



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

Trabajo de Diploma

En Opción al Título de Ingeniero Eléctrico

Título: Observador de eficiencia para accionamiento con motor de inducción usando agentes difusos con variador de Velocidad Yaskawa.

Autor: Alfredo Ramón Ávila Pérez

Tutor: Dr. Luís Delfín Rojas Purón

Dpto. Ingeniería Eléctrica .ISM, Moa, Holguín

Ing. Miguel Álvarez Domínguez

Empresa René Ramos Latour Nicaro

Ing. Ernesto Coello Velásquez

Empresa Ernesto Guevara de Moa.

Agradecimientos

En especial a mis padres Annia Lis Pérez Segura y Rafael Parra Ávila por su amor y apoyo en todo momento.

A mi Hermana y novia Lianna y Yeilin que en los momentos más difíciles siempre tienen un beso, una frase o alguna travesura para alegrar.

A muchas personas que aunque ya no estén físicamente han sido mi fuente de inspiración y el camino a seguir.

En resumen a toda mi familia y no podía dejar de agradecer a mi abuelo Fidencio Pérez Doimeadios quien siempre estuvo a mi lado en los momentos más difíciles.

A mi tutor Dr. Luís Delfín Rojas Purón con sus críticas, sugerencias, confianza y lucha para conmigo.

A todos los profesores, por los conocimientos y experiencia que me transmitieron, 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.

Dedicatoria

A mi tía y mi abuela:

Ester Pérez Doimeadios y Mirna Segura Farran.

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

En el presente trabajo se implementan las herramientas para la creación de un observador de la eficiencia mediante algoritmos difusos. Se realiza una búsqueda bibliográfica de los temas relacionados con eficiencia energética en los motores de inducción, se exponen los fundamentos teóricos de las herramientas a aplicar en la investigación, también se analiza mediante simulaciones el estado actual de la eficiencia en los motores de la Empresa Cmdte Ernesto Che Guevara concentrándonos en la planta de Lixiviación, se establece una comparación entre dos situaciones de los motores de la planta de lixiviación, primero los motores sin el regulador difuso y luego estos con el regulador difuso. Se determinan así las deficiencias que afectan el proceso productivo y se proponen las medidas de conservación y ahorro de energía.

Summary

In the present work, the efficiency observer was implemented by means of logic diffuse algorithms. A bibliography search of the topics related with energy efficiency in induction motors was realized, the theoretical foundations of the tools are exposed to apply in the investigation, and another analysis made was the simulation of the current state of the efficiency of the motors of the Cmdte. Che Guevara company, concentrating in the lixiviation plant, making a comparison of two situations of the motors in the same plant, firstly for the motors without a diffuse regulator and later on with a regulator. The deficiencies are determined that affect the productive process and so the proposal of conservation measurements and energy saving.

Índice

Introducción General.....	1
Capítulo I: Descripción del accionamiento con motor de inducción.	3
1.1 Introducción.....	3
1.2 Accionamiento con motor de inducción para un sistema de bombas centrífuga para el transporte de pulpa laterítica.	3
1.2.2 Optimización de eficiencias de los motores desde sus diseños.	10
1.2.3 Mejoramiento de la eficiencia desde esquemas de control.	10
1.3 Características de operación del motor de inducción.....	12
1.3.1 Motores asincrónicos, jaula de ardilla.	13
1.3.2 Aplicaciones industriales de los motores.	14
1.3.3 Propulsiones eléctricas.....	16
1.3.4 Fallas de los motores eléctricos.....	17
1.3.5 Eficiencia en los motores eléctricos.....	19
1.4 Conclusiones.....	29
Capítulo II: Descripción del variador de velocidad Yaskawa.....	30
2.1 Introducción.....	30
2.2 Descripción del variador.....	31
2.2.1 Características de Diseño.....	32
2.2.2 Características de Operación.	33
2.2.3 Características de Protección.	35
2.2.4 Condiciones de Servicio.	35
2.2.5 Entradas y Salidas.....	36
2.2.6 Características adicionales para V/f.	36
2.2.7 Normas y Confiabilidad.....	36
2.2.8 Opciones.....	36
2.2.9 Otros modelos de variadores Yaskawa.	38
2.3 Esquema de potencia. Circuito de mando.....	40
2.3.1 Instrucciones y normas para su uso.	41
2.4 Protocolos de comunicaciones.....	41
2.5 Aplicaciones en motores eléctricos.	42
2.5.1 Aplicaciones específicas en las que se utiliza.....	43
2.5.2 Otras aplicaciones.	43
2.6 Conclusiones.....	44
Capítulo III: Diseño del observador difuso de torque de carga.	45
3.1 Introducción.....	45
3.2 Esquemas utilizados en MATLAB.	45
3.3 Conclusiones parciales.	53
Capítulo IV: Simulación del controlador difuso asistido por MATLAB.....	55
4.1 Introducción.....	55
4.2 Resultados obtenidos en las simulaciones.....	56
4.3 Conclusiones parciales.	75
Capítulo V: Valoración económica del trabajo.	75
5.1 Introducción.....	75
5.2 Cálculo del aporte económico.	75

5.3 Cálculo del tiempo de la inversión.....	77
5.3.1 Valoración ambiental.....	78
5.3.3 Valoración social.....	79
5.4 Conclusiones parciales.....	80
Conclusiones.....	81
Recomendaciones.....	82
Bibliografía.....	83
Anexos.....	0

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 una red difusa.

La estructura del controlador de velocidad se basa en un observador de eficiencia y un estimador de velocidad. La condición de cargas variables es ajustada con el uso de un bloque difuso.

Situación problemática

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 un observador difuso 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 diapason de carga mecánica en su árbol, sin sensor de velocidad, usando las cualidades del sistema inteligente.

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

Autor: Alfredo Ramón Ávila Pérez

Objetivo General

Diseñar un estimador de eficiencia para un accionamiento con motor de inducción que trabaje sin sensor y se auto-ajuste ante cualquier condición de carga mecánica, basado en una red difusa.

Resultados esperados:

- ❖ Describir el sistema de accionamiento eléctrico con motor de inducción.
- ❖ Ofrecer el diagrama de bloque para el control del motor eléctrico usando una red difusa.
- ❖ Brindar un observador de torque de carga para el control del motor eléctrico.
- ❖ Elaborar un bloque estimador difuso 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-Methodológico 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 Mixta Moa Niquel SA. El objetivo de esta planta en dicha empresa es disolver selectivamente el níquel y el cobalto del mineral. El ácido sulfúrico concentrado es usado como lixivante. El circuito de lixiviación consiste de cinco trenes independientes, cada uno tiene cuatro reactores verticales tipo Pachuca conectados en serie. Las bombas de fondo de los espesadores envían la pulpa a los precalentadores de contacto directo, donde la pulpa es calentada con vapor de baja presión hasta 80 0C. La pulpa precalentada fluye por gravedad a uno de los dos tanques de almacenaje. Desde los tanques de almacenaje la pulpa es bombeada con bombas centrífugas a las bombas de desplazamiento las cuales envían la pulpa a los calentadores por contacto directo, donde la pulpa es calentada a 246oC, con vapor de alta presión (44atm). Este vapor es de una combinación de vapor de venteo de los reactores y vapor fresco suministrado de la planta eléctrica y la planta de ácido. La pulpa calentada pasa del calentado al primer reactor a (A), de cuatro conectados en serie,

donde a la vez se alimenta el ácido sulfúrico concentrado. Cada reactor tiene un tubo central y es agitado por la inyección de vapor de alta presión. La pulpa pasa de un reactor al otro por tuberías de reboso. La pulpa de reboso del cuarto reactor (D), fluye a dos enfriadores de pulpa en paralelo donde la temperatura es reducida a 135oC y cada uno de ellos descarga de los tanques despresurizadores a través de estranguladores de flujo. El vapor de baja presión usado en los precalentadores de pulpa es generado en estos enfriadores. La descarga de la pulpa en los tanques despresurizadores es por gravedad y entonces a través de un tanque de sello común al circuito de lavado contracorriente. El vapor de baja presión de los tanques despresurizadores es usado para precalentar la solución que entra a las autoclaves de precipitación. A continuación se muestra el diagrama de flujo tecnológico de la planta de Lixiviación de la Empresa Moa Níquel SA.

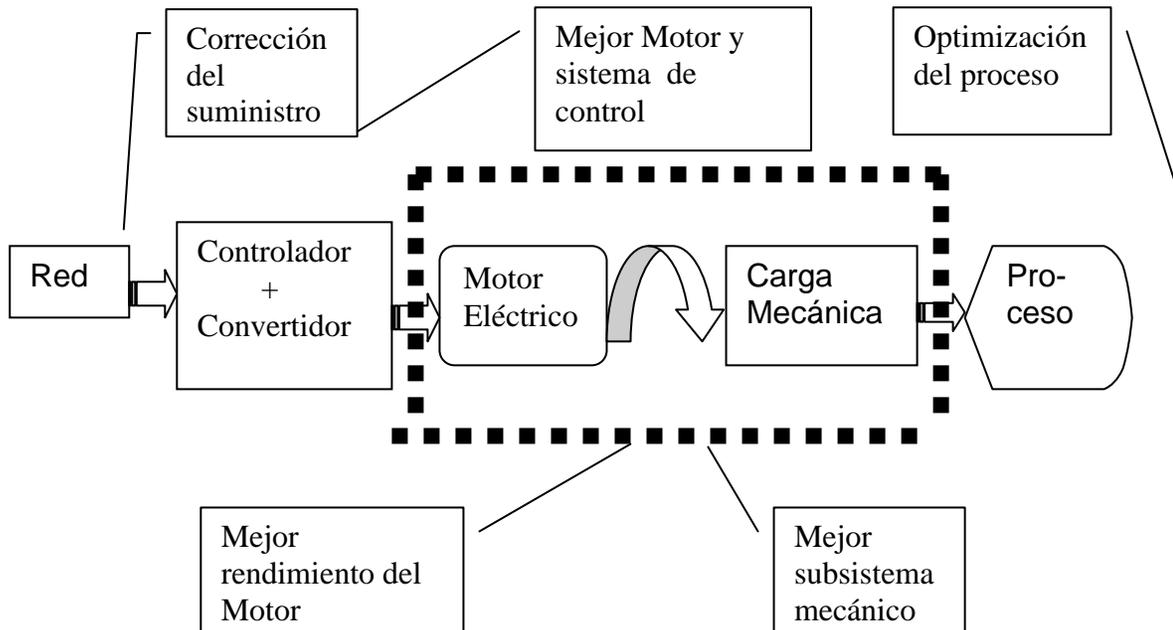


Figura 1.2 Sistema de accionamiento eléctrico y oportunidades de mejoramiento de sus rendimientos

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.

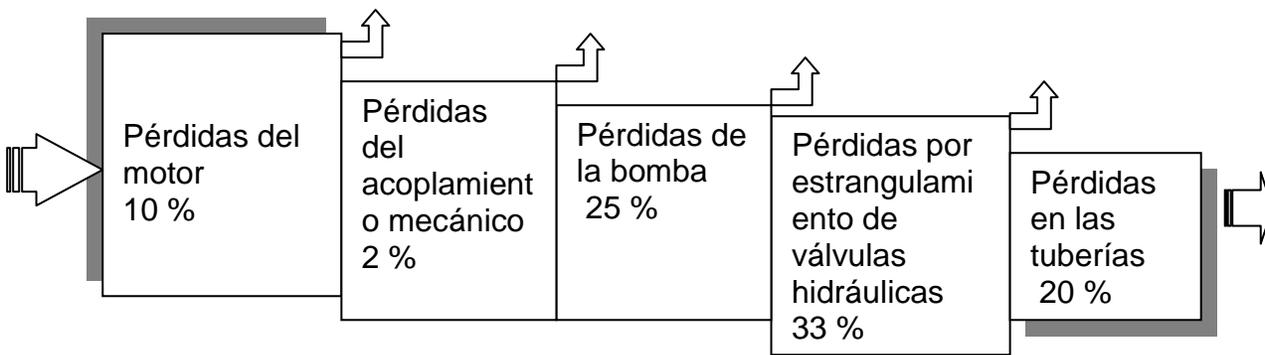


Figura 1.3 Diagrama de pérdidas en un sistema de accionamiento eléctrico de bombas centrífugas

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 significativamente 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 $\eta_{\max} = f(\text{costos (USD)})$, $\eta_{\max} = f(\text{Cos } \varphi)$, $\eta_{\max} = f(\Delta p)$, 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 asíncronos nunca se alcanza la velocidad del sincronismo, los bobinados del rotor cortan siempre el flujo giratorio del campo inductor.

1.3.1 Motores asíncronos, 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. Cuando 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 asíncrono sincronizado, su construcción es muy parecida a la del motor asíncrono con el rotor bobinado con anillos rozantes, con la diferencia de que una de las 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.

ASINCRONICOS	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerte arranque. 	<input type="checkbox"/> Falta de potencia mediana.
--------------	--	---

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:

- ❖ Polvos combustibles, explosivos, abrasivos o conductores.
- ❖ Condiciones de pelusa o mugre excesivas, en donde la acumulación de mugre y polvo podría entorpecer la ventilación.
- ❖ Vapores químicos o vapores y gases inflamables o explosivos.
- ❖ Radiación nuclear.
- ❖ Vapor, aire cargado de sal o vapores de aceite.
- ❖ Lugares húmedos o muy secos, calor radiante, infestación de plagas o atmósferas que favorezca el crecimiento de hongos
- ❖ Choques, vibraciones o carga mecánica externa, anormales.
- ❖ Empuje axial o fuerzas laterales anormales sobre el eje del motor.
- ❖ Desviación excesiva de la intensidad de voltaje.
- ❖ Factores de desviación del voltaje de línea que excedan de 10 %.
- ❖ Desequilibrio mayor que el 1 % en el voltaje de línea.

- ❖ Situaciones en donde se requiere bajo nivel de ruido
- ❖ Velocidades mayores que la velocidad máxima especificada.
- ❖ Funcionamiento en un cuarto mal ventilado, en fosas o con el motor inclinado.
- ❖ Cargas torsionales de impacto, sobrecargas anormales repetidas, funcionamiento en reserva o frenado eléctrico.
- ❖ Funcionamiento con la máquina impulsada parada con cualquier devanado excitado en forma constante.
- ❖ Operación con ruido muy bajo transportado por la estructura o en aire.

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 $\pm 5\%$ 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 $\pm 5\%$, 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 $\pm 5\%$ de la placa de características.

1.3.4 Fallas de los motores eléctricos

- ❖ Servicio de corta duración: El motor alcanza el calentamiento límite durante el tiempo de funcionamiento prescrito (10-30-60 minutos), la pausa tras el tiempo de funcionamiento debe ser lo suficientemente larga para que el motor pueda enfriarse.
- ❖ Servicio intermitente: Se caracteriza por periodos alternos de pausa y trabajo.
- ❖ Protección contra averías: Si se daña un motor, deben tomarse en cuentas los siguientes factores:
 - ❖ Clase de máquina accionada.
 - ❖ Potencia efectiva que debe desarrollar, HP.
 - ❖ Velocidad de la máquina movida, RPM.
 - ❖ Clase de transmisión (Acoplamiento elástico o rígido), sobre bancada común o separada, correa plana o trapezoidal, engranajes, tornillos sin fin, etc.
- ❖ Tensión entre fase de la red.

- ❖ Frecuencia de la red y velocidad del motor.
- ❖ Rotor anillos rozantes o jaula de ardilla.
- ❖ Clase de arranques, directo, estrella triángulo, resistencias estatóricas, resistencias retóricas, auto transformador, etc.
- ❖ Forma constructiva.
- ❖ Protección mecánica.
- ❖ Regulación de velocidad.
- ❖ Tiempo de duración a velocidad mínima.
- ❖ Par resistente de la máquina accionada (MKG).
- ❖ Sentido de giro de la máquina accionada mirando desde el lado de acoplamiento derecha, izquierda o reversible.
- ❖ Frecuencia de arranque en intervalos menores de dos horas.
- ❖ Temperatura ambiente si sobrepasa los 40 °C.
- ❖ Indicar si el motor estará instalado en áreas peligrosas: Gas, Humedad, etc.
- ❖ El motor funciona en forma irregular
- ❖ Avería en los rodamientos.
- ❖ La caja del motor está sometida a tensiones mecánicas.
- ❖ Acoplamiento mal equilibrado.
- ❖ No arranca
- ❖ Tensión muy baja.
- ❖ Contacto del arrollamiento con la masa.
- ❖ Rodamiento totalmente dañado.
- ❖ Defecto en los dispositivos de arranques.
- ❖ Arranca a golpes
- ❖ Espiras en contacto.
- ❖ Motor trifásico arranca con dificultad y disminución de velocidad al ser cargado
- ❖ Tensión demasiado baja.
- ❖ Caída de tensión en la línea de alimentación.
- ❖ Estator mal conectado, cuando el arranque es estrella triángulo.
- ❖ Contacto entre espiras del estator.
- ❖ Trifásico produce zumbido internamente y fluctuaciones de corriente en el estator.
- ❖ Interrupción en el inducido.

- ❖ Trifásico no arranca o lo hace con dificultad en la conexión estrella
- ❖ Demasiada carga.
- ❖ Tensión de la red.
- ❖ Dañado el dispositivo de arranque estrella.
- ❖ Trifásico se calienta rápidamente
- ❖ Cortocircuito entre fases.
- ❖ Contacto entre muchas espiras.
- ❖ Contacto entre arrollamiento y masa.
- ❖ Estator se calienta y aumenta la corriente
- ❖ Estator mal conectado.
- ❖ Cortocircuito entre fases.
- ❖ Contacto entre arrollamientos y masa.
- ❖ Se calienta excesivamente pero en proceso lento
- ❖ Exceso de carga.
- ❖ Frecuencia de conexión y desconexión muy rápida.
- ❖ Tensión demasiado elevada.
- ❖ Tensión demasiado baja.
- ❖ Falla una fase.
- ❖ Interrupción en el devanado.
- ❖ Conexión equivocada.
- ❖ Contacto entre espiras.
- ❖ Cortocircuito entre fases.
- ❖ Poca ventilación.
- ❖ Inducido roza el estator.
- ❖ Cuerpos extraños en el entrehierro.
- ❖ La marcha no corresponde al régimen señalado por la placa.

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.

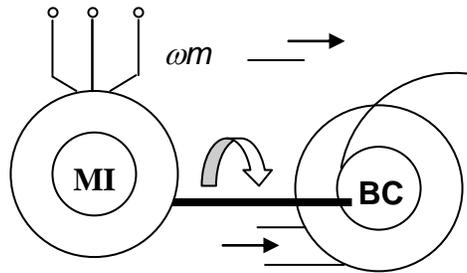


Figura 1.4 Grupo Motor de inducción (MI) con Bomba Centrífuga (BC)

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:

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

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, [°]

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:

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

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

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

Donde:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

La potencia electromagnética P_{em} y también llamada potencia en el entrehierro PAG es la encargada de enlazar, la potencia eléctrica de entrada del motor P_e con la potencia mecánica rotacional de salida P_s 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 M_{em} a una frecuencia angular sincrónica ω_s que entrega la potencia convertida P_{conv} en el árbol del motor con la frecuencia angular de rotación del rotor ω_r [Chapman, 2003], tal como se indica en la expresión (1.5):

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

Donde:

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

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

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

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

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 R_r/s en el conocido circuito equivalente por fase del motor de inducción (figura 1.5).

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

Donde:

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

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

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

Y la potencia del entrehierro total será:

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

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:

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

Y el par producido por el motor se convierte en:

$$M_{em} = 3 \cdot s \cdot \frac{U^2}{R_r \cdot \omega_s} = 3 \cdot \frac{I_r^2 \cdot R_r}{\omega_s} \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (1.9)$$

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

$$P_s = M_c \cdot \omega_r \quad (1.10)$$

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

$$M_{em} = p \cdot \frac{m_1}{2} \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \Psi_r \cdot I_M \quad (1.11)$$

Siendo:

p – es el número par de polos del motor.

m_1 – es el número de fases del motor.

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

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

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

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

El módulo de la corriente del estator está dado como:

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

Donde:

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

En la expresión (1.11) el torque electromagnético está en función del flujo del rotor Ψ_r , el cual está determinado por la corriente de magnetización I_{mag} , como (1.13):

$$\psi_r = I_{mag} \cdot L_m \quad (1.13)$$

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

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

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 Δp_{ac} están determinadas por (1.15):

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

Donde:

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

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

Siguiendo las expresiones (1.13), (1.14) y (1.15); con cambios en la corriente de magnetización I_{mag} , esencialmente porque variando la frecuencia del motor se modifica su reactancia de magnetización X_m , y entonces varía la f.e.m. E_1 de la máquina, pudiéndose disminuir así las pérdidas en el acero Δp_{ac} .

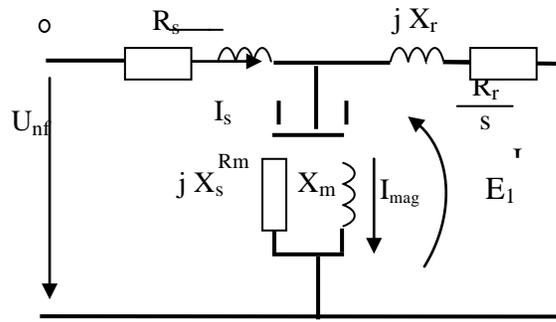


Figura 1.5 Circuito equivalente simplificado del motor de inducción.

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 ω_e . 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):

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

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

Donde:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\psi_{dr} = L_m \cdot I_{ds} \quad (1.18)$$

Siendo equivalentes la componente I_{ds} con la corriente de magnetización I_{mag} [Bose y otros, 1997].

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

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

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

La potencia de entrada del accionamiento es obtenida desde:

$$P_e = I_{ds} \cdot U_{ds} + I_{qs} \cdot U_{qs} \quad (1.20)$$

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

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

$$\eta_{MI} = \frac{M_c \cdot \omega_r}{P_e} \quad (1.21)$$

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

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

Donde

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

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

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

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

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

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

Donde

ρ Es la densidad del fluido transportado por la bomba, [kg/m³]

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

Q es el caudal o gasto desarrollado por la bomba, [m³/s]

η_b es el rendimiento de la bomba, [%]

η_{tr} - 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 [m³/s].

El caudal desarrollado por la bomba centrífuga está determinado por:

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

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,

[m²] ó [mm²]

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:

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

Donde

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

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

Con este parámetro n_{esp} 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):

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

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 $NPSH_{req}$, 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):

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

Donde

p_0 es la presión en el punto de medición del fluido en [Pa]

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

$NPSH_{req}$ es la carga neta de succión positiva requerida.

Δp_{pre} 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

- Al observar y describir el flujo tecnológico donde se desarrolla el accionamiento eléctrico, en que las condiciones de operación son únicas por su tipo en Cuba; se aprecia que las variables que inciden en la eficiencia del sistema de accionamiento de bomba centrífuga son: la potencia de entrada y la frecuencia angular de rotación del motor eléctrico, la densidad de la hidromezcla transportada, la altura de carga de presión y el caudal desarrollado por la bomba centrífuga.
- 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, lo cual necesita un estimador de eficiencia a esas diferentes condiciones de explotación.

Capítulo II

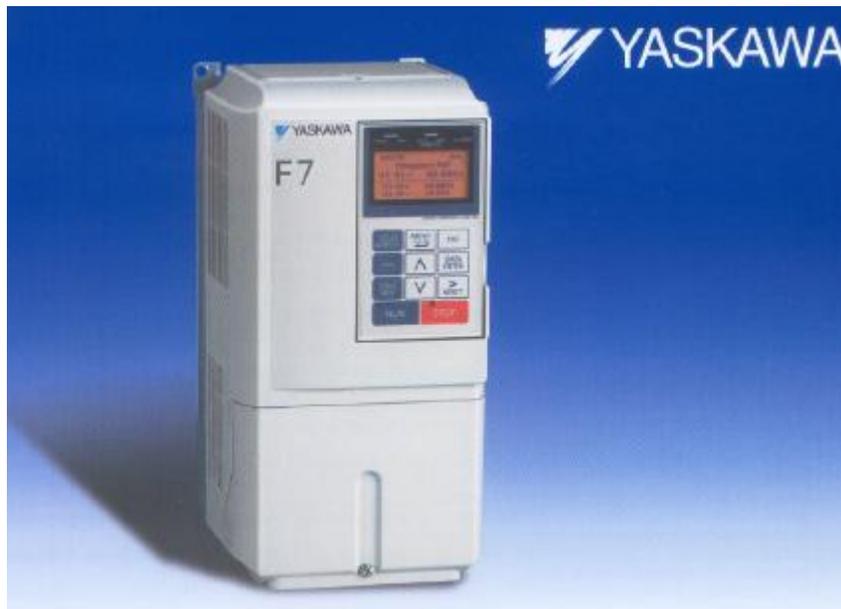
Capítulo II: Descripción del variador de velocidad Yaskawa

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 F7 puede 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 10V y salidas de relay programables.

2.2.1 Características de Diseño

- ❖ Microprocesador lógico 32-BIT tecnología desmontaje sobre superficie.
- ❖ Teclado digital con función manual/automático, Display: 5 líneas x 16 caracteres.
- ❖ 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 programable 1 amp. 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/4-20ma y 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 modelos de 30hp 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.

2.2.2 Características de Operación

- ❖ Potencias desde, 0,5 hp hasta 150 hp 230vac .En 440vac desde 0, 5hp hasta 500hp.
- ❖ Sobrecarga 150% por 60 segundos, en heavy-duty, y 110% por un minuto en normal duty (200% de valor pico).
- ❖ Torque de arranque: 150% a 1,0hz (v/f), 0,5hz en lazo abierto y 0,3 Hz en lazo cerrado.
- ❖ Frecuencia de salida: 300Hz en heavy duty 400Hz en normal duty.
- ❖ Reversa electrónica.

- ❖ Aceleración y desaceleración ajustables independientemente de 0,1 a 6000segundos.
- ❖ Relación del control de velocidad 40:1 en control v/hz. 50:1 en v/f con encoder, 200:1 en lazo abierto y 1000:1 en lazo cerrado.
- ❖ Regulación de velocidad 2 a 3% (v/f) 0.02% (Vf con P.G). 0, 2% en lazo abierto y 0,01 en lazo cerrado.
- ❖ Rechazo a frecuencias críticas (3 seleccionables, bandas ajustables).
- ❖ Eficiencia del Variador: 96-98%.
- ❖ Desplazamiento del factor de potencia: 0, 98.
- ❖ Resolución de la frecuencia: 0.01hz con referencia digital 0.1% con referencia análoga. 0.01Hz con Modbus.
- ❖ Patrón de relación voltios /hertz (v/hz) programable.
- ❖ Frenado con inyección DC en el arranque y parada con amplitud y duración ajustable con límite de corriente.
- ❖ Refuerzo automático de torque.
- ❖ Control ahorro de energía.
- ❖ Sostenimiento por pérdida de energía: 2 segundos.
- ❖ Sostenimiento por inercia.
- ❖ Búsqueda de velocidad.
- ❖ Auto arranque programable.
- ❖ Detección de la pérdida de la señal de realimentación.
- ❖ Detección de la pérdida de la señal de comunicación.
- ❖ Compensación de deslizamiento.
- ❖ Capacidad de control del punto flotante.
- ❖ Control PID, con función perdida en la realimentación.
- ❖ Auto sintonía dinámica y estática.
- ❖ Función seguidor de señal (BIAS y GAIN).
- ❖ Selección de formas de paro y marcha.
- ❖ Frenado dinámico de alta inercia.
- ❖ Frenado de alto deslizamiento.
- ❖ Capacidad de bus DC .común.
- ❖ Arranque desincronizado de rotación.

2.2.3 Características de Protección

- ❖ Refuerzo automático de torque, en todo el rango de frecuencia.
- ❖ Límite de corriente, prevención de paro en la aceleración/desaceleración y marcha.
- ❖ Protección de sobre carga al variador y al motor.
- ❖ Sobrevoltaje.
- ❖ Pérdida de fase Input /output.
- ❖ Sobre corriente instantánea.
- ❖ Cortocircuito fase/fase fase /neutro.
- ❖ Bajo voltaje.
- ❖ Cortocircuito con protección 65krmsy 100 krms con reactor DC. .Sobrecalentamiento del Variador.
- ❖ .Falla a tierra.
- ❖ Sobre torque.
- ❖ Bajo torque.
- ❖ Indicador de carga del circuito DC.
- ❖ Código de seguridad del programa.
- ❖ Prevención lógica 'hunting'.
- ❖ Prohibición de la función reversa.
- ❖ Controles óptimamente aislados.
- ❖ Aislación galvánica del control mediante auto acoplador.

2.2.4 Condiciones de Servicio

- ❖ Temperatura ambiente:-10 a40°C.
- ❖ Temperatura de almacenamiento: -20 a 60°C.
- ❖ Humedad95% no condensado.
- ❖ Altitud: 3300 ft.
- ❖ Factor de servicio: 1,0.
- ❖ Voltaje de entrada:-15 +10%
- ❖ Frecuencia de entrada:+/-5%50/60hz.
- ❖ No sensible a la secuencia de fase.

- ❖ Vibración 1G (10a 20Hz), 0.2G(20a50 HZ).
- ❖ Alimentación: +10% / -15%, sobre rangos especificados.

2.2.5 Entradas y Salidas

- ❖ Entrada analógica: De -10 a +10 VCC (20 Kohms) ó de 4 a 20 mA (250 ohms)
- ❖ Salida analógica: De -10 a +10 VCC ó de 4 a 20 mA, proporcional a los parámetros de salida.
- ❖ Tren de pulsos de entradas y salidas, hasta 32 KHz máximo.
- ❖ 8 Entradas digitales multifunción.
- ❖ Salidas digitales programables tipo A.
- ❖ Contacto de salida por falla tipo C.
- ❖ Terminales para comunicación RS-485/422.

2.2.6 Características adicionales para V/f

- ❖ Aumento de torque automático en todo el rango de velocidad.
- ❖ 15 curvas V/f preseleccionados, más una programable con infinitas posibilidades.
Compensación de resbalamiento.

2.2.7 Normas y Confiabilidad

- ❖ Aprobación UL, CUL, CE y otras
- ❖ IEC: 146A
- ❖ Tiempo promedio entre fallas (MBTF): superior a 28 años.
- ❖ Cada equipo probado con motor a plena carga.

2.2.8 Opciones

- ❖ Desconexión del breaker de alimentación.
- ❖ Operador moto externo.
- ❖ .Redes de comunicación.
- ❖ Reactor de línea DC externo (si no tuviera).

- ❖ Filtros de ruido EMC.
- ❖ Software drive wizard de monitoreo.
- ❖ Software específico al cliente.
- ❖ Módulos de frenado. .
- ❖ Reactores AC (Input /output).
- ❖ Módulo de frenado dinámico (si no tuviera).

Figura 2.2 Conexión eléctrica

◆ Conexión eléctrica
■ Cableado del variador

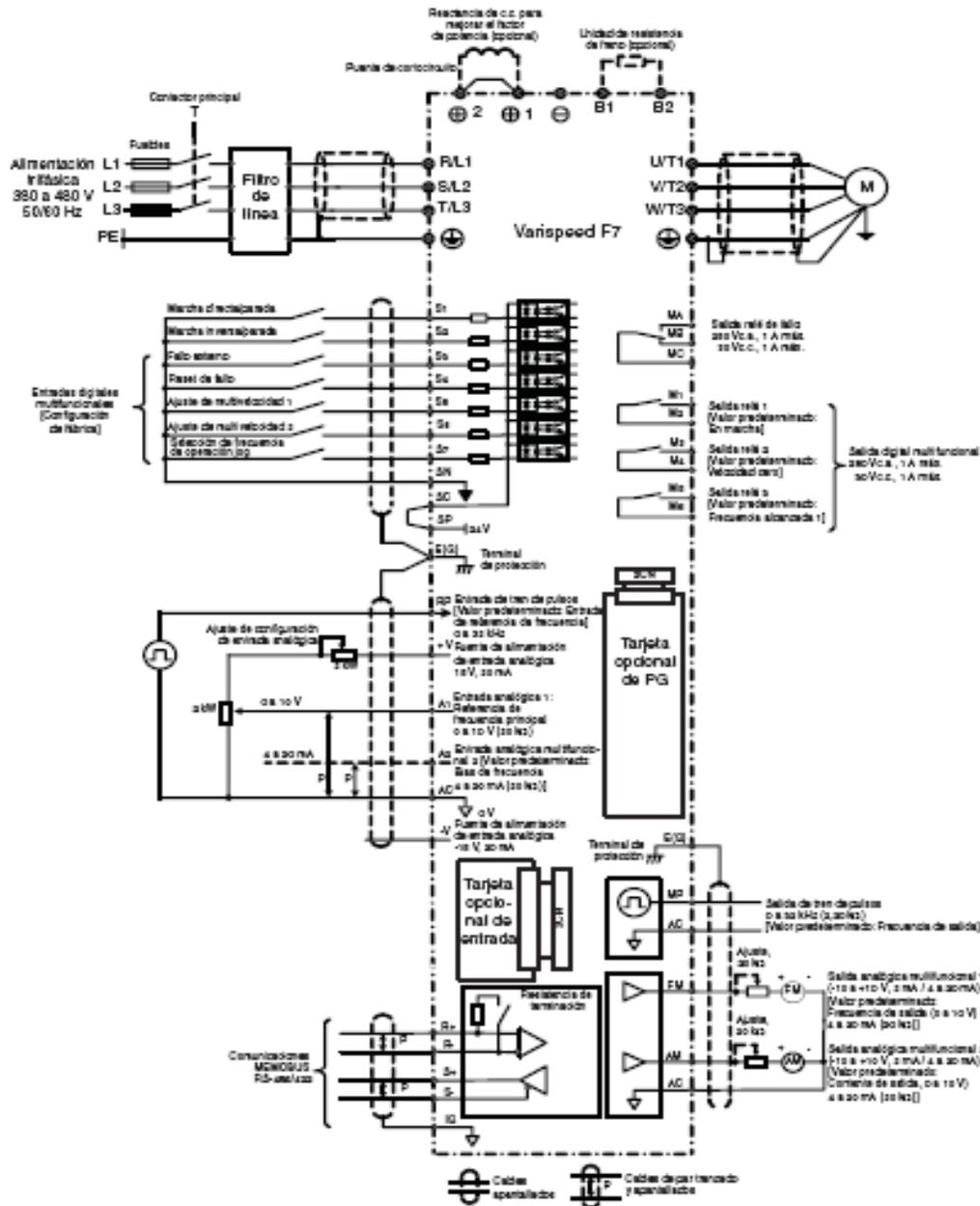


Fig. 4 Diagrama de cableado

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.

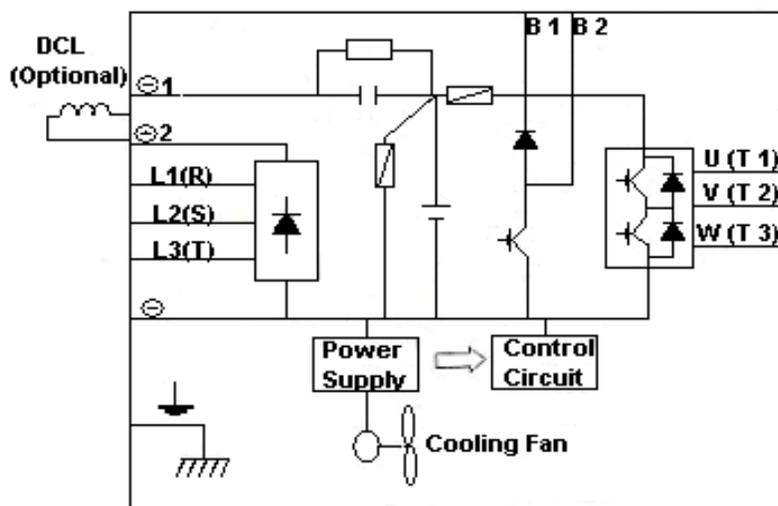


Figura 2.2.1 Diagrama en bloques del variador de velocidad

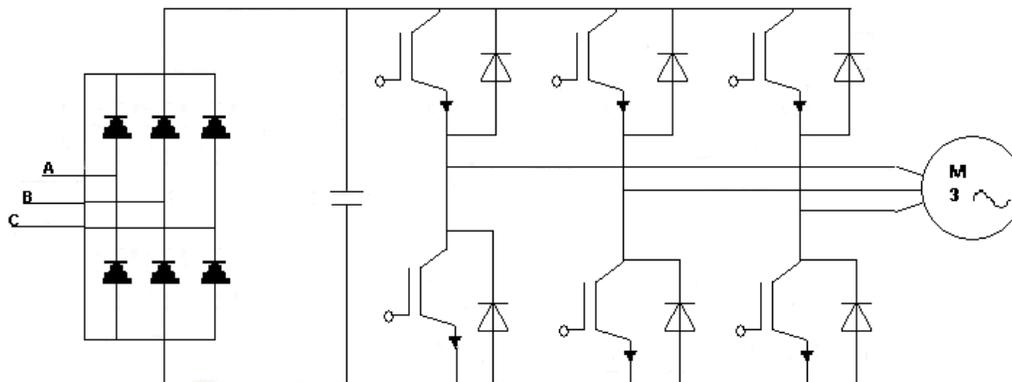


Figura 2.2.2 Esquema de potencia del variador de velocidad Yaskawa

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 autómatas 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

- ❖ 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: Diseño del estimador de eficiencia difuso del accionamiento eléctrico

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.

3.2 Esquemas utilizados en MATLAB

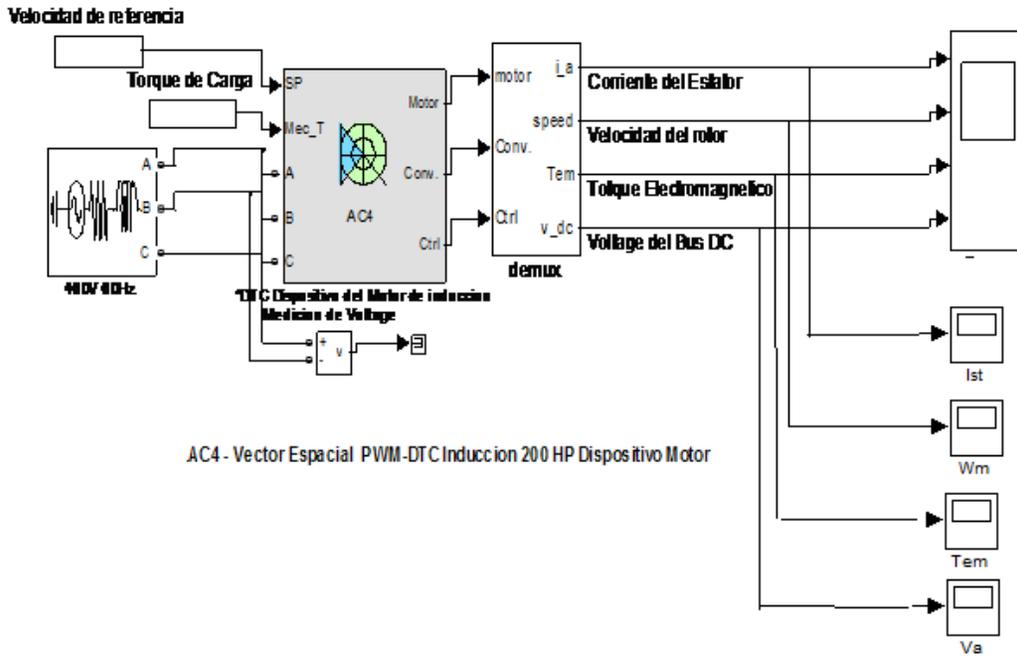


Figura 3.1 Esquema general utilizado para obtener las mediciones de los distintos parámetros

Esquema de control de eficiencia en accionamiento de motor de inducción que acciona bomba centrífuga, usando controlador difuso. 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.

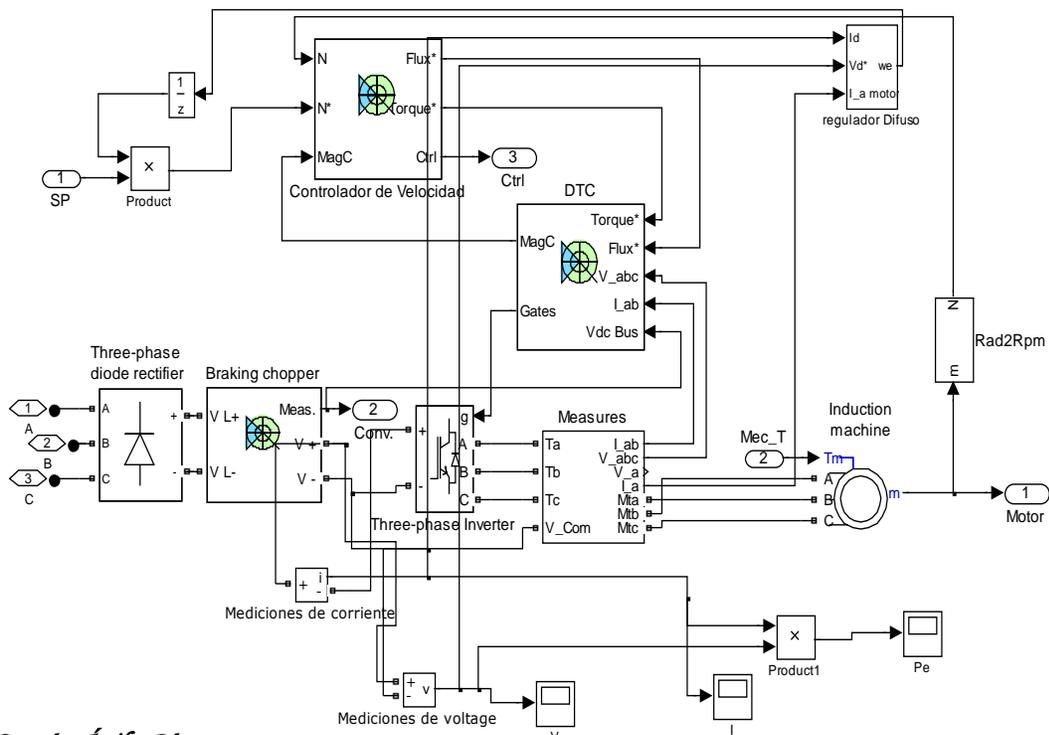


Figura 3.2 Esquema donde se muestra el diagrama del variador de velocidad con el regulador difuso

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 I_d y U_d mediante las cuales se obtiene la potencia de entrada.

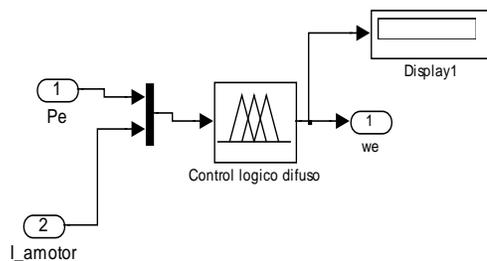


Figura 3.3 Esquema de el regulador difuso

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.

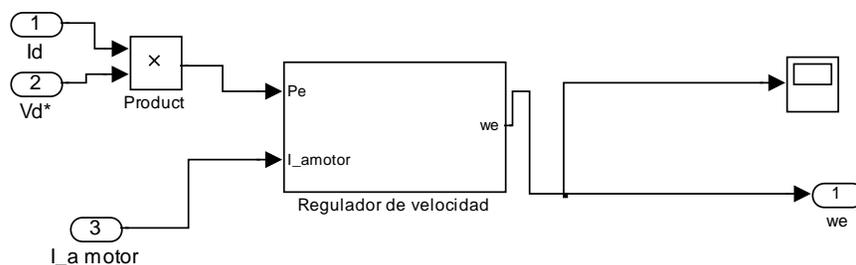


Figura 3.4 Esquema de mediciones del regulador difuso

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.

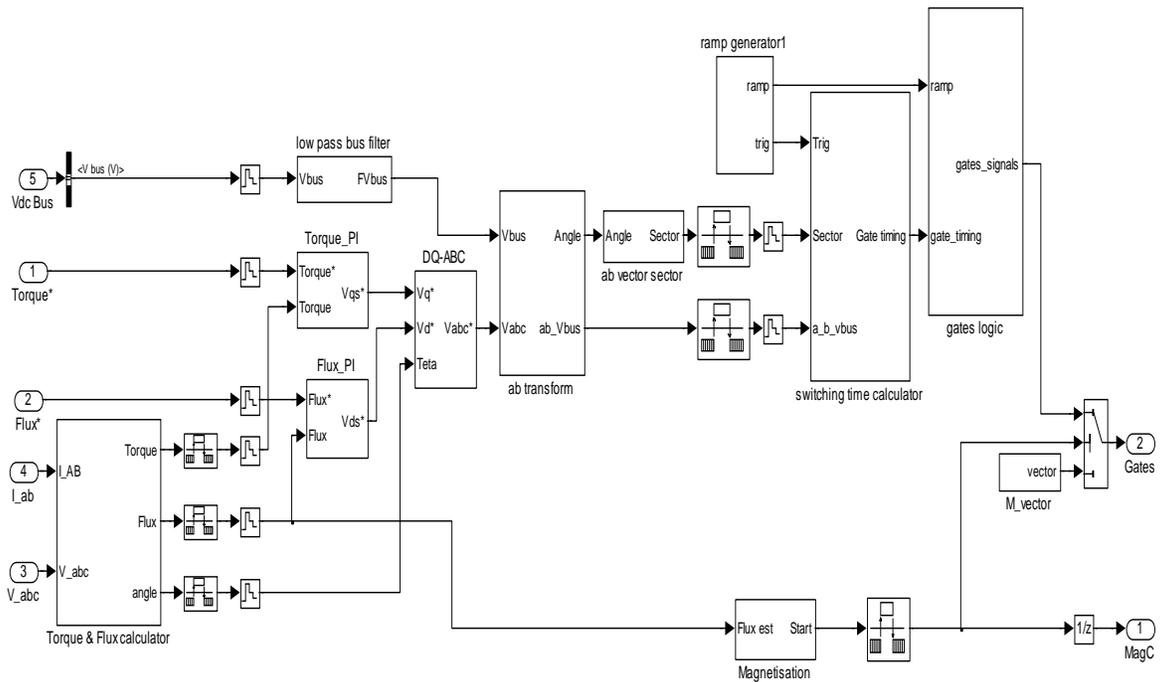


Figura 3.5 Esquema de mediciones de V_{qs} y V_{ds}

Este es el esquema donde se realizan las mediciones de las variables V_{qs} y V_{ds} y se observa su comportamiento para los distintos estados de carga.

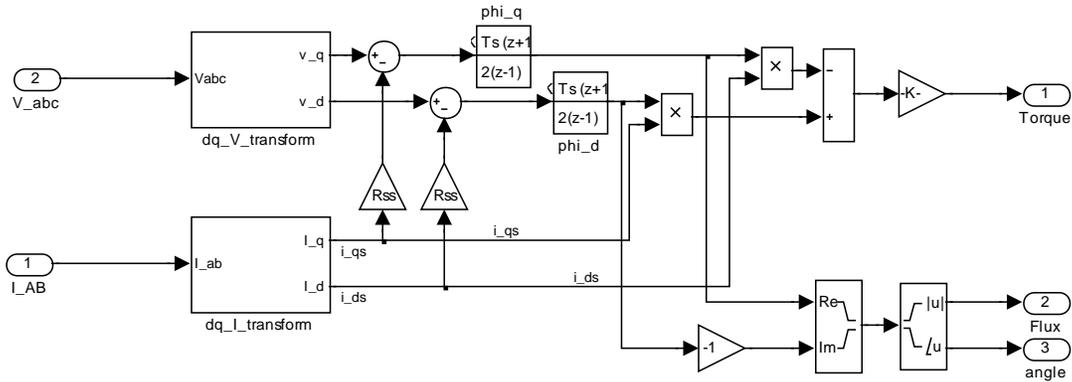


Figura 3.6 Esquema de mediciones de Iqs e Ids

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

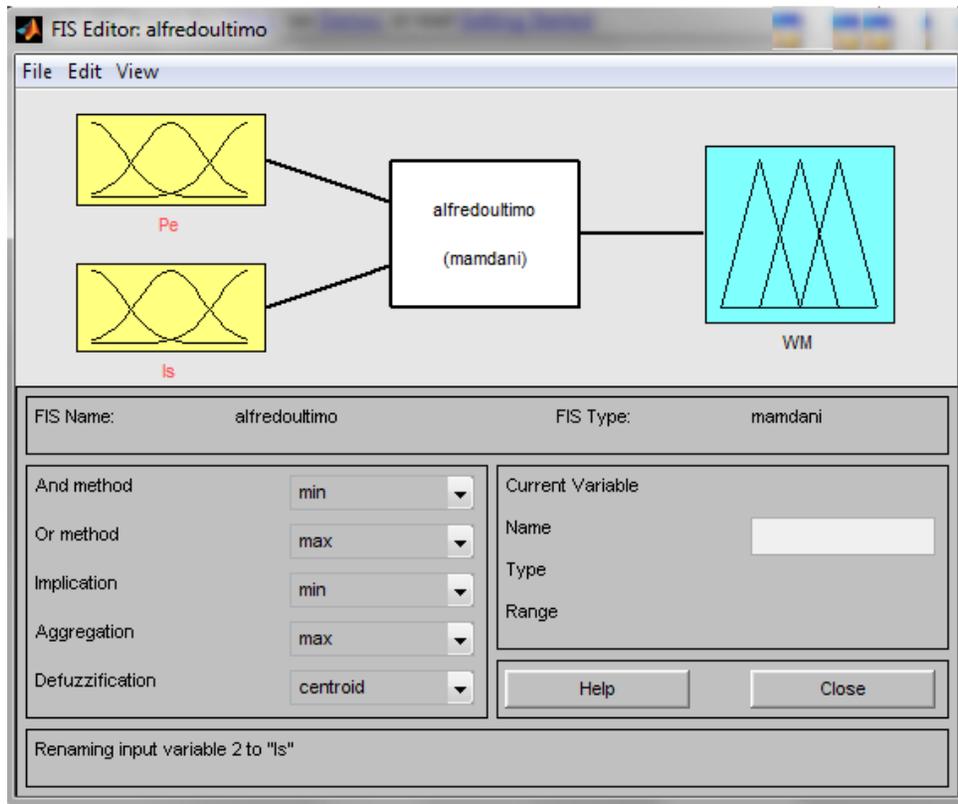


Figura 3.7 Regulador difuso

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.

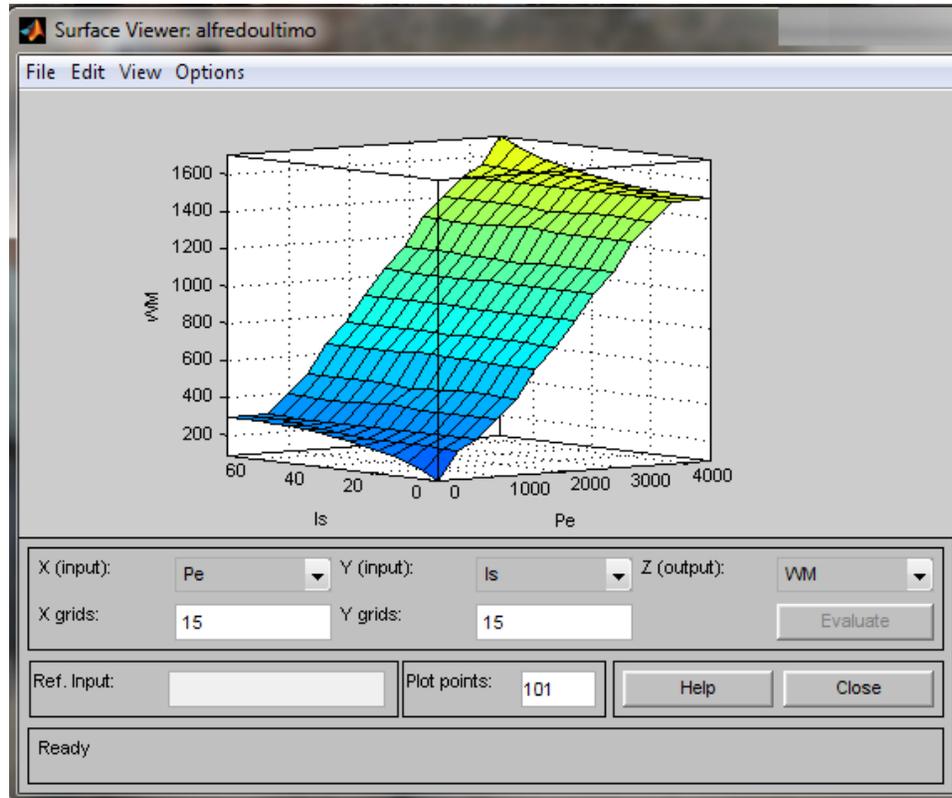


Figura 3.8 Visualizador de la superficie

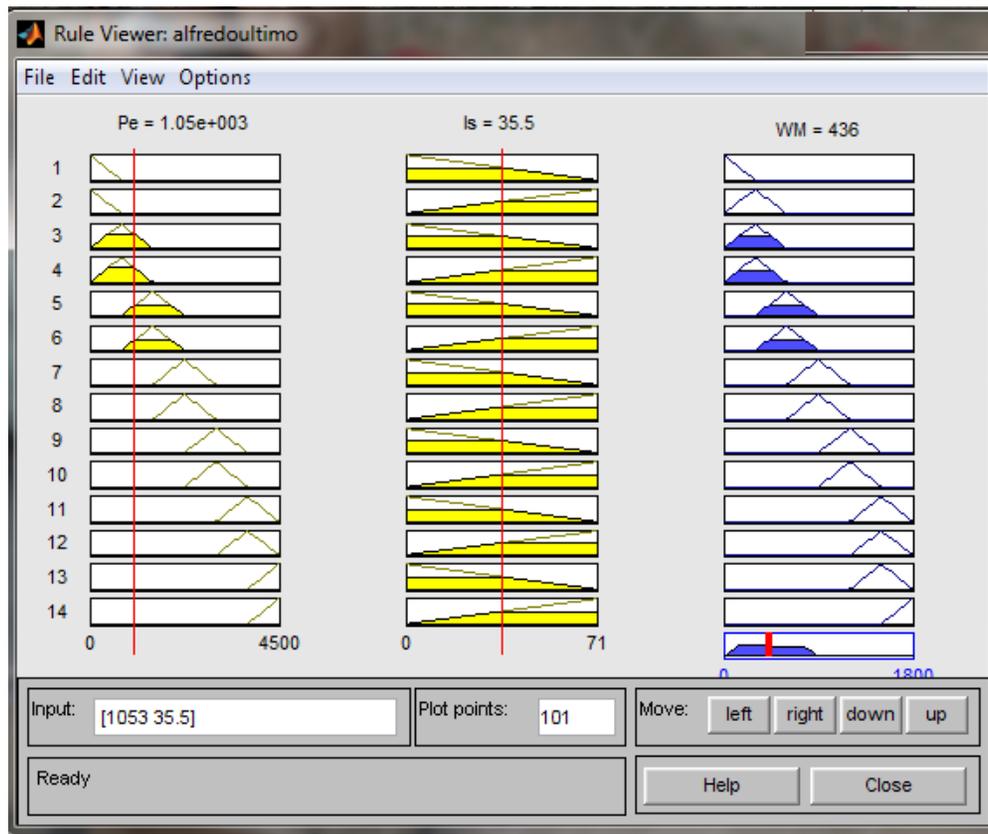


Figura 3.9 Visualizador de los ajustes difusos

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.

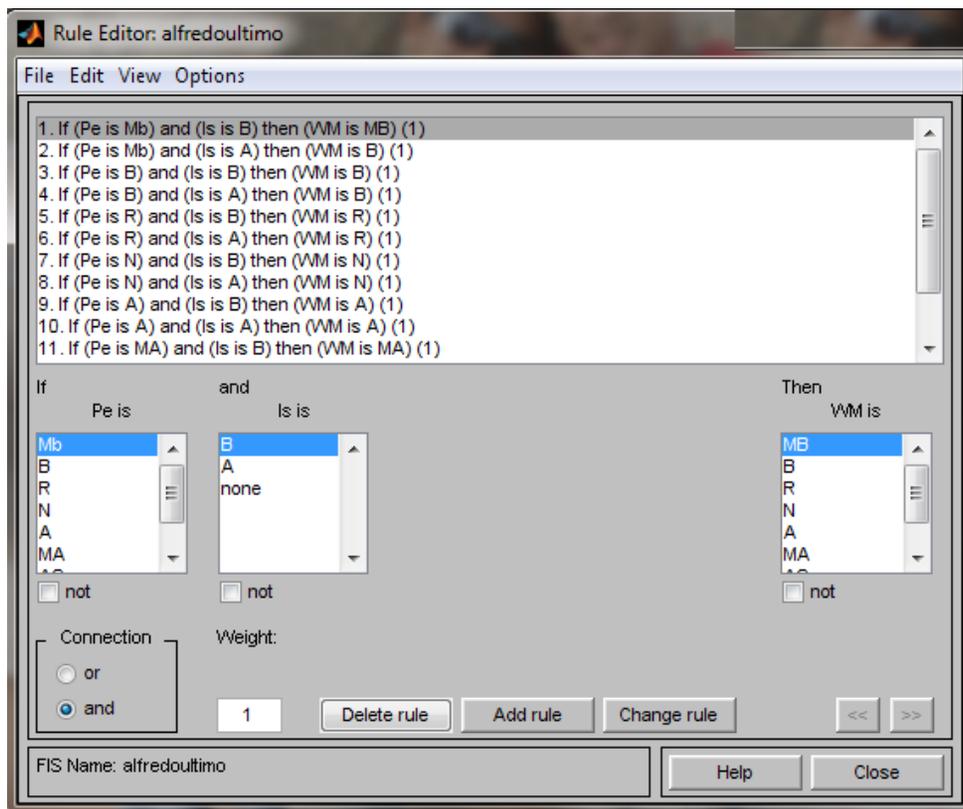


Figura 3.10 Ajustes difusos

En esta figura se muestra como se realizaron los diferentes ajustes difusos teniendo en cuenta la necesidad de tener a la salida una velocidad óptima para mantener así una buena eficiencia en los distintos estados de carga.

3.3 Conclusiones parciales

- ❖ Resultó adecuado el diseño del estimador difuso de eficiencia, teniendo en cuenta un bloque con arquitectura Mamdani, con dos variables de entrada (Potencia de entrada y corriente) y una variable de salida (velocidad).
- ❖ Las funciones de pertenencia utilizadas son de tipo triángulo, las cuales están enmarcadas en el universo industrial del accionamiento eléctrico.
- ❖ El visualizador de las reglas permite corroborar la validez con las mediciones de los cambios de los parámetros y predecir el comportamiento del accionamiento a diferentes estados de cargas.

Capítulo IV

Capítulo IV: Simulación del controlador difuso asistido por MATLAB

4.1 Introducción

En este capítulo se plantean los resultados de la experimentación del sistema de accionamiento eléctrico de bomba centrífuga.

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 controlador difuso si se siguen sus parámetros de mando ajustados durante la simulación.

Como se conoce la eficiencia en los motores de inducción está dada por la relación entre la potencia de salida P_s o potencia mecánica en su árbol y la potencia de entrada o eléctrica P_e 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):

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

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

4.2 Resultados obtenidos en las simulaciones

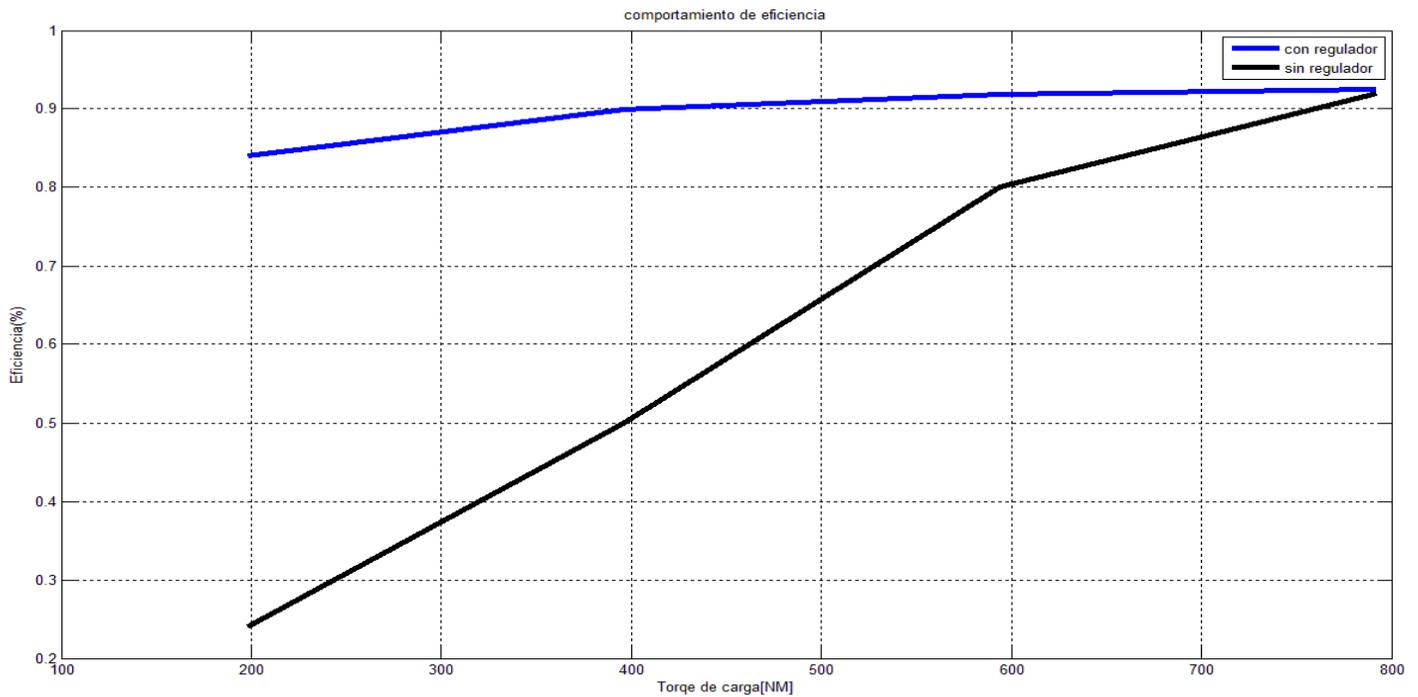


Figura 4.2.1 Comportamiento de la eficiencia con y sin el regulador difuso

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)

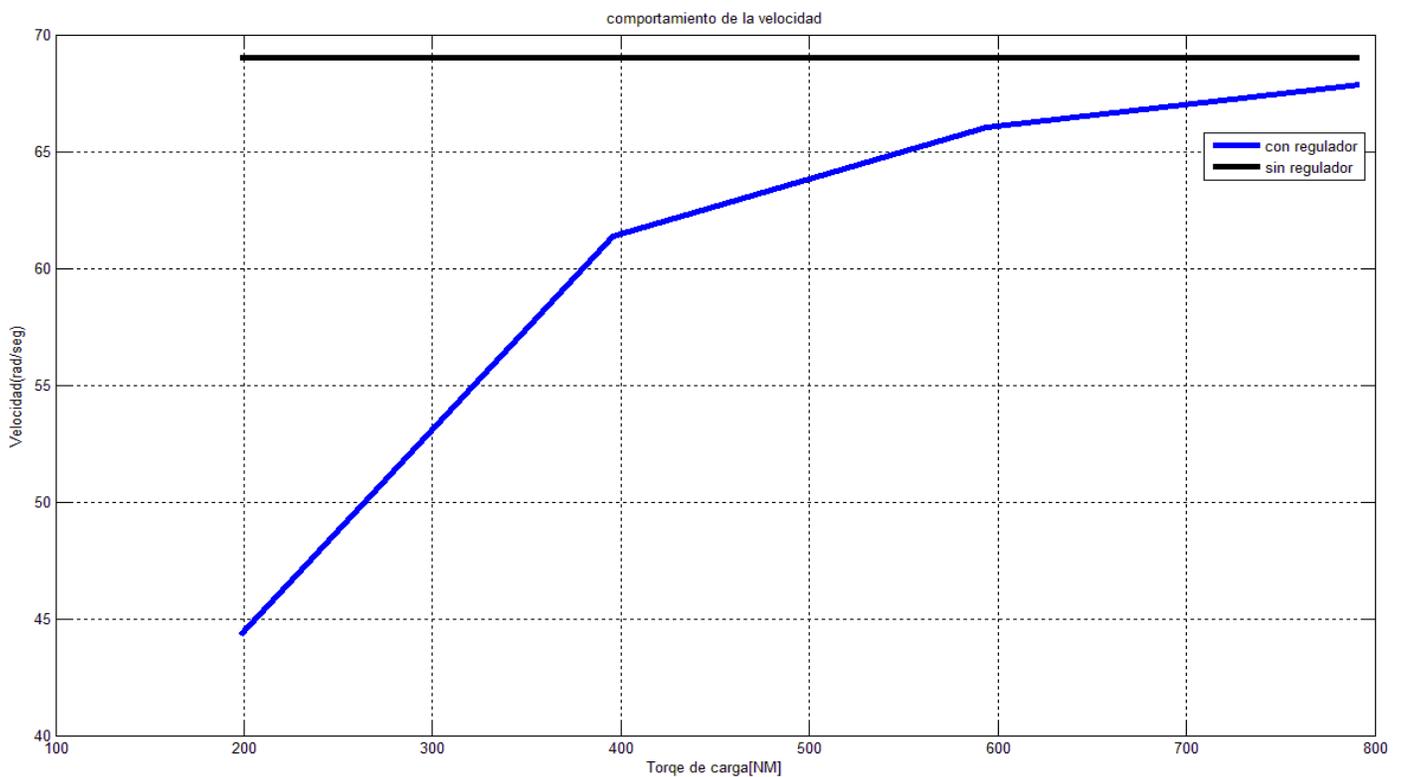


Figura 4.2.2 Comportamiento de la velocidad con y sin el regulador difuso

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.

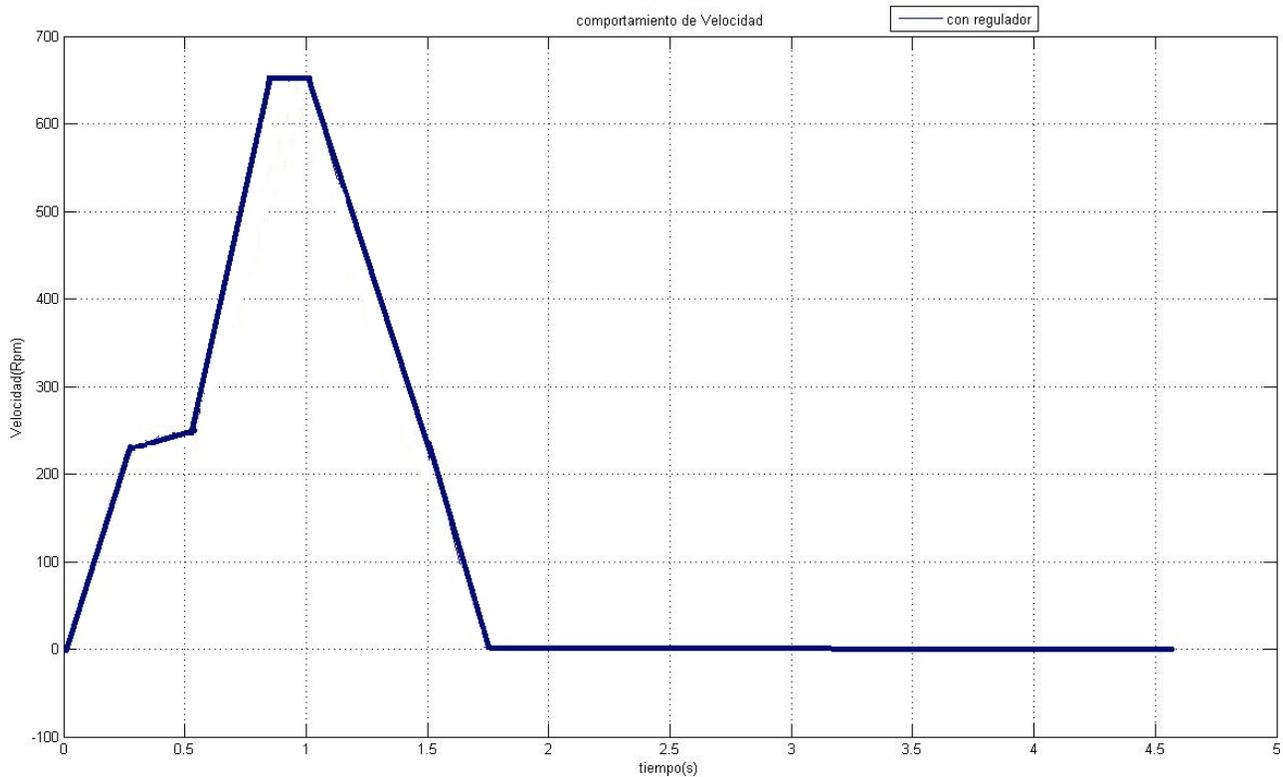


Figura 4.2.3 Comportamiento de la velocidad para el 100% de la carga nominal

En esta gráfica se muestra como la velocidad aumenta hasta 648.5 (rpm) con la cual el motor mueve perfectamente la carga sin necesidad de disminuir el rendimiento de lo contrario este aumenta.

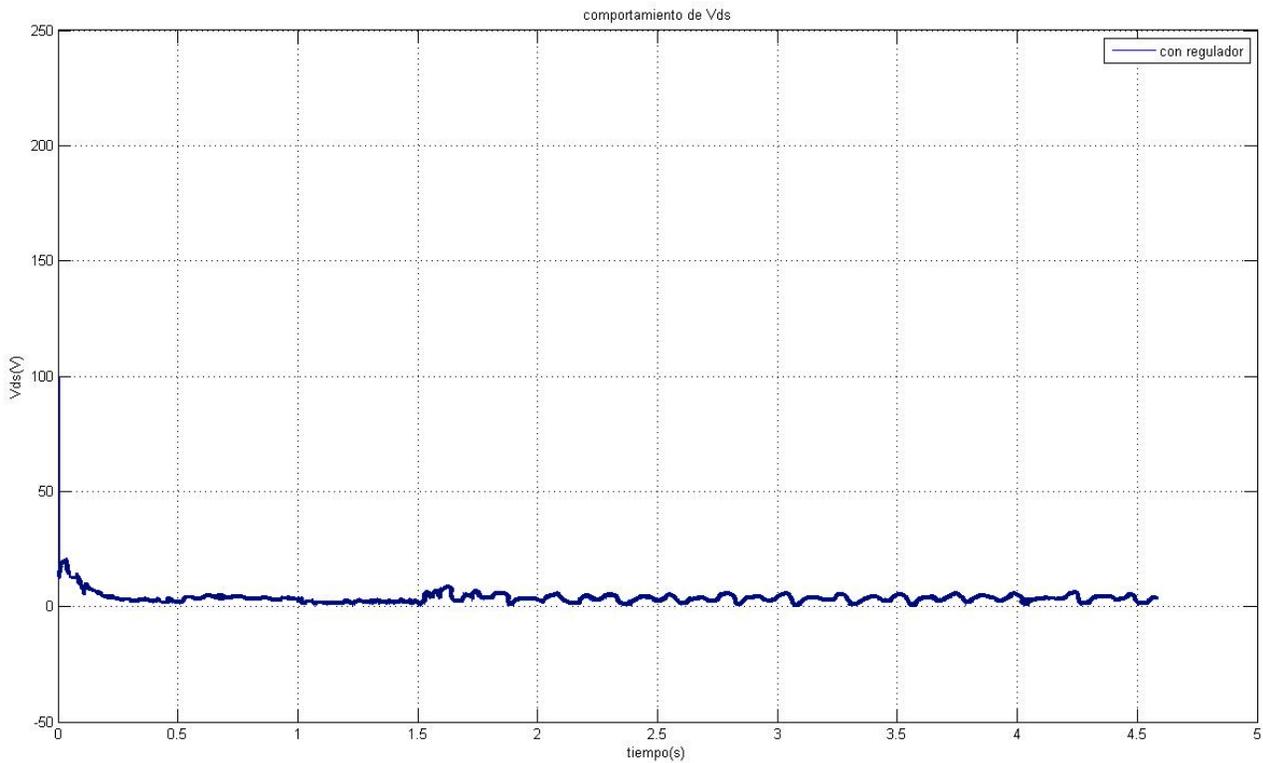


Figura 4.2.4 Comportamiento de V_{ds} para el 100% de la carga nominal

La gráfica muestra como la componente V_{ds} de la tensión que oscila en el arranque del motor es de 100 volts pero luego disminuye hasta 5 volts aproximadamente.

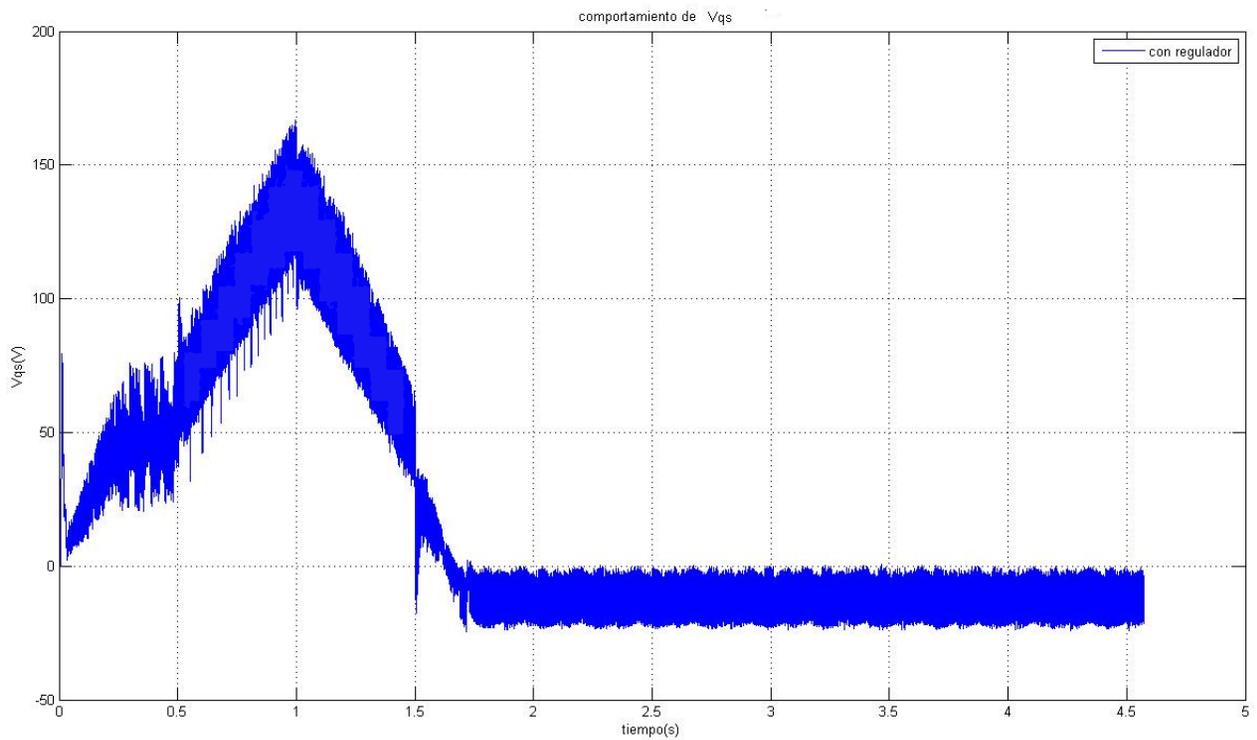


Figura 4.2.5 Comportamiento de V_{qs} para el 100% de la carga nominal

La gráfica muestra como la componente V_{qs} de la tensión oscila desde 75 volts hasta 0 para luego aumentar a 175 volts, el cual se alcanza cuando el motor llega a su carga nominal y luego disminuye hasta 0 volts.

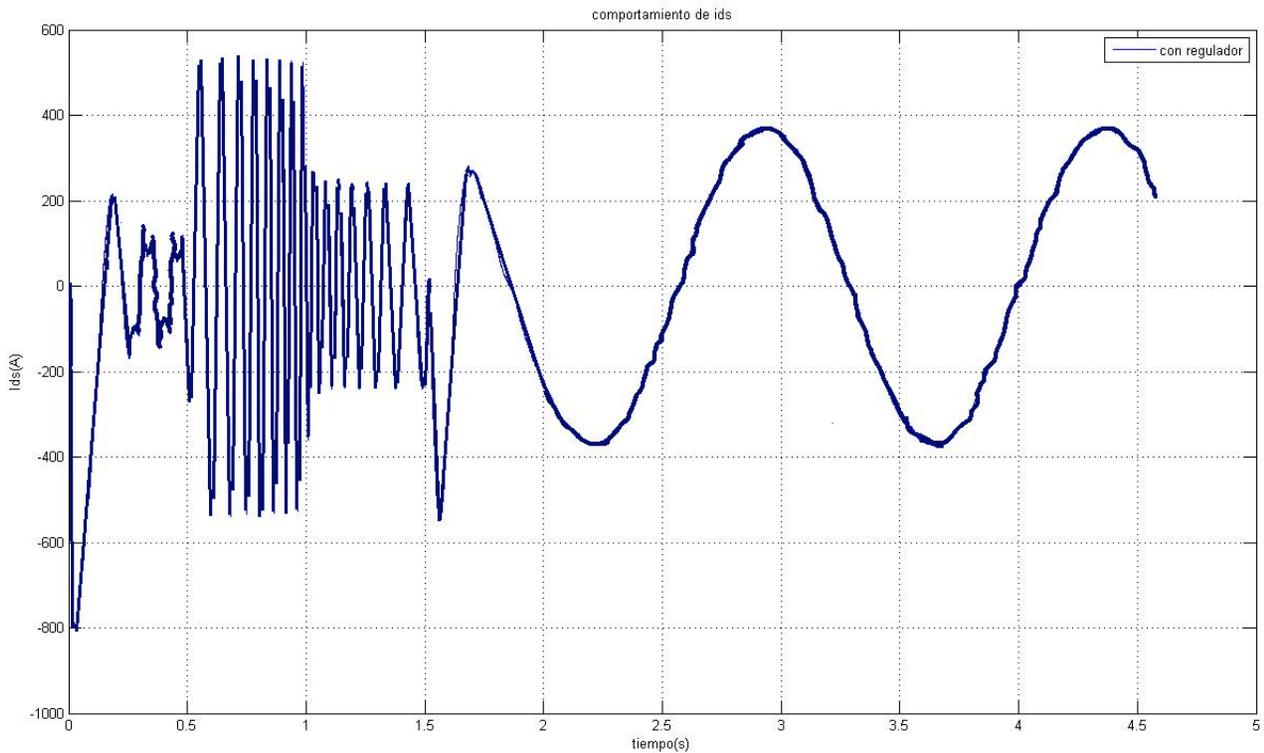


Figura 4.2.6 Comportamiento de I_{ds} para el 100% de la carga nominal

La gráfica muestra como la componente I_{ds} de la corriente oscila primero sobre los 520 hasta los 220 amperes en el período de carga nominal y se mantiene variando entre 375 y -375 el resto del tiempo de simulación.

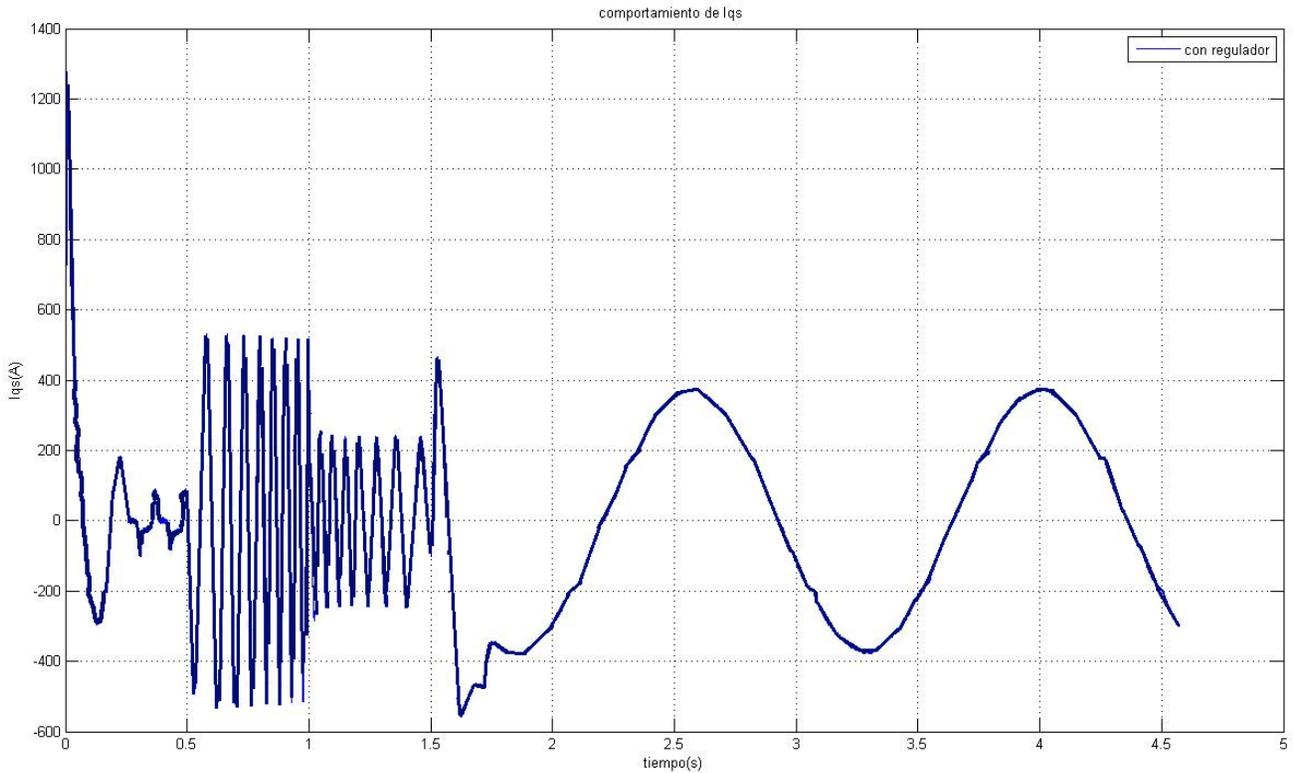


Figura 4.2.7 Comportamiento de Iqs para el 100% de la carga nominal

La gráfica muestra como la componente Iqs de la corriente oscila primero sobre los 520 hasta los 220 amperes en el período de carga nominal y se mantiene variando entre 375 y -375 el resto del tiempo de simulación.

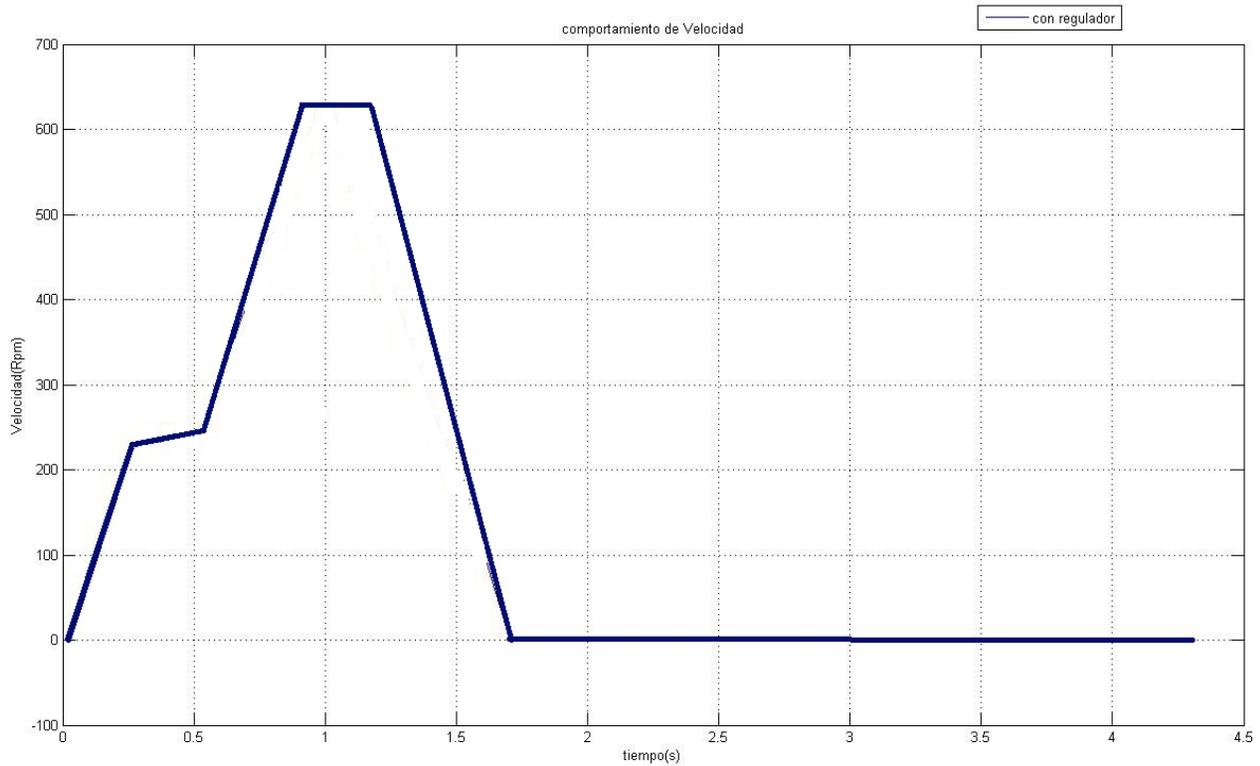


Figura 4.2.8 Comportamiento de la velocidad para el 75% de la carga nominal

En esta gráfica se muestra como la velocidad disminuye con respecto a la velocidad nominal hasta 631(rpm) con la cual el motor mueve perfectamente la carga sin necesidad de disminuir el rendimiento de lo contrario este aumenta.

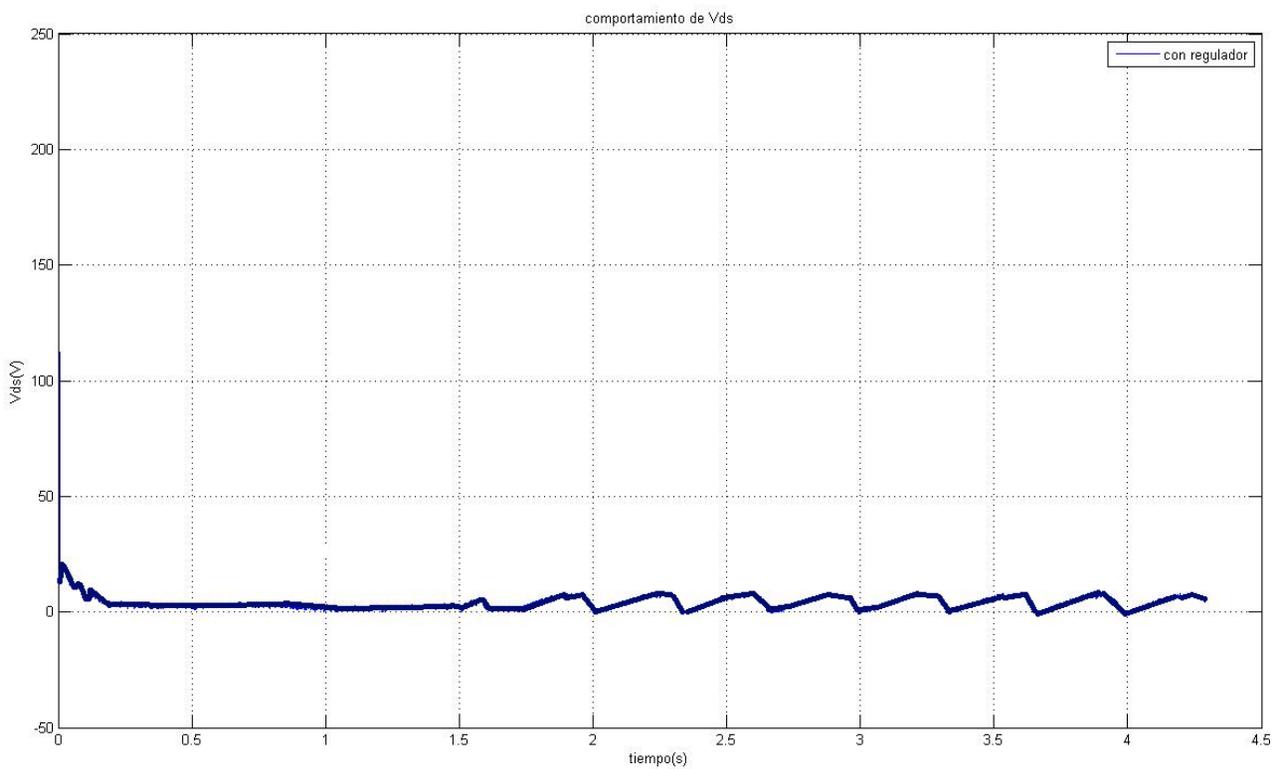


Figura 4.2.9 Comportamiento de V_{ds} para el 75% de la carga nominal

La gráfica muestra como la componente V_{ds} de la tensión que oscila en el arranque de el motor es de 110 volts pero luego disminuye hasta 5 volts aproximadamente y continua oscilando entre 0 y 18 volts por el resto de la simulación.

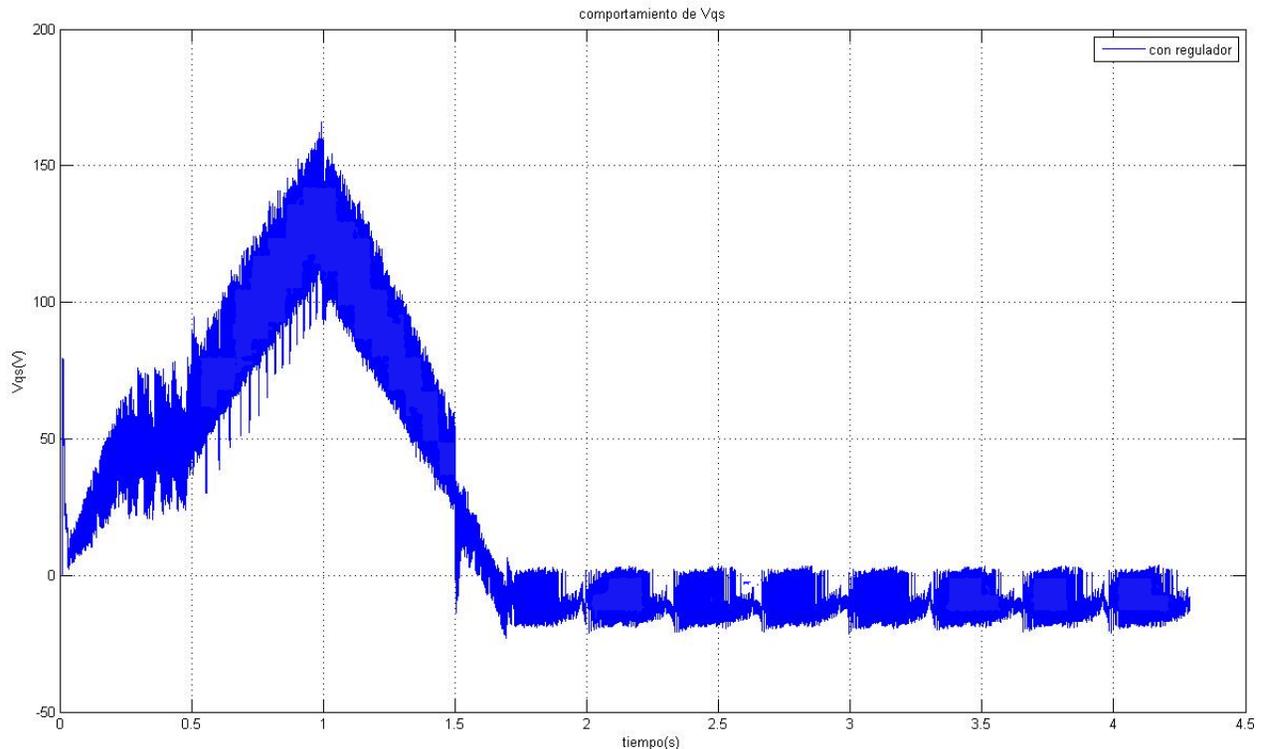


Figura 4.2.10 Comportamiento de V_{qs} para el 75% de la carga nominal

La gráfica muestra como la componente V_{qs} de la tensión oscila desde 75 volts hasta 0 para luego aumentar a 160 volts, el cual se alcanza cuando el motor llega al 75% de su carga nominal y luego disminuye hasta cero.

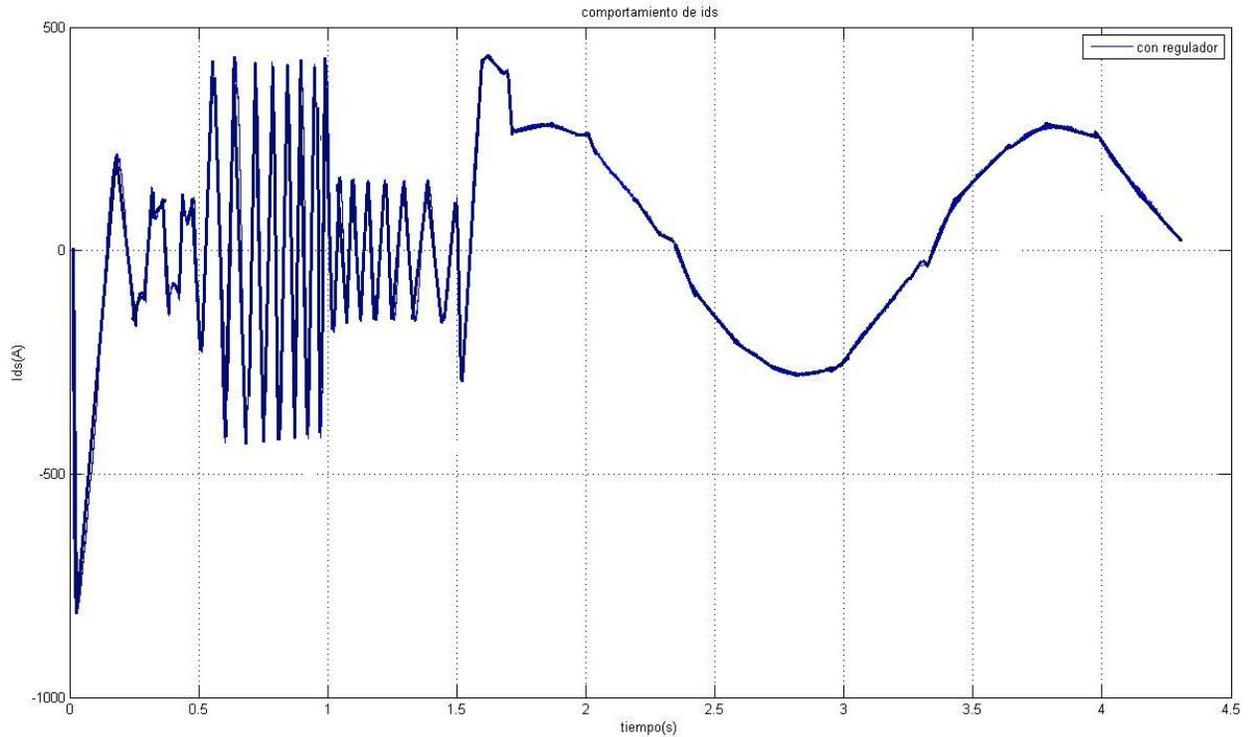


Figura 4.2.11 Comportamiento de Ids para el 75% de la carga nominal

La gráfica muestra como la componente Ids de la corriente oscila primero sobre los 400 amperes hasta los 175 amperes en el período del 75 % de la carga nominal observándose una disminución en el consumo de la corriente con respecto a la gráfica de la carga nominal y se mantiene variando entre 175 y -175 el resto del tiempo de simulación.

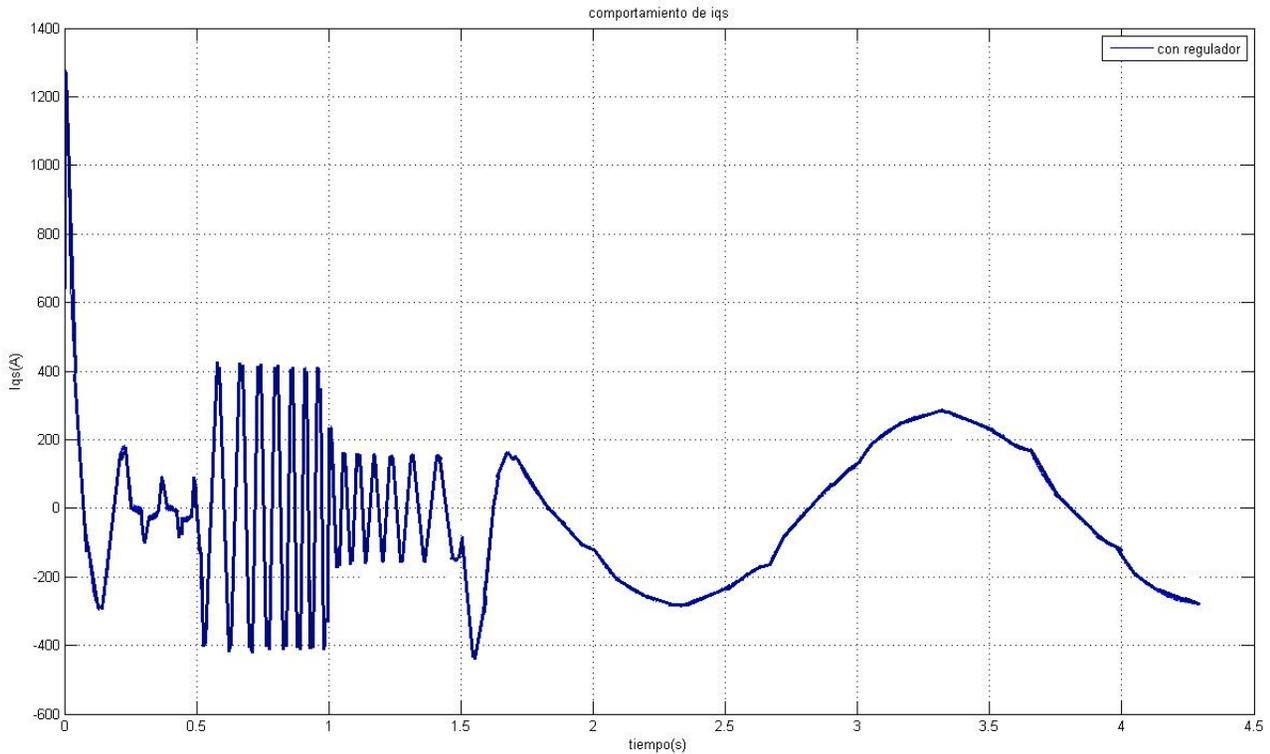


Figura 4.2.12 Comportamiento de I_{qs} para el 75% de la carga nominal

La gráfica muestra como la componente I_{qs} de la corriente oscila primero sobre los 410 amperes hasta los 175 amperes en el período del 75 % de la carga nominal observándose una disminución en el consumo de la corriente con respecto a la gráfica de la carga nominal y se mantiene variando entre 175 y -175 el resto del tiempo de simulación.

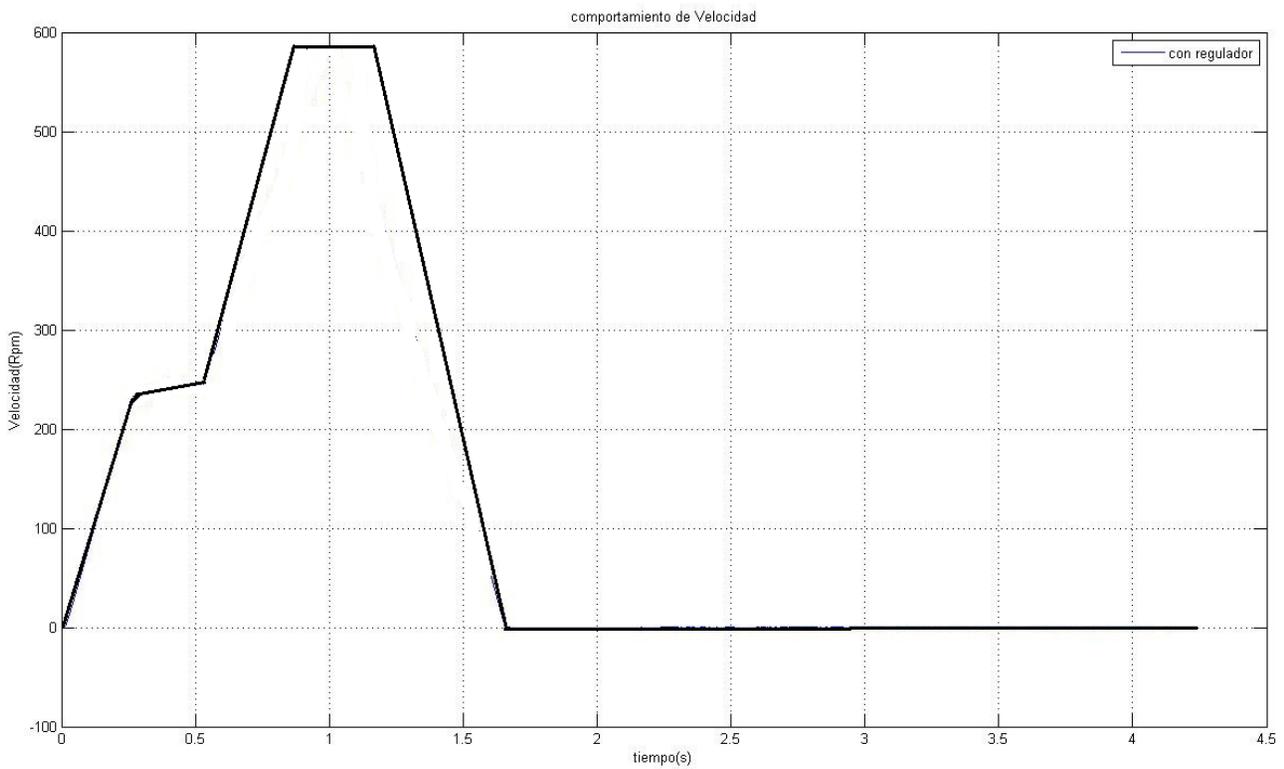


Figura 4.2.13 Comportamiento de la velocidad para un 50% de la carga nominal

En esta gráfica se muestra como la velocidad disminuye con respecto a la velocidad nominal hasta 586 (rpm) con la cual disminuyendo así la corriente de entrada del motor y siendo esto el rendimiento aumenta.

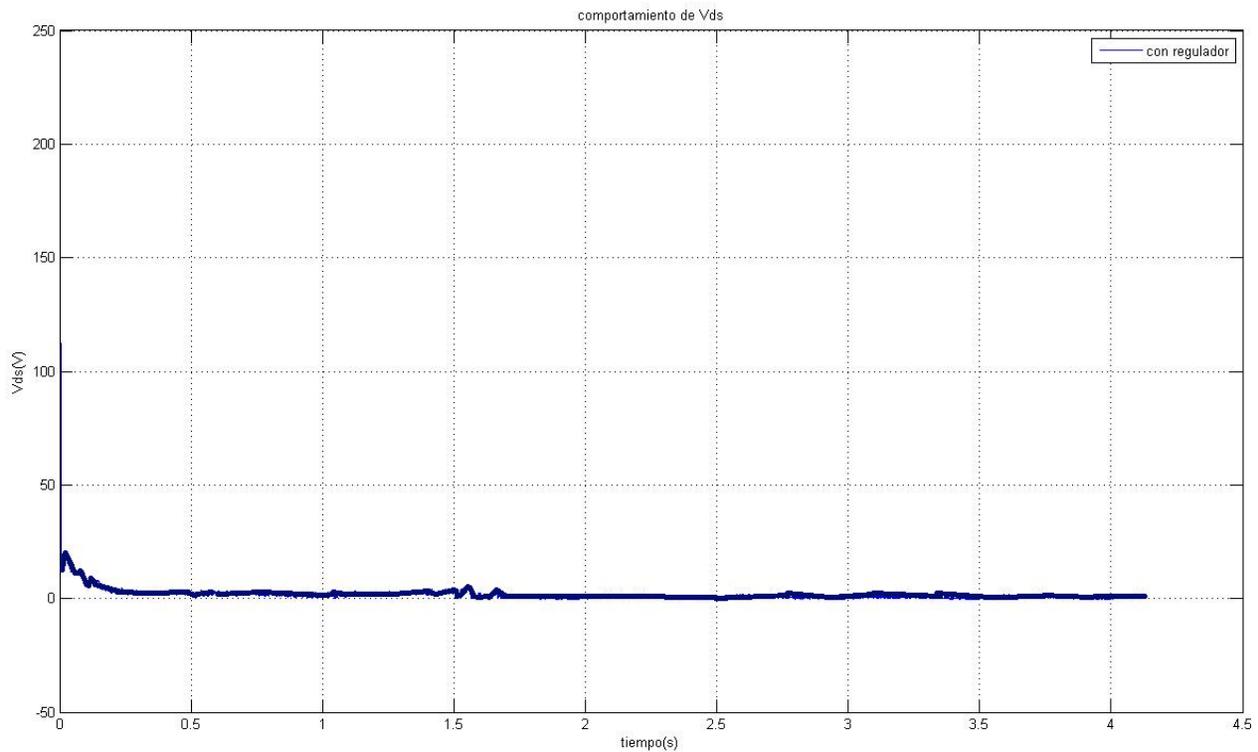


Figura 4.2.14 Comportamiento de Vds para un 50% de la carga nominal

La gráfica muestra como la componente Vds de la tensión que oscila en el arranque del motor es de 110 volts pero luego disminuye hasta 5 volts aproximadamente y continúa así el resto de la simulación.

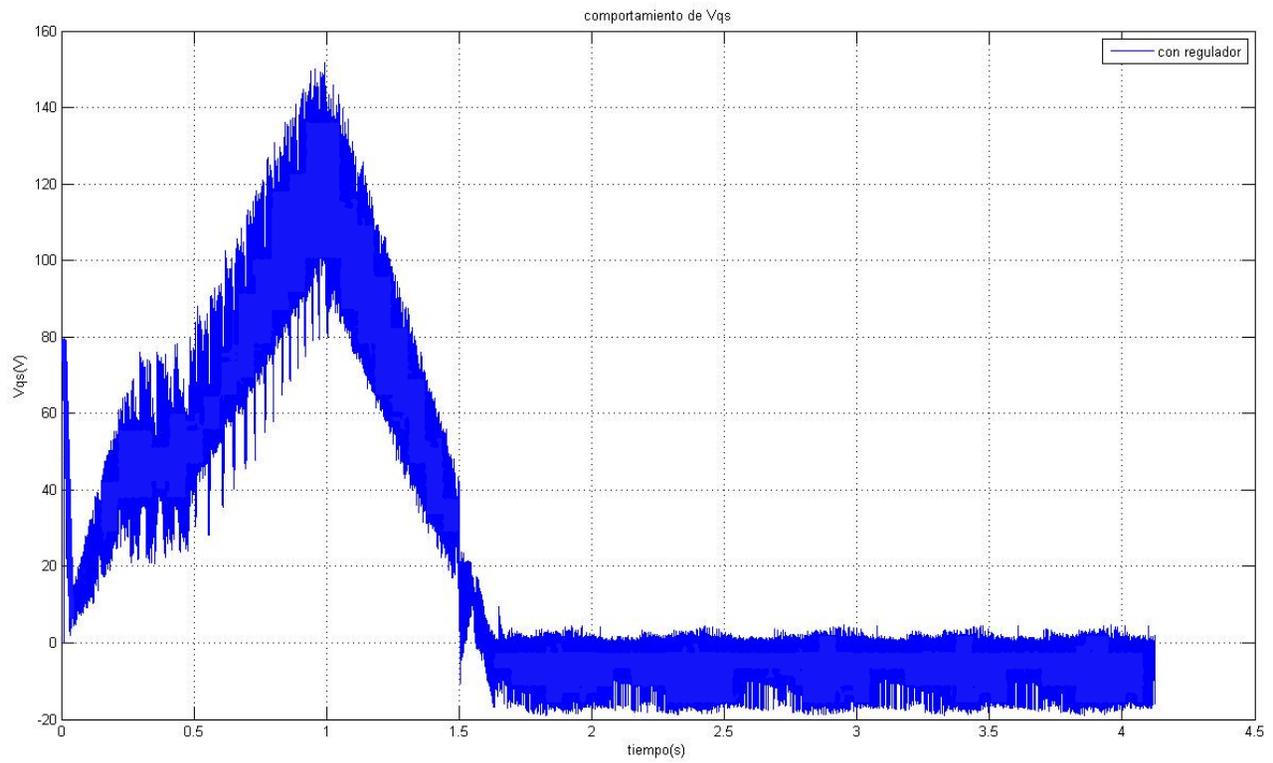


Figura 4.15 Comportamiento de V_{qs} para un 50% de la carga nominal

La gráfica muestra como la componente V_{qs} de la tensión oscila desde 75 volts hasta 0 para luego aumentar a 150 volts, el cual se alcanza cuando el motor llega al 50% de su carga nominal y luego disminuye hasta cero.

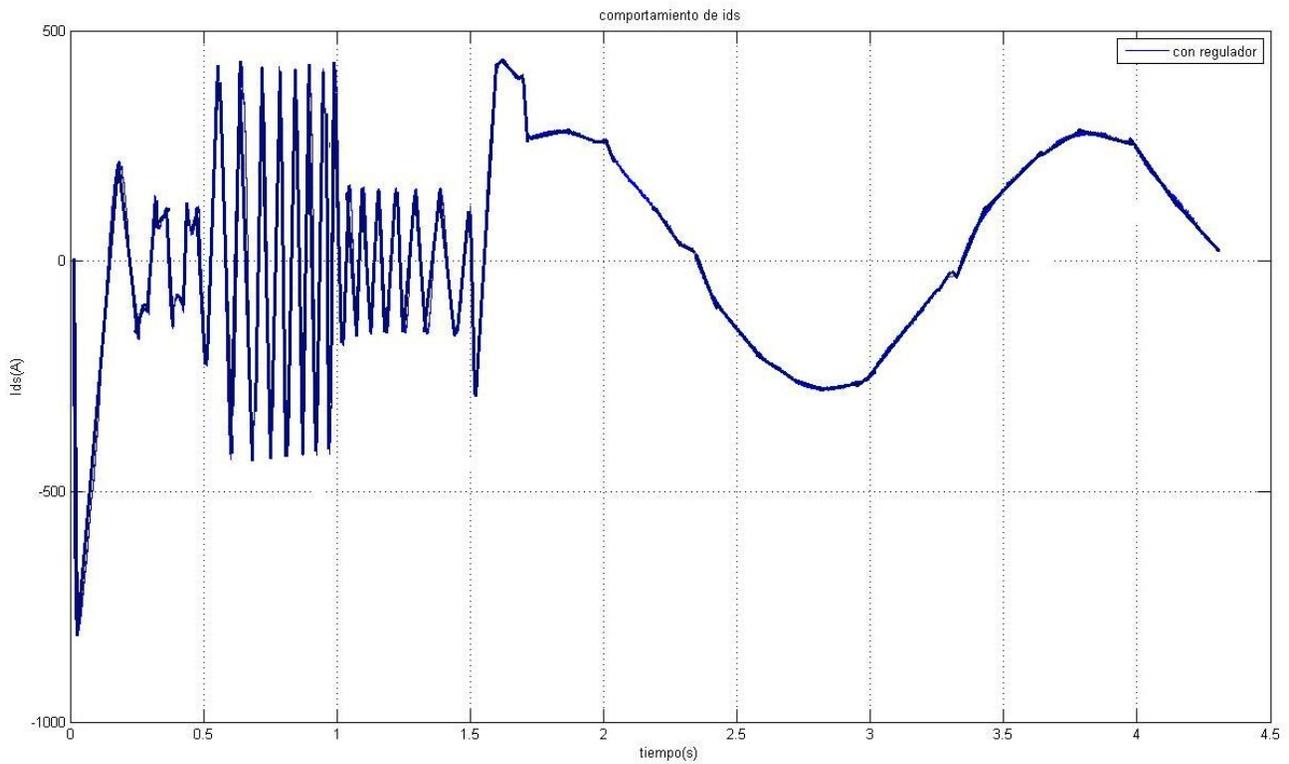


Figura 4.16 Comportamiento de I_{ds} para un 50% de la carga nominal.

La gráfica muestra como la componente I_{ds} de la corriente oscila primero sobre los 350 amperes hasta los 100 amperes en el período del 50% de la carga nominal observándose una disminución en el consumo de la corriente con respecto a la gráfica de la carga nominal y se mantiene variando entre 200 y -200 el resto del tiempo de simulación.

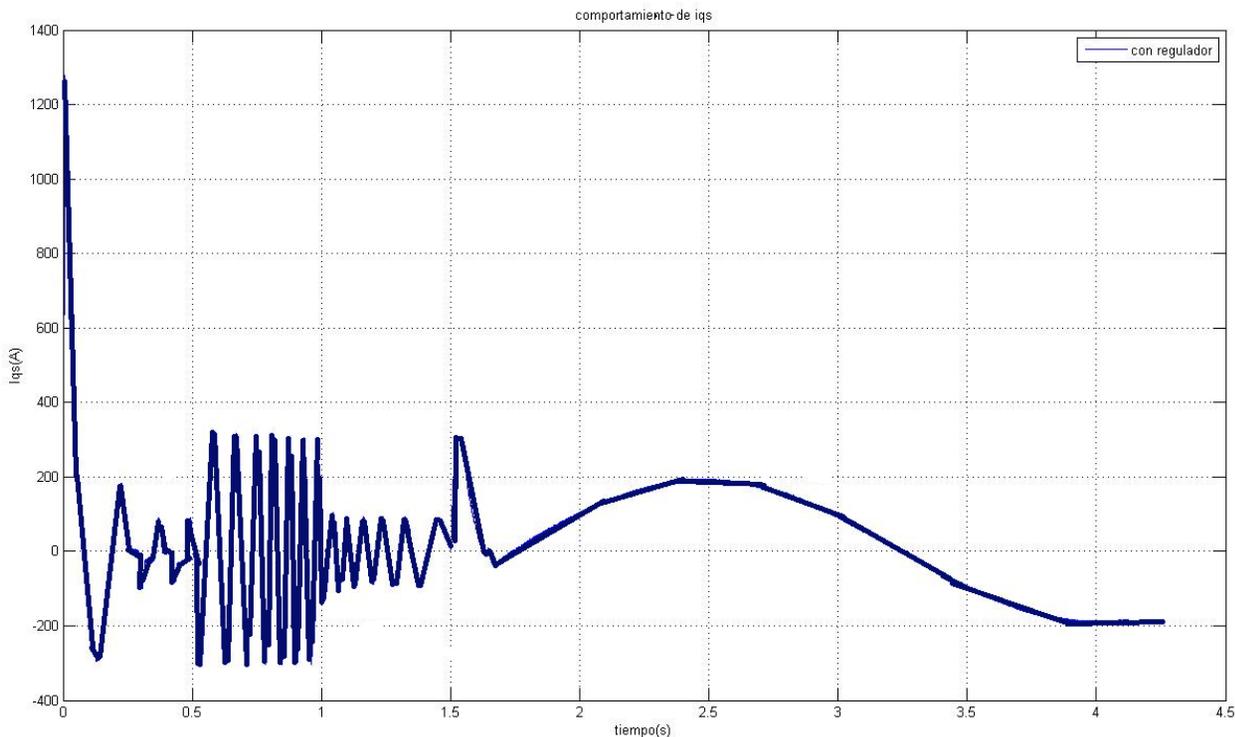


Figura 4.17 comportamiento de I_{qs} para un 50% de la carga nominal

La gráfica muestra como la componente I_{qs} de la corriente oscila primero sobre los 350 amperes hasta los 100 amperes en el período del 50% de la carga nominal observándose una disminución en el consumo de la corriente con respecto a la gráfica de la carga nominal y se mantiene variando entre 200 y -200 el resto del tiempo de simulación.

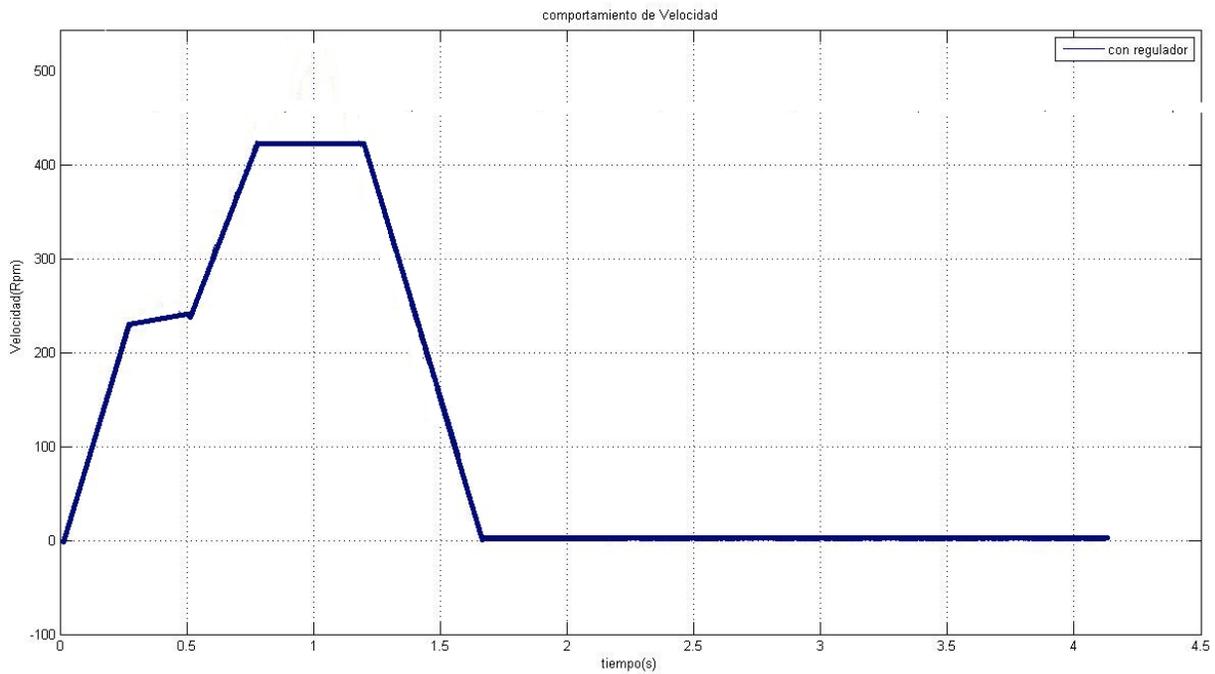


Figura 4.18 Comportamiento de la velocidad para un 25% de la carga nominal

En esta gráfica se muestra como la velocidad disminuye con respecto a la velocidad nominal hasta 423 (rpm) con la cual disminuye así la corriente de entrada del motor y siendo esto el rendimiento aumenta.

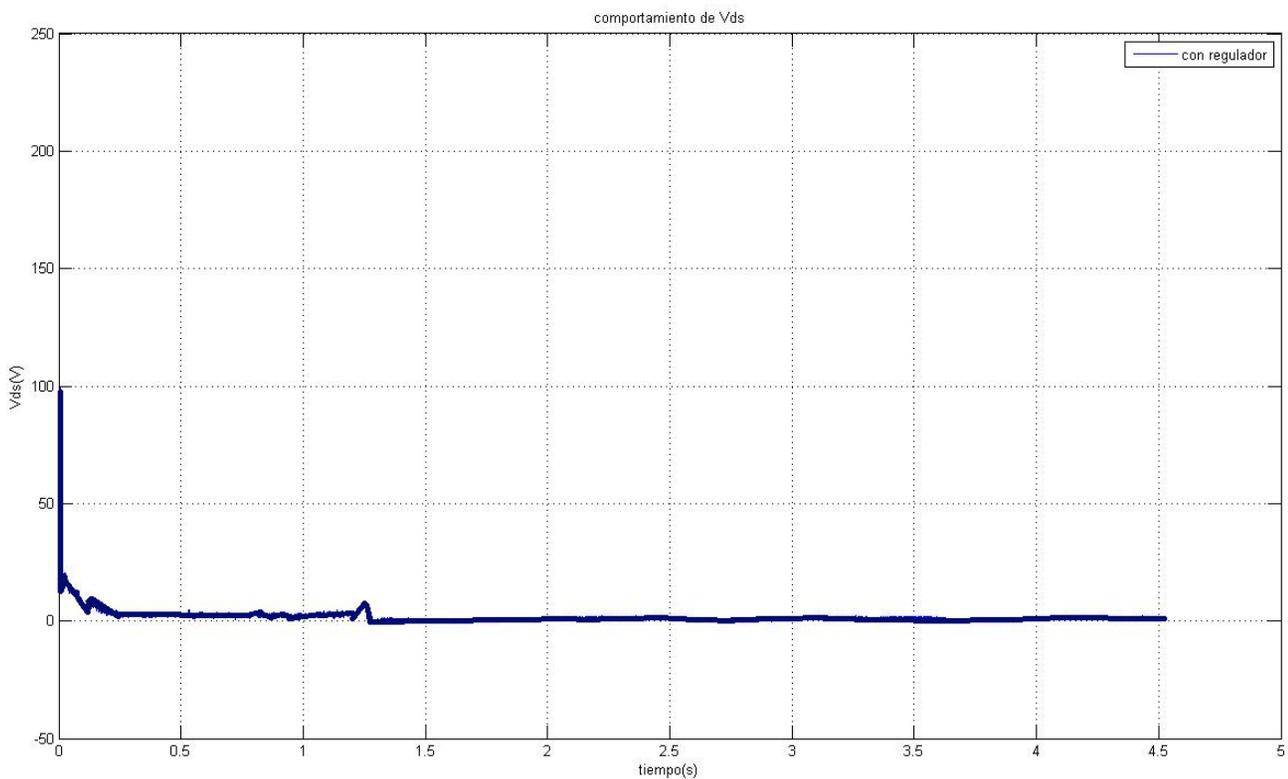


Figura 4.19 Comportamiento de V_{ds} para un 25% de la carga nominal

La gráfica muestra como la componente V_{ds} de la tensión que oscila en el arranque del motor es de 90 volts y luego disminuye hasta 5 volts aproximadamente y continúa así el resto de la simulación.

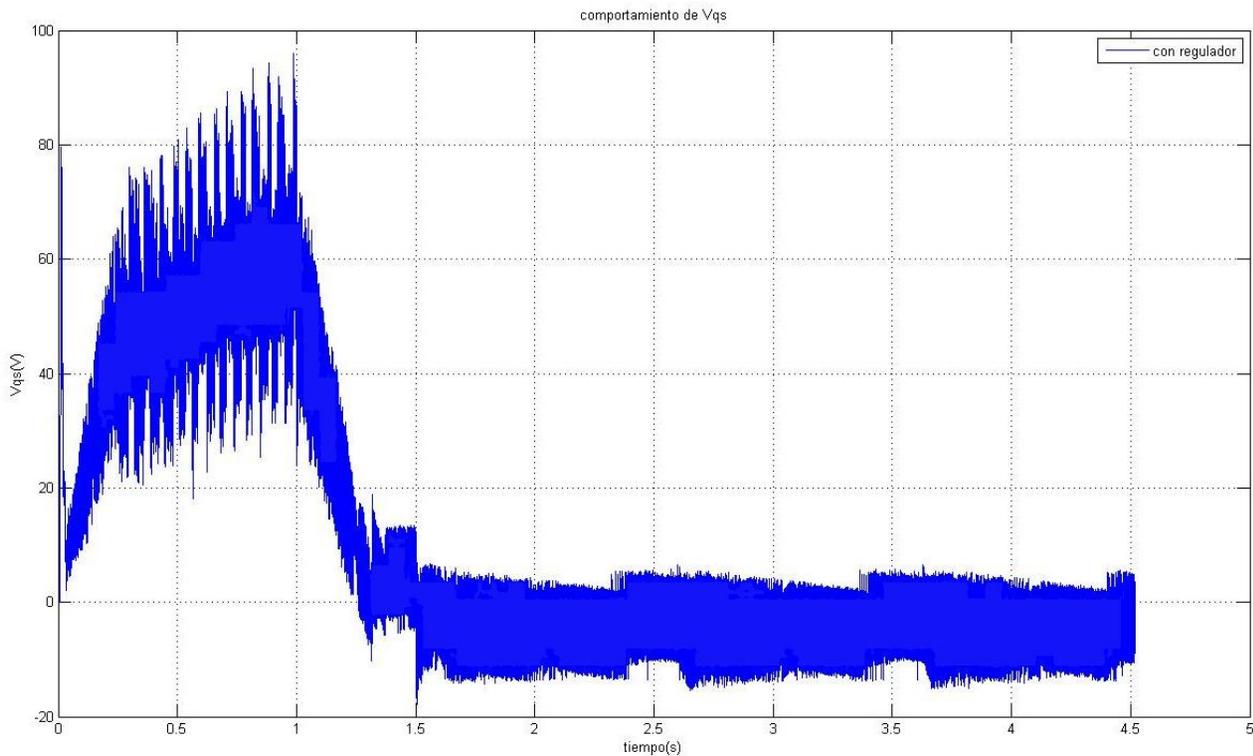


Figura 4.20 Comportamiento de V_{qs} para un 25% de la carga nominal

La gráfica muestra como la componente V_{qs} de la tensión oscila desde 75 volts hasta 0 para luego aumentar a 100 volt, tensión la cual se alcanza cuando el motor llega a su 25% de su carga nominal y luego disminuye hasta cero.

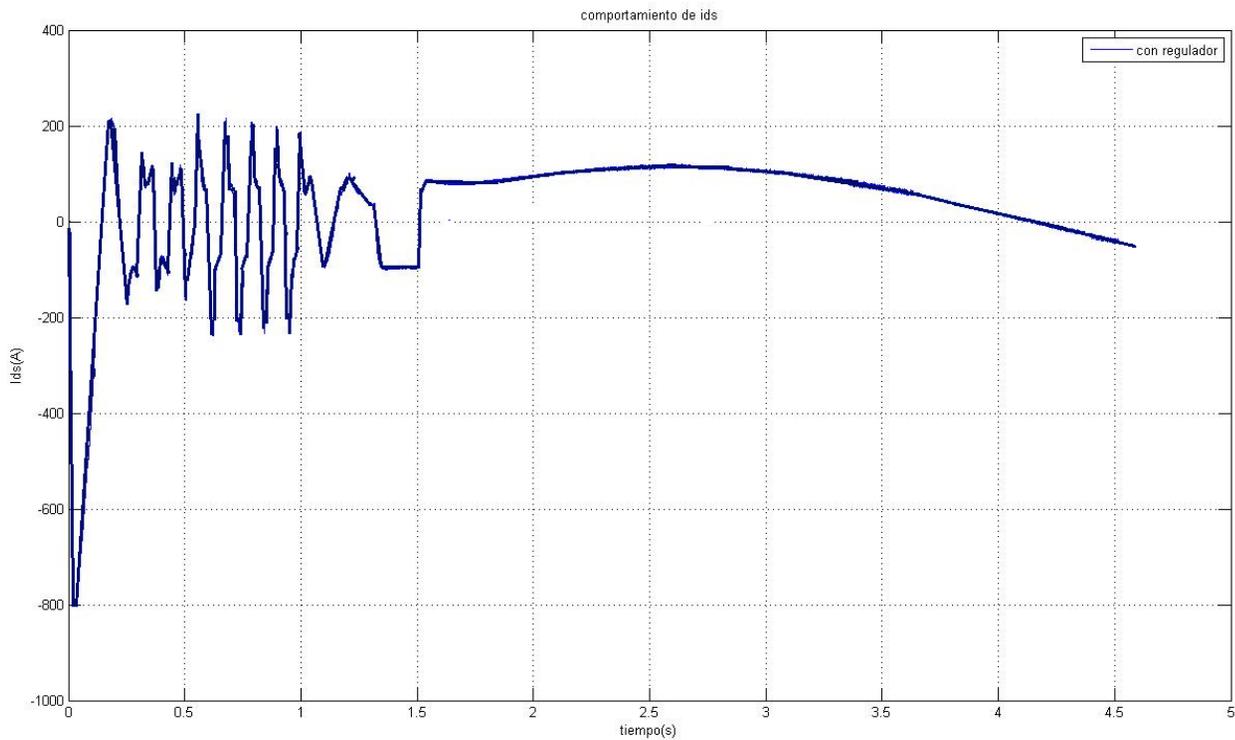


Figura 4.21 Comportamiento de Ids para un 25% de la carga nominal

La gráfica muestra como la componente Ids de la corriente oscila primero sobre los 230 amperes hasta los 90 amperes en el período del 25% de la carga nominal observándose una disminución en el consumo de la corriente con respecto a la gráfica de la carga nominal y se mantiene en 90 amperes el resto del tiempo de simulación.

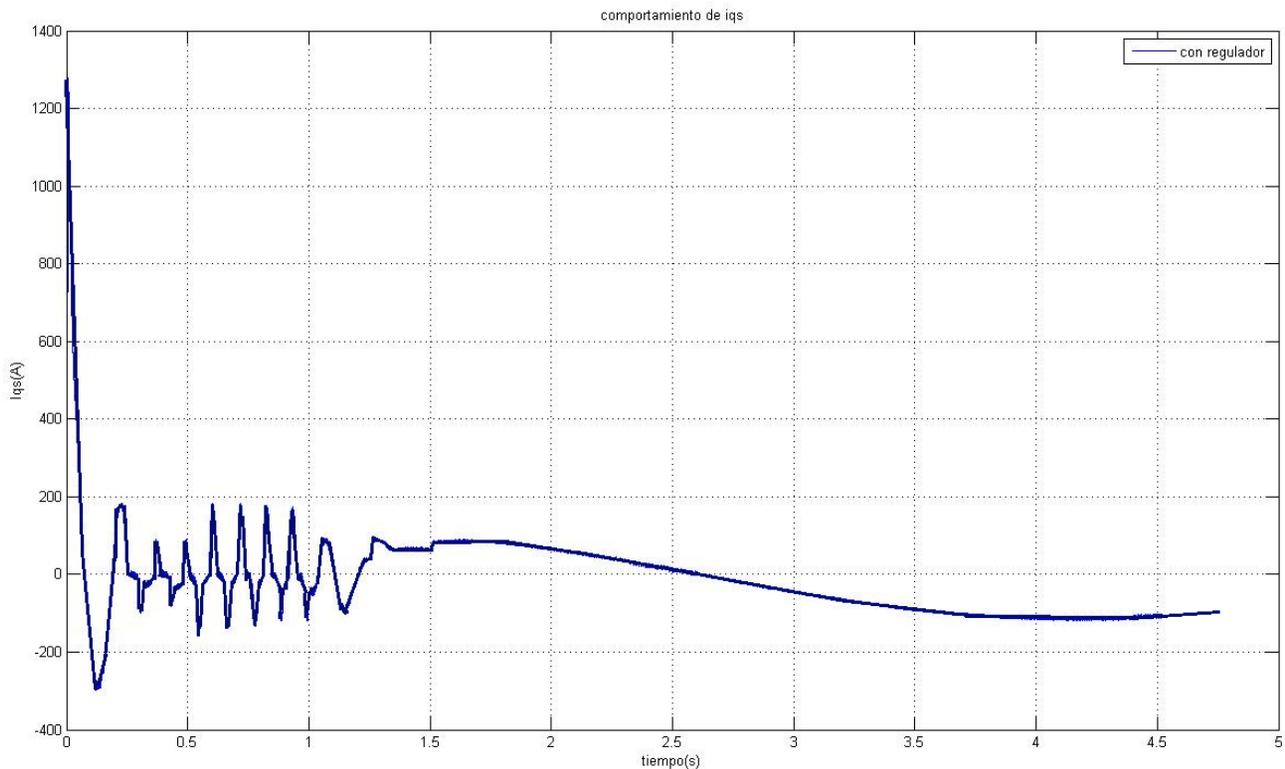


Figura 4.22 Comportamiento de i_{qs} para un 25% de la carga nominal

La gráfica muestra como la componente i_{qs} de la corriente oscila primero sobre los 190 amperes hasta los 100 amperes en el período del 25% de la carga nominal observándose una disminución en el consumo de la corriente con respecto a la gráfica de la carga nominal y se mantiene variando entre 90 y -90 amperes el resto del tiempo de simulación.

Tabla 4.1 Valores de las variables sin el regulador difuso

Estados de carga (%)	T_{em} (Nm)	P_s (W)	P_e (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

Tabla 4.2 Valores de las variables con el regulador difuso

Estados de carga (%)	T_{em} (Nm)	P_s (W)	P_e (W)	η (%)	ω_m (rad/s)	Factor de Potencia
100	540	36686.93	39769.03	0,923	67.87	0.96
75	479	31610.34	34433.92	0.9180	66.04	0.93
50	343	21056.02	23240.64	0.906	61.36	0.90
25	285	12610	15000	0.848	44.28	0.86

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.

4.3 Conclusiones parciales

- ❖ Con el uso del estimador de eficiencia, a través de la técnica de Lógica difusa, fue posible mantener actualizada la consigna del regulador PI, a diferentes estados de cargas mecánicas en el accionamiento de bomba centrífuga.
- ❖ Se corroboran las buenas cualidades del estimador 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 ambos reguladores, tanto el difuso como el convencional PI.
- ❖ Es necesario señalar también como se ahorra energía con la aplicación de estos algoritmos difusos lo cual se traduce en ahorro de dinero para el país.

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):

$$E_{MIahorr} = N_b \cdot \left(\frac{1}{\eta_{MI1}} - \frac{1}{\eta_{MI2}} \right) \cdot h_{totales} \quad (5.1)$$

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):

$$E_{bcahor} = N_{b1} \left(1 - \frac{\eta_{bc1}}{\eta_{bc2}} \right) \cdot h_{totales} \quad (5.2)$$

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% de la carga nominal.
- ❖ Aplicado a cuatro accionamientos eléctricos de la empresa Cmdte. Ernesto Guevara de Moa los cuales trabajan a un 75 % 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 $T_{amortización} = \frac{Inversión}{Energía Ahorrada}$

Donde:

$T_{amortización}$: 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 comprensión 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 SO₂, SO₃, NO₂.

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 Applications, Vol 19, No. 4. pp 561 – 570. July – august- 1983.
10. Electric Machinery, A. E. Fitzgerald 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 laterítica) 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

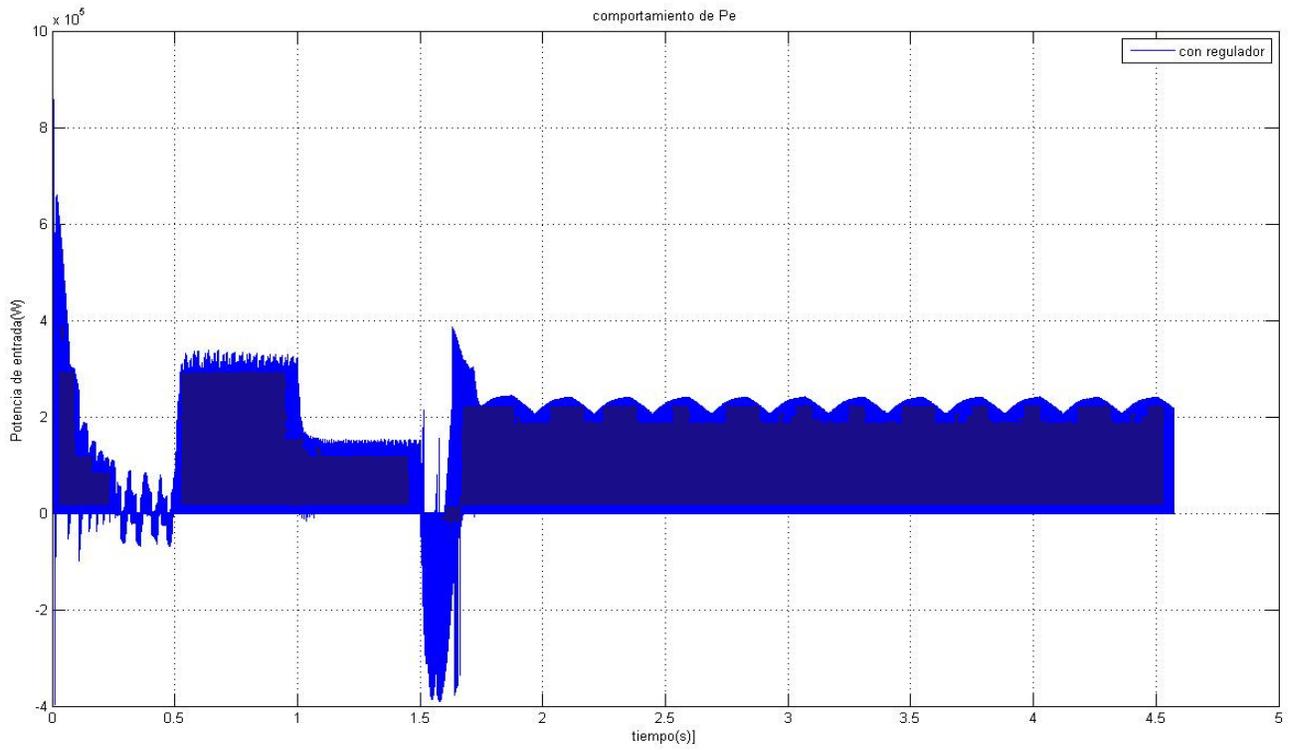


Figura 1. Gráfica de potencia de entrada para el 100% de la carga nominal

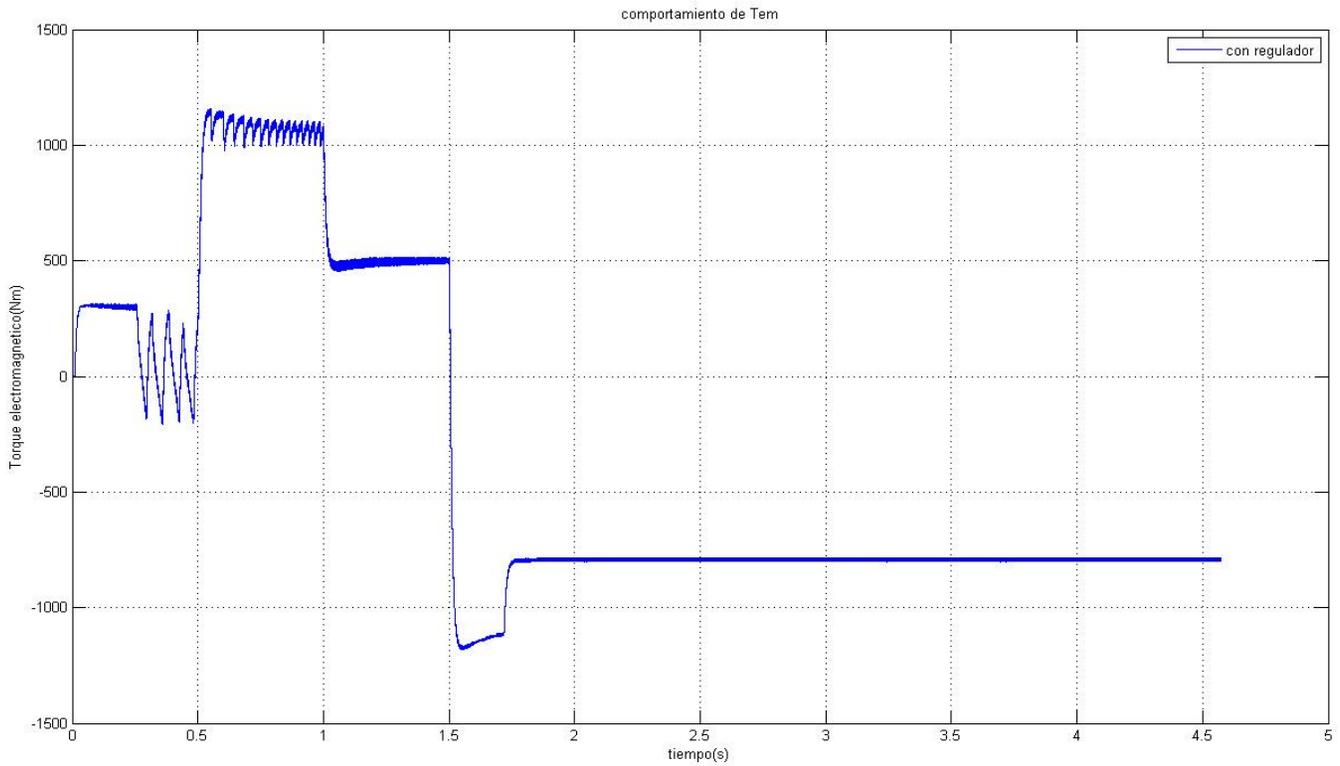


Figura 2. Gráfica del Torque electromagnético para el 100% de la carga nominal

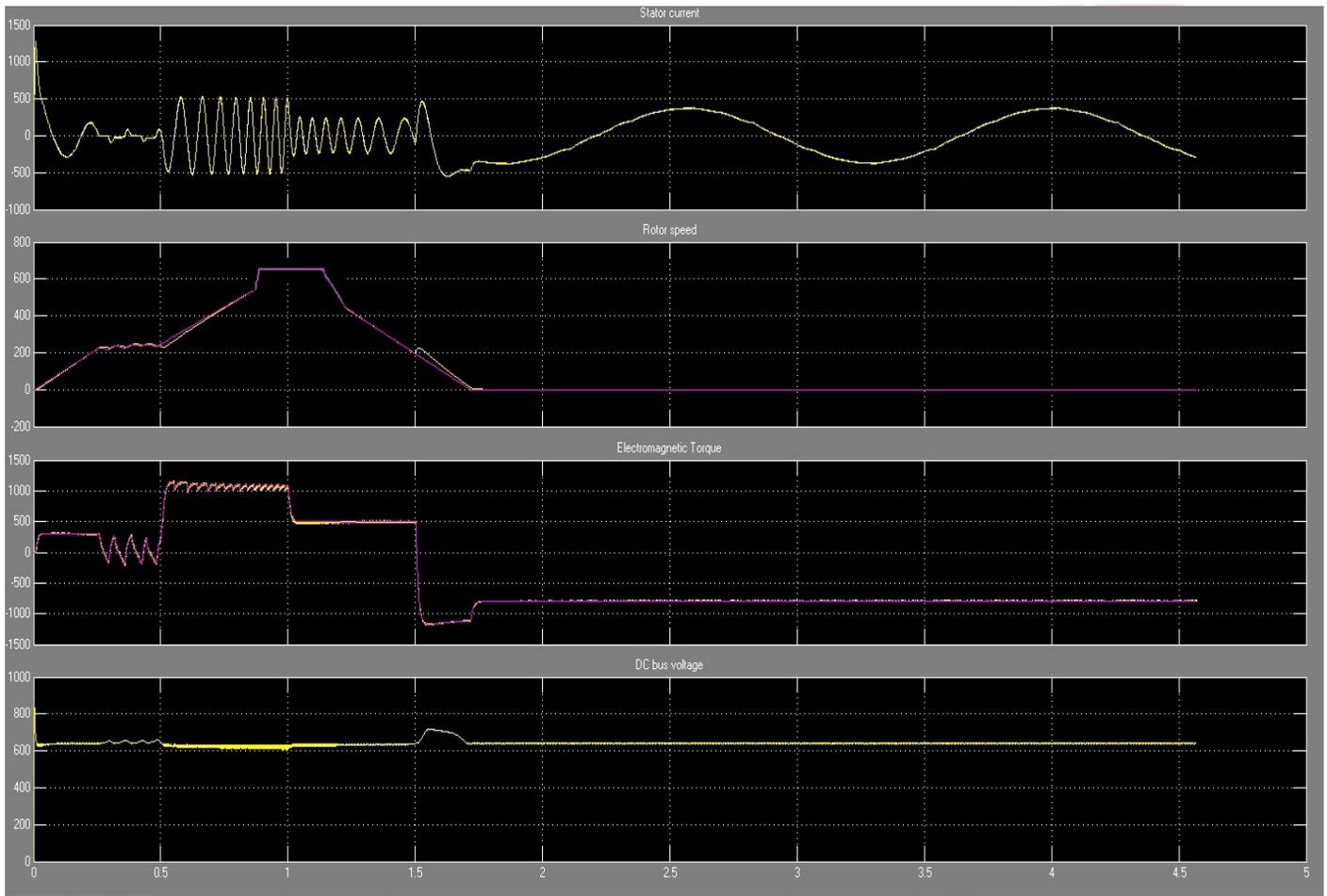


Figura 3. Gráfica donde se muestran todas las mediciones realizadas para el 100% de la carga nominal

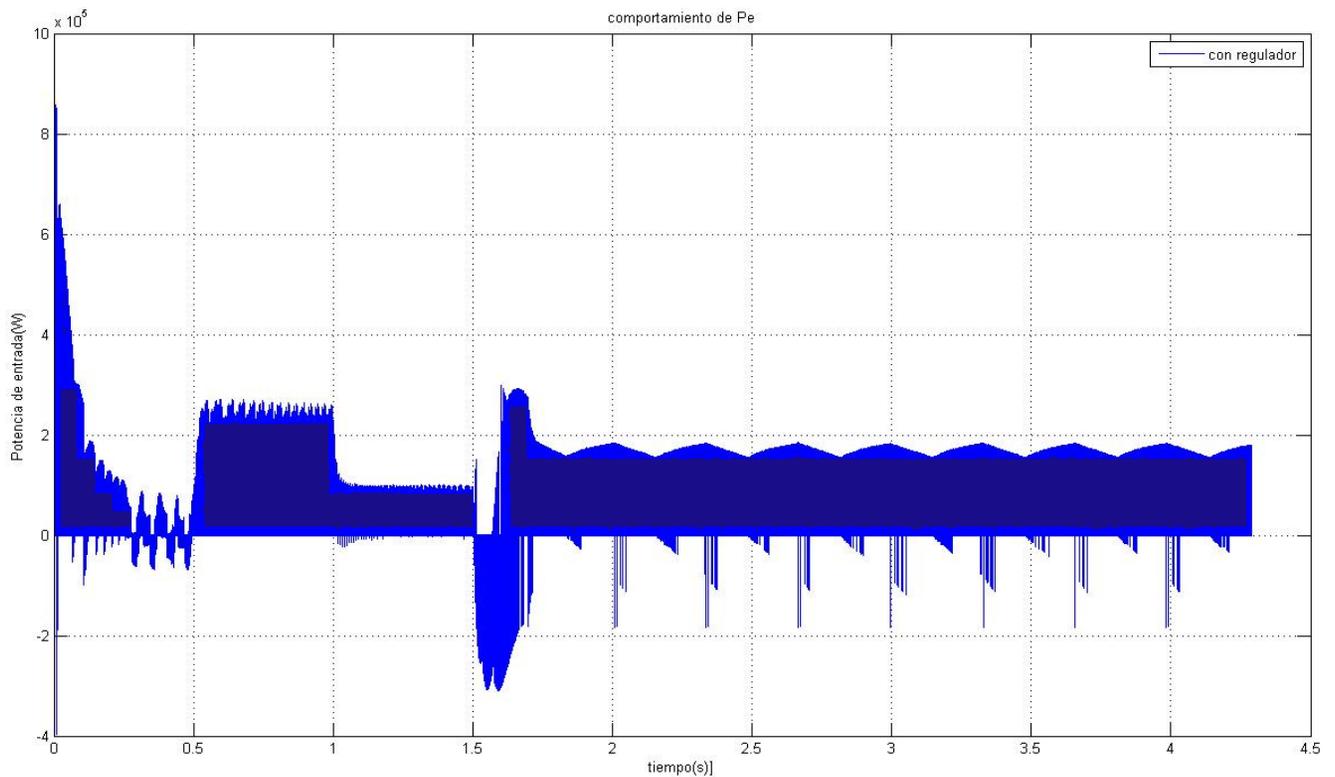


Figura 4. Gráfica de la potencia de entrada para el 75% de la carga nominal

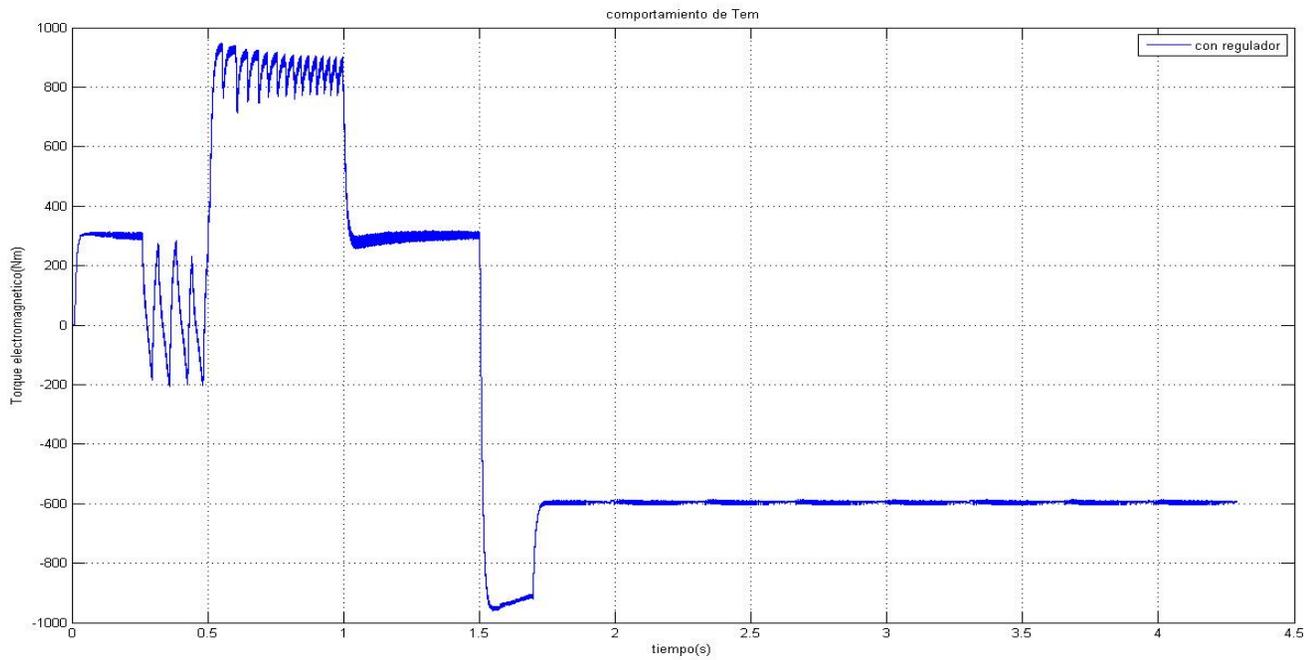


Figura 5. Gráfica del Torque electromagnético para el 75% de la carga nominal

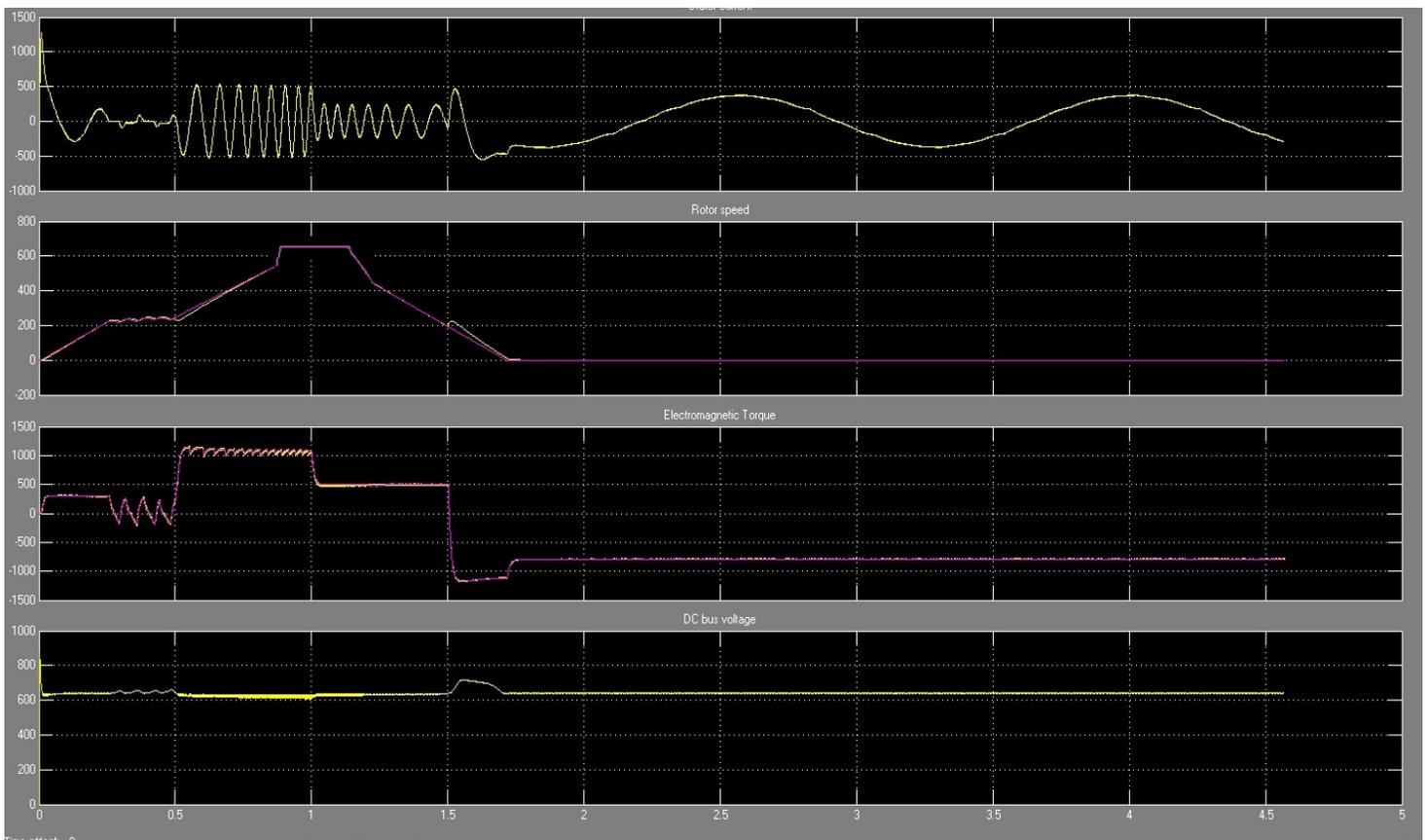


Figura 6. Gráfica donde se muestran todas las mediciones para el 75% de la carga nominal

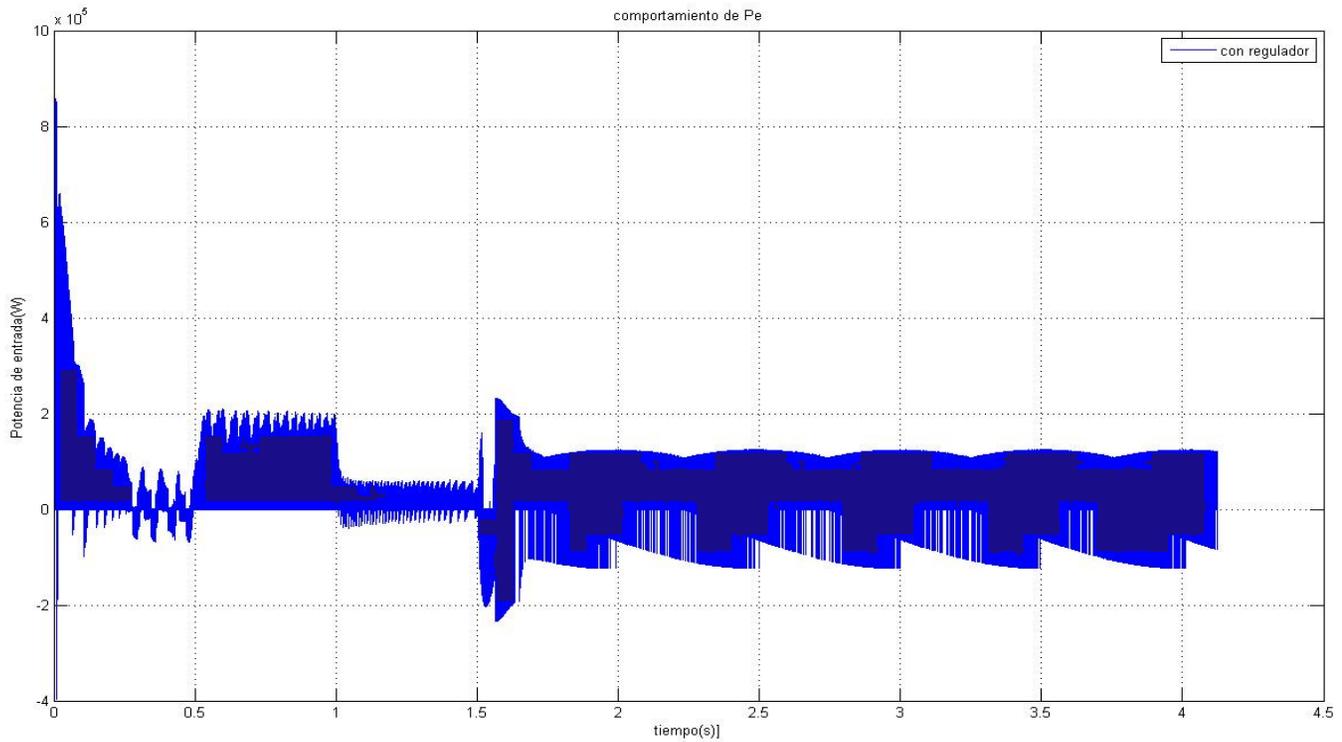


Figura 7. Gráfica de la potencia de entrada para un 50% de la carga nominal

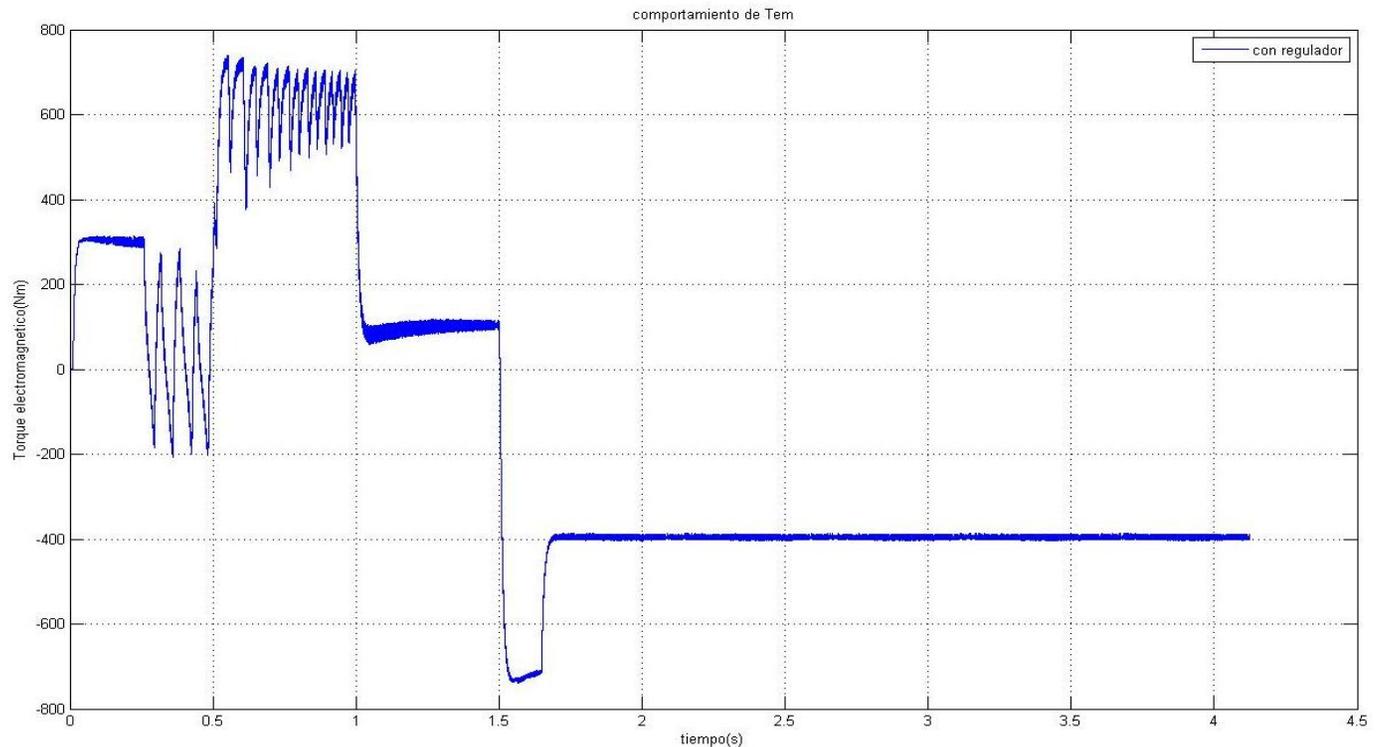


Figura 8. Gráfica del Torque electromagnético para el 50% de la carga nominal

Autor: Alfredo Ramón Ávila Pérez

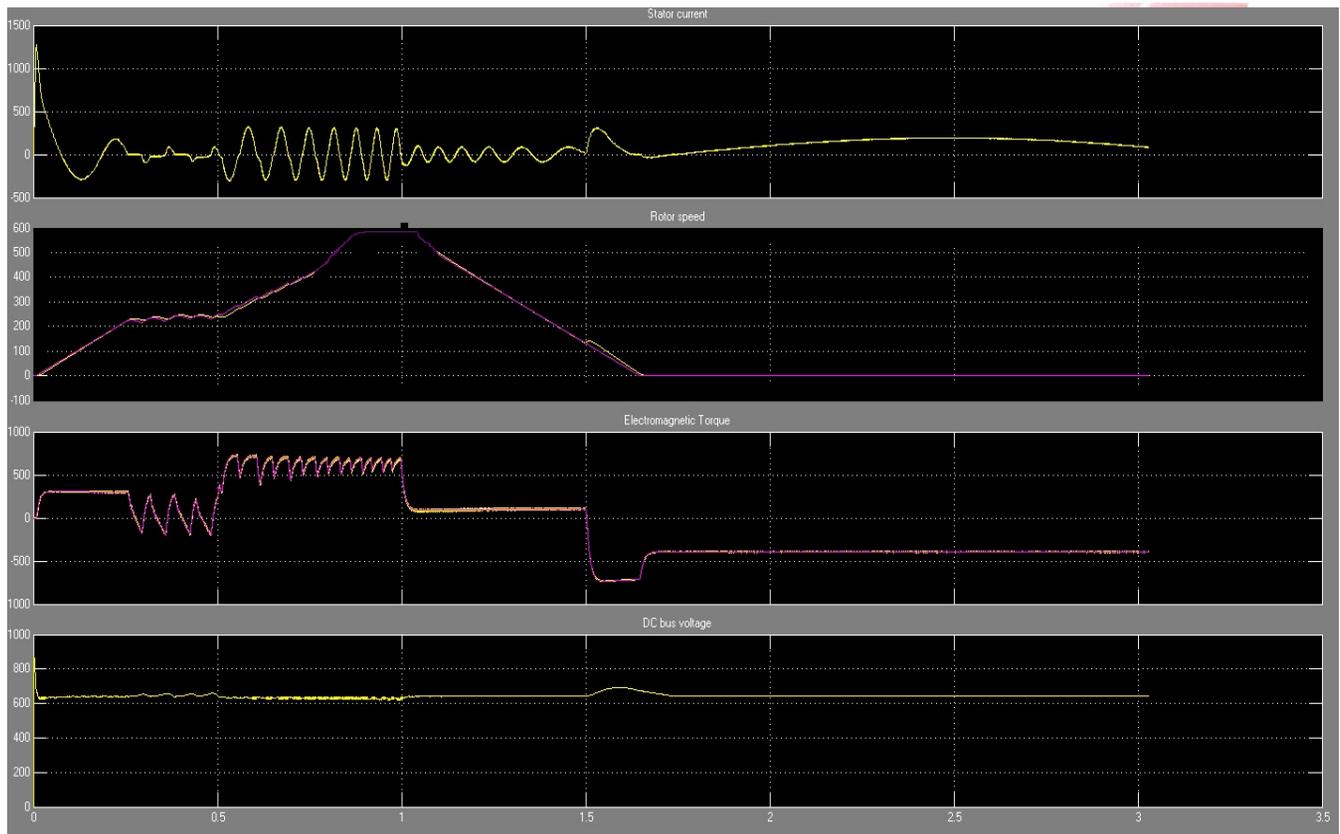
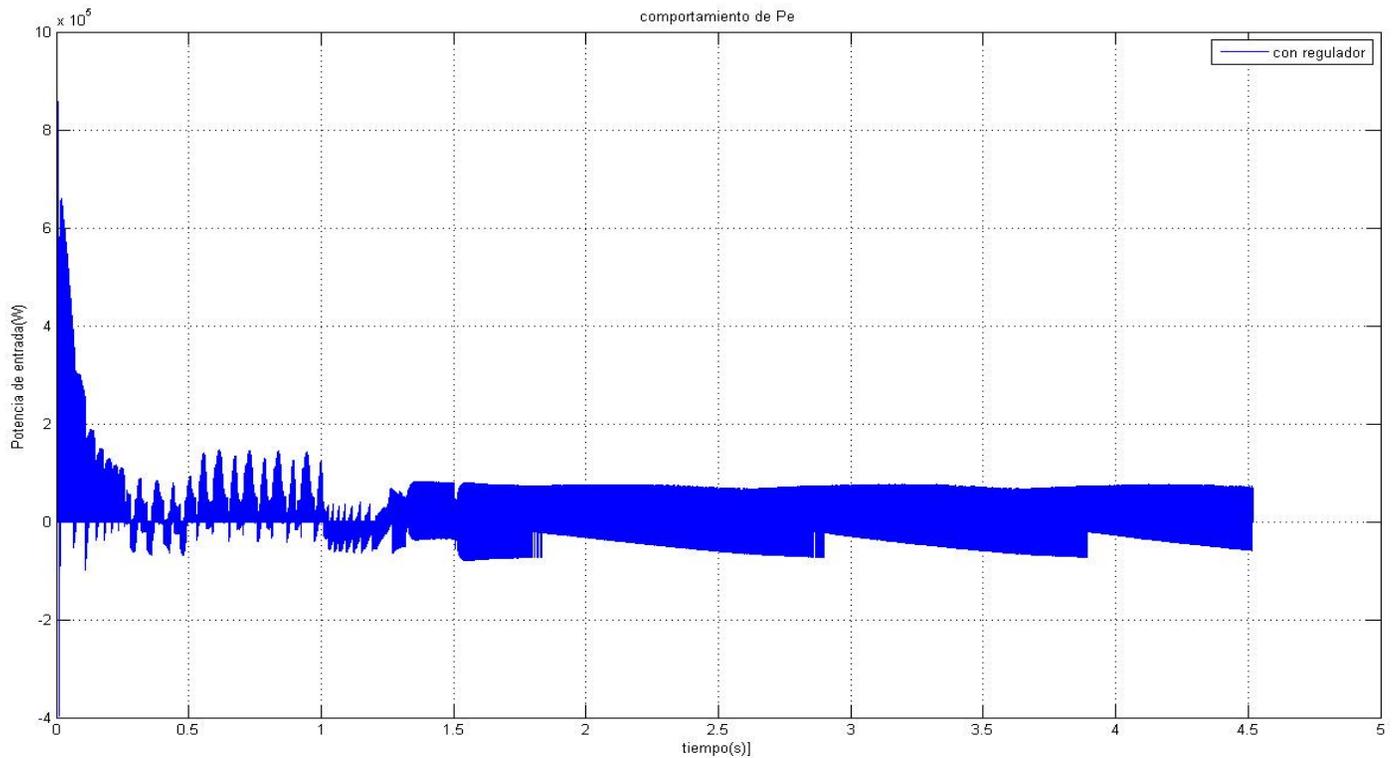


Figura 9. Gráfica donde se muestran todas las mediciones para el 50% de la carga nominal



www.ingenieria.com

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

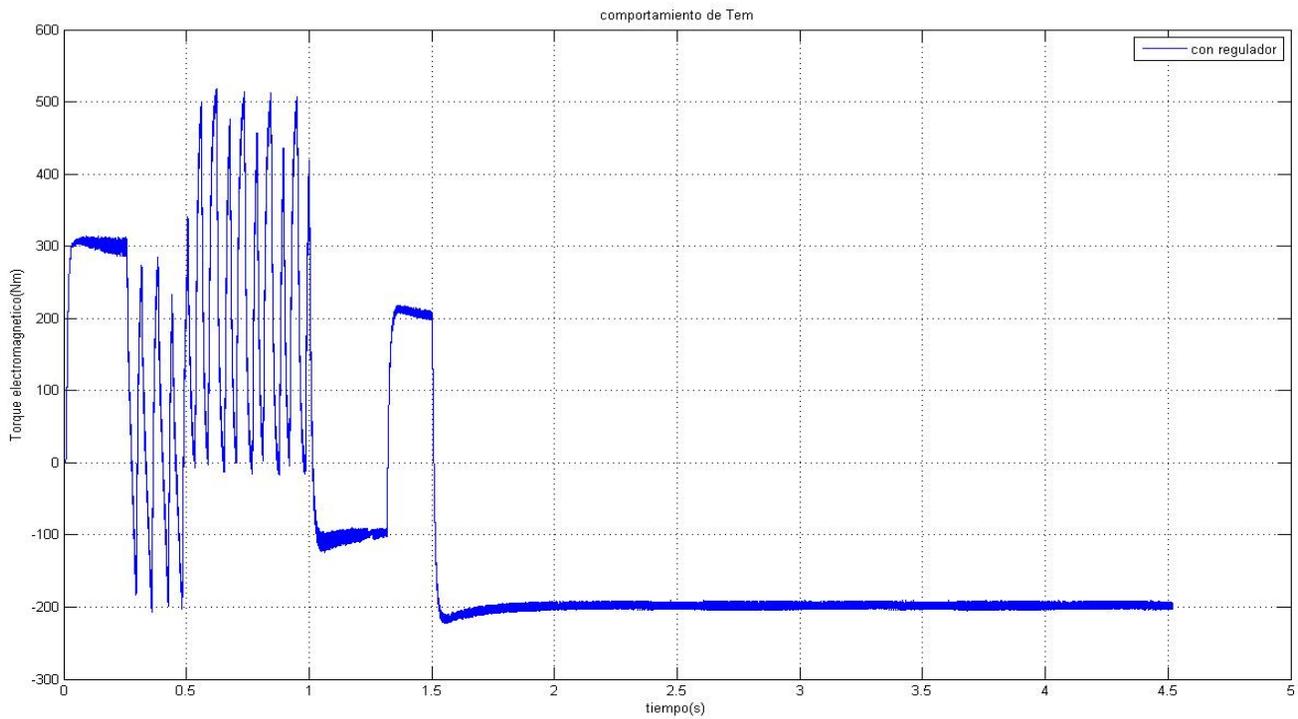


Figura 11. Gráfica del Torque electromagnético para el 25% de la carga nominal

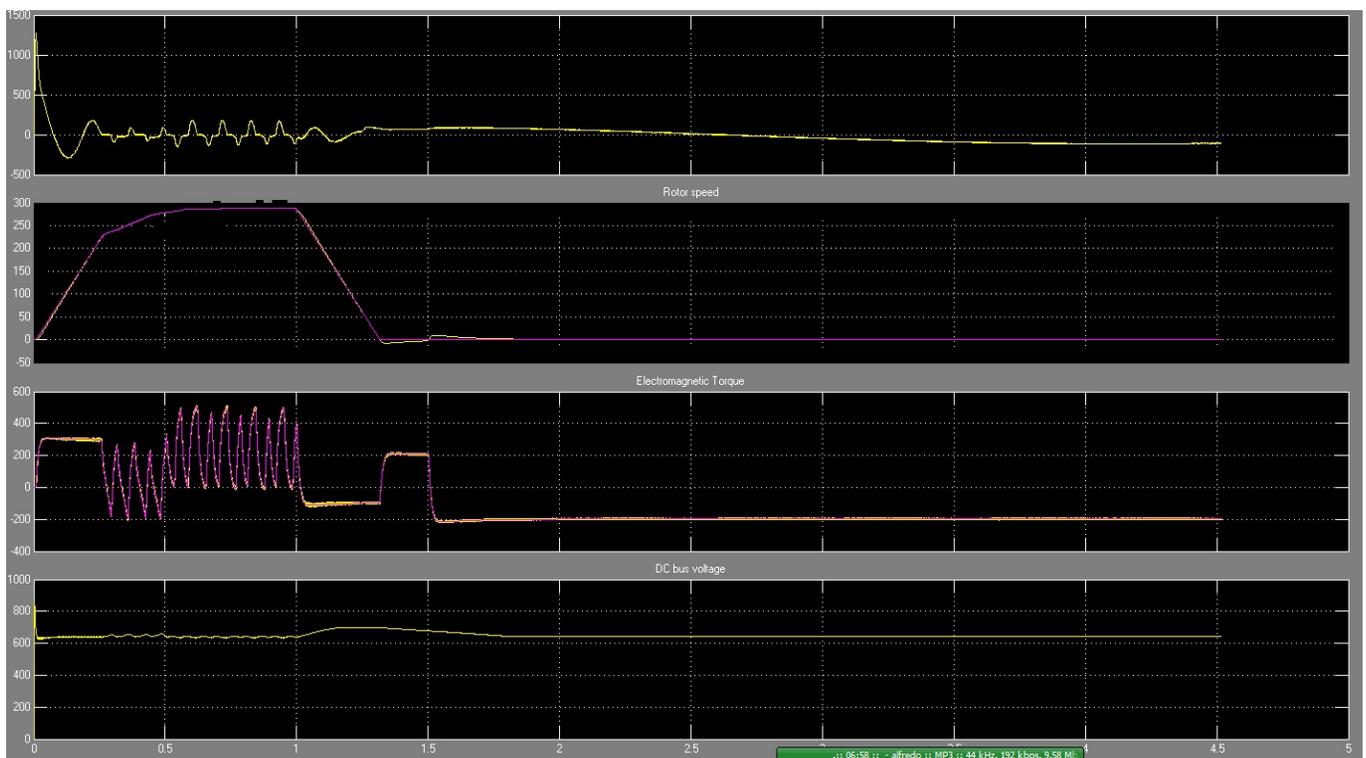


Figura 12. Gráfica donde se muestran todas las mediciones para el 50% de la carga nominal