



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELÉCTRICA

**ANÁLISIS DE UTILIZACIÓN DE MOTORES DE INDUCCIÓN DE ROTOR
BOBINADO EN EL ACCIONAMIENTO DE UN MOLINO DE BOLAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

RENATO NICOLÁS SANDOVAL MARMOLEJO

SANTIAGO DE CHILE
2011



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELÉCTRICA**

**ANÁLISIS DE UTILIZACIÓN DE MOTORES DE INDUCCIÓN DE ROTOR
BOBINADO EN EL ACCIONAMIENTO DE UN MOLINO DE BOLAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

RENATO NICOLÁS SANDOVAL MARMOLEJO

**PROFESOR GUÍA:
NELSON MORALES OSORIO**

**MIEMBROS DE LA COMISION
SERGIO MOSCOSO BUSTAMANTE
HECTOR AGUSTO ALEGRIA**

**SANTIAGO DE CHILE
2011**

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: RENATO SANDOVAL M.
FECHA: 7/04/2011
PROF. GUIA: NELSON MORALES O.

“ANÁLISIS DE UTILIZACIÓN DE MOTORES DE INDUCCIÓN DE ROTOR BOBINADO EN EL ACCIONAMIENTO DE UN MOLINO DE BOLAS”

El principal objetivo de este trabajo de título es la realización de un análisis técnico-económico que permite establecer la factibilidad de utilizar motores de inducción para el accionamiento de un molino de bolas, aplicando criterios de eficiencia energética en su diseño.

Primero se analiza las principales configuraciones utilizadas actualmente para el accionamiento de un molino de bolas, optando por la utilización de un accionamiento de piñones gemelos utilizando motores de inducción de rotor bobinado por su bajo costo, pero agregando la característica de velocidad variable para aumentar la eficiencia del sistema. Luego, se investigó los métodos más utilizados para el control de un motor de inducción de rotor bobinado, escogiendo un rango de velocidad de 85-110% y el uso del accionamiento *Scherbius* por su alta eficiencia.

A partir de lo anterior se diseñó el sistema necesario para el accionamiento del molino, especificando las características técnicas del molino de bolas y los equipos eléctricos necesarios para su accionamiento. Además se realizó un análisis del sistema mecánico involucrado, el diseño de la electrónica de potencia y el sistema encargado de controlar la velocidad del motor.

Diseñado el sistema para el accionamiento del molino de bolas, se creó un modelo matemático de los motores y el sistema de control de velocidad, todo bajo la plataforma *Simulink* de MATLAB. El estudio analizó la dinámica de las variables en todo el rango de velocidad del motor, prediciendo la dinámica del motor en operación.

Por otro lado el análisis económico contempló una comparación de los costos de inversión y operación de las tres opciones más factibles para el accionamiento del molino: motor sincrónico sin escobillas, inducción jaula de ardilla e inducción de rotor bobinado. Además se realiza un análisis energético para distintos casos de operación y potencia nominal.

Finalmente se concluye que la mejor opción corresponde a utilizar un motor de mayor potencia nominal al diseñado en un comienzo por el equipo metalúrgico, con el fin de operarlo al 85% de su velocidad nominal, ampliando de esta manera la capacidad para aumentar la velocidad a un 25%.

*Era Willy la Ballena
o Bruce Willis?
o Will Williams
o Lorenzo Willams?*

Renenato

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a quien ideó el tema de esta memoria, Sr. Sergio Moscoso, por su ayuda y dedicación en el desarrollo de este trabajo. Agradecer a los profesores integrantes de esta memoria Sr. Nelson Morales, quien gracias a sus dedicadas clases en incontables ramos y su tremenda ayuda en este trabajo, aportaron al termino exitoso de esta etapa universitaria, y al profesor Héctor Agosto quien con sus criticas e ideas, mejoraron este informe.

Agradecer además al profesor Sr. Roberto Cardenas por su ayuda invaluable para la finalización de esta memoria; y al Sr. Carlos Orellana por darme la oportunidad de desarrollar mi memoria en el proyecto Quechua, de la consultora AMEC.

Agradezco a Dios por darme mi familia, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida. Agradezco a mis padres Jorge y Sonia, por su apoyo, comprensión y cariño durante todos estos años; a mis hermanos Beatriz e Ignacio, quienes son y serán mi eterno orgullo. Y como no agradecer al integrante menor de mi familia, mi perro Coco-Cachibimbo.

También quisiera agradecer a todos mis tíos y primos que me han acompañado en estos años.

Agradecer a mis compañeros de ruta: Pajaro, Ciego, Keison, Kt, Lalo, Damaris y Pashka por estar cada vez que los necesité.

A mis amigos de la universidad y todos aquellos que estuvieron a mi lado durante esta etapa universitaria.

Y finalmente agradecer a mis compañeros de trabajo en AMEC, quienes aportaron con su tiempo y enseñanzas en la construcción de este trabajo.

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Alcance	2
1.3. Objetivo general	3
1.4. Objetivos específicos	3
1.5. Estructura del trabajo	3
2. Contextualización	5
2.1. Introducción	5
2.2. Molino de Bolas	6
2.3. Accionamiento mediante engranajes	8
2.3.1 Accionamiento por motores sincrónicos	10
2.3.2 Accionamiento por motores asincrónicos	14
2.4. <i>Gearless</i> o motor de anillos	16
3. Control de la velocidad	17
3.1. Introducción	17
3.2. Control de velocidad mediante reóstatos	18
3.3. Control de velocidad mediante <i>Chopper</i>	19
3.4. Accionamiento estático Kramer	20
3.5. Accionamiento estático Scherbius	21
4. Análisis del modelo conceptual	28
4.1. Introducción	28
4.2. Molino de Bolas	29
4.2.1 Descansos o <i>Bearings</i>	30
4.2.2 <i>Inching Drive</i>	31
4.3. Configuración	31
4.4. Motor	32
4.4.1. Partida del motor	34
4.4.2. Secuencia de partida hasta la operación	37
4.4.3. Descansos Motor	38
4.4.4. Protecciones	39
4.4.5. Accesorios del Motor	41
4.5. Transformador de Recuperación	42
4.6. Reductor	44
4.6. Piñones	45
4.7. Accionamiento Motor	46
4.7.1 Estrategia de control convertidor del lado del rotor.	48
4.7.2 Estrategia de control convertidor del lado de la línea	50
5. Modelo en MATLAB	51
5.1. Introducción	51
5.2. Simulación máquina doblemente alimentada sin control	51
5.2.1 Modelo máquina doblemente alimentada en MATLAB	52
5.2.2 Bloque para el cálculo de ω_r	55
5.2.3 Bloque para la conversión α - β \rightarrow d-q	56

5.2.4 Bloque para el cálculo θ_s	56
5.3 Ejemplo implementación de un motor de inducción sin control	58
5.3.1 Velocidad angular	58
5.3.2 Corrientes α - β	59
5.4. Simulación máquina doblemente alimentada con control	60
5.4.1 Controlador PI	61
5.4.2 Control de corrientes	62
5.4.3 Conversión dq-abc	63
5.4.4 Angulo rotor θ_r	63
5.4.5 Angulo θ_{sl}	64
5.4.6 Voltaje trifásico del rotor	66
6. Evaluación Económica	68
6.1. Introducción	68
6.2. Motores	68
6.2.1 Costos de operación	69
6.2. Sistema mecánico	71
6.3. Análisis a largo plazo	71
6.4. Análisis energético	72
7. Conclusiones	75
8. Referencias	78
Anexo 1	80
Código MATLAB del motor de inducción	80
Anexo 2	83
Código MATLAB – Otras funciones	83

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

En las últimas décadas, el mundo se ha visto enfrentado a un escenario energético complejo, con alzas en el costo de la energía y un crecimiento constante en la demanda. La opción más utilizada para este déficit de energía es la instalación de nuevas generadoras eléctricas; la decisión del tipo de generadora a instalar es un tema complejo y propio de cada país, que debe tomar en cuenta aspectos como: los recursos energéticos disponibles, leyes medioambientales, diversificación de la matriz energética, entre otros.

En base a lo anterior y con el objetivo de mitigar este déficit se ha estado desarrollado en los últimos años el concepto de eficiencia energética que busca solucionar el problema desde otro flanco, creando tecnologías inclinadas hacia la correcta utilización de la energía, disminuyendo así las pérdidas y con esto el consumo de energía.

La industria como uno de los principales consumidores de energía a nivel mundial ha tomado conciencia de este déficit y ha invertido en equipos eficientes, contribuyendo a una disminución en el consumo. La introducción de estos equipos en el mercado fue un proceso lento debido a sus altos costos de inversión pero solventados a largo plazo debido a la disminución de las pérdidas energéticas que significan una disminución en los costos de operación.

En el sector industrial, la minería representa uno de los mayores consumidores de energía, particularmente por las grandes máquinas eléctricas necesarias para la operación. En las plantas de la gran minería existen diversos procesos entre ellos se destacan: chancado, molienda, flotación, lixiviación y electroobtención; siendo la molienda, operación de reducción de tamaño de rocas y minerales, la mayor carga de la planta. El proceso de molienda es realizado por equipos denominados molinos, que son accionados por enormes motores, encargados de procesar toneladas de mineral consumiendo grandes cantidades de energía.

Es así que los molinos, también utilizados en la industria del cemento, preparación de combustibles, molienda de escorias, fabricación de harinas y alimentos, deben ser estudio de investigación con el objetivo de aumentar su eficiencia y disminuir así las pérdidas energéticas de los procesos en que se ven envueltos.

De aquí nace la principal motivación de esta investigación, que es entregar una alternativa eficiente a los métodos convencionales de accionamiento de molinos de bolas utilizando motores de inducción de rotor bobinado.

Para determinar la factibilidad de la propuesta se realiza un estudio técnico y una evaluación económica a largo plazo para determinar si esta opción puede llegar a ser una competencia a los métodos utilizados actualmente en el mercado. Es decir, este trabajo se centra en la evaluación técnica-económica del accionamiento de un molino de bolas del orden de los MW, realizando una comparación con dos tipos de tecnologías definidas de antemano. Estas tecnologías son: accionamiento con motores sincrónicos y asíncrónicos de jaula de ardilla. Esta elección se basa principalmente, considerando que las tecnologías mencionadas son las mayormente utilizadas en todo el mundo.

1.2. Alcance

Este trabajo se centra principalmente en analizar la factibilidad de instalar un accionamiento para el molino de bolas utilizando motores de inducción de rotor bobinado, realizando una comparación entre las tecnologías actuales:

- Sistema de piñón simple/doble utilizando motores sincrónicos de baja velocidad
- Sistema de piñón simple/doble utilizando motores de inducción de jaula de ardilla
- Sistema de motor de anillos (*Gearless*) utilizando cicloconvertidores

El estudio contempla una recopilación de los métodos convencionales utilizados para el accionamiento de un molino de bolas, observando parámetros clave como eficiencia, tipo de motores, costos de inversión, operación e instalación, entre otros. Luego, se analiza los principales métodos para el control de motor de inducción de rotor bobinado con el objetivo de determinar cual aporta la mayor eficiencia.

Cabe mencionar que el sistema de piñones gemelos es utilizado cuando la potencia a transmitir supera los 9500 HP que es el límite de la transmisión mecánica piñón-corona. Considerando que la potencia nominal del molino contemplado en esta memoria es cercano a los 20000 HP, solo quedan dos alternativas factibles: piñones gemelos y accionamiento *gearless*.

La siguiente etapa del estudio caracteriza el molino de bolas y los equipos eléctricos necesarios para su accionamiento, además de analizar el tipo de configuración, sistema de control de velocidad, electrónica de potencia, equipos mecánicos, entre otros.

Es así, que se pretende modelar los motores mediante el software MATLAB y su librería *SimPowerSystem*, para observar cómo se comporta el sistema en régimen permanente, transitorio. Finalmente se hace una evaluación económica a largo plazo de la solución

propuesta realizando una comparación con los métodos utilizados actualmente en la industria.

Un sistema de accionamiento de esta envergadura contiene demasiadas variables para realizar un modelo completo, solo se enfatizará en las características eléctricas del sistema, entendiéndose la electrónica de potencia y variables eléctricas del motor; dejando de lado cualquier característica mecánica. Además esta memoria no pretende inventar un nuevo sistema de control de los motores, ni menos desarrollar un software capaz de controlar un molino de bolas real, el modelo desarrollado solo pretende servir para observar el comportamiento a gran escala del sistema.

1.3. Objetivo general

El objetivo general es determinar si la utilización del sistema de piñones gemelos accionado mediante motores de inducción de rotor bobinado, utilizando un método de control de velocidad con el fin de mejorar la eficiencia del motor, representa una alternativa real para el accionamiento de un molino de bolas y analizar las ventajas o desventajas comparativas con los sistemas convencionales utilizados actualmente.

1.4. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Conocer el estado del arte en el desarrollo de tecnologías para el accionamiento de un molino de bolas.
- Desarrollar un sistema que aporte a la eficiencia energética
- Realizar una evaluación técnica de la solución propuesta.
- Desarrollar un modelo de simulación dinámica para el método propuesto con su respectivo sistema de control.
- Realizar una comparación de costos a corto y largo plazo entre los diversos métodos existentes y el planteado.
- Acercar el mundo de la industria a la universidad

1.5. Estructura del trabajo

La memoria se encuentra organizada en 6 capítulos. El primer capítulo presenta las motivaciones, objetivos y la estructura del trabajo.

El capítulo 2, corresponde a una revisión bibliográfica en donde se recopilan los antecedentes teóricos relacionados con el tema en estudio, y consta principalmente de información relacionada acerca de los distintos métodos para el accionamiento de molinos

de bolas que se presentan en el mercado, y cómo se ha comportado la demanda por los distintos tipos de alternativas a nivel nacional e internacional.

En el capítulo 3, se realiza una revisión bibliográfica de los métodos utilizados para el control de un motor de inducción de rotor bobinado, analizando los métodos para finalmente elegir uno que cumpla con los objetivos de esta memoria.

En el capítulo 4 se detalla el método sugerido para el accionamiento del molino de bolas, realizando una descripción de los diversos equipos y sistemas de control necesarios para el correcto funcionamiento del sistema propuesto.

En el capítulo 5 se desarrolla un modelo matemático de los motores de inducción de rotor bobinado y se hacen simulaciones básicas que den cuenta de resultados confiables.

En el capítulo 6, se observa la evaluación económica del método propuesto y la comparación con los métodos convencionales utilizados actualmente.

Por último, el capítulo de Anexos, incluye el detalle de los códigos y modelos.

Capítulo 2

Contextualización

2.1. Introducción

En los tiempos actuales la importancia en la vida global de las industrias de minería, procesamiento de minerales y cemento son innegables, sus aportes en áreas tan diversas como la medicina, transporte, tecnología, construcción y en la gran mayoría de productos confirma su importancia en la vida moderna.

El procesamiento de minerales es un tema ampliamente estudiado, no es el objetivo de esta memoria ahondar en este tema, pero si cabe destacar sus etapas generales: conminución, clasificación y finalmente la obtención del mineral; en la minería del cobre la obtención puede ser lograda mediante lixiviación, flotación o electroobtención.

La etapa de la conminución es básicamente la reducción del tamaño del mineral. Es natural pensar que esta etapa podría ser llevada a cabo de una sola vez; es decir, que un equipo tome un trozo de material y lo convierta en arena en un solo paso. Desafortunadamente, aún no se ha podido desarrollar una máquina capaz de realizar el proceso de una sola vez para todos los tipos de materiales. Por esto, en la mayoría de las aplicaciones, son necesarias varias etapas para la disminución del tamaño de las partículas y más de un equipo.

Es por esto que la etapa de conminución se lleva a cabo mediante subprocesos denominados chancado y molienda; el hecho que existan estos subprocesos y no sólo uno de ellos, responde a dos motivos muy claros: factibilidad técnica y económica. Existe un límite para el cual los chancadores son eficientes y, pasado éste, realizan muy poco trabajo en comparación con la energía consumida. Para este caso existen otras máquinas que realizan la reducción de material con un rendimiento mucho mayor: los molinos.

Este capítulo presenta las diversas configuraciones utilizadas en la industria para el accionamiento de un molino de bolas. Se entenderá por accionamiento de un molino de bolas toda aquella tecnología y equipamiento necesario para lograr el movimiento del molino. Estas tecnologías han ido evolucionando a través de los años, debido a la continua demanda por molinos de bolas particularmente en las industrias de la minería y el cemento que los utilizan en sus plantas de procesos.

El desarrollo de estas tecnologías tiene como meta crear equipos altamente eficientes y capaces de lograr un control sutil de la velocidad del molino a un bajo costo tanto inicial como operacional, aplicando conceptos de eficiencia energética. En un comienzo la investigación estaba abocada a reducir las pérdidas mecánicas producidas en los ejes y

engranajes del accionamiento del molino llegando a un límite físico que impedía seguir mejorando la eficiencia del accionamiento mecánico. Paralelamente se han desarrollado otras tecnologías como la electrónica de potencia que ha sido de vital importancia para obtener sistemas de motores cada vez más eficientes.

Existen diversos tipos de configuraciones para el accionamiento del molino que se pueden dividir en dos grandes grupos, un primer grupo caracterizado por la utilización de una variedad de arreglos de engranajes y sistemas mecánicos para el accionamiento del molino, y una segunda opción denominada motor de anillos, que no utiliza sistemas mecánicos.

2.2. Molino de Bolas

Un molino es un artefacto o equipo que sirve principalmente para moler y consta de las siguientes partes, ver figura 2-1:

- Tambor
- Descansos
- Sistema de accionamiento

El tambor corresponde a una coraza cilíndrica de acero con tapas cónicas. En su interior lleva un sello de goma y revestimientos de acero y/o goma que forman la superficie de contacto con las bolas de acero. En las tapas del molino se adosan dos cilindros que servirán de soporte (*trunnion*). Los apoyos o descansos utilizan sustentación hidrostática para minimizar el roce al girar, esto se logra con inyección de aceite mediante bombas de alta presión. El molino de bolas es llenado normalmente entre un 30-35% con bolas de acero, resistentes a la abrasión y de preferencia más pesados que el mineral a romper; por norma la carga total no debe exceder el 45% del volumen total del molino.

La operación del molino consiste en moler una pulpa, que consiste en mineral más agua, producto de la rotación, el giro es producido sobre los *trunnions*, básicamente cilindros instalados en las tapas o *heads* del molino, los cuales son soportados por descansos que deben ser lubricados para reducir la fricción del movimiento de rotación.

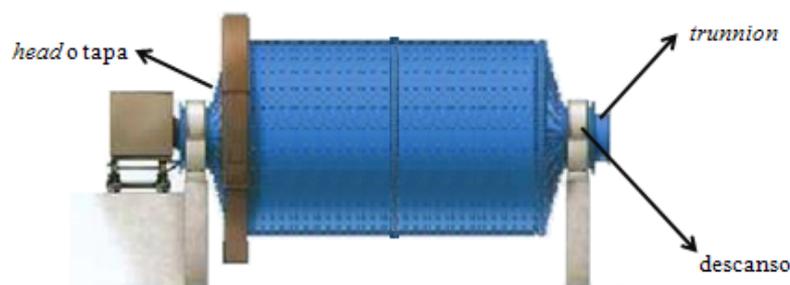


Figura 2-1. Vista lateral.

Al exceder un cierto ángulo parte de la carga se desliza por la camisa interna del molino, figura 2-2, mientras otra parte cae como cascada, esto genera el desgaste por abrasión y por impacto respectivamente.

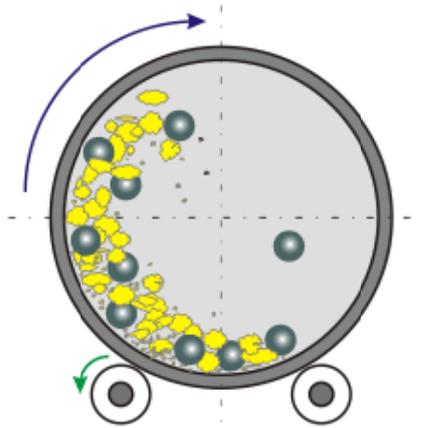


Figura 2-2. Vista frontal

Dependiendo del sistema de descarga existen distintos tipos de molinos:

Figura 2-3. Tipo overflow

Los molinos con descarga *overflow* o de sobrellenado, figura 2-3, se suelen utilizar para partículas resultantes menores; es alimentado a través de uno de sus *trunnion* y la descarga de material se produce por rebalse en el otro. Además es importante considerar que el tamaño del *trunnion* de descarga es mayor que el de alimentación con el fin de que la pulpa no se evacúe por el *trunnion* de alimentación.

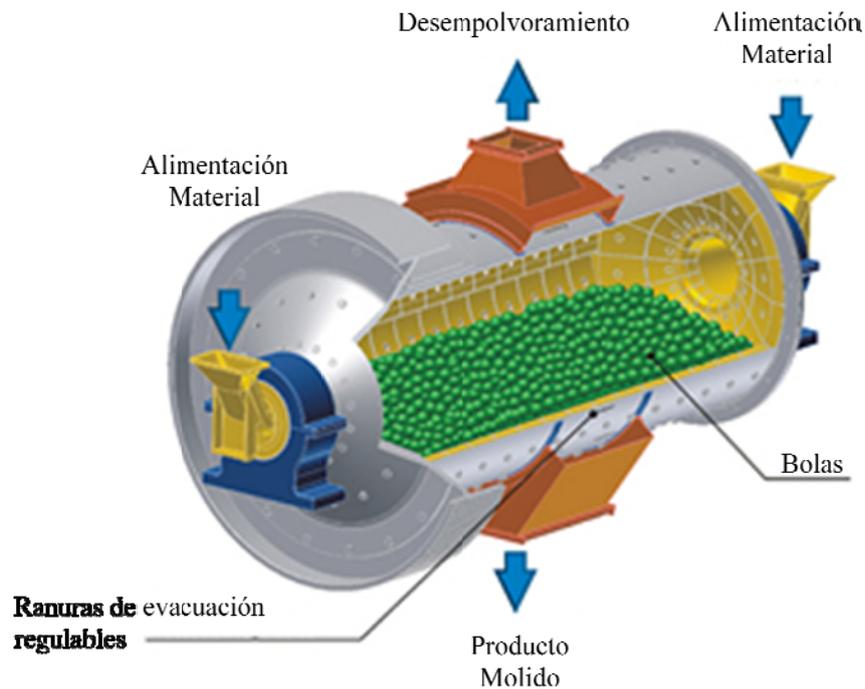


Figura 2-4. Tipo descarga central. Gentileza de www.portonartesano.com.ar

El sistema de molino de bolas por descarga central, figura 2-4, es utilizado para partículas resultantes mayores, la alimentación es mediante ambos *trunnions* y la descarga se produce debido a la gravedad, el material cae a través de unas ranuras regulables que se instalan en el centro del molino. Esta memoria contempla el uso del sistema *overflow*.

2.3. Accionamiento mediante engranajes

Tradicionalmente el accionamiento de los molinos de bolas es realizado por motores de inducción en Europa y motores sincrónicos en USA, la transmisión de potencia entre los motores y el cuerpo cilíndrico del molino es realizada por sistemas mecánicos, integrados por una variedad de arreglos de engranajes y/o embriagues.

La configuración convencional de molino, figura 2-5, muestra la configuración europea con una corona dentada, engranajes, piñones, reductor y motor de inducción, para una velocidad nominal de 1000 rpm. Esta configuración simple puede ser usada como un sistema de piñón simple o dual, es decir, uno o dos motores. El uso de motores de inducción de rotor bobinado asegura entregar suficiente torque para la partida del molino pero sigue teniendo una limitación de la corriente de partida; en otras palabras no es necesario la instalación de un embriague de aire para suministrar el torque en la partida.

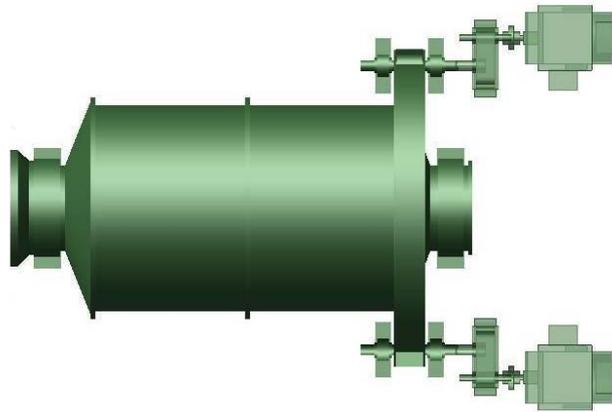


Figura 2-5. Configuración europea

Un diseño americano típico es mostrado en la Figura 2-6, con una corona dentada y piñón, pero sin reductor y utilizando motor sincrónico de baja velocidad, es decir un motor con gran cantidad de polos, por ejemplo con una velocidad nominal de 200 rpm. El uso de motores sincrónicos tiene la característica de un bajo torque de partida, el sistema de piñón directo es generalmente equipado con un embriague de aire o un embriague hidráulico entre el motor y el piñón. El embriague permite al motor partir y alcanzar la velocidad nominal previa a la partida del molino. Para grandes potencias una combinación del sistema de piñones gemelos con corona dentada y embriagues de aire debiese funcionar correctamente.

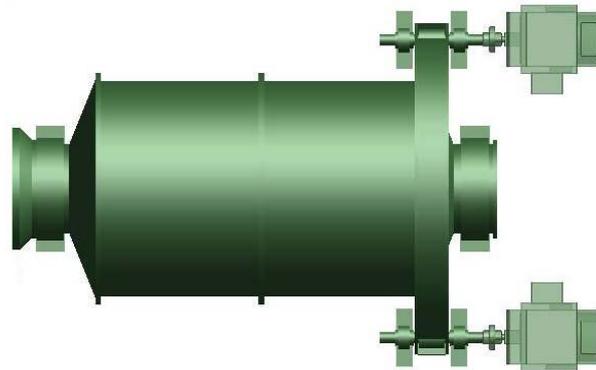


Figura 2-6. Configuración americana

Para molinos con potencias superiores a los 10 [MW] se utiliza el sistema de piñones gemelos, debido a que actualmente no existen motores confiables capaces de generar tanta potencia y por las limitaciones en la transmisión mecánica que este nivel de potencia exige. Por lo tanto se utilizan dos motores idénticos capaces de entregar la potencia exigida. Con el creciente tamaños de los molinos y sus accionamientos una variedad de problemas han surgido con respecto a la manufactura y operación de la transmisión de potencia mediante engranajes, disminuyendo la disponibilidad y confiabilidad de los grandes molinos. Es decir, los límites económicos y tecnológicos de los engranajes han sido alcanzados.

2.3.1 Accionamiento por motores sincrónicos

Los motores sincrónicos son un tipo de motor eléctrico de corriente alterna, caracterizados principalmente por tener una velocidad de giro del eje en régimen permanente directamente proporcional a la frecuencia de suministro eléctrico e inversamente proporcional a los polos de la máquina; existen motores monofásicos y polifásicos, sin embargo en la industria el uso de motores sincrónicos se ha inclinado por utilizar su versión trifásica. De un punto de vista constructivo un motor sincrónico trifásico está constituido por un estator y un rotor; el estator, llamado así por ser la parte estática del motor, contiene un devanado trifásico que al ser alimentado por una fuente trifásica crea el fenómeno de “campo magnético rotatorio”, se denomina así al campo magnético resultante de la interacción de las fuerzas magneto motrices de los tres enrollados del estator, cuando estos son alimentados desde una fuente trifásica de voltajes. Por otro lado el rotor contiene un devanado de corriente continua, denominado devanado de campo, y un devanado en cortocircuito, que impide el funcionamiento de la máquina a una velocidad distinta a la de sincronismo, denominado devanado amortiguador, Romo [14].

Existen dos tipos de rotores, el rotor de polos salientes y el rotor cilíndrico o rotor liso; el rotor de polos salientes es utilizado para aplicaciones donde es necesario una baja velocidad de giro del motor, lo cual se logra agregando polos a la construcción del rotor y por su parte el rotor liso se utiliza para aplicaciones de alta velocidad.

En la industria minera los motores sincrónicos han sido ampliamente utilizados para el accionamiento de molinos, su uso ha sido masificado debido principalmente a que la industria estadounidense desarrolla su tecnología enfocada en el uso de este tipo de motores. Típicamente se opta por un motor sincrónico trifásico de polos salientes, debido a su característica de regular la velocidad de giro mediante la elección del número de polos, logrando así velocidades reducidas de giro característica primordial para el accionamiento de un molino. La elección de utilizar motores sincrónicos para el accionamiento del molino de bolas implica una serie de características inherentes al motor sincrónico: velocidad de giro del eje controlado por las variables de entrada del estator, bajo torque de partida, complejidad constructiva, entre otros.

El trabajo realizado por el molino puede ser considerable dependiendo de las variaciones de la dureza del mineral; el uso de un accionamiento de velocidad variable puede ayudar a compensar estas variaciones. Por lo tanto, un considerable interés se ha concentrado en este concepto.

Existen un sinnúmero de maneras para accionar un molino a velocidad variable utilizando motores sincrónicos y la electrónica de potencia, sin embargo algunas soluciones no son viables técnica o económicamente siendo desechadas para aplicaciones en la industria. A continuación se presentan los principales métodos utilizados, realizando una discusión que cubre los beneficios y desventajas de cada accionamiento.

Los accionamientos de motores sincrónicos que se utilizan actualmente tiene la característica de tener una velocidad variable y controlada. Las razones son las siguientes:

- a) Dependiendo de la dureza del material la velocidad del molino puede ser modificada, reduciendo las pérdidas energéticas
- b) Una mayor posibilidad de eficiencia y confiabilidad
- c) Posibilidad de controlar el motor a una velocidad reducida, con los beneficios inherentes de esta característica.

2.3.1.1 Cicloconvertidores

Esta solución presenta un control de la velocidad de los motores denominado cicloconvertidores, circuito de electrónica de potencia encargado de realizar una conversión AC-AC de forma directa, sin pasar por una etapa DC. El esquema utilizado consta de dos motores sincrónicos controlando dos piñones conectados a una corona dentada común. Los motores utilizados son de pocos polos y son alimentados por cicloconvertidores a una baja frecuencia, figura 2-7. El sistema para compartir la carga es similar al utilizado por dos motores DC.

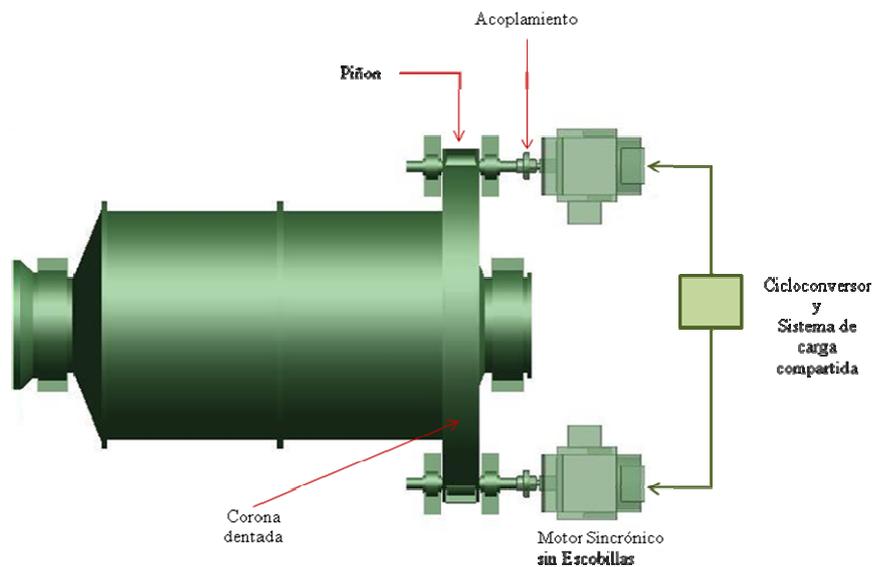


Figura 2-7. Esquema de accionamiento media cicloconvertidores

Beneficios:

- Baja inversión inicial
- Suave, controlada aceleración, desaceleración y paso
- Habilidad de operar sobre y bajo la velocidad nominal
- Capacidad de posicionamiento del molino
- No *pull-out torque*

Desventajas:

- Transmisión mecánica debido a los engranajes
- Requiere la acción del dispositivo “*shear pin*” para la protección de cortocircuito de torques
- No le es inherente la característica de sobrecarga
- No contribuye con la generación de reactivos
- Estator y rotor deben ser removidos para realizar reparaciones

2.3.1.2 *Load Commutated Inverter (LCI)* o Inversor conmutado por carga

Este esquema consta de dos motores sincrónicos de baja velocidad cada uno conectada a un piñón y estos a su vez controlando una corona dentada instalada alrededor del molino. Los motores son alimentados por dos variadores de frecuencia “*load commutated inverter*” los cuales comparten carga de la misma manera que dos motores DC, figura 2-8. Entre cero y un 10% de velocidad, la fuente de energía conmutada forzadamente generando torques pulsantes de aproximadamente $\pm 30\%$ del torque desarrollado. Este torque pulsante producirá frecuencias naturales en el equipo entre cero y 72 [Hz]. Con el fin de asegurar que no existan daños en el sistema normalmente se utilizan análisis transiente de torsión. Es posible que sea necesario acoplamiento reforzados en este accionamiento.

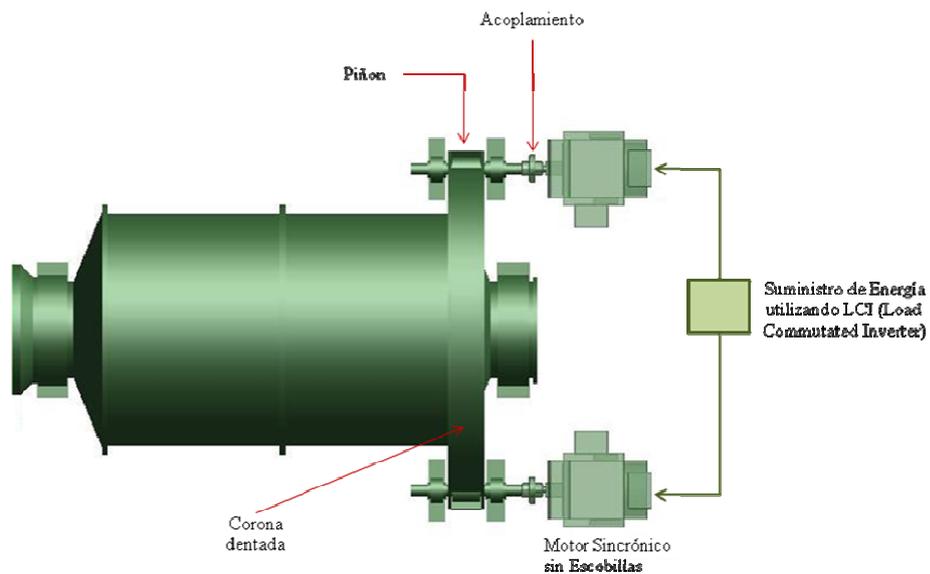


Figura 2-8. *Load Commutated Inverter*

Beneficios

- Suave, controlada aceleración de 10% a la velocidad de operación
- Baja mantención de motores
- Habilidad de operar sobre y debajo de la velocidad base
- No *pull-out torque*

2.3.2 Accionamiento por motores asincrónicos

Las máquinas asincrónicas o de inducción son máquinas de corriente alterna, utilizadas principalmente como motores, en cuyo caso el funcionamiento básico consiste en alimentar el enrollado trifásico del estator desde una fuente trifásica para producir un campo magnético rotatorio, igual que una máquina sincrónica, este campo rotatorio induce corrientes alternas en el enrollado del rotor produciéndose así un torque motriz en el eje de la máquina.

Los motores de inducción puede ser divididos en dos grandes grupos dependiendo de la construcción del rotor: rotor bobinado y jaula de ardilla, siendo el primero un bobinado trifásico accesible mediante escobillas, en cambio el rotor de la jaula de ardilla está constituido por una serie de conductores metálicos dispuestos paralelamente unos a otros, y cortocircuitados en sus extremos por unos anillos metálicos.

2.3.2.1 Motor Jaula Ardilla

Los motores de inducción de jaula ardilla son característicamente motores de alta velocidad por lo cual se hace necesario la instalación de reductores de velocidad a modo de lograr una velocidad reducida en el molino. El sistema consiste en un modelo europeo típico utilizando motores de inducción jaula de ardilla, figura 2-10.

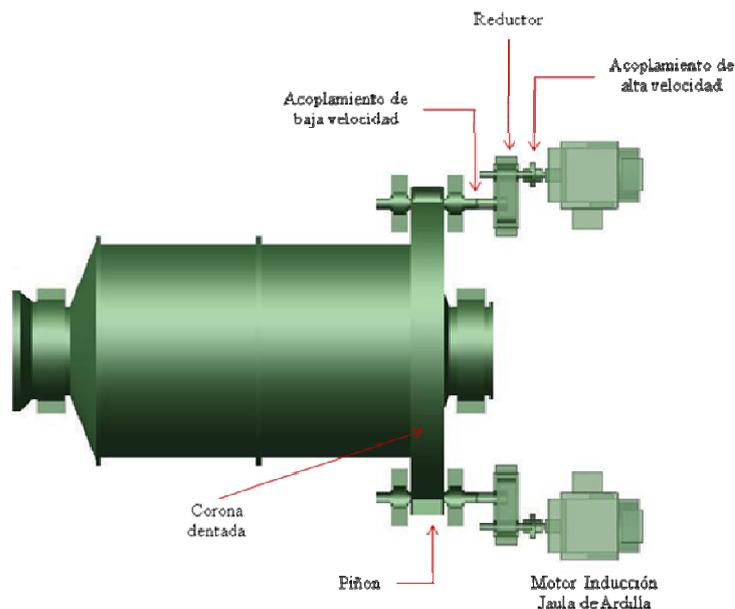


Figura 2-10. Configuración motor jaula de ardilla

Beneficios

- No es necesario la instalación de embriagues para la partida
- Motores de fácil mantención
- Altamente confiables

Desventajas

- Es necesario un arreglo de engranajes
- Es necesario la instalación de reductores de velocidad
- Menor versatilidad
- Es necesario la instalación de condensadores para la regulación del factor de potencia

2.3.2.2 Motor Rotor Bobinado

Esta configuración consta de dos motores de inducción de rotor bobinado conectados a un reductor de velocidad mediante acoplamientos de alta velocidad, a su vez el reductor es conectado a un piñón utilizando un acoplamiento de baja velocidad, los piñones son conectados a una corona dentada común. La partida de los motores es lograda mediante un equipo de reóstatos líquidos común que al alcanzar la velocidad sincrónica cortocircuita las tres fases del rotor, operando así como un motor de inducción de jaula de ardilla. El sistema para compartir la carga es similar al utilizado por dos motores DC, figura 2-11.

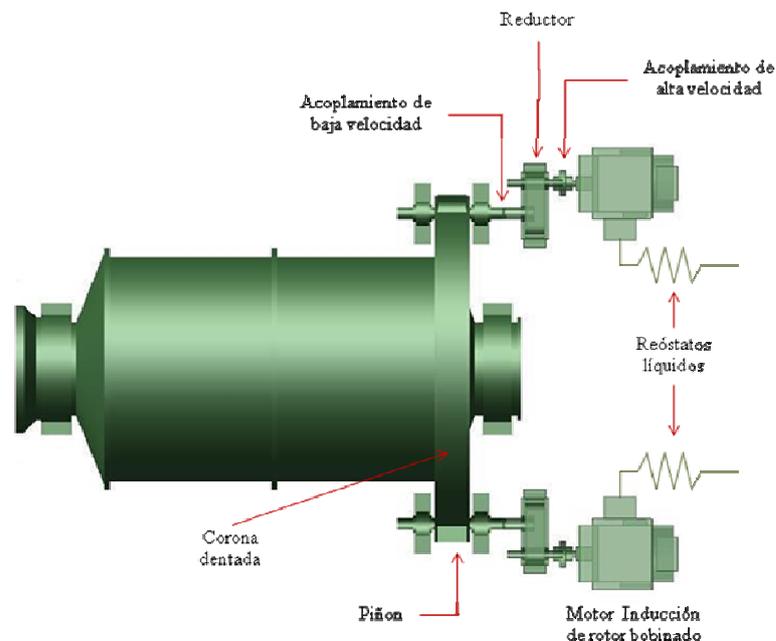


Figura 2-11. Configuración motor de rotor bobinado.

Beneficios

- Bajo costo de inversión inicial
- Motores de fácil mantención
- Altamente confiables

Desventajas

- No existe control de la velocidad
- Es necesario reóstatos líquidos para hacer partir el motor

Esta memoria pretende convertir el sistema actual de motor de inducción de rotor bobinado, en un sistema de velocidad variable controlada, capaz de variar la velocidad de forma dinámica y proporcional a la dureza del material de alimentación.

2.4. *Gearless* o motor de anillos

Existe otro método capaz de accionar un molino denominado *gearless* o motor de anillos, su nombre se debe a que elimina toda componente mecánica en el sistema de accionamiento de los molinos convencionales, como la corona dentada, piñones, caja de engranajes, acoplamientos, eje de motores, descansos, entre otros.

El accionamiento *gearless* consiste en un motor sincrónico diseñado para operar a bajas velocidades variables controlado mediante una fuente de cicloconvertidores (CCV). El rotor del motor es a su vez el molino, es decir los polos del rotor son acoplados mecánicamente alrededor de la estructura cilíndrica del molino. La superestructura del estator es montado en el piso rodeando el rotor. De esta manera, toda la potencia del accionamiento del molino es transmitida magnéticamente al molino y no mediante las conexiones mecánicas convencionales (engranajes), figura 2-12.

Actualmente este método es utilizado para mover molinos SAG, semiautógenos, con una potencia nominal en el rango de los 15-30 [MW], y molinos de bolas con una potencia nominal superior a los 17 [MW], este sistema a pesar de ser un sistema altamente eficiente, tiene la desventaja de ser muy costoso.

La potencia nominal del molino de bolas considerado para esta memoria es de 15[MW], considerando además que esta memoria tiene como objetivo proponer un sistema que equilibre los costos de inversión y eficiencia energética, se debe descartar la posibilidad de usar un sistema *gearless*. Finalmente se opta por estudiar un sistema de velocidad variable utilizando motores de inducción de rotor bobinado.

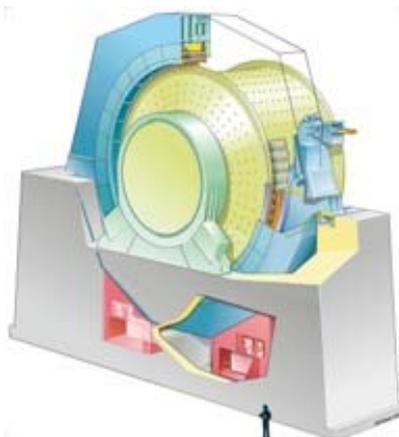


Figura 2-12. Accionamiento *gearless*. Gentileza ABB.

Capítulo 3

Control de la velocidad

3.1. Introducción

Las distintas configuraciones para el accionamiento de molino de bolas aseguran convertir satisfactoriamente la potencia mecánica del motor en la energía de rotación necesaria para la molienda del material. Sin duda se ha hecho un desarrollo importante en el sistema mecánico del accionamiento, alcanzando límites de eficiencia mecánicos propios de los materiales. En cambio la eficiencia eléctrica aún no ha alcanzado los límites y se siguen realizando estudios sobre control de motores, con el objetivo de lograr sistemas energéticamente eficientes.

En los yacimientos mineros es típico encontrar rocas con distintas durezas, la cual depende de las diversas variables geológicas del lugar, litología, alteraciones, estructuras secundarias, entre otros. Las rocas con mayor dureza necesitan más energía para ser molidas; mayor energía implica una mayor velocidad de giro del molino. La característica de tener controlado la velocidad del motor permitirá entonces elegir la velocidad de giro dependiendo de la dureza del material, utilizando así la energía de manera eficiente.

Para aplicaciones de este tipo, un motor de inducción de rotor bobinado presenta una solución interesante; si el estator está conectado a la red de frecuencia constante mientras el rotor es alimentado con una frecuencia de deslizamiento mediante un convertidor estático, sus valores nominales son principalmente determinado por el rango de velocidad deseado y puede ser mantenido relativamente pequeño. Es importante destacar que la energía de deslizamiento puede alcanzar valores importantes para máquinas de gran potencia, haciendo necesario un sistema de control robusto y eficiente.

Desde comienzos de siglo, una variedad de circuitos de accionamiento han sido desarrollados para ser usados en el control de motores de inducción, por supuesto ellos están obsoletos actualmente; con el progreso de la electrónica de potencia nuevas soluciones se han vuelto posibles.

Por lo tanto el presente capítulo convoca los principales métodos utilizados para el control de velocidad de un motor de inducción de rotor bobinado, analizando cual accionamiento cumple con los objetivos de esta memoria.

3.2. Control de velocidad mediante reóstatos

Uno de los métodos más clásicos y simples para el control de velocidad de un motor de inducción de rotor bobinado es mediante la variación mecánica de las resistencias del circuito del rotor, como se muestra en la figura 3-1:

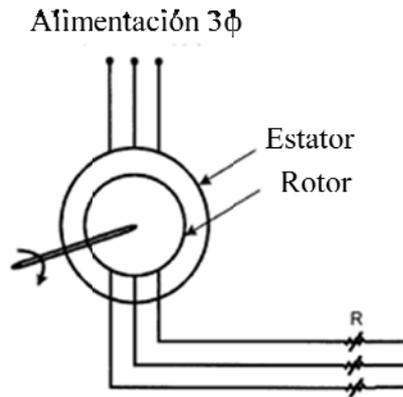


Figura 3-1. Variación mecánica de resistencias

Considerando una resistencia externa R igual a 0, esto es, con los anillos de deslizamiento en cortocircuito, funcionando como motor de inducción jaula de ardilla, el motor gira a una velocidad sincrónica. Al aumentar la resistencia, se va disminuyendo la velocidad hasta que se vuelve cero para grandes resistencias. El máximo torque permanece constante, pero el torque de partida aumenta proporcionalmente con la resistencia externa. El método para el control de la velocidad mediante la variación mecánica de la resistencia del rotor tiene una desventaja inherente, es muy ineficiente debido que la energía de deslizamiento es desperdiciada en la resistencias del rotor. De todas maneras, este método tiene ciertas ventajas: ausencia de altas corriente en la partida (*in-rush*), disponibilidad del torque nominal en la partida, alto factor de potencia, ausencia de armónicos en las corrientes de línea, y un amplio y fluido rango del control de la velocidad, por estas razones es utilizado actualmente para realizar la partida del motor, las resistencias han sido reemplazadas por reóstatos líquidos, que disminuyen las pérdidas por efecto de la temperatura, Bose [3]

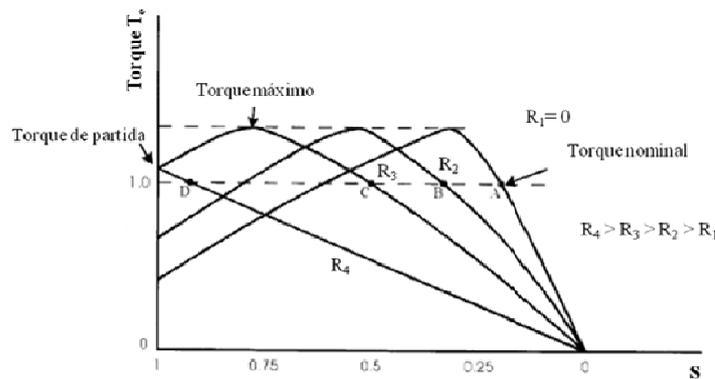


Figura 3-2. Curvas de torque.

3.3. Control de velocidad mediante *Chopper*

En vez de utilizar una variación mecánica de las resistencias del rotor es posible variar estáticamente la resistencia equivalente utilizando el circuito de la figura 3-3, compuesto por un puente rectificador de diodos y un *chopper*. El estator de la máquina es conectada directamente a la línea, pero en el circuito del rotor el voltaje de deslizamiento es rectificado por un rectificador de diodos, el puente DC.

En el puente DC es conectada una gran inductancia en serie L_d , convirtiendo así el voltaje DC en una fuente de corriente I_{DC} , esta corriente entonces alimenta un IGBT¹ con una resistencia. El *chopper* es controlado vía PWM (*Pulse-width modulation*) con un *duty cycle* o ciclo de trabajo, con $d = ton/T$, ton = tiempo de encendido y T = período. Cuando el IGBT está apagado, la resistencia es conectada al circuito y la corriente I_d del puente DC fluye a través de ella. Por otro lado, cuando en el dispositivo la resistencia está en cortocircuito, la corriente I_{DC} busca una ruta alternativa fluyendo a través del IGBT.

Puede ser demostrado que el control del *duty cycle* del *chopper* entrega una resistencia equivalente $R_0 = (1-d)R$ entre los nodos A y B. Por lo tanto el torque y la velocidad desarrollada por la máquina puede ser controlado variando el *duty cycle* del *chopper*. Este control electrónico de la resistencia del rotor tiene definitivamente ventajas por sobre el control por reóstatos, lamentablemente permanece el mismo problema de siempre, la baja eficiencia del accionamiento. Este esquema ha sido usado en aplicaciones con un control intermitente de la velocidad con un rango limitado de velocidad, donde la desventaja de la eficiencia no es de gran consideración.

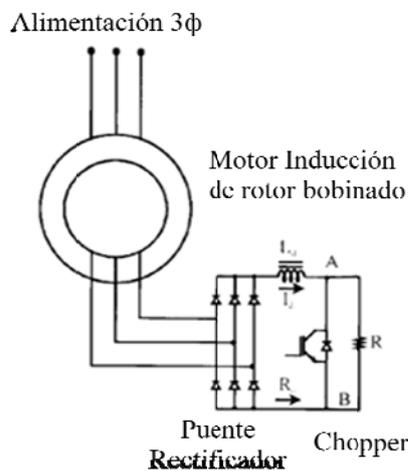


Figura 3-3. Control mediante Chopper

¹ IGBT: El transistor bipolar de compuerta aislada (IGBT, del inglés Insulated Gate Bipolar Transistor) es un dispositivo semiconductor que generalmente se aplica como interruptor controlado en circuitos de electrónica de potencia.

3.4. Accionamiento estático Kramer

El control de la velocidad mediante el accionamiento vía reóstatos o utilizando *chopper*, tienen la desventaja de desperdiciar la energía en resistencias externas al rotor. Ahora si en vez de desperdiciar la energía de deslizamiento en resistencias externas del rotor, esta es convertida en corrientes sinusoidales, con una frecuencia de 60 [Hz] para los objetivos de esta memoria, para luego ser devuelta a la red mediante un convertor, entonces la eficiencia del accionamiento se vería drásticamente aumentada. Este sistema es conocido como *Static Kramer Drive*, desde ahora accionamiento Kramer; el esquema se observa en la figura 3-4. Este accionamiento de la energía de deslizamiento lamentablemente solo permite un rango de velocidad subsíncrono. El accionamiento Kramer ha sido muy popular en accionamientos de ventiladores y bombas de grandes capacidades, donde el rango del control de velocidad es limitado a una velocidad cercana y menor a la sincrónica. El sistema de control es muy eficiente y el nivel de potencia del convertor es bajo, ya que solo debe manipular la energía de deslizamiento que es una fracción de la potencia nominal del motor. De hecho, los niveles de potencia pueden ser disminuidos aun más, pero con una restricción mayor en el rango del control de velocidad. Las ventajas compensan ampliamente las desventajas de una máquina de rotor bobinado y serán explicadas más adelante, este sistema de control tiene la característica de una máquina DC y el control es bastante simple.

El flujo del entrehierro de la máquina es establecido por el suministro en el estator, y prácticamente permanece constante si las caídas de voltaje estator y fluctuaciones del voltaje de la red no son consideradas. Idealmente, la corriente del rotor de la máquina es una onda de seis pulsos en fase con el voltaje del rotor, si la corriente I_d del puente DC es considerada libre de armónicos y el ángulo de conmutación del rectificador de diodos no es considerada. Con un flujo del entrehierro constante, el torque de la máquina es directamente proporcional a la corriente i'_{rf} , corriente de rotor de la frecuencia fundamental referida al estator. Al ser i'_{rf} directamente proporcional a la corriente i'_{DC} del puente DC, el torque es también proporcional a la corriente i'_{DC} .

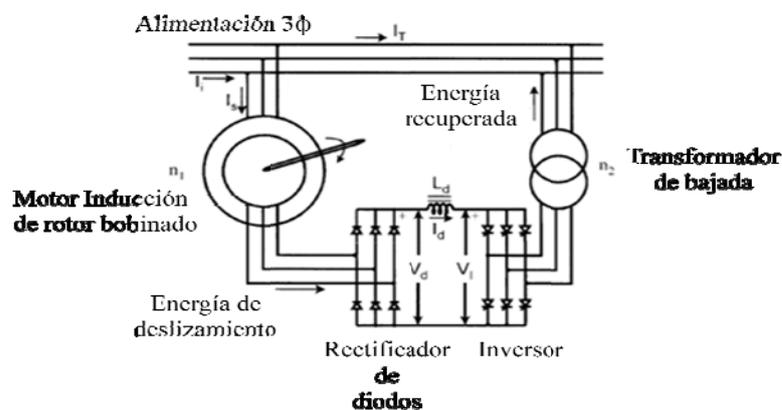


Figura 3-4. Circuito accionamiento Kramer.

3.5. Accionamiento estático Scherbius

La gran desventaja del accionamiento Kramer es su único modo operación es decir solo trabaja como motor en adelante (primer cuadrante). Para obtener un modo de operación regenerativo, las ondas de corriente del rotor debiesen ser invertidas.

Esta característica requiere que la potencia de deslizamiento en el rotor fluya en sentido contrario. Si el diodo rectificador en el lado de la máquina es reemplazado por un puente de tiristores, como se muestran en la figura 3-5, la potencia de deslizamiento podría ser controlada en ambas direcciones. Con la potencia de deslizamiento fluyendo de forma inversa a la velocidad subsíncrona, la potencia mecánica de entrada correspondiente al eje puede ser extraída del estator. Puede ser demostrado que este sistema de accionamiento, con una energía de deslizamiento que fluya en ambas direcciones, puede ser controlado para un modo de operación de motor y regeneración en ambos rangos de velocidad subsíncrona y supersíncronos. Este esquema se ha definido como sistema de accionamiento estático Scherbius, Bose [2]. La conmutación de línea del convertidor del lado de la máquina se vuelve muy difícil cerca de la velocidad sincrónica, exceso en los tiempos de superposición de la conmutación, cuando el voltaje alterno es muy pequeño.

Cuando una corriente continua es suministrada a los anillos de deslizamiento de la máquina de inducción de rotor bobinado y el estator está conectado a la línea de frecuencia constante, el motor asume las propiedades de una máquina sincrónica. Un torque constante solo puede ser producido si el rotor está en sincronismo con el campo del estator; la máquina puede también entregar energía reactiva, pero al mismo tiempo los problemas típicos de una máquina sincrónica conectada a la red se hacen presentes, entre ellos la partida y sincronización. Esto es aún verdad, si en vez de corriente continua, una corriente de excitación alterna con frecuencia constante es aplicada a los enrollados del rotor; solamente será necesario que la velocidad del motor varíe para que las corrientes del estator y del rotor vuelvan a estar en sincronismo. Por estas razones las máquinas doblemente alimentadas operadas a una frecuencia constante en el rotor no son particularmente atractivas.

La situación es diferente, sin embargo, si la corriente de excitación alterna del rotor se hace dependiente del vector de voltajes de la línea y la posición angular del rotor. La máquina entonces pierde totalmente sus características sincrónicas y puede operar a una velocidad variable; los transientes de velocidad pueden ser correctamente mitigados.

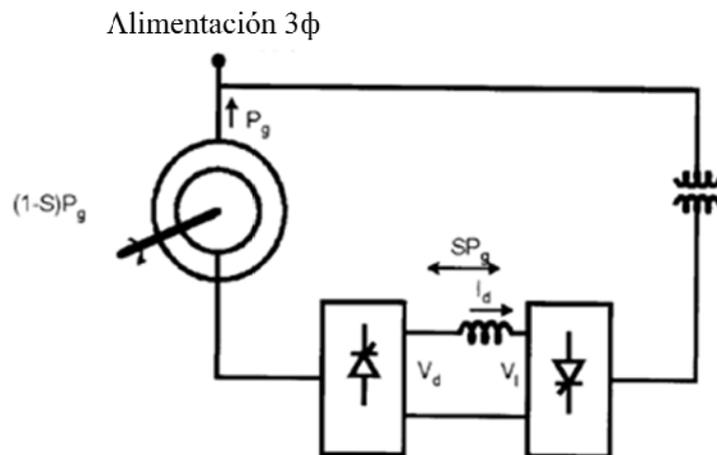


Figura 3-5. Accionamiento Scherbius con doble puente de tiristores

El doble puente convertidor del sistema observado en la figura 3-5 puede ser reemplazado por cicloconvertidores. El uso de un cicloconvertidor significa costos adicionales y un control más complejo, pero las ventajas de los resultados son obvias. El problema de conmutación cerca de la velocidad sincrónica desaparecen, y el cicloconvertidor puede operar fácilmente como un rectificador controlador por fase, administrando corriente DC en el rotor y permitiendo que la máquina opere en modo sincrónico. Las ventajas adicionales son obtener ondas de corriente más sinusoidales en el rotor, lo que significa una reducción de pérdidas por armónicos, y una capacidad de la máquina de estar sobre excitada lo que permite una operación con un factor de potencia en adelanto en el lado del estator. De hecho, el factor de potencia en atraso de la entrada del cicloconvertidor puede ser cancelado con el factor de potencia en adelanto de la máquina, por lo tanto se obtendría un factor de potencia unitario en la línea. El cicloconvertidor puede ser controlado de manera tal que la frecuencia y fase de salida sea precisamente la frecuencia de los voltajes de deslizamiento del rotor. El accionamiento Scherbius al igual que el accionamiento Kramer requiere un partidor resistivo.

El accionamiento Scherbius con cicloconvertidor discutido anteriormente puede ofrecer un rendimiento mejorado si el cicloconvertidor es reemplazado por un doble convertidor PWM mostrada en la figura 3-6. Cualquiera sea la elección es necesario el uso de un transformador entre el convertidor y el lado de la línea, para disminuir el nivel de tensión del convertidor.

La potencia de deslizamiento puede ser controlada para fluir en ambas direcciones y un control vectorial puede ser fácilmente aplicado a ambos convertidores. El voltaje del puente DC V_d debiese ser lo suficientemente alto tal que ambos convertidores, del lado del rotor y de la línea, puedan siempre operar con un nivel de modulación menor a 1, para así fabricar corrientes sinusoidales en la máquina y la línea. El rectificador PWM puede fácilmente seguir el voltaje de deslizamiento de frecuencia y magnitud variable, incluyendo la condición DC ideal para velocidad sincrónica. Esto es básicamente el rectificador operando como un convertidor DC-DC. El transformador del lado de la línea ayuda a mantener bajos

los niveles del convertor con un V_d razonable. El nivel de tensión y frecuencia del convertor son directamente proporcionales al ancho del rango de velocidad deseado. Notar que el factor de potencia de la máquina en el lado del estator es siempre en retardo, pero el convertor del lado de la línea puede ser controlado para obtener un factor de potencia en adelanto, de esta manera obteniendo un factor de potencia total unitario,

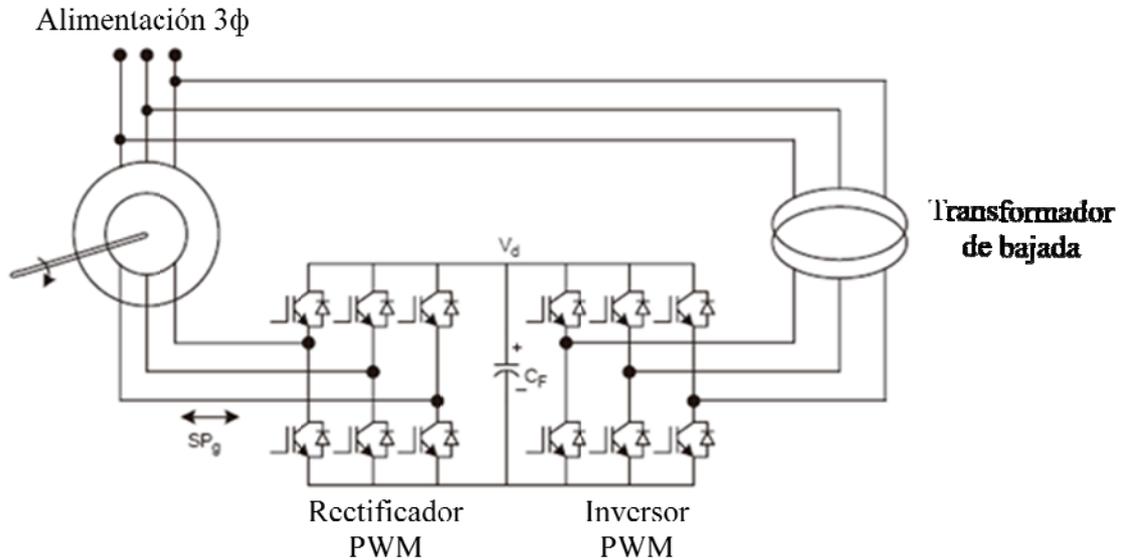


Figura 3-6. Accionamiento Scherbius con doble PWM

Las corrientes del rotor suministradas son controladas mediante la posición angular del rotor y el vector del voltaje de línea; la velocidad y la potencia reactiva son controladas por las corrientes d-q de rotor, los límites de corriente son sobreimpuestos.

El método del control de flujo orientado logra un excelente rendimiento dinámico del accionamiento, incluso aunque este no sea específico para ciertas aplicaciones, su estructura transparente del control lo hace beneficioso, ya que ofrece un gran grado de flexibilidad.

3.6. Modelo máquina de inducción rotor bobinado

Considerando un equivalente bifásico de la máquina de inducción de doble excitación representado por un sistema de referencia estacionario (ejes α - β), mostrado en la Fig. 3-7, se tiene que el vector de tensión de estator \underline{v}_s y la ecuación de tensión del estator están dados por:

$$\underline{v}_s = v_{\alpha s} + v_{\beta s} e^{j2\pi/3} + v_{\gamma s} e^{-j2\pi/3} = v_{\alpha s} + jv_{\beta s} = R_s \underline{i}_s + \frac{d}{dt}(\underline{\lambda}_s) \quad (3.1)$$

donde v_{as} , v_{bs} y v_{cs} son las tensiones de fase de estator, $v_{\alpha s}$ y $v_{\beta s}$ son las componentes del vector de tensión de estator en el sistema de referencia estacionario α - β , y R_s , \underline{i}_s y $\underline{\lambda}_s$ corresponden a la resistencia, vector de corriente y vector de flujo total enlazado de estator, respectivamente.

La técnica de control vectorial permite desacoplar la potencia activa y reactiva. Esto está basado en el concepto del control $d - q$ en diferentes sistemas de referencia, donde las corrientes y voltajes son descompuestos en estas dos componentes que se relacionan con la potencia activa y reactiva [15].

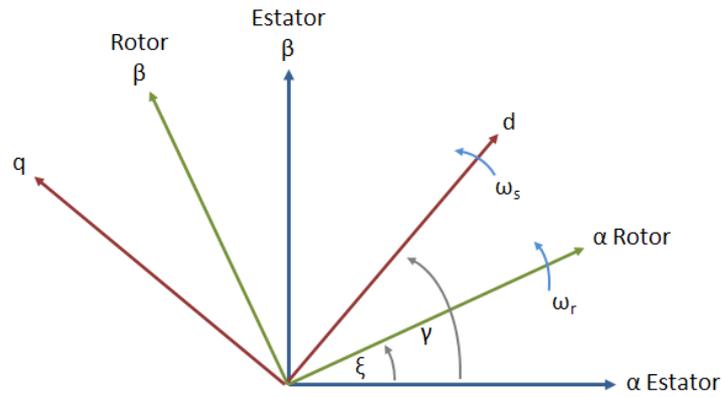


Figura 3-7: Sistema de referencia.

Las componentes α - β del vector tensión de estator están dadas por:

$$\begin{aligned} v_{\alpha s} &= R_s i_{\alpha s} + \frac{d}{dt}(\lambda_{\alpha s}) \\ v_{\beta s} &= R_s i_{\beta s} + \frac{d}{dt}(\lambda_{\beta s}) \end{aligned} \quad (3.2)$$

donde $i_{\alpha s}$ y $i_{\beta s}$ son las componentes de corriente de estator, y $\lambda_{\alpha s}$ y $\lambda_{\beta s}$ son las componentes del flujo total enlazado de estator en el sistema de referencia α - β .

De manera similar, el vector de tensión de rotor y la ecuación de tensión del rotor en ejes α - β está dado por:

$$\underline{v}_r = v_{ar} + v_{br}e^{j2\pi/3} + v_{cr}e^{-j2\pi/3} = v_{\alpha r} + jv_{\beta r} = R_r \underline{i}_r + \frac{d}{dt}(\underline{\lambda}_r) \quad (3.3)$$

donde R_r , \underline{i}_r y $\underline{\lambda}_r$ corresponde a la resistencia, vector de corriente y vector de flujo total enlazado de rotor, respectivamente, y v_{ar} , v_{br} y v_{cr} son las tensiones de fase de rotor. Por otra parte, los flujos totales enlazados del estator y del rotor se definen por:

$$\begin{aligned}\underline{\lambda}_s &= L_s \underline{i}_s + L_o \underline{i}_r e^{j\xi} \\ \underline{\lambda}_r &= L_r \underline{i}_r + L_o \underline{i}_s e^{-j\xi}\end{aligned}\quad (3.4)$$

donde L_s , L_r y L_o son las inductancias de estator, rotor y magnetización, respectivamente y ξ es la posición del rotor.

Luego, sustituyendo los flujos de (3.4) en las ecuaciones (3.1) y (3.3), se obtiene:

$$\underline{v}_s = R_s \underline{i}_s + L_s \frac{d}{dt}(\underline{i}_s) + L_o \frac{d}{dt}(\underline{i}_r e^{j\xi}) \quad (3.5)$$

$$\underline{v}_r = R_r \underline{i}_r + L_r \frac{d}{dt}(\underline{i}_r) + L_o \frac{d}{dt}(\underline{i}_s e^{-j\xi}) \quad (3.6)$$

Al referir estas ecuaciones a un sistema de referencia rotatorio que gira a velocidad sincrónica ω_s (ejes d-q), como se muestra en la figura 3-7, se tiene, con γ igual a la posición del sistema de referencia rotatorio:

$$\begin{aligned}\underline{v}_s' &= \underline{v}_s e^{-j\gamma} \\ \underline{i}_s' &= \underline{i}_s e^{-j\gamma} \\ \underline{v}_r' &= \underline{v}_r e^{-j(\gamma-\xi)} \\ \underline{i}_r' &= \underline{i}_r e^{-j(\gamma-\xi)}\end{aligned}\quad (3.7)$$

En el nuevo sistema de referencia rotatorio, ejes d-q, (3.7) está dada finalmente por:

$$\begin{aligned}\underline{v}_s' &= \underline{v}_s e^{-j\gamma} = v_{ds} + jv_{qs} \\ \underline{i}_s' &= \underline{i}_s e^{-j\gamma} = i_{ds} + ji_{qs} \\ \underline{v}_r' &= \underline{v}_r e^{-j(\gamma-\xi)} = v_{dr} + jv_{qr} \\ \underline{i}_r' &= \underline{i}_r e^{-j(\gamma-\xi)} = i_{dr} + ji_{qr}\end{aligned}\quad (3.8)$$

Donde v_{ds} , v_{qs} , i_{ds} e i_{qs} son las componentes d-q de la tensión y corriente de estator, respectivamente, y v_{dr} , v_{qr} , i_{dr} e i_{qr} son las componentes d-q de la tensión y corriente de rotor, respectivamente.

Para los flujos enlazados se tiene:

$$\begin{aligned}\underline{\lambda}_s' &= \underline{\lambda}_s e^{-j\gamma} = \lambda_{ds} + j\lambda_{qs} \\ \underline{\lambda}_r' &= \underline{\lambda}_r e^{-j(\gamma-\xi)} = \lambda_{dr} + j\lambda_{qr}\end{aligned}\quad (3.9)$$

donde λ_{ds} , λ_{qs} , λ_{dr} y λ_{qr} son las componentes d-q de los flujos enlazados del estator y del rotor, respectivamente.

Finalmente, las ecuaciones de las componentes en ejes d-q, sistema de referencia sincrónico, de la tensión y flujo de estator y de rotor en la máquina de inducción de doble excitación, en función de las corrientes de estator y rotor, son:

$$\begin{aligned}v_{ds} &= R_s i_{ds} + L_s \frac{d}{dt}(i_{ds}) - \omega_s L_s i_{qs} + L_o \frac{d}{dt}(i_{dr}) - \omega_s L_o i_{qr} \\ v_{qs} &= \omega_s L_s i_{ds} + R_s i_{qs} + L_s \frac{d}{dt}(i_{qs}) + \omega_s L_o i_{dr} + L_o \frac{d}{dt}(i_{qr}) \\ v_{dr} &= L_o \frac{d}{dt}(i_{ds}) - \omega_{sl} L_o i_{qs} + R_r i_{dr} + L_r \frac{d}{dt}(i_{dr}) - \omega_{sl} L_r i_{qr} \\ v_{qr} &= \omega_{sl} L_o i_{ds} + L_o \frac{d}{dt}(i_{qs}) + \omega_{sl} L_r i_{dr} + R_r i_{qr} + L_r \frac{d}{dt}(i_{qr}) \\ \lambda_{ds} &= L_s i_{ds} + L_o i_{dr} \\ \lambda_{qs} &= L_s i_{qs} + L_o i_{qr} \\ \lambda_{dr} &= L_o i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \lambda_{qr} &= L_o i_{qs} + L_r i_{qr}\end{aligned}\quad (3.10)$$

Si las tensiones de estator y rotor se expresan en función de corrientes y flujos, las ecuaciones de las componentes en ejes d-q están dadas por:

$$\begin{aligned}v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d}{dt}(\lambda_{ds}) - \omega_s \lambda_{qs} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d}{dt}(\lambda_{qs}) + \omega_s \lambda_{ds} \\ v_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d}{dt}(\lambda_{dr}) - \omega_{sl} \lambda_{qr} \\ v_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d}{dt}(\lambda_{qr}) + \omega_{sl} \lambda_{dr}\end{aligned}\quad (3.11)$$

Por lo tanto el par eléctrico producido por la máquina está dado por:

$$T_e = 3 \frac{P}{2} L_o (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (3.12)$$

donde p es el número de polos de la máquina.

Capítulo 4

Análisis del modelo conceptual

4.1. Introducción

En la contextualización de la memoria se han explicitado los modelos más utilizados en el accionamiento de un molino de bolas, separados en dos grandes grupos: sistemas con y sin transmisión mecánica de la potencia.

Considerando un molino de bolas de aproximadamente 15 [MW] y revisando el mercado actual de motores, existen varias ofertas que permiten este nivel de potencia, una primera opción es el sistema *gearless*, donde el molino hace las veces de rotor mediante la instalación de los polos alrededor de la coraza del molino y se instala un estator a su alrededor, completando el conjunto motor. La opción de utilizar el sistema *gearless* es descartado, primero por su elevado costo y segundo porque en este tipo de sistemas la construcción del motor es del tipo sincrónico, y esta memoria tiene como finalidad analizar el uso de motores de inducción de rotor bobinado.

Existe una segunda opción que es utilizar un sistema que transmite la potencia generada por los motores mediante un arreglo de engranajes, es decir, piñones, corona dentada, acoplamientos, entre otros. La elección de la cantidad de motores a utilizar debe obedecer a la oferta actual de motores existentes en el mercado, que hoy por hoy no superan los 10 [MW], y a los límites físicos de las componentes mecánicas del accionamiento, siendo necesario instalar en este caso más de un motor para suplir la potencia exigida. Un mayor número de motores implica un sistema de transmisión mecánico más complejo y con mayores pérdidas energéticas, el equilibrio entre eficiencia, cantidad de motores y potencia nominal del motor se encuentra en utilizar un sistema de doble piñón.

La elección de motores de inducción de rotor bobinado, debido a su alta velocidad de giro en el eje, trae consigo la necesidad de instalar un reductor de velocidad entre el eje de los motores y la corona dentada, generando nuevas pérdidas en el accionamiento del molino de bolas.

Por lo tanto en el presente capítulo se definen características generales para un molino de bolas ficticio, analizando el equipamiento y las características técnicas necesarias para hacerlo rotar. Además se detalla el sistema encargado de variar la velocidad nominal de los motores entre un 85-110%.

4.2. Molino de Bolas

El sistema contempla la instalación de un molino de bolas 26' x 38', es decir, 26 [ft] o 7,95 [m] de diámetro interior y 38 [ft] o 11,58 [m] de largo interior, construido para molienda en húmedo con descarga del tipo *trunnion-overflow*, operado por dos motores de inducción de rotor bobinado de 7.400 [kW], reductor y partidores de reóstatos líquidos:

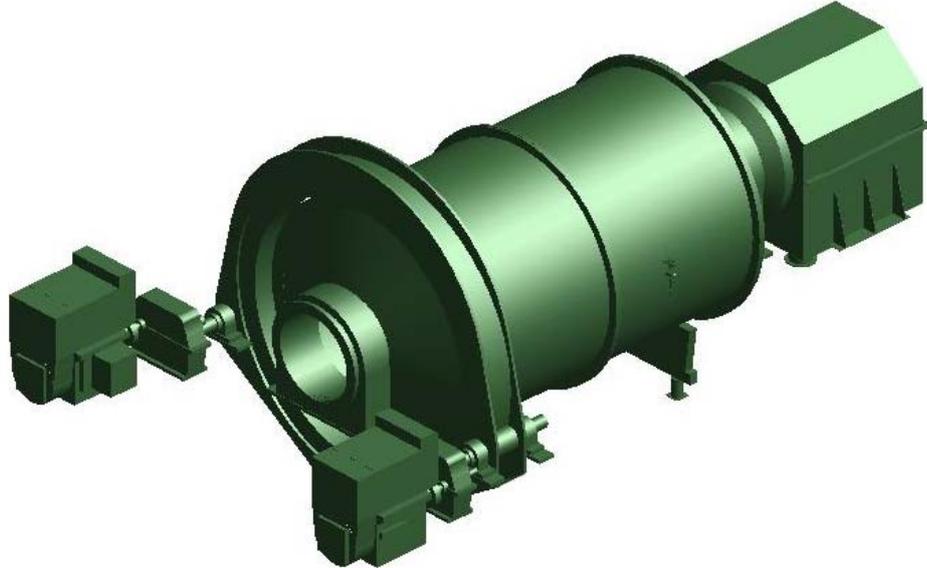


Figura 4-1. Vista general del molino.

Sus componentes generales son:

- *Shell* o coraza: cilindro hueco construido a base de acero al carbono estructural (ASTM A36), es separado en partes, requerido para su transporte. En sus extremos se acopla de forma precisa con los *heads* del molino.
- *Heads* o tapas: Se contempla dos tapas cónicas de 22.5°. Las tapas forman un acoplamiento preciso con la coraza del molino y los *trunnions*. Separado en dos partes y construido en hierro dúctil.
- *Trunnions*: cilindros instalados en las tapas del Molino, deben formar un acoplamiento preciso con las tapas del molino y ser desmontables. Construido en hierro dúctil.

Por lo tanto las características generales del molino son:

Tipo	: Trunnion-overflow
Molienda	: Húmeda
Dimensiones	: 26' x 38'
Potencia [kW]	: 14.800
Velocidad crítica	: 75%
Carga recomendada	: 35% (Volumen total)

4.2.1 Descansos o *Bearings*

Los descansos o *bearings* de los *trunnions* son los encargados de soportar el movimiento de rotación del molino, son diseñados para una lubricación hidrostática. Se opta por descansos del tipo *multipad*:

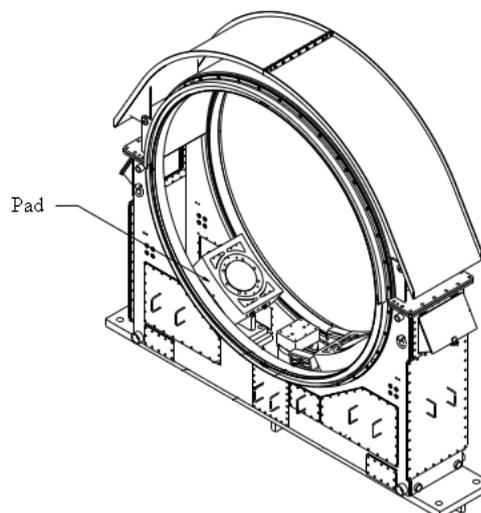


Figura 4-2. Vista Frontal descansos.

La superficie de descanso corresponde a un arco de 120°, se utilizan *pads* fabricados de bronce y lubricación mediante inyección de aceite con bombas de alta presión:

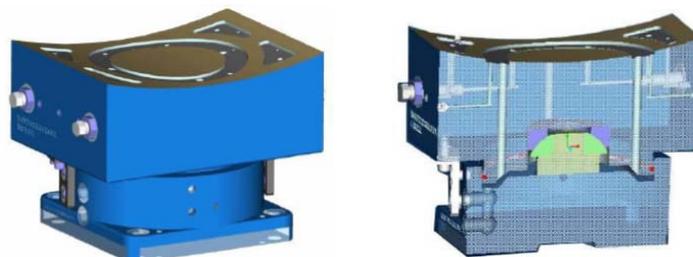


Figura 4-3. a) Vista general *pad* b) Corte transversal *pad*.

El objetivo es lograr levantar el molino y dejarlo flotando sobre una capa hidrostática de aceite. Deben existir descansos radiales y axiales.

4.2.2 Inching Drive

El sistema del molino además contempla para mantención el uso de un *inching drive*, unidad de motor hidráulica portable del tipo TEFC (*totally enclosed fan-cooled*) utilizado para hacer rotar lentamente el molino de bolas, esta unidad no reemplaza el motor de inducción si no que es utilizada en aplicaciones como mantenciones y casos de emergencia.

Este accionamiento es capaz de rotar el molino con carga e incluye frenos capaces de detener el molino con su máxima carga recomendada. De todas manera, por razones de seguridad se recomienda no trabajar en, sobre, ni dentro del molino, hasta que la carga esté en una posición estable.

El equipo es acoplado al reductor de velocidad, en el extremo no utilizado del eje de alta velocidad, en el otro extremo es acoplado el motor de inducción. Cuenta con un sistema que permite un acoplamiento fácil y rápido al reductor, además de frenos hidráulicos y alrededor de 6 metros de cable para su fácil desplazamiento.

4.3. Configuración

La configuración consta de dos motores de inducción de alta velocidad, los ejes de los motores son conectados a los reductores de velocidad mediante acoplamientos de alta velocidad, los reductores a su vez son conectados a piñones mediante acoplamientos de baja velocidad.

Una corona dentada debe ser apernada alrededor de la coraza de acero del molino de bolas, los dientes de la corona deben acoplarse perfectamente con los piñones, permitiendo la transmisión mecánica desde los motores hacia el molino:

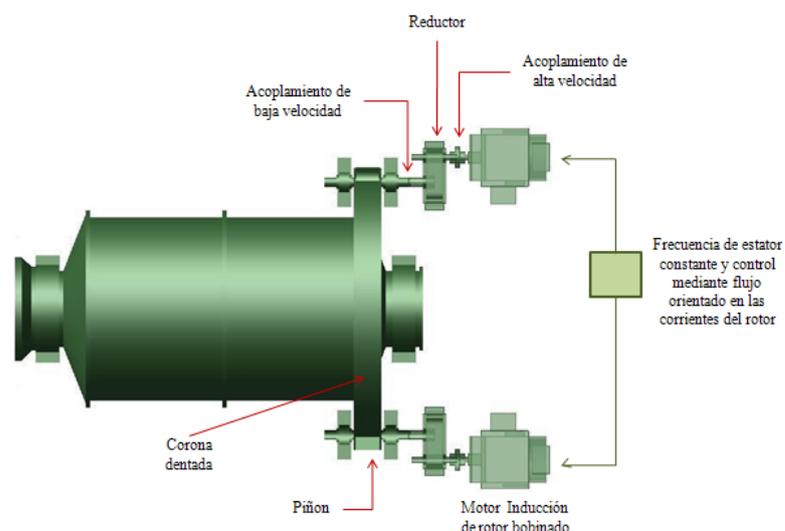


Figura 4-4. Configuración accionamiento molino.

4.4. Motor

Los motores de inducción de rotor bobinado son instalados en una configuración de piñones gemelos, esta elección responde al fácil acceso a las fases del rotor mediante los anillos de deslizamiento, los cuales son conectados a un arreglo de semiconductores, en una configuración denominada accionamiento Scherbius, controlando la velocidad del molino en un rango de velocidad del 85-110% en torno a su velocidad nominal de 10 [r.p.m.]. El control de la velocidad se logra manipulando la potencia de deslizamiento del rotor mediante una técnica de control de flujo orientado. El control de los motores de inducción debe acelerar y repartir la carga entre los motores de manera igualitaria. La diferencia de carga entre los motores no debe ser mayor al 5%.

Los motores de inducción de rotor bobinado, deberán ser de diseño estándar para partida directa, según norma NEMA o IEC, durante la aceleración el torque no deberá ser menor al 10% del torque a plena carga y ser capaces de partir con un 85% de la tensión nominal en los terminales del motor, deberán estar equipados con sensores de temperatura RTD en las bobinas del estator y en los rodamientos, deberán tener aislación clase F y elevación de temperatura clase B, deben ser aptos para instalación exterior tipo TEAAC (*Totally Enclosed Air to Air Cooled*), con calentadores alimentados en 220 VAC 60Hz, y deberán venir provistos de transformadores de medida para protección y medida.

Además el estator y rotor deben ser completamente protegidos contra el polvo y la humedad, los enrollados del rotor deben estar conectados a anillos rozantes que deberán estar separados del sistema de enfriamiento del motor para prevenir que partículas de carbón entren a los enrollados del rotor y el estator.

Por lo tanto las características técnicas del motor son las siguientes:

Tipo	: Trifásico de Inducción
Factor de Servicio	: 1.0
Rotor	: Rotor bobinado
Potencia [kW]	: 7.400
Tensión [V]	: 13.200
Frecuencia [Hz]	: 60
Polos	: 6
Vel. giro [r.p.m.]	: 1.195
Peso [kg]	: 41867
Corriente carga máxima [A]	: 403
Características del Torque	: B (NEMA)
Torque máxima carga [Nm]	: 59138
Inercia rotor	: 1060
Conexión estator	: Estrella
Protección	: TEAAC (<i>Totally Enclosed Air to Air Cooled</i>)
FP (100/75/50% Carga)	: 0.83/.79/.68
Eficiencia (100/75/50% Carga)	: 96.8/96.7/96.1
Montaje	: Horizontal

El motor trifásico de inducción de rotor bobinado tiene la característica inherente de ser un motor de fácil construcción, esta ventaja se acentúa al escoger un motor con un número reducido de polos pero repercute en una alta velocidad en el eje, siendo necesaria la instalación de un reductor de velocidad para alcanzar una velocidad nominal de 12 [r.p.m.] en el molino.

El motor además debe cumplir las siguientes características generales:

- Motores auto ventilados (ventiladores directamente acoplados al eje del motor)
- Grado de protección IP 55
- 2 Unidades hidráulicas de lubricación y refrigeración de los descansos de los motores
- Ventilador anti corrosión y anti chispas
- Apto a Ambiente de instalación: Intemperie
- Carcasa en Acero soldado
- Pintura con terminación epóxica para ambiente agresivo
- Nivel de Ruido (presión Sonora): 85db(A), medido a 1 metro (sin carga) considerando ventiladores unidireccionales
- Descansos y eje no aptos a empuje radial o axial
- Rotor bobinado con bobina de cobre
- Bobinas de Rotor y Estator con Impregnación VPI (*Vacuum-Pressure Impregnated*)
- Sentido de Giro: Unidireccional.



Figura 4-5. Motor de Inducción trifásico WEG

4.4.1. Partida del motor

Para aplicaciones de motores de gran potencia es común la utilización de un reóstato líquido para arrancar el motor, este método es utilizado por su fácil control y su gran capacidad térmica. El reóstato líquido debe consistir en un estanque, separado en dos cámaras llenadas con agua saturada de sal, o algún líquido electrolítico similar:



Figura 4-6. Reóstatos Líquidos. WEG.

Las características técnicas son:

Potencia Nominal	: 2x7400 [kW]
Tensión Estatórica	: 13.200 [V]
Corriente Estatórica	: 402 [A]
Frecuencia	: 60 [Hz]
Nº Polos	: 6
Rotación Nominal	: 1195 [r.p.m.]
Tensión Rotor	: 2850 [V]
Corriente Rotor	: 1544 [A]
Torque Arranque	: 150%
Torque Máximo	: 270%
Instalación	: Interior
Pintura	: Electrostática
Dimensiones	: 4.82 [m] x 2.64 [m] x 3.15 [m]

En la cámara principal se sumergen tres electrodos en la solución electrolítica creando una carga eléctrica de resistencia variable. Los electrodos a su vez deben estar conectados con las fases del rotor mediante un dispositivo de cortocircuito, la variación de las resistencias de las fases del rotor es mediante el aumento o la disminución del nivel de electrolito dentro del estanque, haciendo variar así la resistencia eléctrica de la carga de los electrodos.

A pesar de la gran capacidad térmica del electrolito que limita la elevación de la temperatura, deben ser instaladas cuatro resistencias calefactoras sumergidas en la cámara

de reserva, cumpliendo la función de mantener el electrolito en una temperatura característica que impida la ebullición del líquido. El sistema de control de la temperatura del electrolito debe tener instalado además cuatro sensores de temperatura, dos en cada cámara para obtener una señal de realimentación que permita el control dinámico de la temperatura. Los reóstatos líquidos trabajan teóricamente a un factor de potencia unitario. El sistema elegido recomienda el uso de un único reóstato líquido para la partida de los dos motores, es decir un solo estanque llenado con electrolito, el cual debe ser una solución de carbonato de sodio con una concentración en el rango de 0.2-3.0%.

El estanque debe contener dos cámaras, una principal donde los dos grupos de tres electrodos sean sumergidos en el electrolito y una cámara secundaria donde se acumule el electrolito de reserva. Cabe destacar que tanto la cámara principal como la de reserva están divididas en dos compartimientos unidos por una abertura que asegura el mismo nivel de electrolito en ambas cámaras, en cada cámara es necesaria la instalación de un grupo de tres electrodos en una posición fija, es decir solo el nivel del electrolito varía. El nivel de electrolito de la cámara principal se aumenta mediante cuatro motores que toman electrolito de la cámara de reserva y la bombean hacia la principal, la disminución del nivel de electrolito se logra utilizando una válvula de reciclaje que une ambas cámaras, el fluido cae por gravedad desde la cámara principal hacia la de reserva, disminuyendo así el nivel del electrolito en la cámara principal.

Durante el proceso de la partida del motor el nivel del estanque va evolucionando, empieza con un nivel mínimo de electrolito en la cámara principal y la resistencia eléctrica de la carga del electrodo en su valor máximo. A medida que acelera el motor el nivel del electrolito aumenta en el interior del estanque, la resistencia disminuye hasta que alcance su valor mínimo. Cuando este mínimo es logrado, los anillos del motor son cortocircuitados por un dispositivo que hace parte del reóstato. Un sistema de protección integrado previene que el reóstato sea desconectado antes de las condiciones iniciales de partida sean satisfechas.

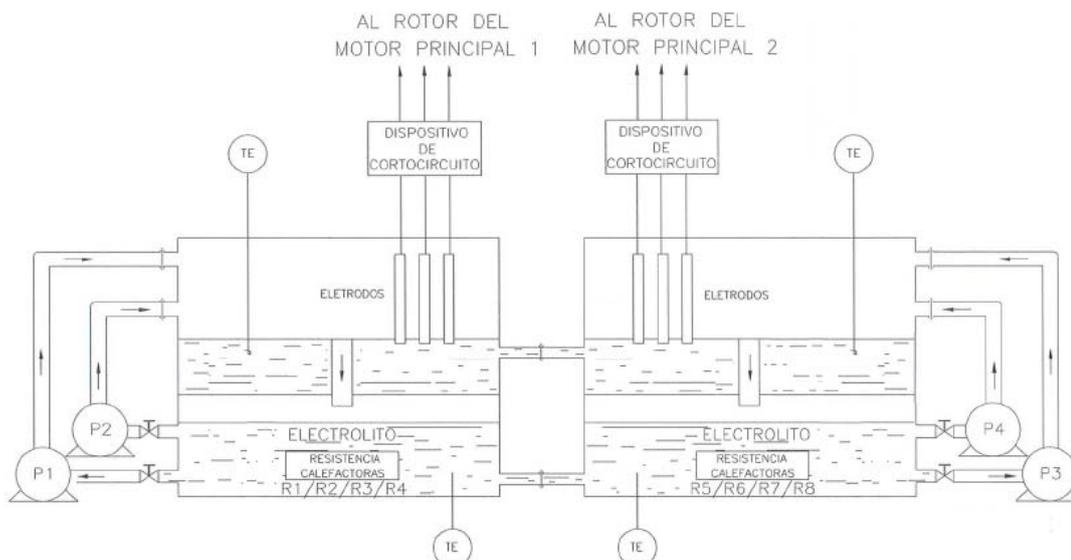


Figura 4-7. Diagrama reóstato líquido.

La partida puede ser hecha en dos formas: Local o Remota:

- Partida Local: El reóstato tiene un panel de comando local.
- Partida Remota: La partida automática remota es hecha conectando el relé auxiliar del disyuntor principal al terminal disponible en el panel de control del reóstato.

Protecciones Incluidas:

- Un sistema timer, para apagar el sistema en caso de no ser lograda la partida en un tiempo dado
- RTD (*Resistance Temperature Detector*) o sensores de temperatura basados en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura, instalados en los estanques para prevenir el sobrecalentamiento del electrolito que pueda repercutir en un malfuncionamiento.
- Puerta con seguro manual, para prevenir el acceso al gabinete del dispositivo de cortocircuito
- Protección para restaurar las condiciones iniciales de la partida
- Comprobar el interruptor del partidor del rotor mientras la alimentación del estator se encuentra desconectado

Accesorios Incluidos:

- Supervisión del tiempo de partida
- Dispositivo de cortocircuito de los anillos
- Panel de control completo para una operación automática

4.4.2. Secuencia de partida hasta la operación

La partida de los motores de inducción de rotor bobinado será mediante el uso de un solo equipo de reóstatos líquidos para ambos motores, es decir, el reóstato líquido debe contar con al menos seis bornes específicos para la conexión de las fases rotóricas de los motores, tres por cada motor. Las fases de cada rotor son conectados al reóstato líquido, mediante interruptores trifásicos, sincronizados de maneta tal que se cierren o se abran conjuntamente.

Por lo tanto los motores están inicialmente en reposo y desenergizados, al conectar los interruptores del reóstato líquido se puede energizar el sistema, el motor comienza a acelerar desde el reposo, con una resistencia máxima en la carga eléctrica del reóstato líquido, hasta alcanzar la velocidad nominal del motor donde la resistencia es mínima, es decir casi el nivel de cortocircuito.

Además es necesario un dispositivo de cortocircuito de las fases del rotor, la conexión es mediante interruptores trifásicos, al hacer cortocircuito en las fases rotóricas, el motor asume característica de un motor de jaula de ardilla. Este dispositivo cumple dos funciones principales: la primera y más importante, asegurar el nivel de cortocircuito en el momento que el motor alcanza su velocidad nominal, es decir, la resistencia de la carga eléctrica del reóstato líquido llega a su mínimo, y una segunda función de protección. Normalmente este dispositivo de cortocircuito viene incluido en el equipo que contiene el reóstato líquido.

Finalmente se tiene los convertidores que son conectados a sus respectivos rotores mediante interruptores y desconectores trifásicos. Los desconectores son instalados para asegurar la aislación del sistema de electrónica de potencia en caso de ser necesario.

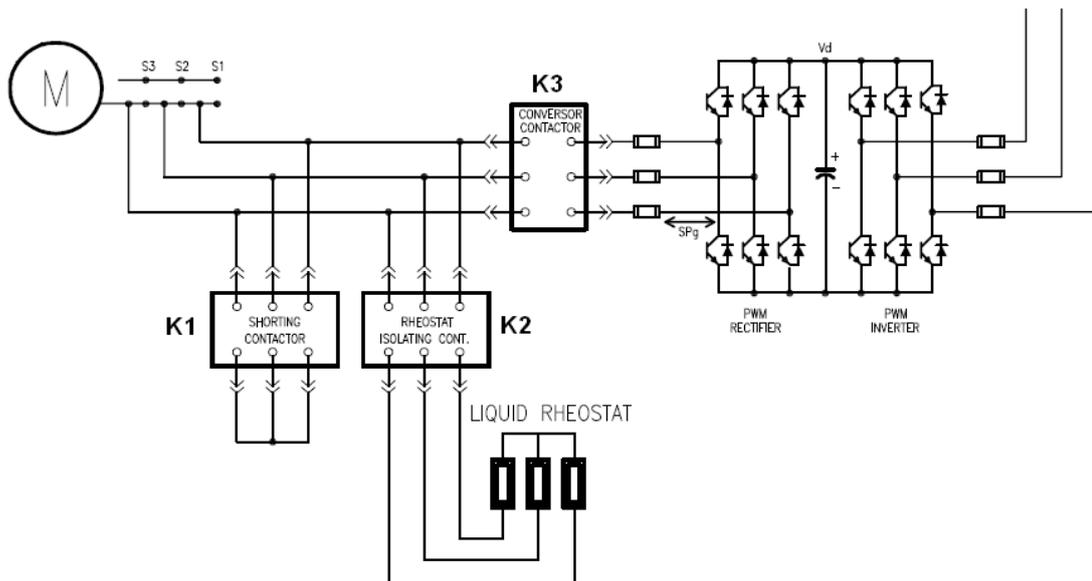


Figura 4-8. Sistema de Interruptores

Por lo tanto, la evolución de los interruptores es (ver figura 4-8):

- Sistema en reposo y desenergizado - K1, K2 y K3 abierto
- Se conecta K2 y se energiza el sistema – K1 y K3 abierto, K2 cerrado
- El motor acelera hasta su velocidad nominal
- Se conecta K1 asegurando el cortocircuito - K1 y K2 cerrados, K3 abierto
- Una vez cerrado K1, se abre K2
- Una vez abierto K2, se cierra K3
- Una vez cerrado K3, se abre K1
- K3 cerrado, K1 y K2 abiertos
- Motor operando con velocidad controlada.

donde,

- K1: Interruptor de cortocircuito
- K2: Interruptor reóstatos líquidos
- K3: Interruptor conversor

4.4.3. Descansos Motor

Los descansos del motor, son las estructuras sobre la cual descansa el eje del motor, están sometidos a un gran desgaste debido al roce producido por el movimiento del rotor. Normalmente se incluye un sistema de lubricación a modo de reducir el desgaste de los materiales y lograr los estándares de eficiencia requeridos; se recomienda el uso de un sistema de lubricación de inyección de aceite en los descansos, mediante bombas de baja y alta presión.

La bomba de baja presión es utilizada en la operación normal del motor, donde una capa de aceite hidrodinámico es mantenida entre el eje y los descansos. No obstante en la partida y bajas velocidades el aceite no es capaz de separar el eje de los descansos. Si una separación mínima no es lograda, los descansos y el eje podrían verse dañados.

Por lo tanto para los casos donde no es posible mantener una capa hidrodinámica de aceite, el sistema *jacking oil* o sistema de nivelamiento de aceite, inyecta aceite mediante bombas de alta presión al corazón de los descansos. La inyección de aceite continúa hasta que el eje flota sobre una capa de aceite. Las bombas del sistema *jacking oil* deben generar una presión que eleve los ejes del rotor. El aceite mineral usado en el sistema representa un riesgo de incendio debido a la proximidad de las componentes de alta temperatura. Precauciones especiales son necesarias para reducir este peligro. El sistema debe ser instalado cerca de los descansos para evitar filtraciones del aceite.

Finalmente para el sistema de lubricación se contempla una bomba de baja presión en la operación normal y un sistema *jacking oil*, es decir, una bomba de alta presión que servirá para la lubricación hidrostática de los descansos durante casos como: arranque, mantención

del molino o frenado; no siendo necesario el desacoplamiento del motor. De todas maneras existirán pérdidas de 4-5 [kW] por cada descanso, es decir, 8-10 [kW] para el sistema escogido.

La instalación de un circuito de filtrado del aceite con bombas motores y filtros será necesario, adicionalmente filtro de aceite, enfriadores, instrumentos eléctrico para el control y monitoreo, tanque de aceite y conexiones de cañerías, Kiameh [16]

4.4.4. Protecciones

El sistema de protección del motor contempla la instalación de un grupo de relés, encargado de actuar sobre el interruptor de entrada del motor en caso de alguna falla, aislando el motor de la red eléctrica. Los relés deberán ser configurados acorde a las características finales del motor, el esquema general del sistema de relés queda como:

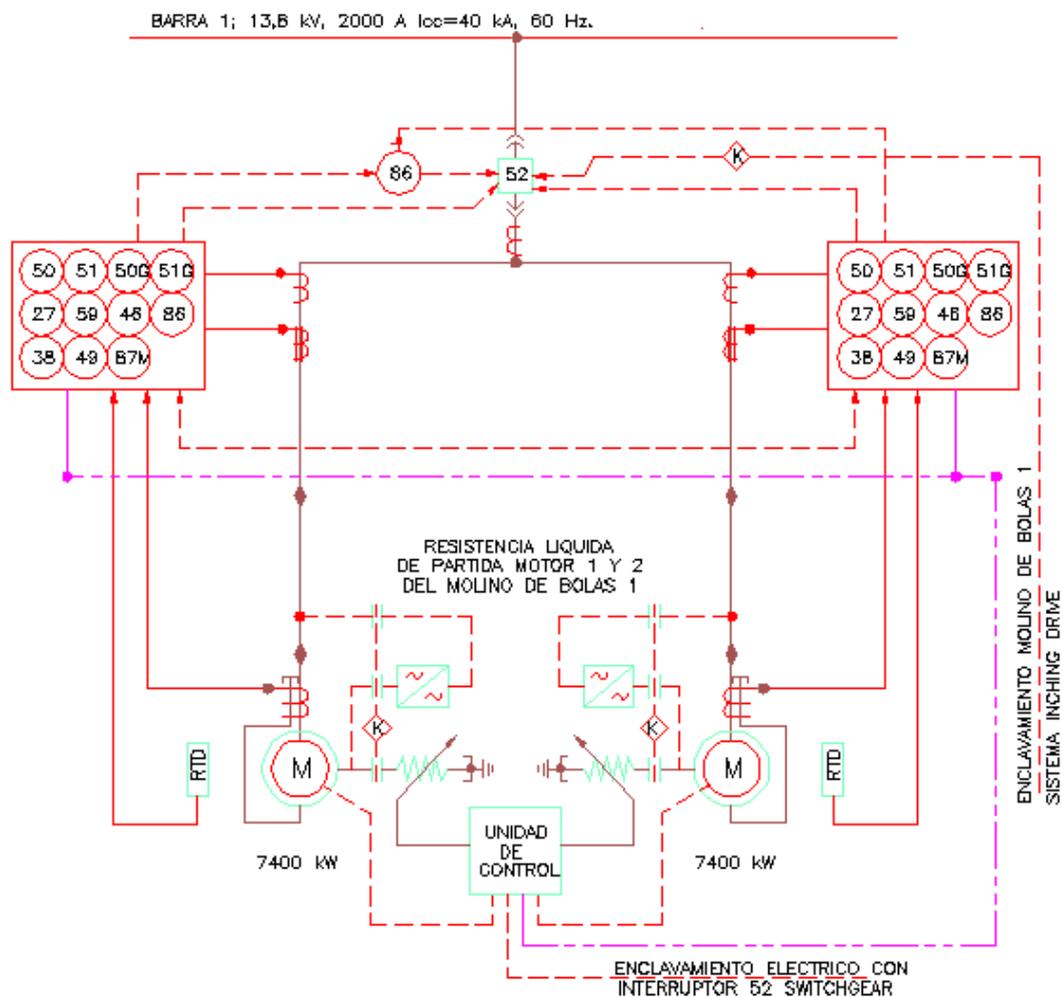


Figura 4-9. Sistema de Relés.

donde,

- **27 - Undervoltage Relay:** Dispositivo que opera cuando el voltaje de entrada es menor a un valor predeterminado.
- **38 - Bearing Protective Device:** Su función es operar cuando se alcanzan temperaturas excesivas en los descansos o alguna otra condición mecánica anormal asociada a los descansos, tal como condiciones de desgaste, la cual puede eventualmente resultar en temperaturas excesivas del descanso o en falla.
- **46 - Reverse-phase or Phase-Balance Current Relay:** Un dispositivo en un circuito polifásico que opera cuando las corrientes polifásicas están en secuencia equivocada o cuando las corrientes polifásicas están desbalanceadas o cuando las corrientes de secuencia negativa exceden un valor predeterminado; para la aplicación escogida solo se contemplan corrientes trifásicas.
- **49 - Machine or Transformer, Thermal Relay:** Opera cuando la temperatura de los enrollados de armadura de la máquina o alguno de sus elementos exceden un valor predeterminado, queda claro que su aplicación en este caso es para el uso en los motores.
- **50 - Instantaneous Overcurrent Relay:** Opera con un retardo de tiempo no intencional cuando las corrientes exceden un valor predeterminado.
- **51 - AC Inverse Time Overcurrent Relay:** Este relé opera cuando la corriente AC de entrada excede un valor predeterminado, y donde el tiempo de operación de relé es inversamente proporcional con la corriente AC de entrada.
- **59 - Overvoltage Relay:** Este dispositivo opera cuando la entrada de voltaje excede un valor predeterminado.
- **86 - Lockout Relay:** Este dispositivo mantiene el equipamiento asociado inoperativo hasta que el relé sea reseteado por un operador, ya sea local o remotamente.
- **87 - Differential Protective Relay:** Es un relé que opera cuando el vector de diferencia entre dos o más cantidades eléctricas similares, excede un valor predeterminado.

Las mediciones necesarias para la operación de los relés anteriormente descritos serán obtenidos mediante:

- 3 Transformadores de corriente y potencial
- 3 Transformadores de corrientes para protección diferencial (autobalanceados, tipo ventana, 50:5, C20, 5VA según norma ANSI)
- Detector de filtración de agua

- Llave de caudal de agua en la entrada del radiador
- 2 x Detectores de temperatura (3 terminales) por fase.
- 1 x Detector de temperatura (3 terminales) por descansos.
- 2 x Detectores de temperatura (3 terminales) por ambiente de refrigeración
- (circuito de aire caliente interno a la carcasa y circuito de aire frio).

Además el motor debe estar protegido contra peaks de voltaje, se contempla el uso de 3 capacitores y 3 pararrayos, uno por cada fase, como se observa en la figura 4-10:

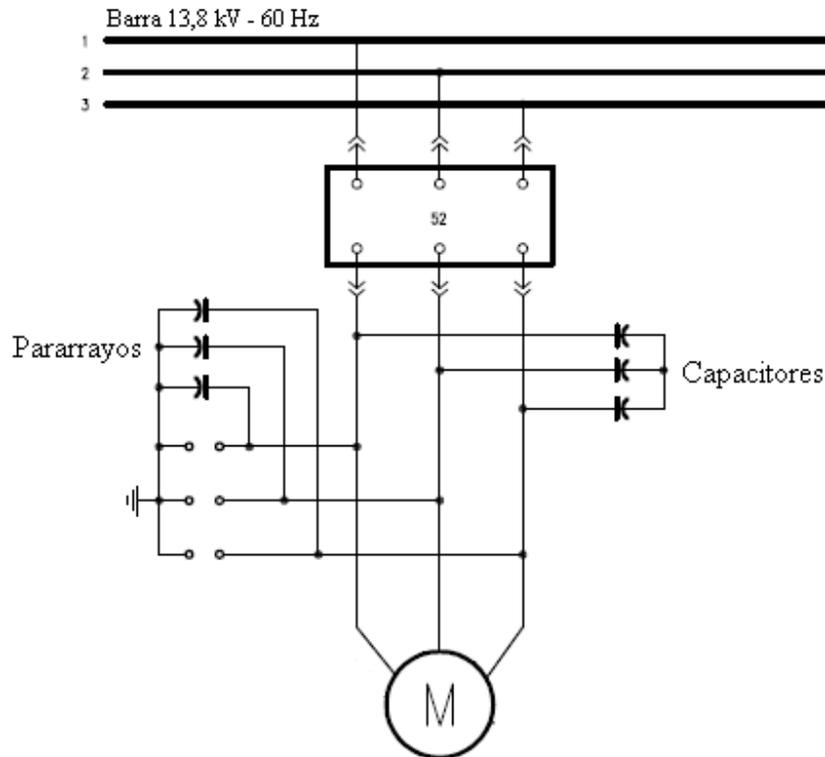


Figura 4-10. Protección Motor.

4.4.5. Accesorios del Motor

El motor además contempla el uso de diversos accesorios:

- Caja de conexión principal sobredimensionada en acero tipo NEMA 4X.
- Cajas de conexión de accesorios (según dimensional mecánico).
- Intercambiador de calor AIRE-AGUA con tubos de cobre.
- Supresores de Ruido.
- Resistencia de Calentamiento anti-condensación en 220V, 600W.
- Tres Terminales de puesta a tierra (dos puntos en carcasa en lados opuestos).
- Escobilla de puesta a tierra en el eje.
- Ambos descansos eléctricamente aislados.

Bases y Fundaciones

- Elementos de fijación y de nivelación para instalación en acero inoxidable AISI 316.
- Pernos de Anclaje
- Pernos para nivelación vertical.
- Pernos para nivelación horizontal.

Dispositivo de escobilla (IP44)

- Ventana de inspección del compartimiento de escobillas en vidrio templado.
- Escobilla con sensor de desgaste
- Previsión para operar con reóstatos líquidos de doble estanque totalmente controlado.

-

Monitoreo y Protecciones a vibraciones.

- 4 x Bentley Nevada Probes
- 4 x Bentley Nevada Proximity

-

Monitoreo de Velocidad

- Rueda con dientes.
- Zero speed switch sensor DYNALCO
- Transductor para sensor de velocidad.

4.5. Transformador de Recuperación

El transformador de recuperación es utilizado para disminuir el nivel de tensión de los convertidores conectados al rotor, es instalado entre el doble convertidor PWM y la barra de 13.800 [kV], El transformador contemplado es trifásico, 60 [Hz], sumergido en aceite vegetal, del tipo reconocido como el líquido menos inflamable según la NFPA, de enrollados de cobre 550V/13800V, con estanque sellado, incluirá cambiador de derivaciones sin carga, *bushings* y accesorios. El estanque debe ser sin conservador de líquido aislante y el sistema debe absorber los cambios originados en la variación de temperatura y la producción de gases en las distintas condiciones de operación.

Para dimensionar la potencia nominal del transformador es necesario calcular la potencia devuelta a la red desde el rotor, utilizando las siguientes ecuaciones [17]:

$$\begin{aligned} P_s &= \omega_e \psi_{sd} i_{sq} \\ P_r &= \frac{L_0}{L_s} \omega_{sl} \psi_{sd} i_{rq} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Si el sistema esta orientado según el flujo del estator $\psi_{sq} = 0$, entonces:

$$\psi_{sq} = 0 = L_s i_{sq} + L_0 i_{rq} \Rightarrow i_{sq} = -\frac{L_0}{L_s} i_{rq}$$

$$P_s = -\omega_e \psi_{sd} i_{rq} \frac{L_0}{L_s} \Rightarrow \frac{P_r}{P_s} = \frac{\omega_{sl} \psi_{sd} i_{rq} \frac{L_0}{L_s}}{-\omega_e \psi_{sd} i_{rq} \frac{L_0}{L_s}} = -\frac{\omega_{sl}}{\omega_e} = -\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} = -s$$

$$\therefore P_r = -s P_s$$

Anteriormente se ha estipulado que el motor debe controlar un rango de velocidad entre 85%-110% es decir un 15% de deslizamiento máximo, considerando además que la potencia en el eje del motor corresponde a 7400 [kW], se tiene:

$$P_r = 0.15 * 7400 [kW] = 1110 [kW]$$

El transformador debe suministrar su potencia nominal 1.400 kVA a una temperatura de 55 °C, medidos con el método de resistencia (enfriamiento KNAN). El diseño escogido debe permitir la operación continua a su mayor capacidad, sin pérdida de la vida útil de la aislación. El estanque debe ser sin conservador de líquido aislante y el sistema debe absorber los cambios originados en la variación de temperatura y la producción de gases en las distintas condiciones de operación.

El transformador estará sumergido en aceite vegetal biodegradable, en cantidad y calidad, suficiente para operar en régimen normal, con elevaciones de temperatura, según norma, sobre la temperatura ambiente considerada como 40° C y a 2.150 metros sobre el nivel del mar. El punto de inflamación (*Flash Point*) deberá ser mayor que 330°C, según clasificación UL. No se aceptará el uso de líquidos con contenido de PCB. Los enrollados serán diseñados, con bobinas de cobre electrolítico de sección transversal rectangular, aislado con papel termo estabilizado, resistente al envejecimiento, adecuado para la elevación de temperatura de enrollados y para el líquido refrigerante indicado.

Todas las uniones de los enrollados, si no son empernadas, deberán ser soldadas con soldadura de plata o su equivalente en características eléctricas y mecánicas. Las conexiones de los enrollados a los *bushings* o conectores y al cambiador de derivaciones deberán ser sujetadas mediante soportes aislantes que impidan vibraciones.

Las conexiones serán las siguientes: El primario en conexión delta, lado de alta tensión; el secundario en conexión estrella, lado de media tensión y con neutro accesible para la puesta a tierra a través de una resistencia. El diseño del aislamiento de la zona del punto neutro de la estrella del bobinado, tendrá la misma clase que el extremo conectado a la fase. Las bobinas y el núcleo, completamente ensamblados, deberán secarse al vacío e inmediatamente después impregnarse con aceite dieléctrico.

4.6. Reductor

El uso de motores de alta velocidad hace del reductor de velocidad un equipo crítico dentro del sistema para el accionamiento del molino de bolas. El sistema mecánico del molino debe contar con dos reductores de velocidad de ejes paralelos, con acoplamientos de baja y alta velocidad instalados en sus respectivos ejes, figura 4-11:



Figura 4-11. Reductor de velocidad - Flender MDSS.

Los acoplamientos de alta y baja velocidad deben contar con un sistema de protección. La construcción debe ser conforme las normas AGMA correspondientes para esta aplicación.

Además se contempla el uso de un sistema de lubricación con bombas de alta y baja presión, instalados de forma contigua al reductor, figura 4-12:

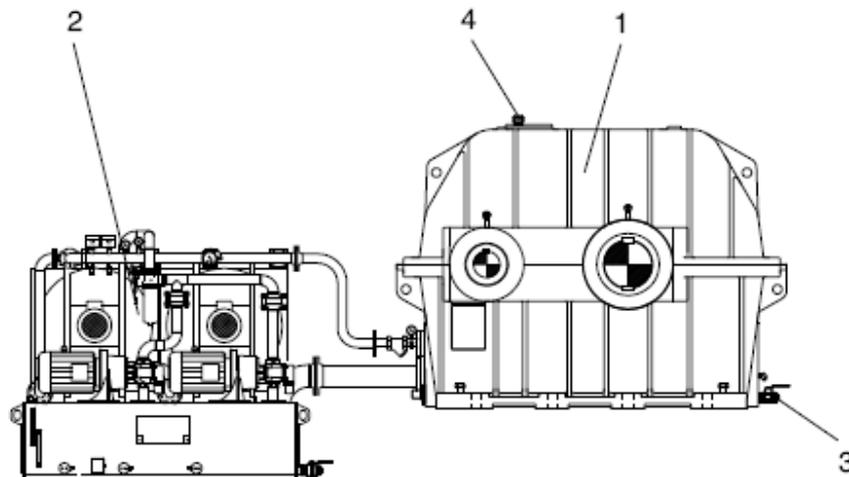


Figura 4-12. Lubricación del reductor - Siemens.

donde,

- | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| 1.- Reductor | 3.- Válvula para el drenaje de aceite |
| 2.- Equipo inyección de aceite | 4.- Ventilación coraza |

4.6. Piñones

La elección de motores de inducción de 6 polos implica una velocidad sincrónica:

$$n_s = \frac{120 * f}{p} = \frac{120 * 60}{6} = 1200[r.p.m.]$$

Con una velocidad en el eje del motor igual a 1200 [r.p.m.] y considerando un reductor 6:1 se obtiene una velocidad de salida de 200 [r.p.m.]

El diámetro del piñón es calculado suponiendo una velocidad en el eje de baja velocidad igual a 200 [r.p.m.] y mediante la siguiente ecuación de mecánica (ver figura 4-13):

$$n_1 * d_1 = n_2 * d_2 \Rightarrow 200[r.p.m.] * d_1 = 10[r.p.m.] * 8[m]$$

$$d_1 = \frac{10[r.p.m.] * 8[m]}{200[r.p.m.]} = 0.4[m]$$

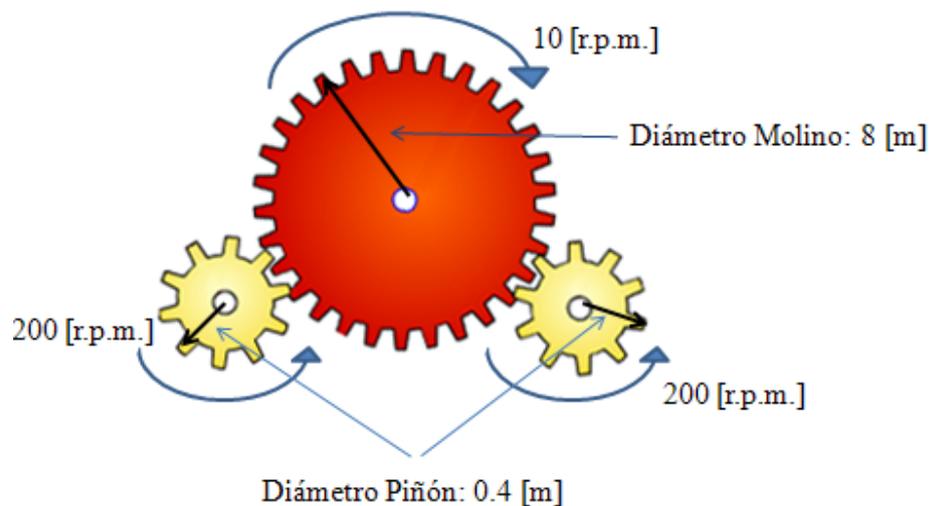


Figura 4-13. Acoplamiento de la corona dentada y piñones.

Nota. El largo de los dientes de los piñones se suponen iguales y contenidos dentro del diámetro de los piñones por lo tanto la incidencia en el cálculo es despreciable.

La corona dentada es del tipo helicoidal, hecha de una aleación de acero, con alrededor de 290 dientes. En cambio los piñones tienen cerca de 20 dientes y son de acero forjado. Los piñones son acoplados al reductor y este a su vez a los motores de inducción de rotor bobinado, por lo tanto el sistema mecánico queda descrito por la figura 4-14:

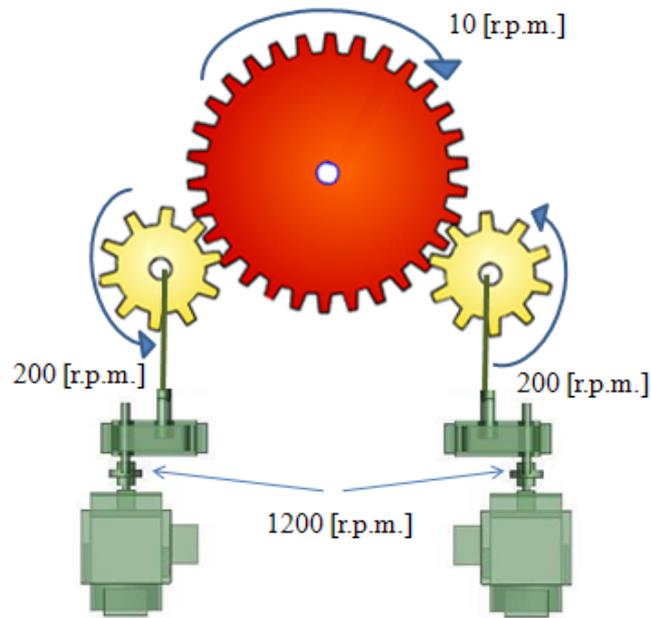


Figura 4-14. Sistema mecánico general.

4.7. Accionamiento Motor

En el capítulo 3 se han analizado las diferentes técnicas que se utilizan para controlar el motor de inducción de rotor bobinado, optando finalmente por utilizar el accionamiento Scherbius, con una configuración de doble convertidor PWM. Los semiconductores escogidos son de tecnología IGCT², el inversor básico es descrito por la figura 4-15:

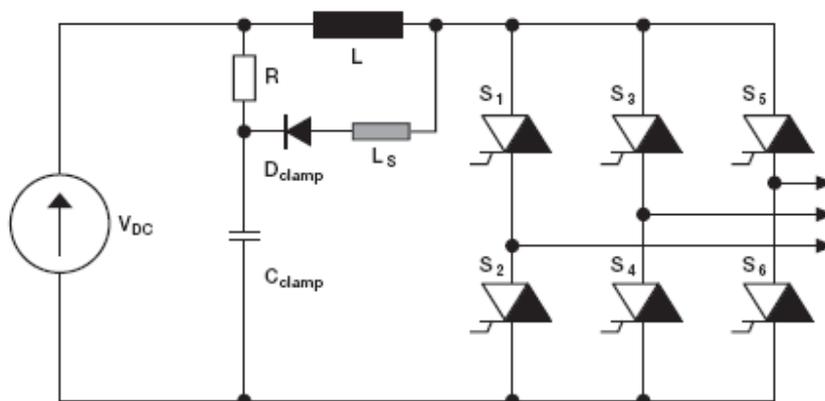


Figura 4-15. Convertidor PWM tecnología IGCT. ABB

² IGCT: El tiristor integrado controlado por compuerta (IGCT, del inglés Integrated Gate-Commutated Thyristor) es un dispositivo semiconductor que generalmente se aplica como interruptor controlado en circuitos de electrónica de potencia.

La protección de cortocircuito de salida se beneficia directamente del rápido *switching* de los IGCTs. Si el di/dt de una corriente de cortocircuito externa es limitada por un filtro o una inductancia L , los IGCTs pueden ser apagados antes de que se alcance el máximo de la corriente de apagado, o *turn off current*, de los semiconductores.

En la figura 4-15 se observa el circuito *clamp* del inversor, en los raros casos de una saturación interna tendrá la función de captar el incremento de di/dt , limitando así el peak máximo de corriente. Una saturación descargará de forma segura en el capacitor del puente DC ya que los IGCTs harán cortocircuito de forma segura bajo las peores condiciones de falla posible. Esta característica es especialmente ventajosa para convertidores con dispositivos conectados en serie. Por lo tanto el circuito del accionamiento del motor queda caracterizado por la figura 4-16:

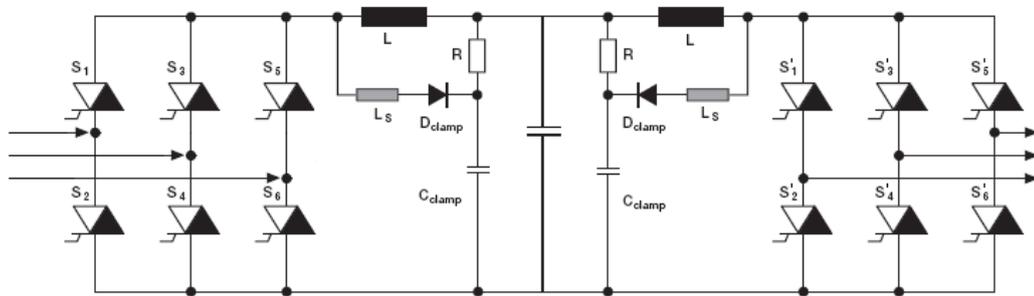


Figura 4-16. Accionamiento motor. Modificado ABB

Para simplificar el cálculo de la corriente del puente DC, se asumen pérdidas despreciables de los semiconductores, es decir, toda la potencia de deslizamiento del rotor fluye a través del puente DC:

$$P_{EP} = P_r = sP_s = V_{dc} I_{dc} \quad (4.2)$$

donde:

P_{EP} Potencia del circuito de electrónica de potencia

:

s : Deslizamiento

P_s : Potencia en eje del motor

V_{dc} : Voltaje puente DC

I_{dc} : Corriente puente DC

Utilizando un valor de 1800 [V]

para el voltaje V_{dc} en la ecuación (4.2), la corriente I_{dc} queda dada por:

$$I_{dc} = \frac{1110[W]}{1800[V]} \Rightarrow I_{dc} = 0.6[A]$$

4.7.1 Estrategia de control conversor del lado del rotor.

El sistema de control utiliza un sistema de referencia rotatorio sincrónico, que se orienta en el ángulo de posición del vector de flujo de estator, θ_s , el cual se utiliza para modular y demodular las variables eléctricas. Este ángulo se obtiene de las componentes α - β del flujo de estator, las cuales se obtienen al integrar la fuerza electromotriz (FEM) inducida del estator. Las componentes α - β del flujo de estator están dadas por:

$$\begin{aligned}\lambda_{\alpha s} &= \int (v_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) dt \\ \lambda_{\beta s} &= \int (v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt\end{aligned}\tag{4.3}$$

Por lo tanto, el ángulo del vector de flujo de estator está dado por:

$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{\beta s}}{\lambda_{\alpha s}} \right)\tag{4.4}$$

Para modular y demodular las variables de rotor se utiliza el ángulo de deslizamiento dado por:

$$\theta_{sl} = \theta_s - \theta_r\tag{4.5}$$

donde θ_r es el ángulo de rotor, obtenido con un encoder de posición, en radianes eléctricos. Finalmente el sistema de control queda expresado por la figura 4-17:

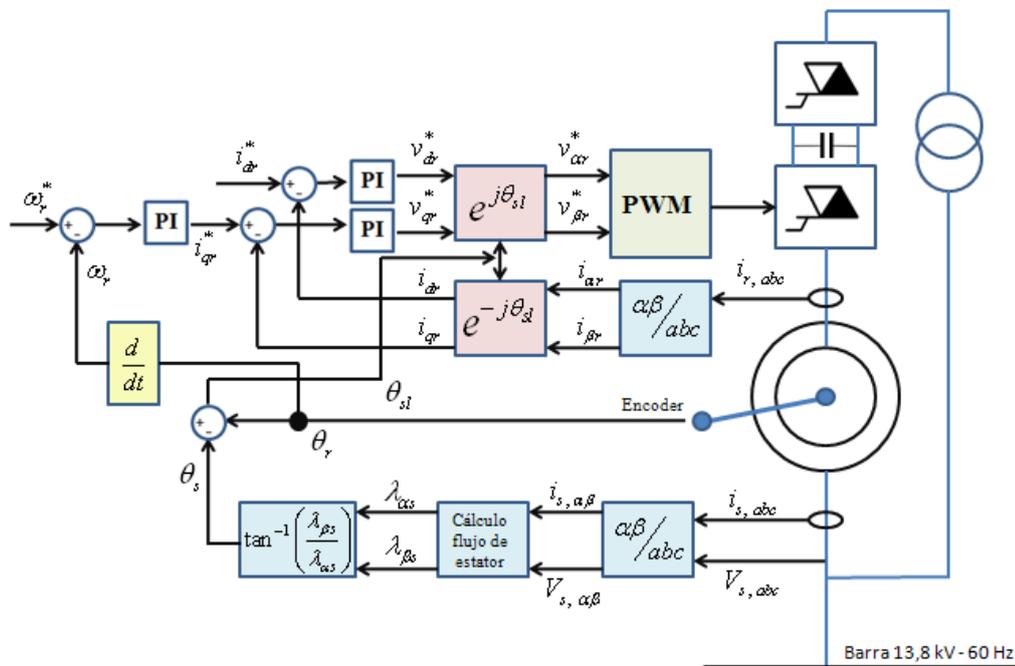


Figura 4-17. Control conversor lado rotor.

Luego, orientando los ejes d-q en la dirección del vector de flujo de estator, es decir, orientado el sistema de referencia d-q en la dirección dada por el ángulo θ_s , se tiene:

$$\begin{aligned} |\lambda_s| = \lambda_{ds} \Rightarrow \lambda_{qs} = 0 \Rightarrow i_{qs} &= -\frac{L_o}{L_s} i_{qr} \\ \lambda_{ds} = L_o i_{ms} \Rightarrow i_{ms} &= \frac{L_s}{L_o} i_{ds} + i_{dr} \end{aligned} \quad (4.6)$$

donde i_{ms} es la corriente magnetizante.

Para el control de las corrientes de rotor, se tiene:

$$\begin{aligned} v_{dr} &= R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{d}{dt}(i_{dr}) - \omega_{sl} \sigma L_r i_{qr} \\ v_{qr} &= R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{d}{dt}(i_{qr}) + \omega_{sl} (\sigma L_r i_{dr} + L_m i_{ms}) \end{aligned} \quad (4.7)$$

donde se definen σ y L_m como:

$$\sigma = 1 - \frac{L_o^2}{L_s L_r}; L_m = \frac{L_o^2}{L_s} \quad (4.8)$$

Luego, para el diseño de controladores se tiene:

$$\begin{aligned} v_{dr}' &= R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{d}{dt}(i_{dr}) \\ v_{qr}' &= R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{d}{dt}(i_{qr}) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Así, la salida de los controladores está dada por:

$$\begin{aligned} v_{dr}^* &= v_{dr}' - \omega_{sl} \sigma L_r i_{qr} \\ v_{qr}^* &= v_{qr}' + \omega_{sl} (\sigma L_r i_{dr} + L_m i_{ms}) \end{aligned} \quad (4.10)$$

donde v_{dr}^* y v_{qr}^* son las referencias de tensión de rotor.

Por otra parte, de las ecuaciones (3.12) y (4.6), se tiene que el par eléctrico, para el sistema alineado con el vector de flujo de estator, está dado por:

$$T_e = -3 \frac{p}{2} \frac{L_o^2}{L_s} i_{ms} i_{qr} \quad (4.11)$$

Al controlar las corrientes de rotor, la componente en eje directo, i_{dr} , se puede utilizar para suministrar parte de la corriente magnetizante de la máquina. Si su valor se controla en cero, la totalidad de la corriente magnetizante se suministra por el estator del generador. Por otra parte, la componente en eje en cuadratura, i_{qr} , se utiliza para controlar el par de la máquina y, en consecuencia, se le denomina componente de par.

4.7.2 Estrategia de control conversor del lado de la línea.

El conversor del lado de la red es el encargado de mantener el voltaje del puente DC en un valor predefinido, independiente de la magnitud y dirección de la potencia del rotor. Existen diversas técnicas capaces de lograr este objetivo pero finalmente se optó por un control d-q que permite desacoplar el control de potencia activa y reactiva.

Es necesaria además la instalación de un PLL (*phase-locked loop*) para asegurar la sincronización del conversor con las corrientes de líneas, utilizando el ángulo del PLL para realizar las conversiones $d-q/\alpha-\beta$. El control de las corrientes de línea i_d e i_q permite entonces el control desacoplado de las potencia activa y reactiva respectivamente, ver figura 4-18.

El suministro de potencia reactiva necesario para el funcionamiento del motor se realizará solamente a través del estator, es decir, el rotor no debe intercambiar potencia reactiva con la línea a través del conversor, por lo tanto la referencia i_q^* de las corrientes de línea debe mantenerse en cero. Existe la posibilidad de suministrar potencia reactiva mediante el rotor, ya sea para efectos de necesidad del motor o para trabajar con un factor de potencia unitario (visto desde la red), mediante el control de la referencia i_q^* .

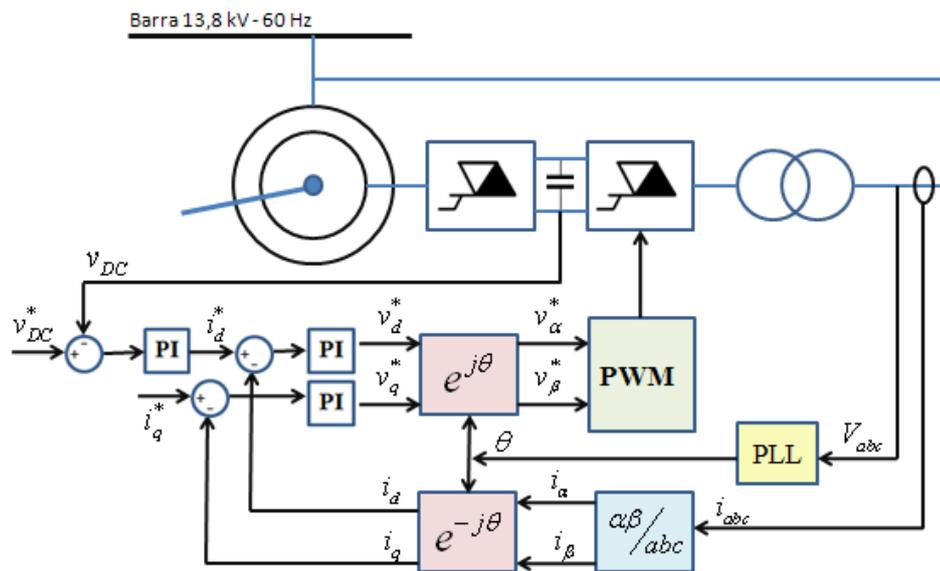


Figura 4-18. Control conversor lado línea.

Capítulo 5

Modelo en MATLAB

5.1. Introducción

Previo a la construcción de cualquier circuito o sistema eléctrico, es recomendable realizar simulaciones y/o modelos de los circuitos, entendiendo de antemano el funcionamiento de estos y mejorando así el diseño. En el mercado se pueden encontrar varios software que realicen tareas de simulación pero todas con características especiales y específicos para cada tema, entre ellos se destacan PSpice, MATLAB, DigSilent, ETAP, entre otros.

La elección de cual programa utilizar para modelar el funcionamiento de un motor y su sistema de control respectivo es compleja ya que cada uno cuenta con ventajas y desventajas, PSpice por su parte es un gran simulador de circuitos eléctricos de baja potencia, pudiendo eventualmente simular el circuito de electrónica de potencia escogido por esta memoria, pero la simulación del motor se vuelve bastante compleja.

El software ETAP es un programa con grandes herramientas para la simulación de sistemas eléctricos de potencia, pero a lo que modelo de motores se refiere es demasiado básico y simplista, reduciendo el motor a un carga eléctrica más una inyección de armónicos, además de no tener posibilidad de simular circuitos de electrónica de potencia.

En cambio DigSilent, es un software con una vasta librería de modelo de motores y circuitos de electrónica de potencia, cada uno con su especificación técnica y la explicación de cada modelo. Aún así, no existe un real control de todas las variables del sistema, sin contar que para modificar algún modelo es necesaria una gran experiencia en el software.

Finalmente queda MATLAB, que es un programa creado para realizar prácticamente cualquier función matemática, ideal para implementar un modelo matemático del motor utilizando las ecuaciones dinámicas que rigen el movimiento de este. Además es posible simular el sistema de electrónica de potencia mediante el uso de modelos de semiconductores disponibles en las librerías del programa, todo esto en una plataforma que trabaja por bloques denominada *Simulink*.

5.2. Simulación máquina doblemente alimentada sin control

Para simular el accionamiento Scherbius en MATLAB la primera opción fue utilizar la herramienta *Simulink* que trae consigo una librería llamada *SimPowerSystem*, utilizada para la simulación de generación, transmisión, distribución y consumos de energía eléctrica.

Provee modelos de las componentes utilizadas en estos sistemas, tales como, máquinas trifásicas, accionamientos eléctricos, semiconductores, entre otros.

La librería a primera vista es una gran herramienta para el estudio de sistemas eléctricos, pero el hecho que traiga modelos pre-hechos hace desconfiar de su veracidad. El estudio de cada bloque es largo y tedioso, además que es necesario tener conocimientos avanzados sobre el funcionamiento de MATLAB para realmente entender que sucede en cada bloque de la librería.

A modo de ejemplo en la figura 5-1 se expone el bloque de una máquina asincrónica, que varía su modelo según la elección del usuario entre motor de jaula ardilla o rotor bobinado:

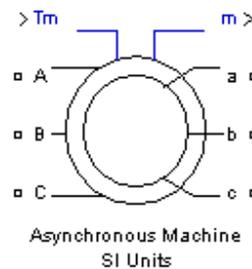


Figura 5-1. Bloque máquina asincrónica MATLAB.

La complejidad de este modelo y el poco conocimiento de la gran cantidad de funciones que existen en MATLAB y que son utilizadas en este bloque, además del hecho de la casi nula posibilidad de variar el funcionamiento del bloque si fuese necesario, hacen desconfiar de este modelo. Por lo tanto se opta por crear un modelo nuevo del motor de inducción de rotor bobinado, quizás simple pero con la gran ventaja de tener absoluto control de todas sus variables.

5.2.1 Modelo máquina doblemente alimentada en MATLAB

El modelo de la máquina de inducción de rotor bobinado es en coordenadas α - β , implementado en el sistema de ejes del estator de la máquina. Por lo tanto las ecuaciones son:

$$\bar{V}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} \quad (5.1)$$

$$\left[\bar{V}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} \right] e^{j\theta_r} \quad (5.2)$$

Donde el ángulo θ_r se utiliza para transferir la dinámica del rotor en coordenadas de estator.

Recordando que el flujo del rotor y estator en coordenadas α - β pueden obtenerse desde las corrientes de la máquina, se tiene:

$$\bar{\psi}_s = L_s \bar{i}_s + L_0 \bar{i}_r \quad (5.3)$$

$$\bar{\psi}_r = L_r \bar{i}_r + L_0 \bar{i}_s \quad (5.4)$$

Las ecuaciones de estado de la máquina de inducción de rotor bobinado, se pueden obtener a partir de (5.1-5.4). Reemplazando las ecuaciones (5.3) y (5.4) en (5.1) y (5.2) respectivamente se obtiene:

$$\begin{aligned} V_{s\alpha} &= R_s i_{s\alpha} + L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + L_0 \frac{di_{r\alpha}}{dt} \\ V_{s\beta} &= R_s i_{s\beta} + L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + L_0 \frac{di_{r\beta}}{dt} \\ V_{r\alpha} &= R_r i_{r\alpha} + \left(L_r \frac{di_{r\alpha}}{dt} + L_0 \frac{di_{s\alpha}}{dt} \right) + \omega_r (L_r i_{r\beta} + L_0 i_{s\beta}) \\ V_{r\beta} &= R_r i_{r\beta} + \left(L_r \frac{di_{r\beta}}{dt} + L_0 \frac{di_{s\beta}}{dt} \right) - \omega_r (L_r i_{r\alpha} + L_0 i_{s\alpha}) \end{aligned} \quad (5.5)$$

Utilizando la herramienta “*solve*” de MATLAB se obtienen las ecuaciones de estado:

$$\begin{aligned} \frac{di_{s\alpha}}{dt} &= \frac{V_{s\alpha} L_r - r_s i_{s\alpha} L_r - L_0 V_{r\alpha} + L_0 R_r i_{r\alpha} + L_0 \omega_r L_r i_{r\beta} + \omega_r L_0^2 i_{s\beta}}{L_s L_r - L_0^2} \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} &= \frac{V_{s\beta} L_r - R_s i_{s\beta} L_r - L_0 V_{r\beta} + L_0 R_r i_{r\beta} - L_0 \omega_r L_r i_{r\alpha} - \omega_r L_0^2 i_{s\alpha}}{L_s L_r - L_0^2} \\ \frac{di_{r\alpha}}{dt} &= \frac{L_s V_{r\alpha} - L_s R_r i_{r\alpha} + L_0 R_s i_{s\alpha} - L_s \omega_r L_r i_{r\beta} - L_s \omega_r L_0 i_{s\beta} - L_0 V_{s\alpha}}{L_s L_r - L_0^2} \\ \frac{di_{r\beta}}{dt} &= \frac{L_s V_{r\beta} - L_s R_r i_{r\beta} + L_0 R_s i_{s\beta} + L_s \omega_r L_r i_{r\alpha} + L_s \omega_r L_0 i_{s\alpha} - L_0 V_{s\beta}}{L_s L_r - L_0^2} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Del desarrollo mostrado anteriormente es relativamente simple encontrar las ecuaciones de estado de la máquina, que tienen la forma:

$$s \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{41} & \cdots & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{41} & \cdots & b_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ V_{r\alpha} \\ V_{r\beta} \end{bmatrix}$$

Donde “s” es el operador de Laplace representando (d/dt) en el dominio del tiempo. Los valores de las matrices A y B, para fines de simulación, se pueden calcular utilizando un archivo “m” donde además se agregarán algunas constantes necesarias para la simulación R_s, R_r, L_s, L_r, L_0 . El archivo “Initial_mirb.m” se observa en el Anexo 1.

Una vez obtenidos valores de las matrices de estado, la modelación de la máquina de inducción de rotor bobinado puede ser realizada en tiempo continuo o en tiempo discreto. Ambas posibilidades son permitidas por MATLAB.

Dado que los computadores actuales permiten velocidades de procesamiento bastante altas, se opta por utilizar simulación con modelos discretos. De todas formas, los modelos implementados en MATLAB son simulados en forma discreta utilizando algún algoritmo como Runge-Kutta 4 o similar.

Para implementar las ecuaciones de estado en forma discreta se utiliza:

$$s \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \approx \left(\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix}_{k+1} - \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix}_k \right) / T_s \quad (5.7)$$

Donde el subíndice k+1 indica valores de las variables de estado como resultado de la iteración (k+1). T_s es el intervalo de tiempo entre iteración e iteración y que puede ser igual al período de switching del PWM (aunque esto no es estrictamente necesario).

Se debe tener en cuenta que la aproximación de (5.7) no es muy exacta a menos que se utilice un tiempo de iteración relativamente pequeño. Por otra parte valores muy bajos de T_s pueden producir problemas debido a que la diferencia entre $[X]_{k+1}$ y $[X]_k$ será afectada por la precisión utilizada en la representación de números reales.

Utilizando (6), las ecuaciones de estado discreta son obtenidas como:

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + T_s \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{41} & \dots & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix}_k + T_s \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{41} & \dots & b_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ V_{r\alpha} \\ V_{r\beta} \end{bmatrix}$$

El código necesario para simular en forma discreta la máquina de inducción de rotor bobinado es guardado en un archivo llamado “mirb.m”, el código se adjunta en el Anexo 1. La implementación del modelo del motor en MATLAB es bastante sencilla; se debe utilizar un bloque denominado “MATLAB Fcn”, y hacer referencia a la función mirb previamente creada.

5.2.2 Bloque para el cálculo de ω_r

Las variables de entrada de la función mirb son los voltajes trifásicos a-b-c de estator y rotor, además de la velocidad angular del rotor. Las variables de salida son las corrientes α - β del estator y rotor. Dado que es necesaria la velocidad angular para hacer correr el modelo, es obtenida mediante la ecuación del torque:

$$T_e = T_m + J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (5.8)$$

donde,

- J : Coeficiente de inercia máquina
- B : Coeficiente de fricción máquina
- T_e : Torque eléctrico máquina
- T_m : Carga mecánica
- ω_r : Velocidad angular rotor

El coeficiente de fricción es despreciado $B = 0$, no existen pérdidas por efectos de fricción, y el coeficiente de inercia es obtenido de la especificación técnica típica de un motor de 7400 [kW], es decir, $J = 1060 [kg \bullet m^2]$. Por lo tanto el cálculo de ω_r queda:

$$\omega_r = \frac{1}{s} \left(\frac{T_e - T_m}{J} \right) \quad (5.9)$$

El próximo paso es obtener el valor de la carga mecánica y el torque eléctrico de la máquina, la carga mecánica en un principio es modelada como una constante $T_m = 6000$ y el T_e será obtenido mediante la ecuación 5-10:

$$T_e = \frac{2}{3} \left(\frac{p}{2} \right) L_0 (i_{dr} i_{qs} - i_{ds} i_{qr}) \quad (5.10)$$

El bloque finalmente queda con las corrientes d-q del estator y rotor como variables de entrada, y ω_r como la variable de salida:

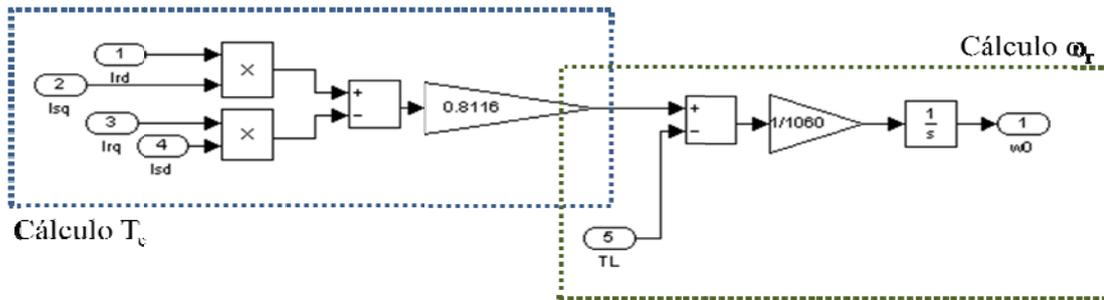


Figura 5-2. Bloque cálculo ω_r .

5.2.3 Bloque para la conversión α - β \rightarrow d-q

En el cálculo del torque eléctrico son utilizadas las corrientes en coordenadas d-q, sin embargo, las salidas del motor de inducción son corrientes en el sistema de coordenadas α - β , siendo necesario entonces una conversión de coordenadas. El bloque encargado de realizar la conversión es ilustrado en la figura 5-3:

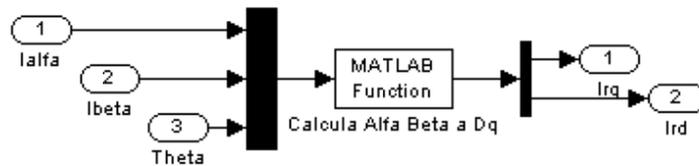


Figura 5-3. Conversión α - β \rightarrow d-q.

Esta función convierte de coordenadas α - β a coordenadas d-q referidas a un eje rotatorio. Las entradas son las corrientes α - β y el ángulo del eje rotatorio. Las salidas son las corrientes en d-q. En el caso del cálculo del torque eléctrico de la máquina el ángulo del eje rotatorio corresponde al ángulo del flujo del estator. La rutina es guardada en el archivo "AB2DQ.m" y es implementado mediante el bloque "MATLAB Function". Se adjunta el código en el Anexo 2.

5.2.4 Bloque para el cálculo θ_s

El ángulo del flujo de estator utilizado en el cálculo del torque eléctrico y el ángulo de deslizamiento θ_{sl} es obtenido mediante las siguientes ecuaciones:

$$\lambda_{\alpha s} = \int (v_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) dt$$

$$\lambda_{\beta s} = \int (v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt$$
(5.11)

El ángulo del vector de flujo de estator está dado por:

$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{\beta s}}{\lambda_{\alpha s}} \right)$$
(5.12)

Por lo tanto se implementa un bloque en *Simulink* que calcule el ángulo del flujo del estator utilizando como variables de entradas, $i_{\alpha s}$, $i_{\beta s}$ y el voltaje trifásico de alimentación del estator. Dentro del bloque implementado en *Simulink*, el vector del voltaje trifásico del estator es convertido a coordenadas α - β , para luego ser operado según las ecuaciones anteriores, figura 5-4:

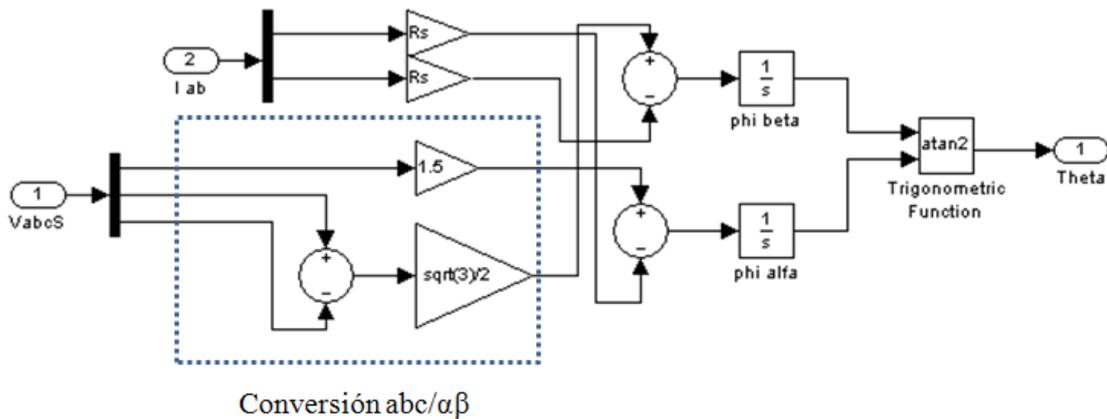


Figura 5-4. Cálculo ángulo flujo estator

Para obtener el ángulo del flujo del estator en un rango $[-\pi, \pi]$ es necesario realizar un cambio en la función tangente inversa típica, el recorrido de esta función es $[-\pi/2, \pi/2]$, recorriendo solo la mitad del círculo, para los propósitos de esta memoria el recorrido del ángulo de salida θ_s debiese recorrer el círculo completo, ya que más adelante deberá ser restada con el ángulo del rotor θ_r que tiene un rango de $[-\pi, \pi]$. En la figura se observa que la función trigonométrica utilizada es “atan2”, una función especial de MATLAB denominada tangente inversa de cuatro cuadrantes, que tiene un recorrido de rango $[-\pi, \pi]$ conforme a las exigencias del sistema de control propuesto.

5.3 Ejemplo implementación de un motor de inducción sin control

Utilizando todos los bloques implementados anteriormente, se procede a crear un modelo simple para verificar el funcionamiento básico del sistema; se alimenta el estator del motor de inducción con una fuente ideal trifásica sinusoidal, de secuencia positiva, 13.800 de amplitud y 60 [Hz] de frecuencia. El rotor es alimentado con voltaje 0, emulando un cortocircuito de las tres fases del rotor. No se debe olvidar utilizar sistema previamente a la ejecución del modelo un archivo .m para inicializar las constantes del sistema. El sistema finalmente queda expresado en la figura 5-5:

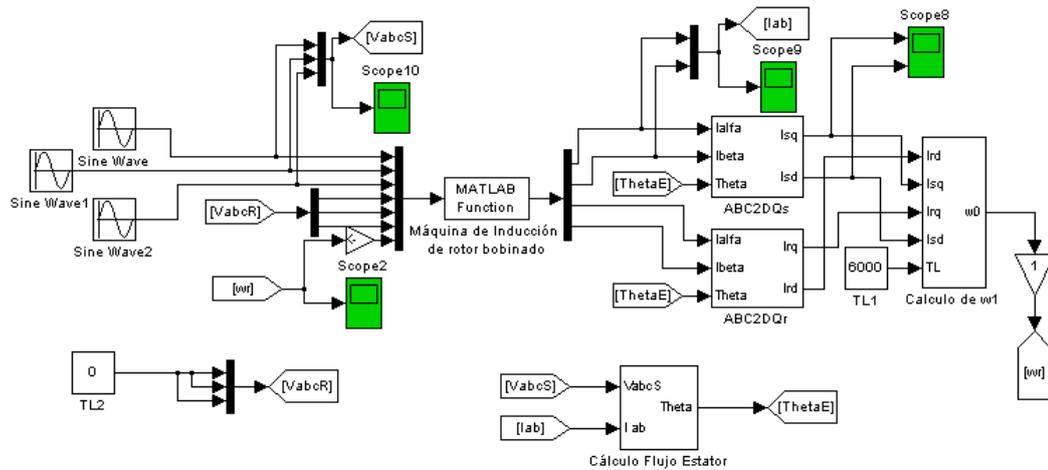


Figura 5-5. Modelo máquina de inducción de rotor bobinado.

5.3.1 Velocidad angular

El motor doblemente alimentado al tener las fases del rotor en cortocircuito debiese comportarse como un motor de inducción jaula de ardilla, es decir, girar a una velocidad constante, ver figura 5-6:

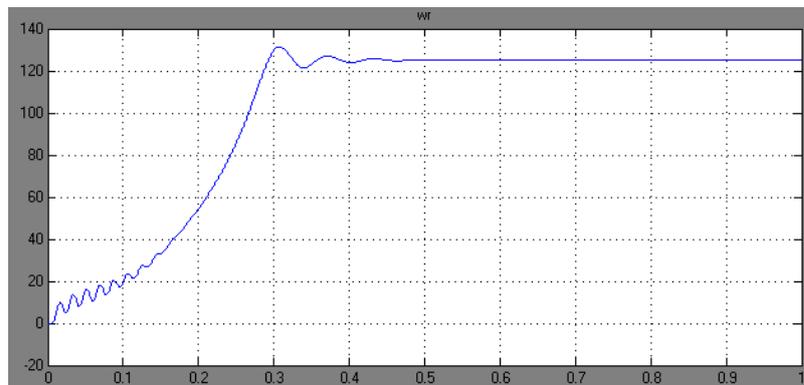


Figura 5-6. Velocidad angular.

En la figura se observa la velocidad angular partir de 0 e incrementar en una curva suave, pasando por un peak para luego estabilizarse. La velocidad de estabilización corresponde a la velocidad sincrónica menos un pequeño deslizamiento, el cálculo de la velocidad sincrónica es:

$$\omega_r = \frac{2}{p} \omega_s \Rightarrow \omega_r = \frac{2\pi \cdot 60}{3} = 125.664 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

La resistencia del rotor escogida es pequeña, es decir, el deslizamiento también lo es. Por lo tanto, la velocidad de estabilización debiese ser casi igual a la velocidad sincrónica:

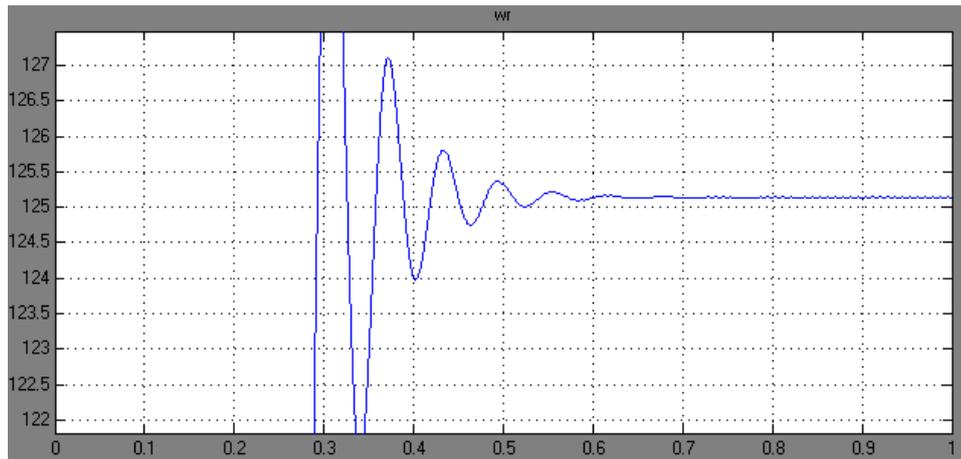


Figura 5-7. Zoom velocidad angular

El deslizamiento es:

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{125.664 - 125.2}{125.664} = 0.03692$$

5.3.2 Corrientes α - β

Las corrientes de estator α - β típicas de un motor de inducción alimentado con una fuente trifásica balanceada son corrientes desfasadas en 90° y con amplitudes idénticas, las corrientes α - β obtenidas en *Simulink* son mostradas en las figuras 5-8 y 5-9:

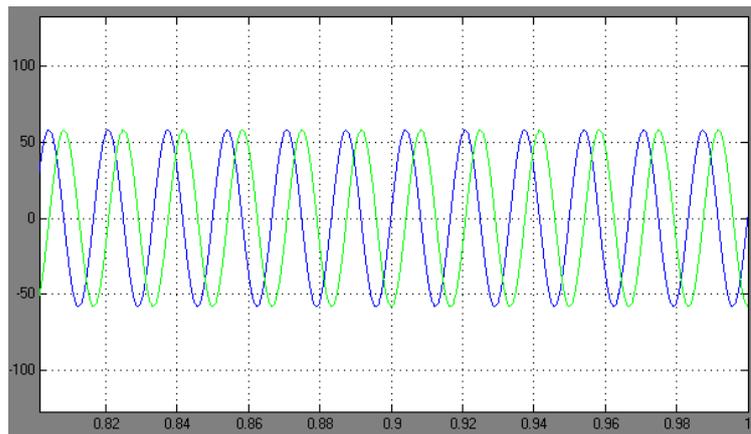


Figura 5-8. Corrientes α - β del estator.

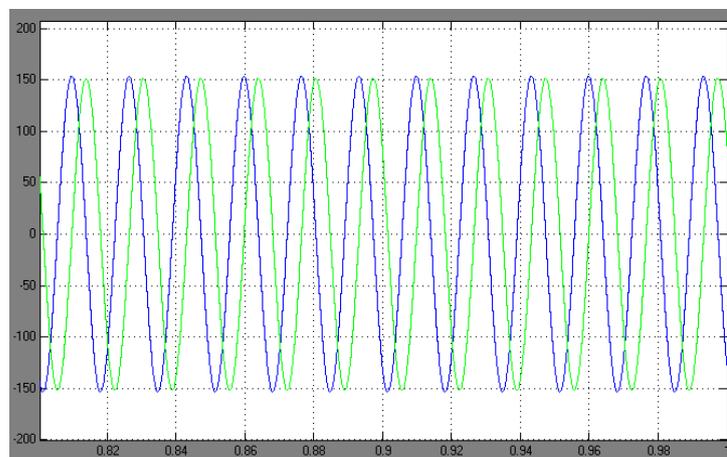


Figura 5-9. Corrientes α - β del rotor.

Por lo observado en las figuras 5-8 y 5-9 se puede verificar que las corrientes de la máquina están correctas. Existe la posibilidad de obtener corrientes α - β erróneas, esto podría deberse a que la fuente trifásica del estator esté desbalanceada, errores en el cálculo de las ecuaciones de estado o parámetros de la máquina mal dimensionados, recordar que en un motor de inducción de rotor bobinado típico se cumple $R_s \geq R_r$.

5.4. Simulación máquina doblemente alimentada con control

El motor de inducción de rotor bobinado será controlado utilizando la técnica de flujo orientado que permite expresar la ecuación de torque a través del producto de dos variables mediante el sistema de coordenadas d-q. Al expresar el torque como un producto de variables, el control del torque de la máquina se puede realizar en forma simple

manteniendo una de las variables constante y de esta forma disponer de un torque controlado linealmente por una sola variable.

Las variables del sistema de control escogido y analizado en los capítulos anteriores son las corrientes de rotor d-q del motor, siendo la corriente i_{rd} el encargado de controlar la potencia reactiva e i_{rq} la potencia activa de la máquina, las corrientes de estator son mantenidas constantes. Manteniendo i_{rd} constante se controla la potencia reactiva y además se dispone de un torque controlado linealmente por la corriente i_{rq} . El control de las corrientes y de la velocidad angular del rotor es mediante controladores PI.

Se variará la velocidad del motor en todo el rango permitido por esta memoria, 85-110%, para observar la dinámica de las variables del motor.

5.4.1 Controlador PI

El controlador a ser implementado utiliza tres parámetros en el algoritmo de cálculo del control: el proporcional, derivativo y el integral. El valor proporcional K_P determina la reacción del error actual y el integral K_I genera una corrección proporcional a la integral del error, esto asegura que aplicando un control adecuado, el error del estado estacionario se reduce a cero. La función de la acción derivativa es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce; de esta manera evita que el error se incremente.

El diseño escogido contempla el uso de la acción proporcional e integrativa, ya que de no utilizar el valor integral podría evitar que se alcance al valor deseado, ver figura 5-10:

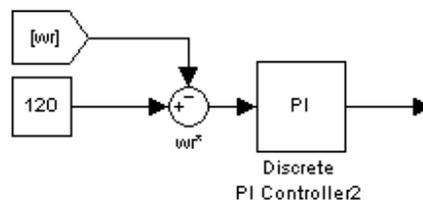


Figura 5-10. Ejemplo controlador PI

La acción derivativa no será utilizada, K_D igual a 0, esto se debe a que la acción derivativa es muy sensible al ruido, y lamentablemente las corrientes de los motores presentan una gran cantidad de armónicos, repercutiendo en errores de la acción correctora.

El bloque del controlador PI tiene como entrada el error entre la variable medida y su valor de referencia, la salida es utilizada para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso, es decir, sirva de referencia para el próximo controlador, figura 5-11:

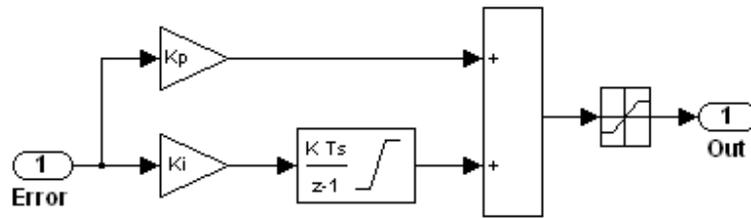


Figura 5-11. Bloque controlador PI discreto.

5.4.2 Control de corrientes

Básicamente un control PQ, las señales medidas de i_q e i_d son comparadas con las referencias, luego el error de ambas pasan por un control PI, con un limitador de la salida integrado. El esquema del sistema de control de las corrientes queda ilustrado en la figura 5-12:

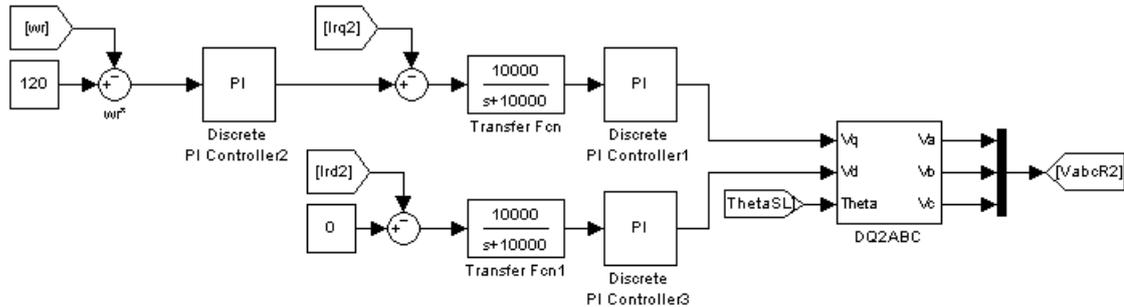


Figura 5-12. Diagrama de control de corrientes.

La salida del controlador PI asociado al error de la velocidad angular servirá de referencia para la corriente i_q . De igual manera la comparación de las corrientes d-q pasan por un controlador PI, finalmente la salida del controlador de corrientes entrega la referencia para los voltajes d-q.

Las corrientes medidas serán obtenidas mediante una conversión $\alpha\text{-}\beta\text{→d-q}$ de las corrientes del rotor utilizando como ángulo demodulador θ_{sl} :

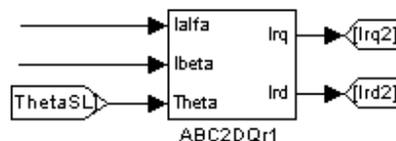


Figura 5-13. Conversión de corrientes

El bloque del controlador tiene una función de transferencia correspondiente a un filtro de primer orden. Esta función de transferencia es:

$$G(s) = \frac{10000}{s + 10000}$$

Este filtro no existe y no debería estar presente en una implementación real. Se utiliza debido a que el diagrama de la Fig. 5-11, tiene un *algebraic loop*, que es una condición que puede producir inestabilidad en una simulación. Para romper este lazo algebraico se utiliza un filtro con una frecuencia de corte muy alta y que en la práctica no produce ningún cambio en el modelo, porque sus polos se encuentran muy a la izquierda en el plano s y alejados de los polos dominantes.

5.4.3 Conversión dq-abc

La función mostrada en la figura 5-14 convierte de coordenadas d-q referidas a un eje rotatorio a coordenadas abc. Las entradas son las corrientes d-q y el ángulo del eje rotatorio. Las salidas son las corrientes en abc. Este bloque es utilizado para simular las corrientes del rotor utilizando un ángulo de entrada igual a θ_{sl} . La rutina es guardada en el archivo "DQ2ABC.m" y es implementado mediante el bloque "MATLAB Function". Se adjunta el código en el Anexo 2.

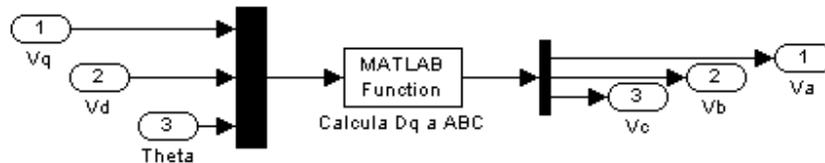


Figura 5-14. Conversión dq-abc.

5.4.4 Angulo rotor θ_r

El ángulo del rotor θ_r es utilizado para determinar el ángulo de deslizamiento θ_{sl} y es obtenido integrando la velocidad angular del eje del motor:

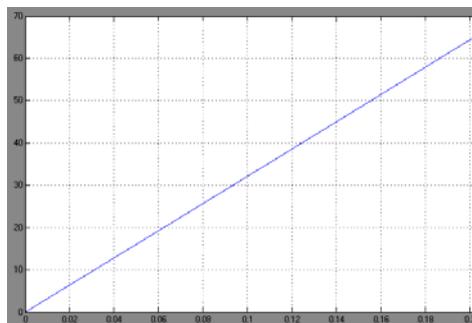


Figura 5-15. Integración de la velocidad angular.

De la figura 5-15 se observa la curva obtenida al integrar la velocidad del eje del motor, correspondiente a una curva ascendente con respecto al tiempo, la cual debe ser modificada y acotada en el rango $[-\pi, \pi]$ utilizando el bloque de la figura 5-16:

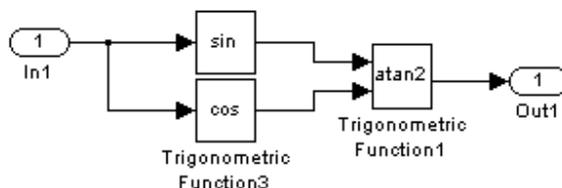


Figura 5-16. Acotador ángulo rotor.

Obteniendo:

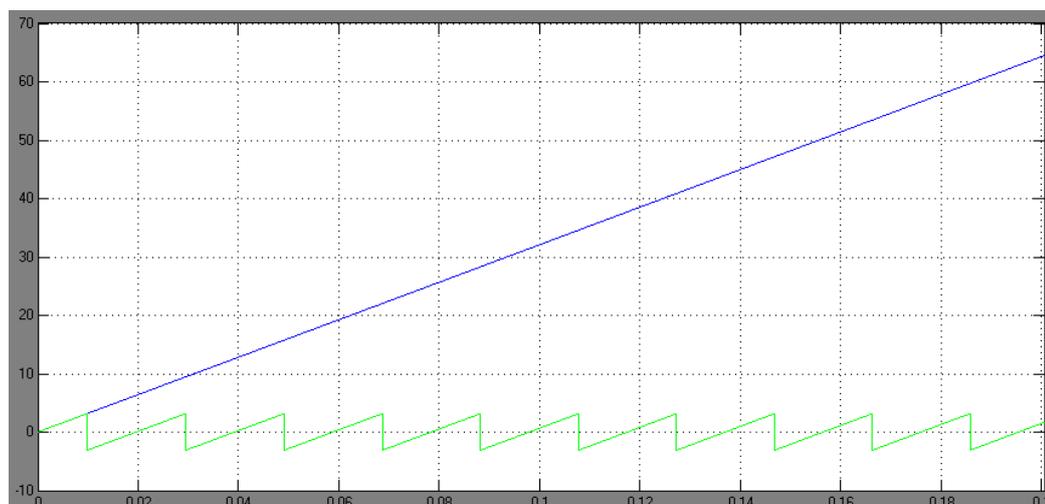


Figura 5-17. Angulo posición rotor.

Finalmente la recta resultante de la integración matemática de la velocidad angular del rotor con cierta pendiente, es convertida en un diente de sierra con igual pendiente y será utilizada como el ángulo de la posición del rotor, ver figura 5-17.

5.4.5 Angulo θ_{sl}

Este ángulo es utilizado para demodular las corrientes del rotor y es denominado ángulo de deslizamiento, se obtiene de la resta entre los ángulos del flujo del estator θ_s y la posición del rotor θ_r , obteniendo lo mostrado en la figura 5-18:

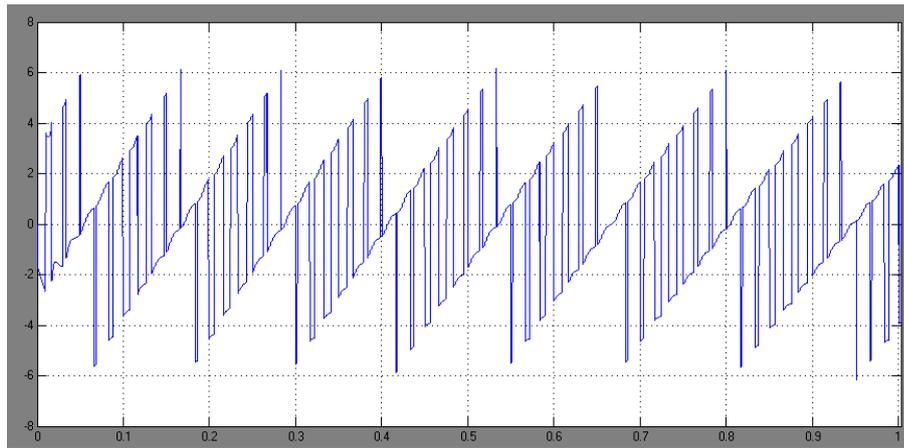


Figura 5-18. Comportamiento de θ_{sl} frente una rampa de velocidad.

En la figura 5-18 se observa que existen saltos de magnitud 2π , por lo tanto es necesario pulir la señal mediante una nueva función que se denominará “sumangulos”, el código se adjunta en el Anexo 2.

Luego las señales obtenidas antes y luego de la función “sumangulos” respectivamente son graficadas en la figura 5-19:

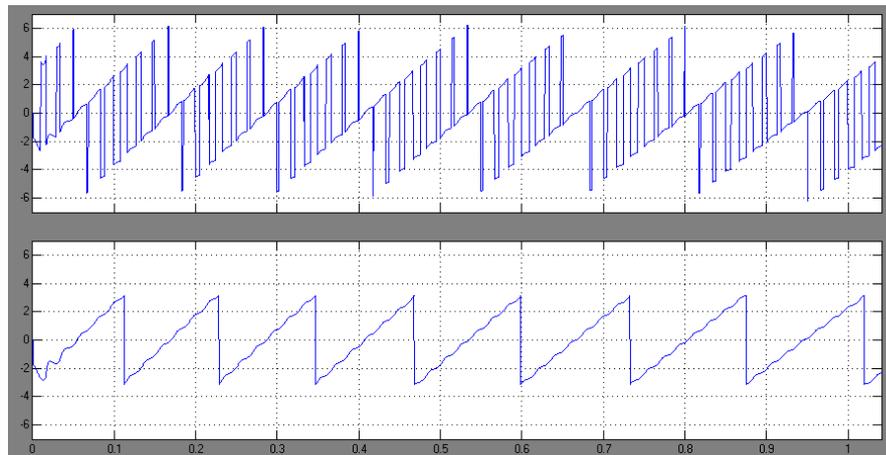


Figura 5-19. Comportamiento de θ_{sl} frente una rampa de velocidad.

Finalmente se grafica el ángulo en todo el rango de velocidad permitido:

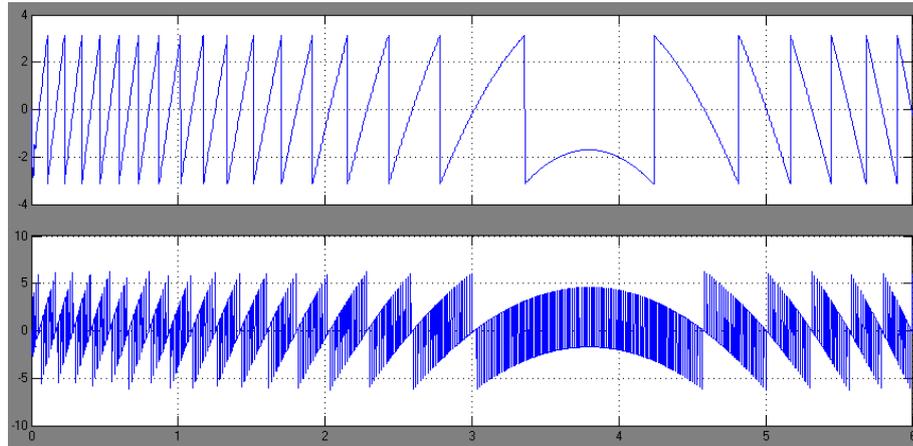


Figura 5-20. Comportamiento de θ_{sl} en todo el rango de velocidad.

Analizando el ángulo de deslizamiento en la figura 5-20 se observa que durante los primeros 3 segundos la máquina está operando en modo subsíncrono, con una pendiente positiva. Luego al alcanzar el sincronismo el ángulo tiende a ser una constante para finalmente tener una pendiente negativa en modo supersíncronico.

5.4.6 Voltaje trifásico del rotor

El voltaje trifásico del rotor es obtenido mediante un conversor PWM que controla el conversor del lado del rotor. La señal para el PWM es obtenida utilizando el bloque de la figura 5-21:

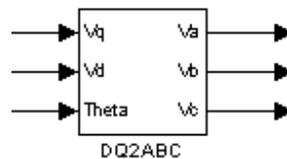


Figura 5-21. Conversion d-q \rightarrow abc.

Donde las señales de v_d y v_q provienen de la salida de los controladores de corriente y el ángulo para la demodulación corresponde al ángulo de deslizamiento θ_{sl} . Finalmente se obtienen los voltajes trifásicos del rotor:

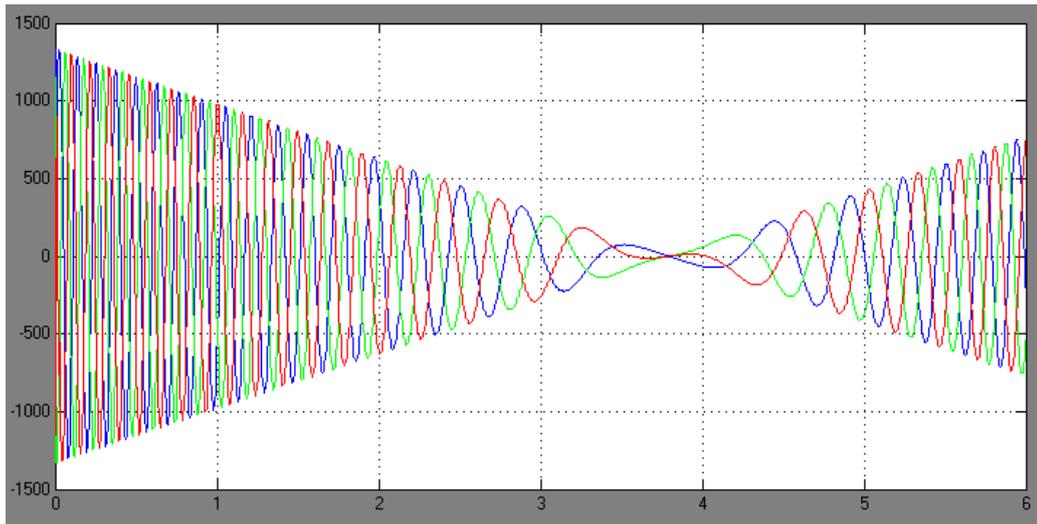


Figura 5-22. Voltaje del rotor frente a una rampa de velocidad.

Como se puede observar en la figura 5-22 la amplitud y la frecuencia de los voltajes trifásicos del rotor son proporcionales al deslizamiento, es decir, se comporta como la función:

$$v_a = sA \sin(s2\pi f_e t + \phi)$$

donde,

- s = Deslizamiento
- A = Amplitud voltaje de entrada
- f_e = Frecuencia eléctrica entrada
- ϕ = desfase

Capítulo 6

Evaluación Económica

6.1. Introducción

En los capítulos anteriores se ha realizado un análisis técnico de las diversas posibilidades para el accionamiento del molino y se ha optado por considerar solo tres de estos sistemas para un análisis económico. En el presente capítulo se realiza una comparación a nivel de costos de las tres opciones técnicamente viables para el accionamiento del molino de bolas.

El análisis contempla una comparación de los costos de inversión en los motores y otras características asociados a estos, se destacan: ingeniería, operación, repuestos, entre otros. Luego se realiza una comparación de costos de los equipos críticos del sistemas de cada propuesta: sistema de control, reductor en caso de ser necesario, transformadores, entre otros.

Intermedio a la comparación de costos de inversión se realiza una cuantificación de las pérdidas energéticas de los equipos y se determina un costo asociado a estas; valor que se utiliza para calcular el costo de operación de cada opción.

Existen otros tópicos relevantes además de los costos de inversión de equipos y los costos de operación del sistema que son discutidos en este capítulo y considerados para la evaluación económica: impuestos, lugar de descarga de los equipos, traslados, entre otros.

Finalmente se conjugan las comparaciones anteriores para realizar un flujo de caja de cada opción y así poder determinar cual es la mejor opción desde el punto de vista económico.

6.2. Motores

El equipo eléctrico más importante en el accionamiento del molino de bolas es el motor, siendo además el más costoso, por eso su elección es de suma importancia. Los costos de construir un motor son muy variables en el tiempo, es el caso de los de los precios del cobre o del acero, componente principales de los motores, que pueden llegar a fluctuar de manera importante según el comportamiento del mercado; por esta razón los precios que se asumen en esta evaluación económica son solo valores de referencia. Para la evaluación de los motores se realiza una comparación entre los motores más utilizados en el mercado actualmente y la solución que propone esta memoria. Por lo tanto las opciones a evaluar se enumeran en la tabla 6-1:

	Tipo de Motor	P [MW]	Polos	n _s [rpm]	Controlador
OPCIÓN 1	Motor sincrónico sin escobillas	7,4	20	360	Variador de Frecuencia
OPCIÓN 2	Motor de Inducción de jaula de ardilla	7,4	6	1200	Variador de Frecuencia
OPCIÓN 3	Motor de Inducción de rotor bobinado	7,4	6	1200	Accionamiento Scherbius

Tabla 6-1. Opciones para la evaluación económica.

A través de la memoria se ha discutido largamente el uso de uno o dos motores para el accionamiento del molino de bolas, llegando a la conclusión que es necesario utilizar dos motores por la gran potencia exigida. En la tabla 6-2 se expone los costos promedios de los motores de cada opción:

	Tipo de Motor	Costo [USD]	Costo Total [USD]	Reductor
OPCIÓN 1	Motor sincrónico sin escobillas	2.796.285	5.592.569	
OPCIÓN 2	Motor de Inducción de Jaula de Ardilla	2.254.965	4.509.930	X
OPCIÓN 3	Motor de Inducción de Rotor Bobinado	1.379.263	2.758.525	X

Tabla 6-2. Detalle de costos de motores.

Un análisis primario refleja el bajo costo del motor de inducción frente al motor sincrónico, la gran diferencia de costos se debe principalmente a la complejidad de la construcción de los motores sincrónicos con gran cantidad de polos comparados con los motores de inducción que son constructivamente simples y de pocos polos.

El análisis del costo de los motores muestra una fuerte tendencia a utilizar la opción 3, propuesta por esta memoria, por su bajo costo de inversión inicial; pero aún existen otros factores que no han sido analizados y pueden marcar diferencia, el paso siguiente es analizar el costo de operación.

6.2.1 Costos de operación

Los costos de operación asociados al molino pueden dividirse en: pérdidas de energía por efecto de eficiencia, repuestos de elementos sujetos a desgaste, lubricantes para el descanso del motor, entre otros. Las pérdidas por efecto de la eficiencia se observan en la tabla 6-3:

Componente	Eficiencia [%]
Motor	97
Accionamiento Eléctrico	96,5
Reductor	99
Corona dentada y piñones	98,5

Tabla 6-3. Eficiencia de los componentes del sistema

Considerando un motor con potencia nominal de 7400 [kW], las pérdidas asociadas a las eficiencias de los equipos quedan dadas por la tabla 6-4:

Equipo	Motor de Inducción 7,400 kW			Motor Sincrónico 7,400 kW		
	η [%]	Ptrans [kW]	Pérdidas [kW]	η [%]	Ptrans [kW]	Pérdidas [kW]
Motor	97	7.178	222	97	7.178	222
Accionamiento Eléctrico	96,5	6.927	251	96,5	6.927	251
Reductor	99	6.858	69	-	-	-
Corona dentada y Piñones	98,5	6.755	103	98,5	6.823	104
Transformador	99	6.687	68	99	6.755	68
Descansos	-	-	10	-	-	10
		TOTAL MOTOR	723		TOTAL MOTOR	655
		TOTAL MOLINO	1.446		TOTAL MOLINO	1.290

Tabla 6-4. Pérdidas del accionamiento del molino.

En la tabla 6-4 se observan las pérdidas asociadas a las eficiencias de los principales equipos de las opciones a evaluar, se realiza una separación entre el motor de inducción y el sincrónico para diferenciar el costo de utilizar el reductor de velocidad. Además se agrega las pérdidas correspondientes a los dos descansos del eje del motor. Para calcular el costo asociado a las pérdidas se asume un valor promedio de 65 [USD\$/MWh] y una operación de los motores en forma continua 24 horas al día, 7 días a la semana y 365 días al año, es decir:

$$C_{Operacion\ Anual} = P[MW] * CE \left[\frac{USD\$}{MWh} \right] * 365 * 24[h] = P * 65 * 365 * 24 [USD\$]$$

es decir,

Opción	Pérdidas [kW]	Costo Anual [USD\$]
Motor de Inducción	1.446	823.246
Motor Sincrónico	1.290	734.526

Tabla 6-5. Costos anuales asociados a las pérdidas.

La mayoría de los componentes no requiere mantenciones mayores pues se contempla que el sistema tenga una vida útil de al menos 16 años, por lo que los únicos repuestos sujetos a desgaste habitual son los carbones para la recuperación de energía desde el rotor del motor bobinado (opción 3). Este valor se supondrá en 12.000 dólares al año por motor. El costo del cambio de lubricante de los descansos se supondrá en 10.000 dólares anuales por molino, por lo tanto:

	Costos Pérdidas motores - Anual	
	Motor de Inducción [USD]	Motor Sincrónico [USD]
Motor	823.246	734.526
Aceite de Lubricación	10.000	10.000
Costos Carbones	24.000	-
Total Costo Anual	857.246	744.526

Tabla 6-6. Costos de operación anual por Molino.

6.2. Sistema mecánico

El sistema mecánico está compuesto por los engranajes necesarios para transmitir la potencia desde el eje del motor hasta el eje del molino de bolas, los equipos principales de cada sistema mecánico considerado en esta evaluación económica son enumerados en la tabla 6-7:

	Sistema Mecánico	
	Motor de Inducción	Motor Sincrónico
2 x Reductor	X	-
2 x Embriagues de aire	-	X
2 x Piñones	X	X
1 x Corona dentada	X	X
1 x <i>Inching drive</i>	X	X
TOTAL [USD]	1.251.500	1.000.000

Tabla 6-7. Costo sistema mecánico.

El costo total asociado al sistema mecánico del motor sincrónico fue ecualizado con respecto a los motores de inducción, bajo el supuesto de que un reductor de velocidad supera en costo a un embriague de aire.

6.3. Análisis a largo plazo

Para realizar la evaluación a largo plazo primero se calculan los costos de inversión, tabla 6-8:

	OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3
Motores	5.592.569	4.509.930	2.758.525
Sistema Mecánico	1.000.000	1.251.500	1.251.500
TOTAL [USD]	6.592.569	5.761.430	4.010.025

Tabla 6-8. Costo inversión total.

En el análisis de largo plazo se considera una vida útil de 16 años con una tasa de descuento de 8%, por lo tanto para el cálculo del VPN de los costos operacionales se obtiene:

$$S_n = \frac{1}{i} \left[\frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n} \right] = \frac{1}{0,08} \left[\frac{(1+0,08)^{16} - 1}{(1+0,08)^{16}} \right] = 8,8514$$

Finalmente el valor presente neto a 16 años se observa en la tabla 6-9:

	OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3
Costo de Inversión	6.592.569	5.761.430	4.010.025
Costo operacional anual	744.526	857.246	857.246
Costos de operación (VPN)	6.590.097	7.587.827	7.587.827
TOTAL [USD]	13.182.666	13.349.257	11.597.852

Tabla 6-9. Costo total del accionamiento del molino.

Típicamente en los circuitos de molienda son utilizados 2 molinos de bolas, con un total de 4 motores en operación, normalmente se compra un motor de repuesto en caso de falla, aumenta más aun la diferencias de costos entre la opción 3, y las opciones 1 y 2 que utilizan motores más caros.

6.4. Análisis energético

El accionamiento del molino contempla el uso de un doble convertor PWM encargado del control del motor, los convertidores inyectan o recuperan energía proporcionalmente a la velocidad de operación escogida. Por lo tanto la variación de la velocidad repercute en variaciones del consumo energético mediante la relación $P_r = sP_s$, ver tabla 6-10:

Molino 14.800 [kW]	
% Vel. nominal	P [kW]
85	-2.220
110	1.480

Tabla 6-10. Potencia según el deslizamiento

Sin duda el encargado final de la cantidad energía utilizada por el molino es el operador de la máquina, ya que dependiendo de la dureza del material y/o la producción que exija la planta la velocidad del molino variará. Con los actuales precios del cobre es normal pensar que el motor esté constantemente en su máximo, 110% de su velocidad nominal, para lograr la mayor producción posible.

En la Tabla 6-10 se observa que la mayor recuperación de energía es trabajando con el motor operando por debajo de la velocidad de sincronismo con un deslizamiento de 15%, de los análisis anteriores nace por lo tanto un nuevo caso para su análisis, denominado caso II, que consiste en motores que estén trabajando la mayor parte del tiempo a un 85% de su velocidad nominal, a modo de recuperar la mayor cantidad de energía posible, pero capaces de generar la misma potencia a un 85% de su velocidad que el primer caso con velocidad nominal, es decir:

$$\frac{14.800}{0,85} [kW] = 17.400 [kW]$$

El cálculo anterior implica el uso de dos motores de 8700 kW, pero no existen motores confiables de tales dimensiones en el mercado. Por lo tanto se opta por la utilización de motores de 8.500 kW, es decir, la potencia nominal del molino para el caso II es 17.000 kW.

Los nuevos flujos energéticos a través del rotor correspondiente a los deslizamientos mínimos y máximos se observan en la tabla 6-11:

	Molino 14.800 [kW]	Molino 17.000 [kW]
% Vel. Nominal	P [kW]	P [kW]
85	-2.220	-2.550
110	1.480	1.700

Tabla 6-11. Potencia casos I y II.

No es considerado el flujo energético a velocidad de sincronismo, deslizamiento 0, ya que el intercambio energético con la red a través del rotor es despreciable.

Para el análisis del caso I y II, se contempla una operación de los motores en forma continua 24 horas al día y 365 días al año. Durante un año típico el motor puede trabajar en todo su rango de velocidades, es decir, 85-110% de la velocidad nominal, pero su caracterización se hace compleja, por simplificación se asume que el motor solo tiene 3 velocidades 85%, 100%, 110%, asignándole un porcentaje del tiempo total de operación anual a cada velocidad, ver tabla 6-12:

P _n Molino	E [kWh]	Caso	85%		100%		110%		CONSUMO [kWh]
			t [%]	R [kWh]	t [%]	R [kWh]	t [%]	R [kWh]	
14.800	129.648.000	a	25	-4.861.800	50	-	25	3.241.200	128.027.400
		b	0	0	0	-	100	12.964.800	142.612.800
17.000	148.920.000	c	75	-16.753.500	0	-	25	3.723.000	135.889.500
		d	75	-16.753.500	25	-	0	0	132.166.500

Tabla 6-12. Consumo energético anual.

donde,

E [kWh]: consumo energético anual a velocidad sincrónica

R [kWh]: energía consumida o recuperada a través del rotor

En la tabla 6-12 se observa una comparación del consumo eléctrico sobre cuatro casos, el primero caso hace referencia a la utilización ideal del molino, es decir, variando la velocidad del molino según la dureza del material. El caso b es el peor de los casos pero el más típico de la minería, que es utilizar el motor a su máxima capacidad para lograr la mayor producción posible. Los últimos dos casos contempla el uso de dos motores de 8,5 MW, los de mayor capacidad del mercado sin perder confiabilidad, la mayor ventaja de

estos casos es que como trabajan a un 85% de la velocidad nominal puede utilizar todo el rango de velocidad para aumentar la producción en caso de ser necesario. Analizando el caso b, se puede determinar como una mala operación del molino hace aumentar ostensiblemente el consumo de los motores.

Por lo tanto en la tabla 6-13 se expresa el costo asociado al consumo energético anual de cada caso y el valor presente neto a 16 años con una tasa de descuento de 8%:

P _n Molino	Caso	CONSUMO ANUAL [kWh]	COSTO ANUAL [USD]	VPN [USD]
14.800	a	128.027.400	8.321.781	73.659.412
	b	142.612.800	9.269.832	82.050.991
17.000	c	135.889.500	8.832.818	78.182.801
	d	132.166.500	8.590.823	76.040.806

Tabla 6-13. Costo del consumo energético anual.

Capítulo 7

Conclusiones

El trabajo analiza las principales configuraciones para el accionamiento de un molino de bolas, actualmente el uso del método *Quadramatic*TM es uno de los más confiables y utilizados en la industria dejando un tanto rezagado el uso de motores asincrónicos. El análisis determinó que la utilización de motores de inducción de rotor bobinado es un método factible para el accionamiento pero es necesario agregarle la característica de velocidad variable para mejorar su eficiencia y ser una real alternativa a los métodos convencionales.

A través de los años el continuo desarrollo de diversos métodos para el control de motores de inducción, como el accionamiento Scherbius escogido por esta memoria para el accionamiento del motor, sumado a la creación de nuevas tecnologías de semiconductores han aportado indudablemente a mejorar la eficiencia del motor. El estudio del control de motores definitivamente no ha llegado a su límite y es imperativo que se siga avanzando en este tema, no solo por que se puede mejorar la eficiencia de los actuales motores, si no que quizás podría llevar al descubrimiento de nuevos métodos para la conversión electromecánica de la energía.

El software MATLAB es quizás un programa complejo en su utilización y extremadamente sensible pero finalmente es capaz de correr un modelo del motor de inducción y su control, pudiendo extrapolarse a cualquier otro motor. El análisis de la dinámica del motor se vuelve tan profundo, que entrega las herramientas para una posible implementación experimental del sistema modelado, capaz de generar las señales y el sistema de control necesario para el control del motor, claro está que es necesario comprar el motor y los semiconductores respectivos.

El sistema de control de flujo orientado es un método probado a nivel experimental con excelentes resultados, asegurando la confiabilidad del control del motor en todo el rango de velocidad definido por esta memoria. El control de la velocidad del motor no solo aporta al uso eficiente de la energía si no que además permite menos desgaste de las partes mecánicas del accionamiento, menos mantención y se evita la pérdida de eficiencia del sistema mecánico con el pasar de los años.

Hoy en día la industria minera está pasando uno de sus mejores momentos, específicamente la del cobre con un altísimo valor por libra, lo que repercute en la decisión de hacer producir al máximo la planta minera para obtener las mayores utilidades posibles. La exigencia de una mayor producción implica utilizar los motores a su máxima capacidad, es decir, desgaste en la transmisión mecánica y nula utilización de la característica de velocidad variable, convirtiendo el accionamiento del molino en un sistema ineficiente.

Sin duda el motor de inducción de rotor bobinado representa la mejor alternativa en lo que a costos de inversión se refiere; además si se le agrega la característica de velocidad variable, los costos de operación logran ser competitivos con los otros métodos de accionamientos que utilizan engranajes. En cambio, el sistema *gearless* al no tener un sistema de transmisión mecánico, incurre en bajas pérdidas y de esta manera es un menor costo de operación.

Un caso de interés analizado por esta memoria es utilizar un molino de mayor potencia al diseñado inicialmente por el equipo metalúrgico. El nuevo molino debe ser capaz de entregar la misma potencia del primer caso a velocidad nominal pero a un 85% de su velocidad. De los resultados obtenidos en el capítulo 6 es fácil concluir que la mala utilización del sistema con velocidad variable, motores a máxima capacidad, repercute en pérdidas energéticas importantes. Tanto así que el molino mal operado tiene mayores pérdidas energéticas, que un molino de mayor potencia nominal bien operado. Por lo tanto no solo es necesario implementar un sistema con una alta eficiencia, si no que además capacitar a los operadores de la planta minera ya que ellos son finalmente quienes imponen la velocidad del motor y con esto la eficiencia del sistema.

Además la tendencia es utilizar cada vez motores de mayor capacidad debido principalmente a la gran producción de las plantas mineras, aunque esto en el futuro podría alcanzar su límite cuando los precios del cobre se estabilicen y empiecen a bajar, ya sea por una disminución de la demanda o el ingreso de un producto suplementario al mercado, y es aquí cuando realmente se va a apreciar que los gastos de operación de los motores es significativo con respecto al precio final del producto.

En el caso que no se estabilice el crecimiento sostenido en la potencia nominal de los molinos de bolas, los motores alcanzarán un límite en la transmisión mecánica del eje, no pudiendo suplir las potencias exigidas. Por lo tanto la única solución para tales exigencias es el uso del sistema *gearless* con un alto costo de inversión inicial pero con ventajas comparativas al no utilizar un sistema de transmisión mecánico.

El sistema de accionamiento mediante motores de inducción de rotor bobinado es una excelente opción para aplicaciones de gran producción ya que su bajo costo de inversión inicial permite comprar motores de mayor tamaño frente a otras alternativas. Además si se agrega la característica de velocidad variable se obtiene un sistema con eficiencias similares a los métodos actuales.

La recomendación por lo tanto es utilizar el motor de mayor tamaño trabajando por debajo de la velocidad nominal, es decir, en modo subsíncrono permitiendo una mayor tasa de recuperación de energía, evitando stress mecánico y alargando la vida útil de la máquina. Además el rango para aumentar la velocidad se amplía a un 25% en caso de necesitar una mayor producción. En contraposición de utilizar un motor con menor potencia y siendo operado a su máxima capacidad sin la posibilidad de aumentar la producción.

Esta memoria más allá de aportar conocimiento en el accionamiento de un molino de bolas, y mostrar a través de un modelo creado en MATLAB la dinámica de las variables de la máquina en todo su rango de velocidad, no puede determinar fehacientemente cual será el consumo total del sistema, ni menos determinar cual de los diversos accionamientos existentes es el más eficiente. Para poder realizar un estudio de estas características es necesaria la ayuda de varias mineras dispuestas a entregar mediciones en terreno de sus sistemas de accionamiento, es decir, el consumo energético de los motores principales, bombas de lubricaciones y todo aquel sistema que participe en la operación del molino y consuma energía eléctrica. Determinando así de forma experimental qué sistema utiliza menor energía; las mediciones debiesen ser en un periodo de tiempo extendido, al menos un año.

Además este estudio podría entrelazar variables como: energía consumida, producción, valor del cobre, potencia nominal del molino, velocidad de los motores, dureza y tipo de material, entre otros. Analizando la influencia de una variable sobre otra, determinando cual es la de mayor influencia al momento de la elección de la velocidad de rotación del molino.

Capítulo 8

Referencias

- [1] Leonhard W. “Control of Electric Drives”, Springer, 2001.
- [2] Bose B. “Modern Power Electronics and Ac Drives”, Prentice Hall, 2002.
- [3] Bose B. “Power Electronics and Motor Drives”, Elsevier, 2006.
- [4] Mohan N. “Power Electronics”, John Wiley & Sons, 1995.
- [5] Mohan N. “Electric Drives”, MNPERE, 2001.
- [6] EL57A, Sistemas Eléctricos de Potencia. Universidad de Chile, Rodrigo Palma
- [7] Reyes M. Eduardo, “Control de generador de inducción de doble excitación vía convertidor directo de dos etapas”. Tesis de Titulación presentada en conformidad a los requisitos para obtener el Título de Ingeniero Civil en Electricidad, Universidad de Magallanes, 2007.
- [8] Monteiro Z. Johanna, “Modelación dinámica de parques eólicos para una integración masiva en el SIC”. Memoria para optar título Ingeniero Civil Electricista, Universidad de Chile, 2008.
- [9] Agaki H.; Sato H., “Control and Performance of a Double-Fed Induction Machine Intended for Flywheel Energy Storage System”, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 17, No. 1, 109-116, Jan 2002.
- [10] Anca D. Hansen, Clemens Jauch, Poul Sørensen, Florin Iov, Frede Blaabjerg “Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DIGSILENT”, Roskilde, Diciembre 2003.
- [11] Hirofumi Akagi, “The State-of-the-Art of Power Electronics in Japan.” IEEE transactions on power electronics, vol. 13, no. 2, pp.345-356 1998.
- [12] Peña G. Rubén, “Vector control strategies for a doubly-fed induction generator driven by a wind turbine”. Ph.D., Thesis University of Nottingham, March 1996.
- [13] Teske N., “Space vector modulation: Description”. University of Nottingham, GB, PEMC Group, November 2000.

- [14] Romo J, Morales N, Valdenegro A, Palma R, Máquinas Eléctricas, Publicación C/5, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, 1996.
- [15] Muroya M., Shinohara K, Iimori K, Sako H., “Four step-commutation strategy of PWM rectifier of Converter without DC link Components for Induction Motor Drive”. Proc. of IEMDC 2001, pp 770-772. 2001.
- [16] Kiameh P. “Power generation handbook: selection, applications, operation, and maintenance”, McGraw-Hill, 2002
- [17] Cardenas R. “Hand-written lecture notes about Doubly-fed Induction machine”, Apuntes de clases del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Santiago de Chile, Chile. En el sitio web: <https://sites.google.com/a/usach.cl/rcd/>
- [18] Cardenas R. “Modelo de la Máquina de Inducción Jaula de Ardilla en Coordenadas α - β ”, Apuntes de clases del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Santiago de Chile, Chile.

Anexo 1

Código MATLAB del motor de inducción

- Función para modelar el motor de inducción de rotor bobinado:

```
function [Im] = mirb(Viz) %Mirb= máquina de inducc. rotor bobinado

global Isa0 Isb0 Ira0 Irb0; % valores de los estados en la iteración
anterior
global Ts; %Tiempo entre iteraciones
global B ID ; %Matriz B, ID.
global L0 Ls Lr Sig Rr Rs;

Va=Viz(1);
Vb=Viz(2);
Vc=Viz(3);
Vra=Viz(4);
Vrb=Viz(5);
Vrc=Viz(6);
wr=Viz(7);

% Matriz A dependiente de wr
A(1,1)=-Rs/(Sig*Ls);
A(1,2)=wr*(L0*L0)/(Sig*Ls*Lr);
A(1,3)=Rr*L0/(Sig*Lr*Ls);
A(1,4)=L0*wr/(Sig*Ls);

A(2,1)=-L0^2*wr/(Sig*Lr*Ls);
A(2,2)=-Rs/(Sig*Ls);
A(2,3)=-wr*L0/(Sig*Ls);
A(2,4)=Rr*L0/(Sig*Lr*Ls);

A(3,1)=Rs*L0/(Sig*Lr*Ls);
A(3,2)=-wr*L0/(Sig*Lr);
A(3,3)=-Rr/(Sig*Lr);
A(3,4)=-wr/(Sig);

A(4,1)=wr*L0/(Sig*Lr);
A(4,2)=Rs*L0/(Sig*Lr*Ls);
A(4,3)=wr/(Sig);
A(4,4)=-Rr/(Sig*Lr);
% Fin Matriz A

Val=1.5*Va; %Valfa Estator
Vbet=0.8666*(Vb-Vc); %Vbeta Estator
Vra1=1.5*Vra; %Valfa Rotor
Vrb1=0.8666*(Vrb-Vrc); %Vbeta Rotor
```

```

Ik_1=(ID+A*Ts)*[Isa0 Isb0 Ira0 Irb0]'+B*Ts*[Val Vbet Vra1 Vrb1]';%
Valores de la iteración en k
% ' es el símbolo que indica matriz o vector transpuesto
Isa0=Ik_1(1); % Se almacenan los valores de k+1 para la próxima iteración
Isb0=Ik_1(2);
Ira0=Ik_1(3);
Irb0=Ik_1(4);
Im=Ik_1;
return

```

- Archivo que define las condiciones iniciales

```

% Valores iniciales
% Initial_mirb.m
%clear
global Ts;
global Rs Rr L0 Ls Lr Sig;
global Isa0 Isb0 Ira0 Irb0;
global B ID;
global contadorK vtempo;

contadorK=0;
vtempo=0;

Kp=361;
Ki=16;
Imaximo=20;
Vmaximo=1200;
Ts=50e-6; % sampling time
Ts_Power=Ts;
Ts_Control=50e-6;
%
% Set Up Low Pass Filter for the measurements
%
Rs=1.7;Rr=1.36;Ls=0.4186;
Lr=0.4186;L0=0.403;Sig=1-L0^2/(Ls*Lr);
Isa0=0;Isb0=0;
Ira0=0;Irb0=0;
ID=eye(4); %Matriz Identidad de 4x4
%
% Valores de la matriz de estado

B(1,1)=1/(Sig*Ls);
B(1,2)=0;
B(2,1)=0;
B(2,2)=B(1,1);
B(3,1)=-L0/(Sig*Lr*Ls);
B(3,2)=0;
B(4,1)=0;
B(4,2)=B(3,1);

B(1,3)=B(3,1);
B(1,4)=0;

```

```
B(2,3)=0;  
B(2,4)=B(3,1);  
B(3,3)=1/(Sig*Lr);  
B(3,4)=0;  
B(4,3)=0;  
B(4,4)=B(3,3);
```

```
OK = 'OK'
```

Anexo 2

Código MATLAB – Otras funciones

- Función que convierte de coordenadas α - $\beta \rightarrow$ d-q

```
function [Idq] = AB2DQ(Iab)
    Ialfa=Iab(1);
    Ibeta=Iab(2);
    Theta=Iab(3);
    Id=Ialfa*cos(Theta)+Ibeta*sin(Theta);
    Iq=-Ialfa*sin(Theta)+Ibeta*cos(Theta);
    Idq=[Iq Id];
```

```
return
```

- Función que convierte de coordenadas a-b-c \rightarrow d-q

```
function [Ialfabeta] = ABC2AB(Iab)
    Iaa=Iab(1);
    Ibb=Iab(2);
    Icc=Iab(3);
    Ialfita=3*Iaa/2;
    Ibetita=sqrt(3)*(Ibb-Icc)/2;
    Ialfabeta=[Ialfita Ibetita];
```

```
return
```

- Función que convierte de coordenadas d-q \rightarrow a-b-c

```
function [Vabc] = DQ2ABC(Vdq)
    Vq=Vdq(1);
    Vd=Vdq(2);
    Theta=Vdq(3);
    Valfa=Vd*cos(Theta)-Vq*sin(Theta);
    Vbeta=Vd*sin(Theta)+Vq*cos(Theta);
    Va=(2/3)*Valfa;
    Vb=(-1/3)*Valfa+(1/sqrt(3))*Vbeta;
    Vc=(-1/3)*Valfa-(1/sqrt(3))*Vbeta;
    Vabc=[Va Vb Vc]';
```

```
return
```

- Función para arreglar el ángulo de deslizamiento

```
function [ThethitaSL] = sumangulo(asdf)
    ThetaE2=asdf(1);
    ThetaR2=asdf(2);
```

```
if(ThetaE2-ThetaR2 > pi)
    ThethitaSL=ThetaE2-ThetaR2-2*pi;
else if(ThetaE2-ThetaR2 < -pi)
    ThethitaSL=ThetaE2-ThetaR2+2*pi;
else
    ThethitaSL=ThetaE2-ThetaR2;
end;
end;

return
```