realiza a partir de los resultados que se obtengan de un exhaustivo proceso de análisis técnico-económico en el cual se incluyan todas las variantes y cuyo resultado final dependerá mucho de las condiciones específicas de donde se aplicará el control.

La ventaja fundamental que se logra al utilizar variadores de velocidad en el accionamiento de bombas centrífugas es de carácter energético, ahora bien, existen otras consideraciones tecnológicas importantes que también están a favor de la utilización de este tipo de accionamiento. Entre ellas podemos señalar las siguientes:

- La característica de arranque suave elimina la caída de tensión asociada a los arranques de los motores suavizando el choque de arranque en motores, acoplamientos, engranajes y el equipamiento en general del accionador.
- Es permisible la realización de arranque repetidos sin afectaciones mecánicas.
- Dado que estos accionamientos entregan en cada momento exactamente el caudal requerido por el sistema, se logra alargar la vida útil de todos los dispositivos que forman parte del mismo, se conservan elementos de control de flujo eliminando el mantenimiento intensivo. Entre estos dispositivos están los amortiguadores, válvulas de cuello, etc.
- El accionamiento de velocidad ajustable puede ser diseñado para que no se altere el funcionamiento cuando ocurren perturbaciones en el sistema electroenergético. Cuando un fallo de baja tensión ocurre, el accionamiento puede ajustarse de forma tal que disminuyan el consumo de potencia hasta que la tensión nominal sea restablecida, al mismo tiempo el accionamiento puede re-acelerarse hasta la velocidad de referencia.
- Es posible alcanzar rangos de velocidad que excedan las 3600 rpm sin la utilización de engranajes, con inversores de C.A. se logra operando a frecuencias mayores de 60 Hz.
- El rango permisible de control de flujo es generalmente superior con velocidad ajustable

Valoración económica utilizando otros factores de producción

Actualmente una tonelada de níquel obtenida por este proceso consume más de 10 MW.h de energía eléctrica y constituye más del 20 % del costo de producción, 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 plantas minero metalúrgicas como las de Moa y Nicaro, se precisan que los mayores consumidores de energía eléctrica lo representan los accionamientos eléctricos de: producción de aire comprimido, las bombas centrífugas, las instalaciones de molienda y secado y los ventiladores.

Los accionamientos de bombas centrífugas están entre los accionamientos más empleados en el proceso de obtención de níquel ya sea por tecnología Carbonato amoniacal o por Lixiviación Ácida; 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 estrangulando la tubería de impulsión y con esto aumenta la resistencia de la red 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 (Inversor Sinusoidal de Tensión) adecuadamente seleccionado.

En la práctica en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa 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 difuso con los variadores de velocidad, y más si está avalado como el presente estudio del proceso para mejorar eficiencia en el accionamiento, permite la disminución de las pérdidas de energía y aumenta el tiempo de vida útil o empleo de la bomba.

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.

Para hallar en la práctica la característica de la red, se hace necesario determinar las pendientes hidráulicas, esto se grafica en este trabajo a diferentes concentraciones (figura 3.4). Este gráfico es de mucho valor por el hecho de poder utilizar velocidades adecuadas donde tienen lugar las menores pérdidas hidráulicas en el sistema de accionamiento de bombas. El cálculo económico está dado por el ahorro de energía que puede significar cuando utilizamos el controlador difuso y el incremento del tiempo de vida útil de la instalación.

La energía ahorrada para las nuevas condiciones de trabajo del motor eléctrico y la bomba centrífuga se puede estimar con las siguientes expresiones (3.9), y (3.10).

El mejoramiento de la eficiencia del motor eléctrico determinada por la energía total ahorrada por el uso del controlador que modifica el trabajo en el motor se puede estimar como (3.9):

$$E_{MIahorr} = N_b.(\frac{1}{\eta_{MI1}} - \frac{1}{\eta_{MI2}}).h_{totales} \qquad (5.9)$$

donde:

$P_{Miahorr}$ – es la energía total ahorrada en el motor eléctrico, [kWh].

N_b – es la potencia de la bomba centrífuga, [kW].

η_{MI1} – es la eficiencia del motor eléctrico sin el controlador, [%].

η_{MI2} - es la eficiencia del motor eléctrico con el controlador, [%].

$h_{totales}$ – horas totales de operación del accionamiento, [h].

El mejoramiento de la eficiencia de la bomba centrífuga determinada por el ahorro de energía en ella, se determina como (3.10):

$$E_{bcahoor} = N_{b1}(1 - \frac{\eta_{bc1}}{\eta_{bc2}}).h_{totales} \qquad (3.10)$$

donde:

η_{bc1} – es la eficiencia de la bomba sin el controlador, [%].

η_{bc2} – es la eficiencia de la bomba con el controlador, [%].

A modo de ejemplo en la tabla 3.10 se brindan los datos sobre el ahorro que representa el uso del controlador difuso en varios accionamientos de bombas centrífugas con potencias típicas en la planta de lavadero de la empresa Cmdte Ernesto Che Guevara.

Tabla Ahorro de energía anual con el uso del algoritmo de control difuso en accionamientos de motores con bombas centrífugas en planta de lavaderos en la empresa Cmdte. Pedro Sotto alba de Moa.

Potencias de motores [kW]	η_{MI1} [%]	η_{MI2} [%]	$\Delta E_{ahorrada}$ anual en motores. [kW.h]	$\Delta E_{ahorrada}$ anual total [kW.h]	Costo de $\Delta E_{ahorrada}$ anual total (CUC)
55	81	91	20 157,5 *	181 417,5	39 549,02
55	83	91	16 126 **	32 520,00	7 030,94
100	82	92	36 650 *	329 850,00	71 907,51
100	85	91	21 990 ***	87 960	19 175,28
160	83	92	52 776 **	474 984,00	103 546,50
Total			109 583,5	986 251,50	241 204,04

Se ahorrarían XX $ CUC por cada m^3 de pulpa tipo cola transportada, con un ahorro en los gastos de explotación de CUC anualmente, aspecto que se muestra en la tabla 3.11.

5.4 Conclusiones parciales del capítulo

- Con el uso del regulador PI se verifica mejorar la eficiencia, a partir del controlde las pérdidas en el motor eléctrico y la bomba centrífuga, a diferentes estados de cargas mecánicas en el accionamiento de bomba centrífuga.
- Se corroboran las buenas cualidades del regulador PI de eficiencia mediante las simulaciones hechas en MATLAB, donde a bajas cargas mecánicas el esquema del controlador de velocidad mejora en mayores rangos la eficiencia.
- El sistema de simulación diseñado puede ser utilizado también en la síntesis de reguladores PI.
- La metodología utilizada en este capítulo ha permitido corroborar un efecto económico de XXX cuc por reducción de pérdidas en el accionamiento eléctrico.

Capítulo V

Capítulo V: Valoración económica del trabajo

5.1 Introducción

En este capítulo se plantea el aporte económico como resultado de la experimentación del sistema de accionamiento eléctrico de bomba centrífuga.

Para esto se establece una metodología la cual demuestra que es muy económico para el país el uso de La Lógica Difusa ya que esta le da grandes aportes y tiene un período de recuperación de la inversión muy corto, debido a sus ingresos.

5.2 Cálculo del aporte económico

La producción de níquel por el proceso CARON constituye uno de los métodos de mayor consumo energético en la industria nacional.

Actualmente una tonelada de níquel obtenida por este proceso consume más de 10 MWh de energía eléctrica y constituye más del 20 % del costo de producción, 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 plantas minero metalúrgicas como las de Moa y Nicaro, se precisan que los mayores consumidores de energía eléctrica lo representan los accionamientos eléctricos de: producción de aire comprimido, las bombas centrífugas, las instalaciones de molienda y secado y los ventiladores.

En esencia la introducción del esquema de control difuso con los variadores de velocidad, y más si está avalado como el presente estudio del proceso para mejorar eficiencia en el accionamiento, permite la disminución de las pérdidas de energía y aumenta el tiempo de vida útil o empleo de la bomba.

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.

El cálculo económico está dado por el ahorro de energía que puede significar cuando utilizamos el controlador difuso y el incremento del tiempo de vida útil de la instalación.

La energía ahorrada para las nuevas condiciones de trabajo del motor eléctrico y la bomba centrífuga se puede estimar con las siguientes expresiones (5.1) y (5.2).

El mejoramiento de la eficiencia del motor eléctrico determinada por la energía total ahorrada por el uso del controlador que modifica el trabajo en el motor se puede estimar como (5.1):

$$E_{MIahorr} = N_b.(\frac{1}{\eta_{MI1}} - \frac{1}{\eta_{MI2}}).h_{totales} \qquad (5.1)$$

Donde:

$P_{Miahorr}$ – es la energía total ahorrada en el motor eléctrico, [kWh].

N_b – es la potencia de la bomba centrífuga, [kW].

η_{MI1} – es la eficiencia del motor eléctrico sin el controlador, [%].

η_{MI2} - es la eficiencia del motor eléctrico con el controlador, [%].

$h_{totales}$ – horas totales de operación del accionamiento, [h].

El mejoramiento de la eficiencia de la bomba centrífuga determinada por el ahorro de energía en ella, se determina como (3.10):

$$E_{bcahoor} = N_{b1}(1 - \frac{\eta_{bc1}}{\eta_{bc2}}).h_{totales} \qquad (5.2)$$

Donde:

η_{bc1} – es la eficiencia de la bomba sin el controlador, [%].

η_{bc2} – es la eficiencia de la bomba con el controlador, [%].

A modo de ejemplo en la tabla 5.1 se brindan los datos sobre el ahorro que representa el uso del controlador difuso en varios accionamientos de bombas centrífugas con potencias típicas en la planta de lixiviación de la empresa Cmdte Ernesto Che Guevara de Moa.

Tabla 5.1 Ahorro de energía anual con el uso del algoritmo de control difuso en accionamientos de motores con bombas centrífugas en plantas de Las Empresas Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa

Potencias de motores [kW]	η_{MI1} [%]	η_{MI2} [%]	$\Delta E_{ahorrada}$ anual en motores. [kWh]	$\Delta E_{ahorrada}$ anual total [kWh]	Costo de $\Delta E_{ahorrada}$ anual total (CUC)
41,03	0,90	0,926	1 280.54	11 524.86	2 701.26
41,03	0,80	0,9180	29 108.57	116 434.28	25 382.64
41,03	0,62	0,906	152 390.19	304 780.38	66 442.12
41,03	0,35	0,84	516 978.00	516 978.00	112 701.25
Total			699 757.3	949 717.52	207 227.27

- Aplicado a nueve accionamientos eléctricos de la empresa Cmdte. Ernesto Guevara de Moa los cuales trabajan al 100% del la carga nominal.
- Aplicado a cuatro accionamientos eléctricos de la empresa Cmdte. Ernesto Guevara de Moa los cuales trabajan a un75 % de la carga nominal.
- Aplicado a dos accionamientos eléctricos de la empresa Cmdte. Ernesto Guevara de Moa los cuales trabajan a un 50%de la carga nominal.
- Aplicado a un accionamientos eléctricos de la empresa Cmdte. Ernesto Guevara de Moa los cuales trabajan a un 25%de la carga nominal.

5.3 Cálculo del tiempo de amortización de la inversión.

Se tiene que $T_{amortisación} = \dfrac{Inversión}{EnergíaAhorrada}$

Donde:

T $_{amortisación}$: es el tiempo de recuperación de la inversión.

Inversión: es lo que se invierte en la compra del producto.

Energía ahorrada: es la energía que se ahorra con el producto que se propone comprar en (CUC).

Existen unos chips difusos los cuales están en el orden de los 13,000 CUC y para estos el tiempo de recuperación de la inversión es de 23 días laborables, pero lo interesante de esto es que se pueden utilizar los microcontroladores de los PLC. En ellos se programan los algoritmos difusos, estando en el orden de los 4000 CUC, teniendo un tiempo de recuperación de la inversión de solamente 8 días laborables.

5.3.1 Valoración ambiental

El comportamiento ecológico de los agregados metalúrgicos con los accionamientos eléctricos de bombas centrífugas, en particular para el caso de los sedimentadores donde se deposita y bombea pulpa laterítica, está dado por una serie de factores, actividades e impactos entre los que se pueden abordar están:

- Identificación de las acciones o actividades con repercusión ambiental: escape de amoníaco y emisiones de ruido.
- Identificación de los impactos ambientales, reflejados en la siguiente tabla 3.8

Tabla 5.2 Identificación de los factores ambientales susceptibles a afectaciones.

Medio físico	Medio socio-económico
Suelo	Hombre
Agua	Aspectos sociales
Aire	Aspectos económicos

FUENTE: G. Hurtado. 2000. Tesis Doctoral.

El proceso de caracterización de los impactos ambientales es de suma importancia, pues posibilita la compresión de la dimensión exacta del análisis desarrollado, determinando como repercute sobre el medio ambiente cada uno de los impactos ambientales que tienen lugar tanto en el objeto como en los elementos externos a este.

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 mezclado en los tanques sedimentadores, estos gases una vez transitan por diferentes procesos como la dispersión de SO_2, SO_3, NO_2.

Tabla 5.3 Identificación de los impactos ambientales en los tanques sedimentadores de la planta de lixiviación

Acciones o actividades	Factores ambientales	Impactos ambientales
Escape de amoníaco	Aire	Disminución de la calidad del aire
Escape de amoníaco	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
Escape de amoníaco	Económico	Pérdidas económicas
Derrame de pulpa	Económico	Consumo de recursos hidráulicos
Emisiones de ruido	Hombre	Pérdidas de sensibilidad auditiva

FUENTE: G. Hurtado. 2000. Tesis Doctoral.

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 del trabajo físico y mental del hombre, expuestos también a enfermedades respiratorias y de la piel.

5.3.3 Valoración social

La introducción de estos resultados permite humanizar la labor de los operadores que están expuestos a las emisiones gaseosas de amoníaco y gas carbónico, 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.

5.4 Conclusiones parciales

- Usando los ajustes del control difuso, el subsistema hidráulico donde opera la bomba Centrífuga bajas cargas (50%) y (25%) tiene menos pérdidas, pudiendo alcanzar su eficiencia hasta un 90% y un 84% respectivamente.
- Con la introducción del controlador difuso en el accionamiento eléctrico de la bomba centrífuga de hidrotransporte de pulpa laterítica se logra un efecto económico anual de unos 207 227.27 CUC pesos convertibles, por concepto de energía dejada de consumir en forma de pérdidas.

Conclusiones

- El diseño del estimador de eficiencia, usando la lógica difusa permitió mejorar los rendimientos a bajas cargas mecánicas, mediante la actualización de la señal de referencia del regulador PI de velocidad.

- El estimador de eficiencia fue construido utilizando una arquitectura tipo Mamdani, con dos entradas y una salida, con funciones de pertenencia tipo triángulo.
- La simulación del accionamiento eléctrico a través del MATLAB, valida las buenas cualidades del estimador de eficiencia.

- Se comprobó que se pueden realizar ahorros significativos con la implementación de la lógica difusa los cuales estarían en el orden de los 207 227.27 al año con un muy bajo período de recuperación del tiempo de la inversión enmarcado en rangos establecidos.

Recomendaciones

1. Se recomienda que se tome el presente trabajo como base de estudio y de análisis para la elaboración de técnicas de eficiencia energética en motores de inducción.
2. Utilizar el software simulador del accionamiento eléctrico para bombas centrífugas, como herramienta supervisora del proceso de transporte de hidromezclas de pulpa laterítica.
3. El esquema de control difuso desarrollado sirve como programa tutorial para la automatización del proceso de transporte de hidromezclas.
4. Emplear en futuros trabajos de esta temática el uso de una red neuronal artificial para mejorar las cualidades de aprendizaje del estimador difuso.

Bibliografía

1. Aparicio, J. L.: “CRITERIOS de Diseño de Convertidores Estáticos para Accionamientos Regulados en Corriente Alterna con Motores de Inducción”. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 1987.
2. Briz del Blanco, F.: “Control Vectorial del Motor de Inducción con Identificación y Adaptación a los Parámetros de la Carga”, Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 1995
3. Erickson, C. J.: “Motor Design Features for Adjustable Frequency Drives”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.24, No.2, March/April, 1988
4. Ivanov - Smolensky, A.V.: “Máquinas Eléctricas”, Editorial Mir, Moscú
5. Kostenko, M.P.; Piotrovsky, L.: “Máquinas Eléctricas”, Editorial Mir, Moscú
6. Eletrônica de potencia 2da parte.
7. A Voldek, Máquinas eléctricas Tomo II.
8. Bodson J. Digital control improves variable speed drives. EPE Journal. Vol. 2. No. 4. December 1992. pp 243 –248
9. Kusko A., Galler D., Control means for minimization of losses in ac and dc motor drives. IEEE Transactions on Industry Aplications, Vol 19, No. 4. pp 561 – 570. July – august-1983.
10. Electric Machinery, A. E. Fitgeald and Charles Kingsley. JR.
11. Miguel Morales MINED, Accionamiento eléctrico industrial.
12. Tesis doctoral Dr. Luís Delfín Rojas Purón(Título: Accionamiento eléctrico asincrónico para transporte eficiente de pulpa lateritica) Año 2006.
13. http// Edición 19* Revista Energía
14. Power Electronic Applications. Converters and design. N. Mohan, W. Robbing and T. Undeland. 2004. Prentice Hall, New York.
15. Revista Minería y geología. Vol. XVI. No.1.Moa. 1999 ISSN 0258-5979, Simulador para el análisis de motores de inducción con mando adaptivo de inversores sinusoidales de potencia.
16. Modelación accionamiento de motor de inducción en base al radio de potencia. SIE-2001. Santa Clara. 2001. ISBN 0327-0793.

17. Control de la eficiencia del accionamiento de bombas centrífugas usando lógica difusa. SIE-2003. Noviembre 21-23 2003. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. 2003. ISBN 0327-0793.
18. http://www.infolinks.com/
19. www.potencialindustrial.com/motoreselectricos.com
20. http://www.automatas.org
21. http://www.siemens.com
22. http://www.icdindustrial.com/
23. http://www.yaskawa.com

Anexos

De la figura 4.1 del capítulo 4 se observa que a partir de casi un 39 % 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 centrífuga, la f.e.m. 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 8,74 % con el uso del controlador difuso. Además se muestra como el rendimiento por otra parte disminuye gradualmente según disminuyen los estados de carga por lo cual se observa una gran mejora de la eficiencia para los bajos estados de carga.

Tabla 1. Valores de las variables con el regulador difuso

Estados de carga (%)	Corriente(A)	Tensión(V)	Fp	Potencia de entrada(kW)
100	66	630	0.96	39769.03
75	60	625	0.93	34433.92
50	42	620	0.90	23240.64
25	29	610	0.86	15000

Tabla 2. Valores de las variables sin el regulador difuso

Estados de carga (%)	Corriente(A)	Tensión(V)	Fp	Potencia de entrada(kW)
100	65	630	0.90	36720
75	65	625	0.88	35640
50	64	624	0.80	33457
25	84	620	0.60	31789

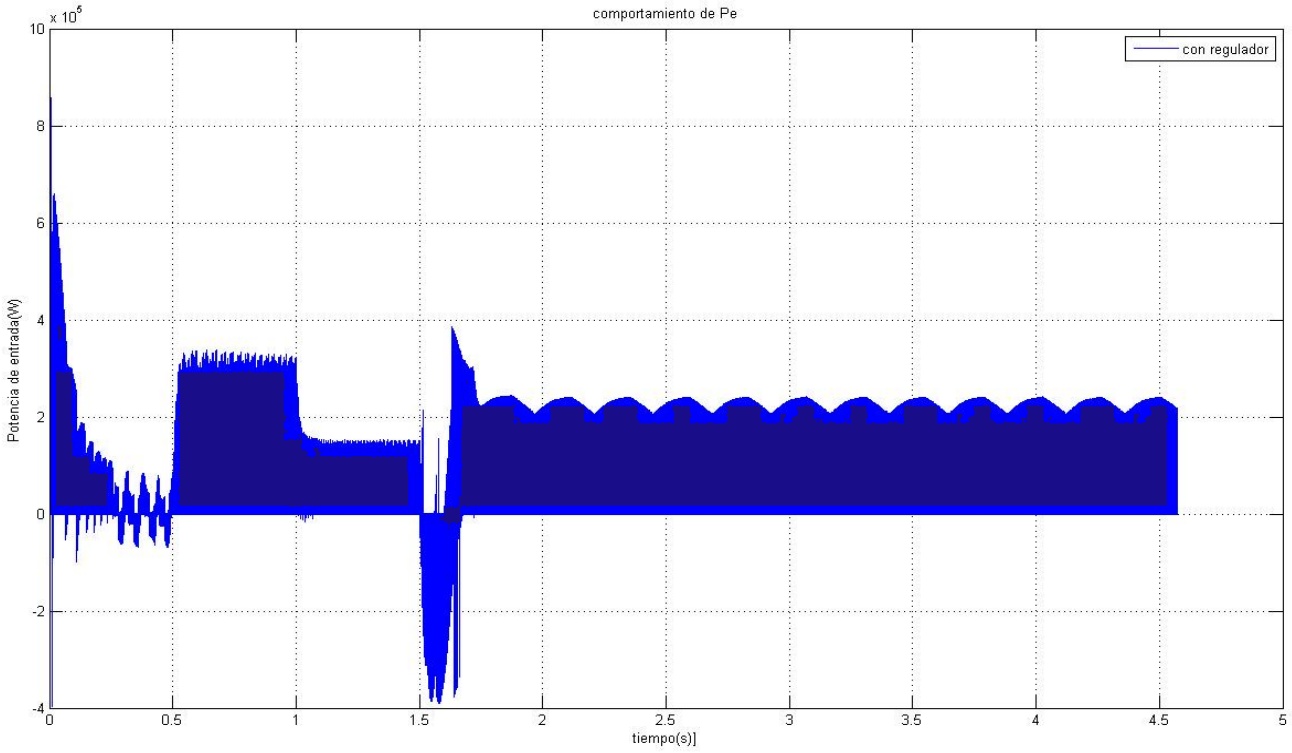


Figura 1. Gráfica de potencia de entrada para el 100% de la carga nominal

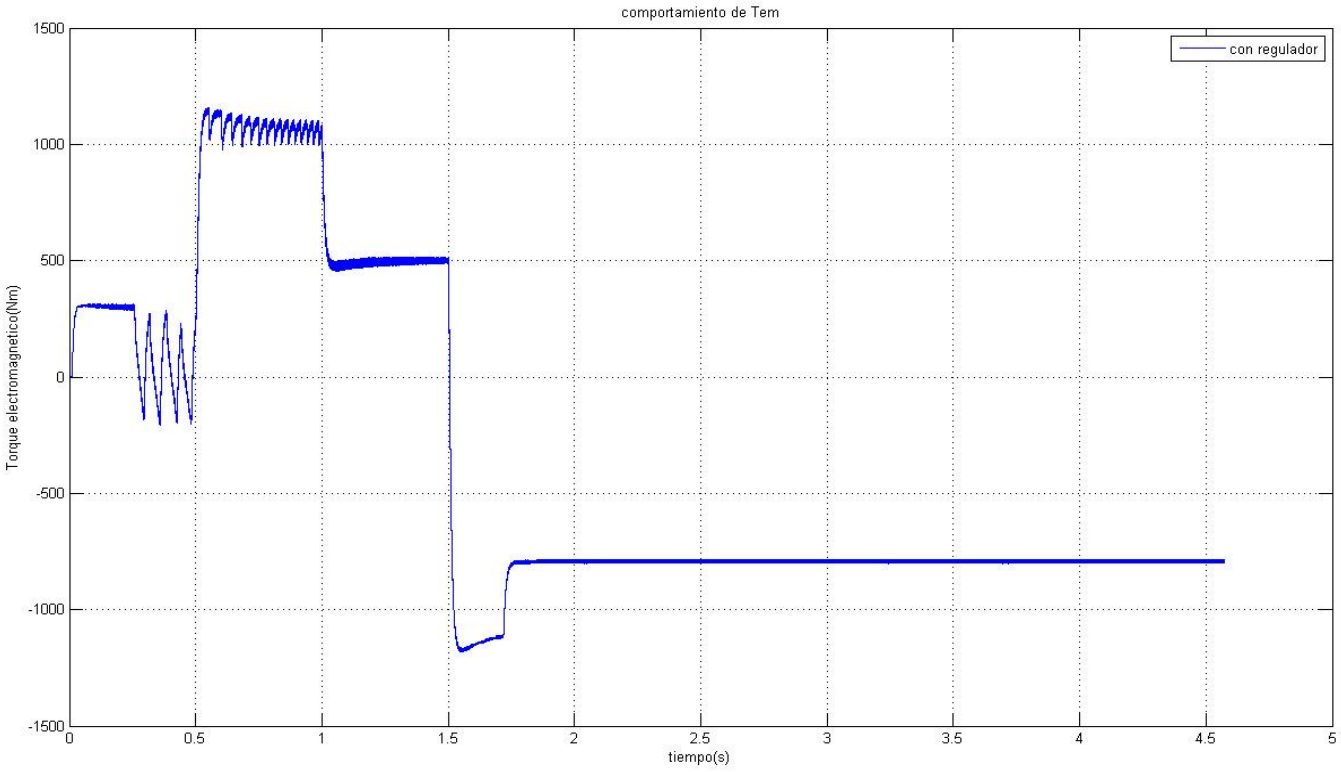


Figura 2. Gráfica del Torque electromagnético para el 100%de la carga nominal

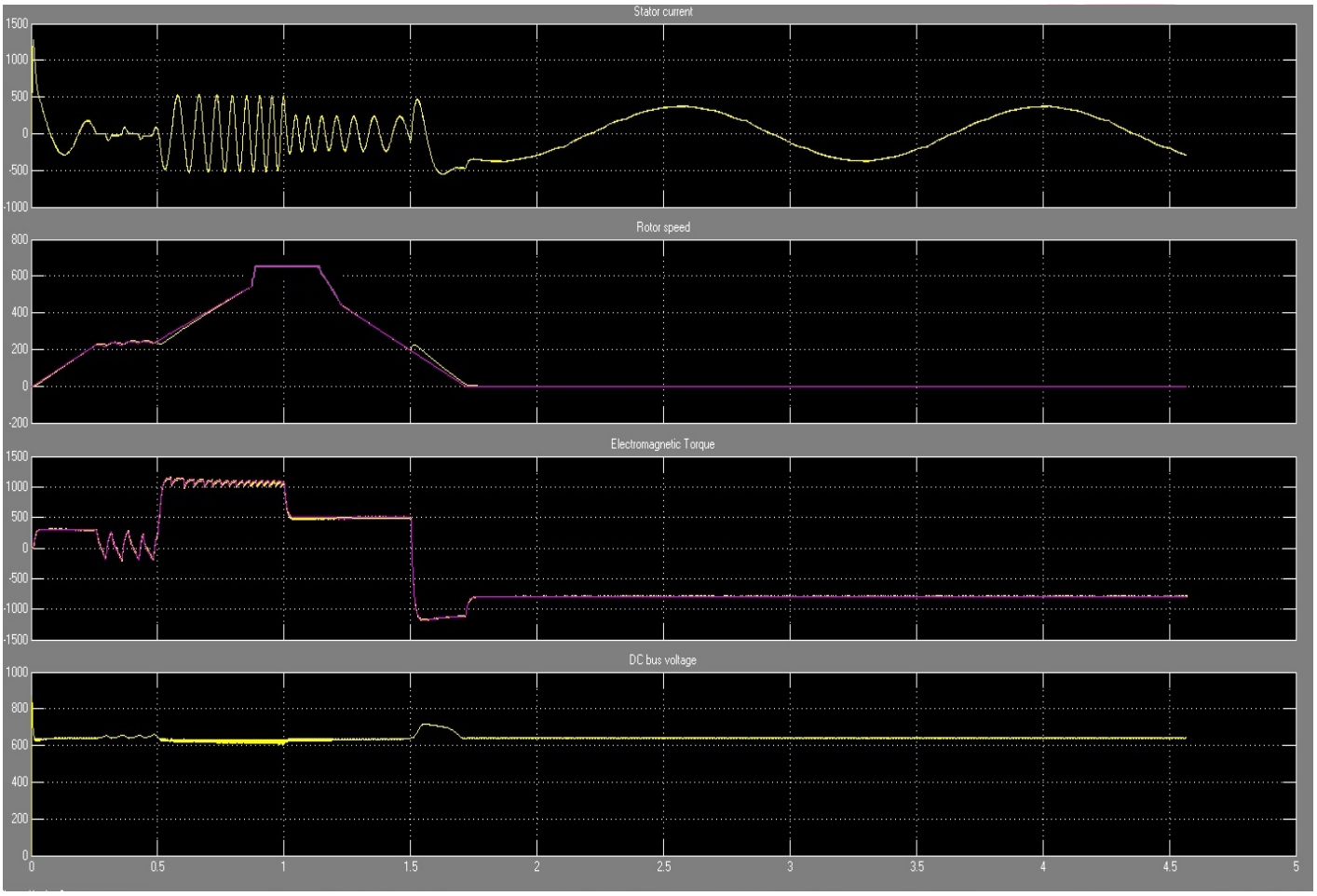


Figura 3. Gráfica donde se muestran todas las mediciones realizadas para el 100% de la carga nominal

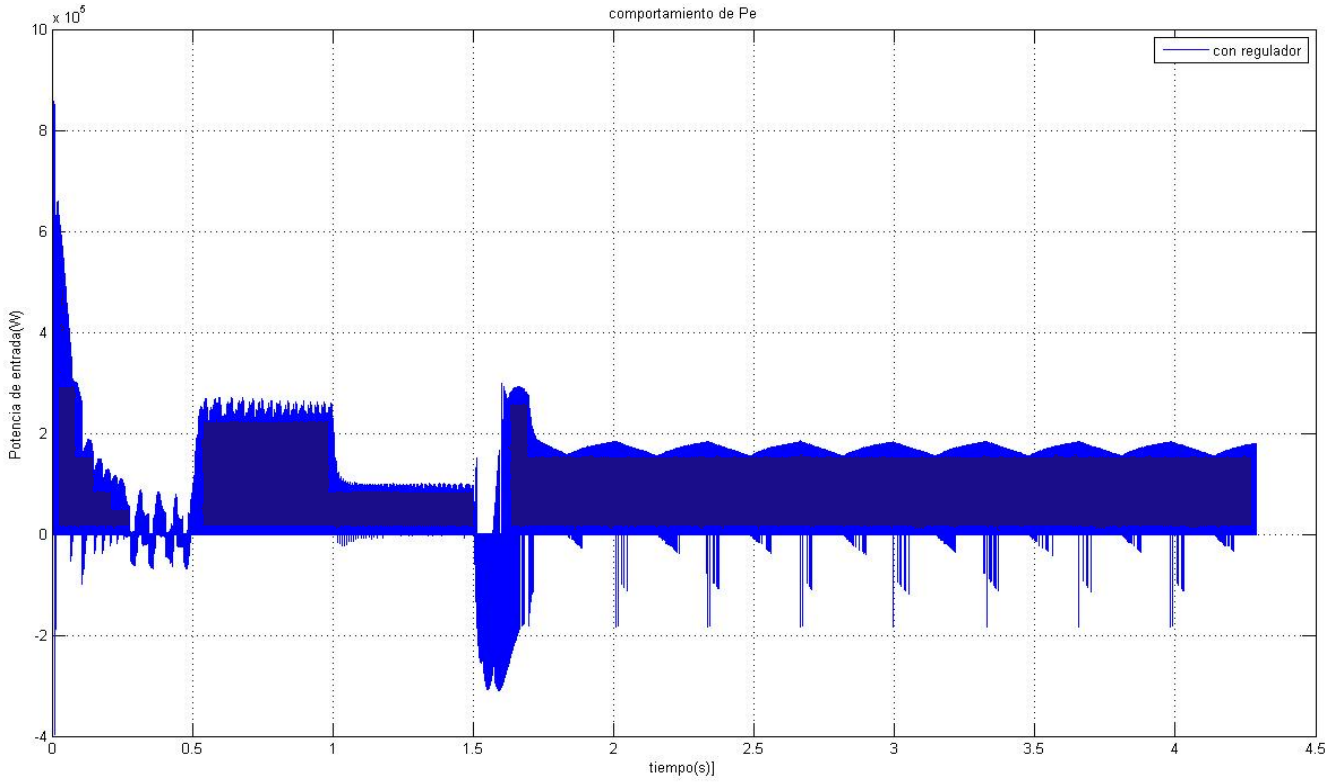


Figura 4. Gráfica de la potencia de entrada para el 75% de la carga nominal

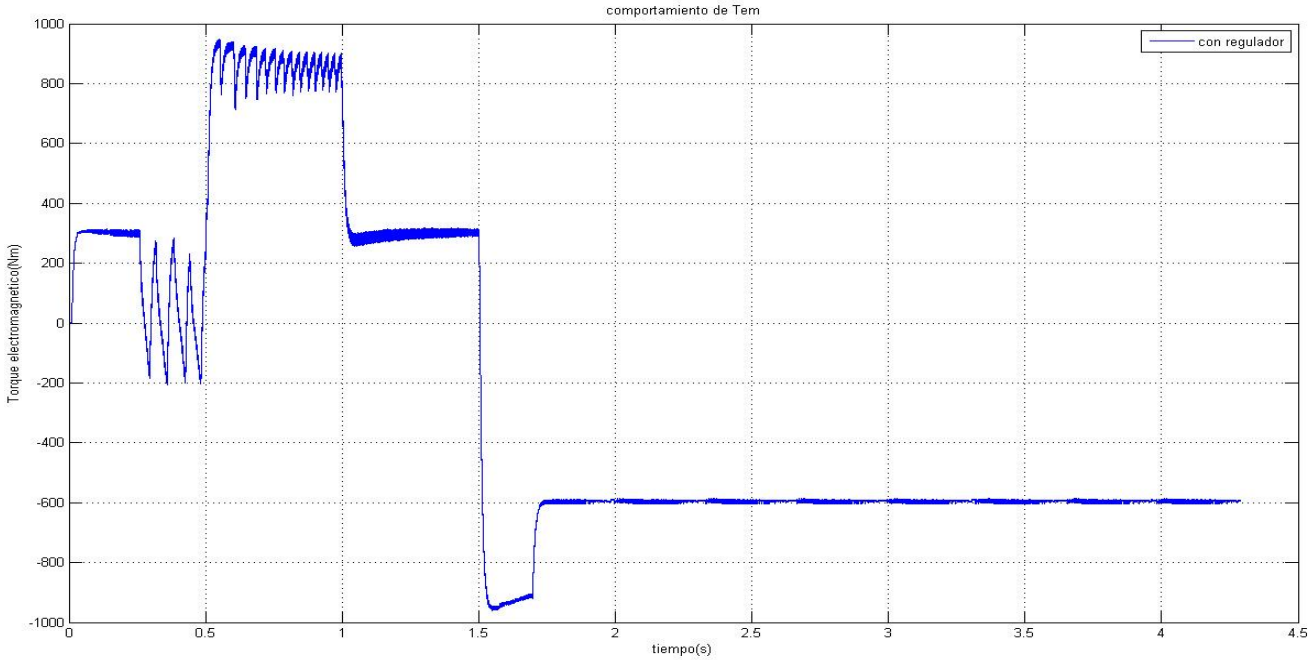


Figura 5. Gráfica del Torque electromagnético para el 75% de la carga nominal

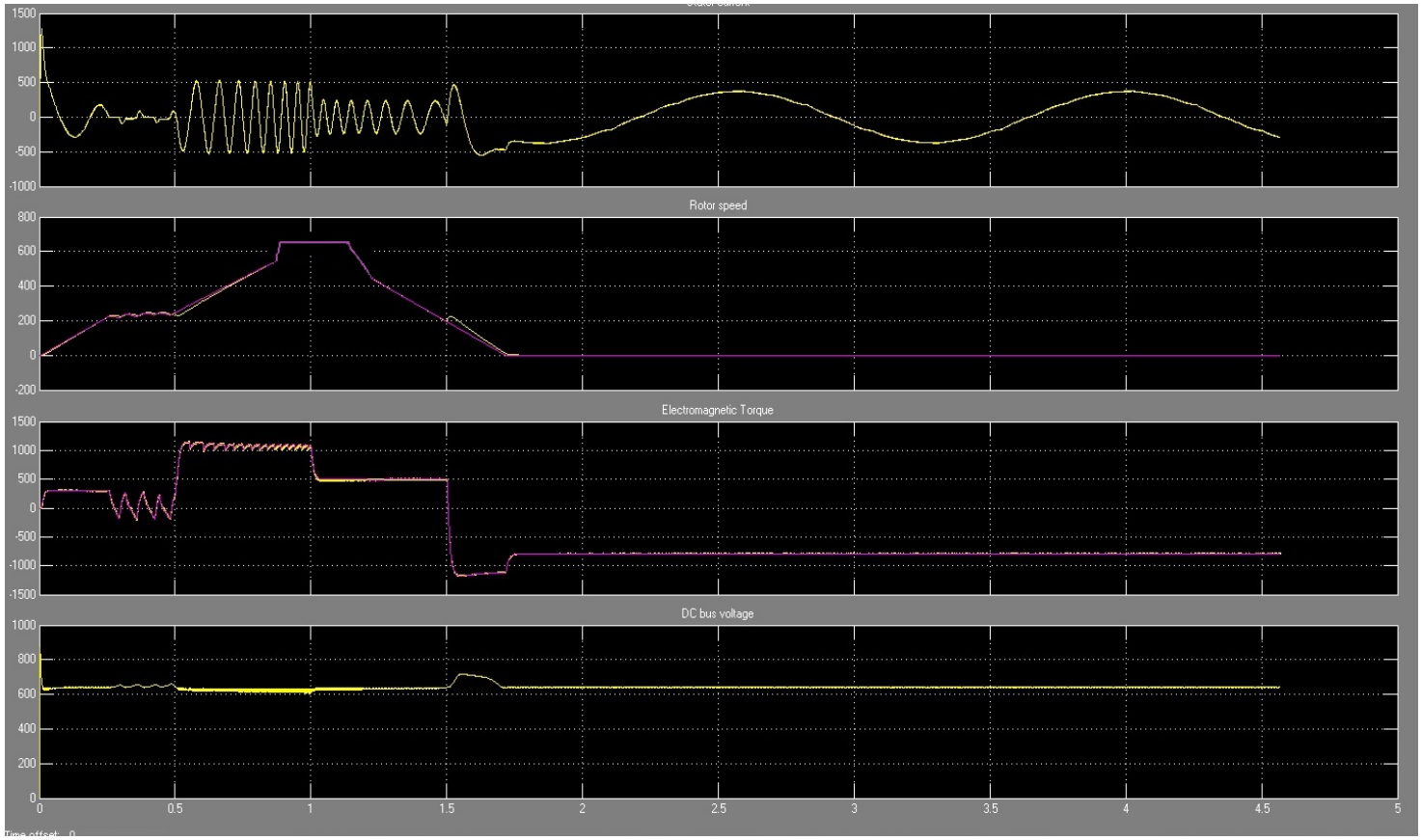


Figura 6.Gráfica donde se muestran todas las mediciones para el 75% de la carga nominal

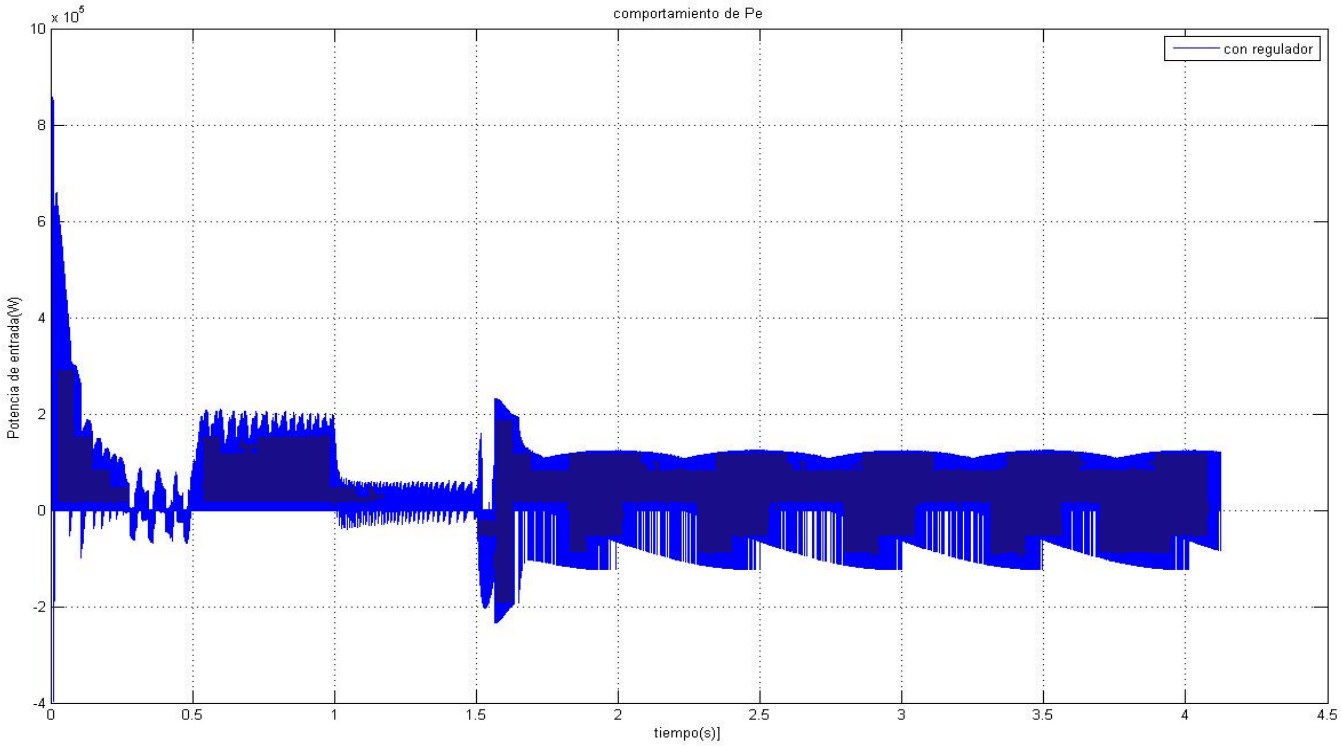


Figura 7.Gráfica de la potencia de entrada para un 50% de la carga nominal

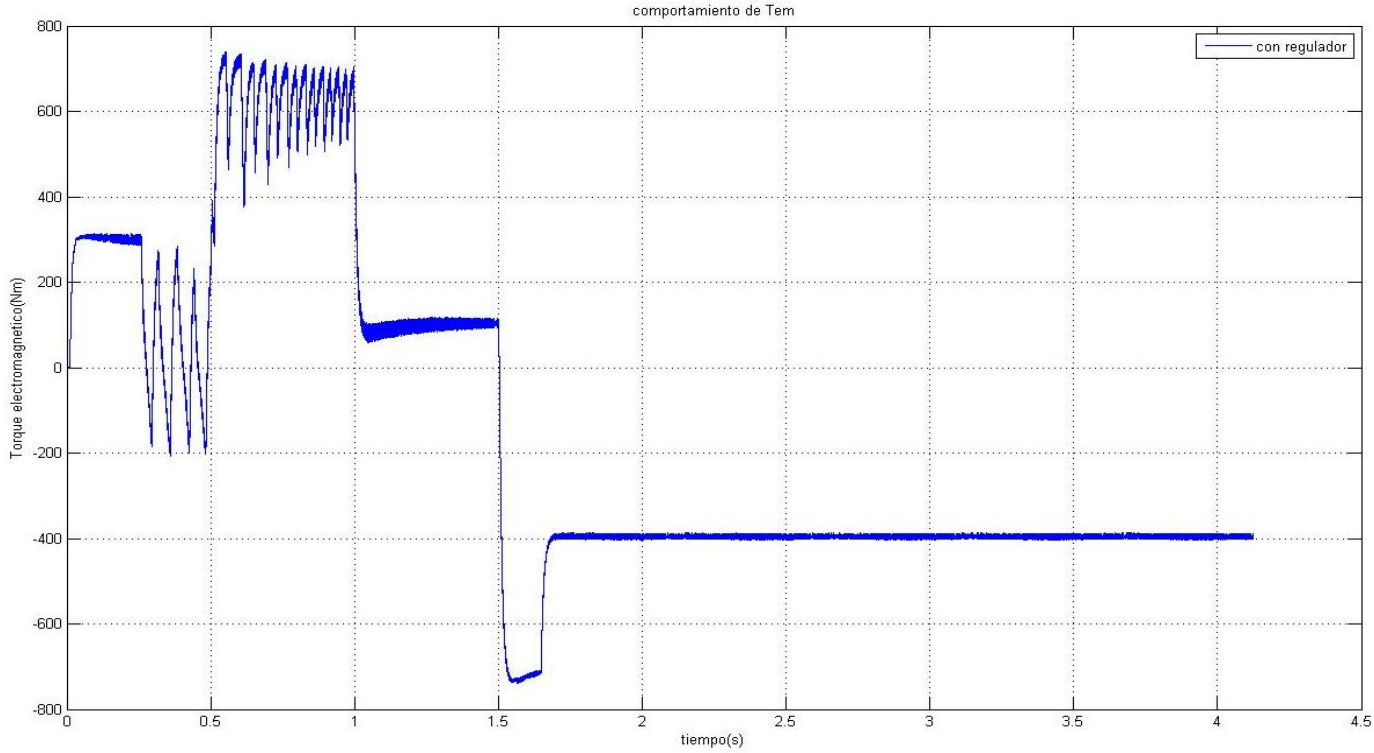


Figura 8.Gráfica del Torque electromagnético para el 50% de la carga nominal

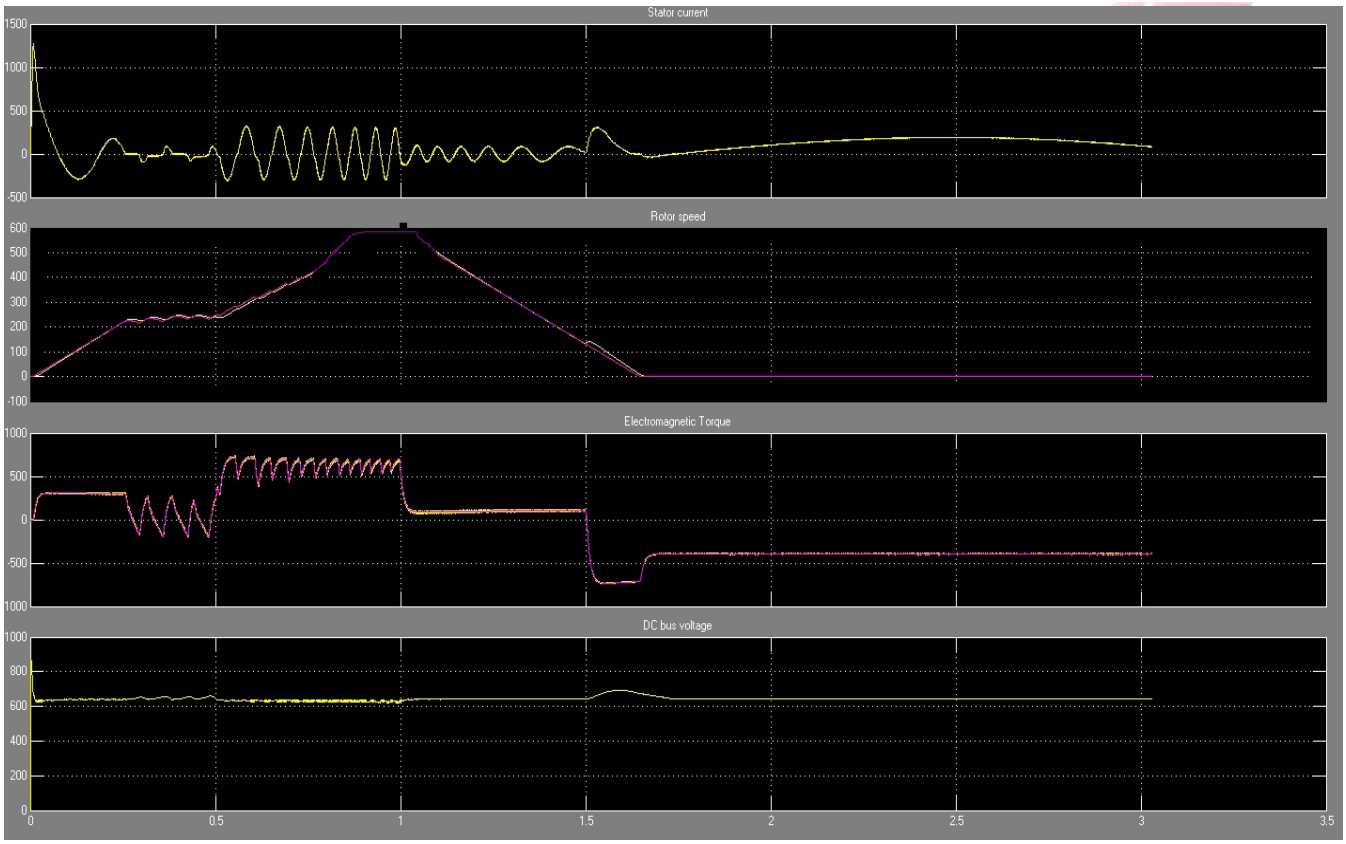


Figura 9. Gráfica donde se muestran todas las mediciones para el 50% de la carga nominal

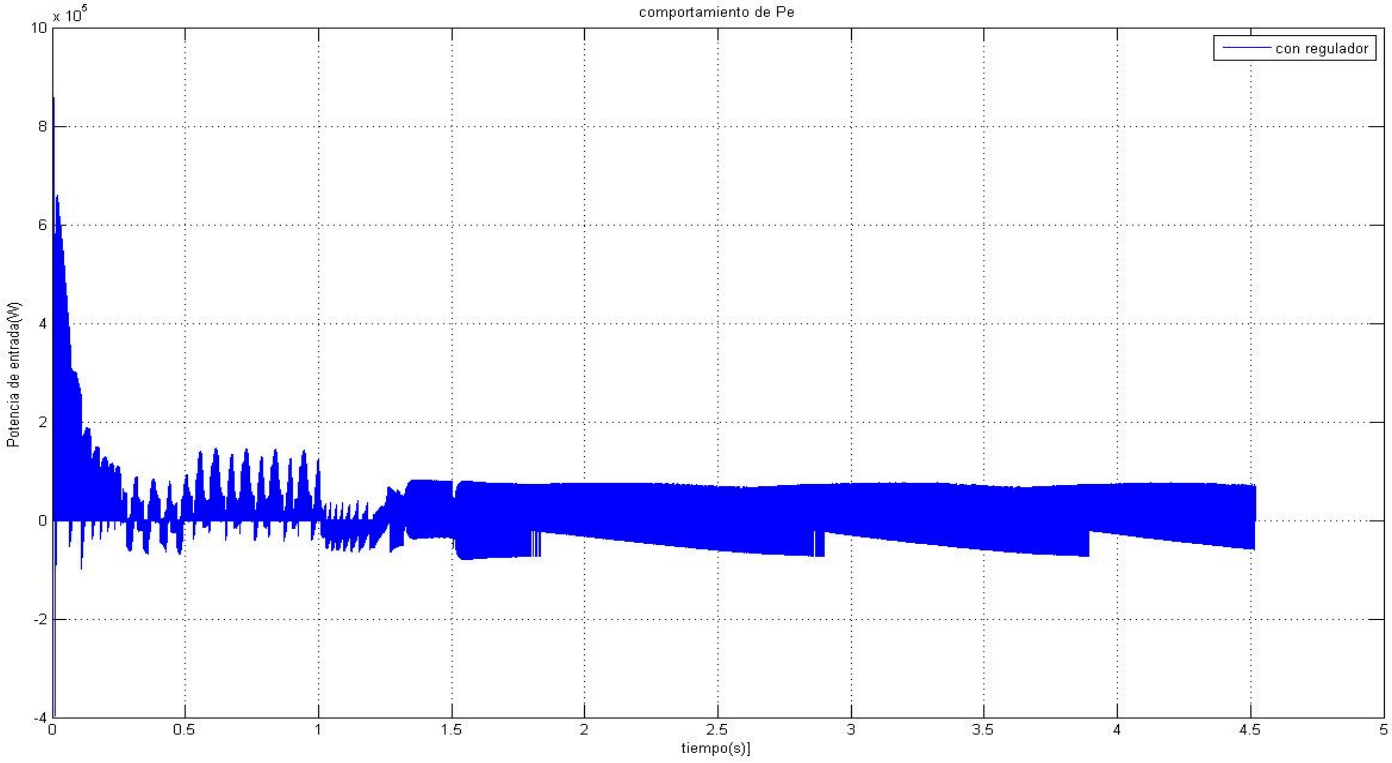


Figura 10. Gráfica de la potencia de entrada para un 25% de la carga nominal

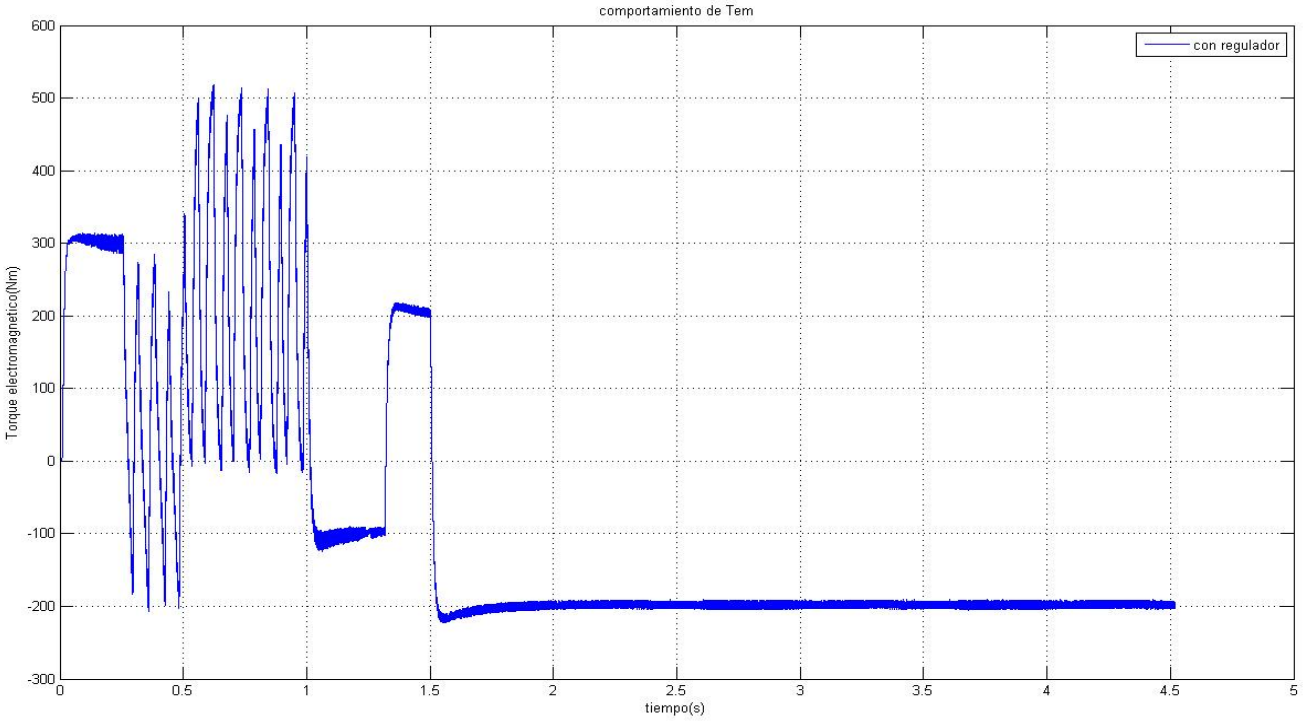


Figura 11. Gráfica del Torque electromagnético para el 25% de la carga nominal

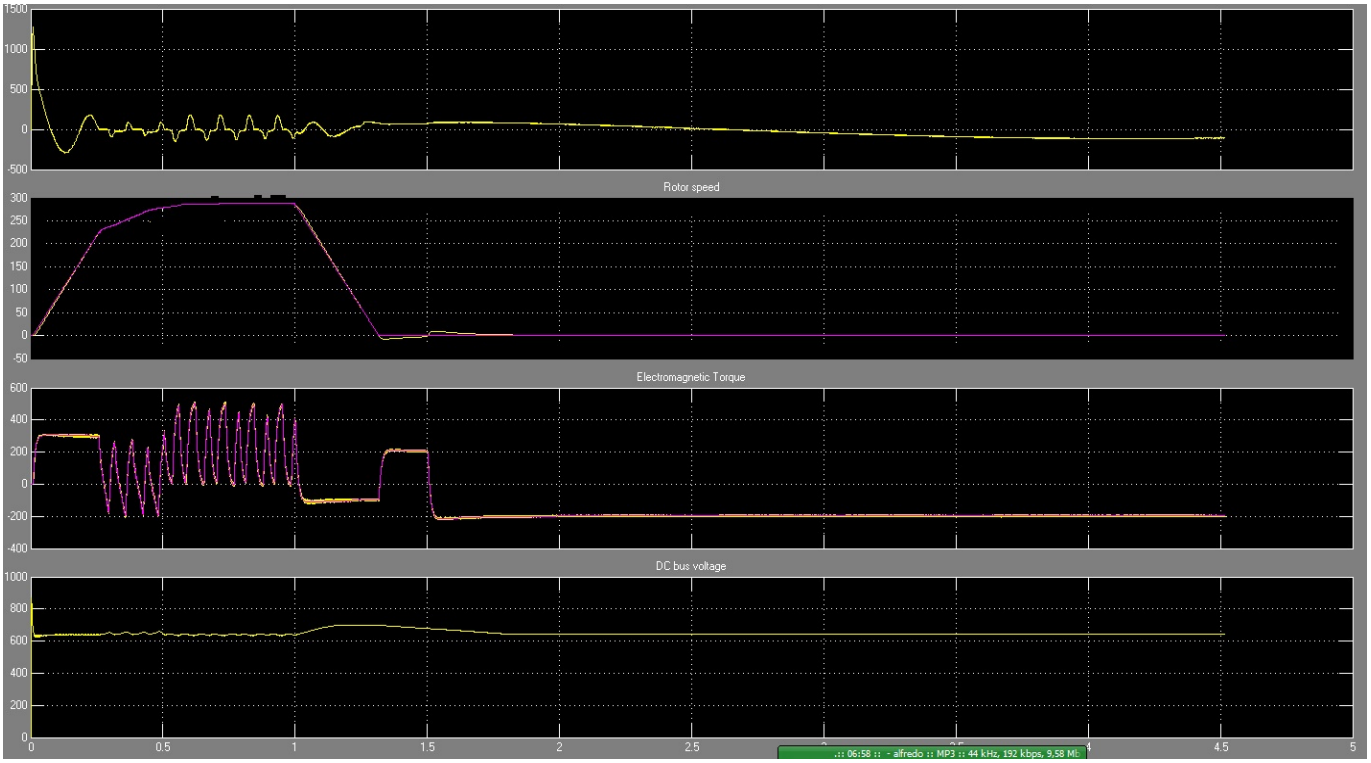


Figura 12. Gráfica donde se muestran todas las mediciones para el 50% de la carga nominal