



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DE TOPOLOGÍAS DE ACCIONAMIENTO DE
VELOCIDAD VARIABLE EN MOLINOS DE MOLIENDA CONVENCIONAL CODELCO,
DIVISIÓN CHUQUICAMATA**

POR

Gonzalo Ignacio Oyanadel Morgado

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Electrónico

Profesor Guía
José Rubén Espinoza Castro

Profesional Supervisor Externo
Erick Larenas García

Enero 2025
Concepción (Chile)

©2025 Gonzalo Ignacio Oyanadel Morgado

©2025 Gonzalo Ignacio Oyanadel Morgado

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Agradecimientos

La presente memoria de título va dedicada, en primer lugar, a Dios, quien ha sido mi guía en cada paso y me ha dado la fortaleza para perseverar en el camino hacia esta meta que, con su propósito, me ha permitido alcanzar.

A mis padres, les agradezco por su apoyo incondicional, sacrificio y amor constante a lo largo de todos estos años. Gracias por cada palabra de aliento, por estar siempre dispuestos a levantarme en los momentos más difíciles y por hacerme sentir que nunca estaba solo en este camino. Agradezco cada llamada y ayuda que me brindaron, y ahora, es momento de disfrutar el tiempo que perdimos.

A mis hermanas, por estar a mi lado en los momentos buenos y malos durante esta etapa universitaria; sin ustedes, nada de esto hubiera sido lo mismo. A mis abuelos, agradezco profundamente su amor, su cariño y el apoyo constante que me brindaron. Estoy profundamente agradecido por todo lo que hicieron por mí en esta etapa, recordándome siempre que debía perseverar y luchar hasta el final.

A Camila agradezco por su inmenso amor que me ha demostrado durante todo este tiempo, por su paciencia y el apoyo en cada etapa de mis estudios. Te agradezco infinitamente por creer y confiar en mí cada día, y por ser una guía en mi acercamiento a Dios.

A mis amigos por su apoyo constante, las salidas y las risas compartidas, les agradezco a cada uno por ser mi segunda familia.

Además, quiero expresar mi agradecimiento al profesor guía José Espinoza por el apoyo constante durante en mi etapa universitaria y por la motivación en mi formación académica y profesional. Se agradece el apoyo por parte del proyecto ANID / FONDAP / SERC / 1523A0006. Finalmente, agradecer a don Eric Larenas, Ingeniero Civil Eléctrico supervisor en la planta concentradora de Codelco Chuquicamata, quien me guio día a día durante estos meses en el desarrollo de mi memoria de título en dicha planta.

Sumario

Este documento estudia la implementación de un sistema de variación de velocidad en la molienda convencional A0 de la división Chuquicamata de Codelco, analizando su influencia en la eficiencia operativa y los costos asociados en la minería. Se examinan diferentes topologías de accionamiento, destacando su capacidad para mejorar el control de la velocidad. El estudio identifica que la efectividad de la topología seleccionada está condicionada por factores como los límites de velocidad operacionales y la adecuada lubricación hidrodinámica. Además, se reconoce la importancia de un control eficiente del torque durante el arranque para minimizar el impacto en el sistema. Finalmente, a través de un análisis de costo/beneficio en distintos escenarios de modernización propuestos por la empresa, se concluye que la opción de mejorar el rendimiento en un 3% es la más ventajosa, con un retorno de inversión relativamente rápido. Sin embargo, se subraya la necesidad de cautela al interpretar estas estimaciones, ya que las mejoras a corto plazo son inciertas.

Summary

This document studies the implementation of a speed variation system in the conventional A0 milling process of the Chuquicamata division of Codelco, analyzing its influence on operational efficiency and associated costs in mining. Different drive topologies are examined, highlighting their ability to improve speed control. The study identifies that the effectiveness of the selected topology is conditioned by factors such as operational speed limits and adequate hydrodynamic lubrication. Furthermore, the importance of efficient torque control during startup is recognized to minimize negative impacts on the system. Finally, through a cost/benefit analysis in various modernization scenarios proposed by the company, it is concluded that the option to improve performance by 3% is the most advantageous, with a relatively quick return on investment. However, the need for caution in interpreting these estimates is emphasized, as short-term improvements are uncertain.

Tabla de contenidos

Abreviaciones	xiii
Introducción.....	1
1.1. Introducción General.....	1
1.2. Trabajos Previos.....	1
1.3. Hipótesis de Trabajo.....	1
1.4. Objetivos	1
1.4.1 Objetivo General	1
1.4.2 Objetivos Específicos	2
1.5. Alcances y Limitaciones	2
2. Descripción del Proceso y Situación Actual	4
2.1. Introducción General y Descripción de la División	4
2.1.1 Caracterización del Proceso	4
2.1.2 Equipos Objetivos	5
2.1.3 Clasificación de Molinos y Descripción del Proceso de Molienda.....	5
2.1.4 Descripción del Problema	6
2.2. Levantamiento de la Situación Actual	7
2.2.1 Requerimientos del accionamiento	8
3. Motor Sincrónico.....	9
3.1. Introducción	9
3.1.1 Principio de Funcionamiento	9
3.1.2 Métodos de arranque	10
3.1.3 Modelo Dinámico del Motor.....	11
3.1.4 Circuito Equivalente en ejes dq0.....	12
3.1.5 Parámetros del Motor	13

3.1.6	Gráfico de corriente de partida del motor	15
3.1.7	Circuito de Sincronización de campo.....	16
4.	Selección de Alternativas	17
4.1.1	Inversor Fuente de Corriente (CSI).....	18
4.1.2	Inversor de Conmutación por Carga (LCI)	19
4.1.3	Cicloconvertidor.....	20
4.1.4	Inversor Fuente de Voltaje (VSI)	20
4.1.5	Inversor Multinivel.....	22
4.1.6	Técnica de Modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM)	24
4.1.7	Topología seleccionada: VSI Multinivel.....	25
4.2.	Propuestas en el mercado	25
4.2.1	Regeneración de energía	28
5.	Variación de Velocidad	30
5.1.	Estrategias de Control de velocidad	30
5.1.1	Control Escalar	30
5.1.2	Control Voltaje-Frecuencia (V/f)	30
5.2.	Función moduladora.....	31
6.	Simulaciones	34
6.1.	Conexión de motor con Moduladoras variables.....	34
6.1.1	Resultados y Comparación desempeño actual vs modelo propuesto	37
6.2.	Simulación Inversor Multinivel	40
6.2.1	Gráficos del Inversor	43
6.3.	Variación de Velocidad de partida	45
6.3.1	Comparación de Corrientes de Partida.....	46
6.3.2	Escenarios de Velocidad y Resultados en Lazo Abierto	49
7.	Análisis Económico.....	50

7.1. Pérdidas y vulnerabilidades Molienda A0	50
7.1.1 Propuesta de Modernización Accionamiento de molinos A0- empresa	51
7.2. Costo/Beneficio	53
7.2.1 Modernización Accionamiento de molinos A0 (Caso conservador)	53
7.2.2 Modernización Accionamiento de molinos A0 (Caso favorable).....	54
7.2.3 Modernización Accionamiento de molinos A0 (Caso con mejora del 3%).....	55
8. Conclusiones	57
8.1. Sumario	57
8.2. Conclusión.....	57
8.3. Recomendaciones.....	58
8.4. Trabajos Futuros.....	59
Referencias	60
Anexo A. Diagrama unilineal Concentradora A-0 y A-1	A.1
Anexo B. Datos de placa motor	B.1
Anexo C. Parámetros p.u y Rectificador trifásico	C.1
Anexo D. Código variación de velocidad en lazo abierto	D.1
Anexo E. Variación de velocidad en lazo cerrado.....	E.1
Anexo F. Modelo Torque de carga	F.1

Lista de tablas

Tabla 4.1: Posibles configuraciones de molinos eléctricos piñón simple [17]	18
Tabla 4.2 Posibles configuraciones de molinos eléctricos piñón doble [18].....	18
Tabla 4.3: Ventajas y Desventajas del Inversor Fuente de Corriente	18
Tabla 4.4: Ventajas y Desventajas del Inversor de Conmutación por Carga	19
Tabla 4.5: Ventajas y Desventajas de los Cicloconvertidores	20
Tabla 4.6 Ventajas y Desventajas del Inversor Fuente de Voltaje	21
Tabla 4.7: Patrón de conmutación de siete niveles con fuente de voltaje igual	23
Tabla 4.8: Ventajas y Desventajas Inversor Multinivel	24
Tabla 6.1: Comparación de Valores en terreno VS Valores de Simulación (s.s)	38
Tabla 6.2: Comparación de valores en terreno vs valores de simulación en la partida	38
Tabla 6.3: Tabla de Ganancias, Velocidades y Razón Inversa (1/G)	49
Tabla 7.1: Características VDF SINAMICS GH180	52
Tabla 7.2: Características Motor de inducción	52
Tabla 7.3: Beneficios-Caso Conservador	53
Tabla 7.4: Costos del molino-Caso Conservador	53
Tabla 7.5: Beneficios-Caso Favorable.....	54
Tabla 7.6: Costos del molino-Caso Favorable	54
Tabla 7.7: Beneficios-Caso con aumento del 3% en rendimiento	55
Tabla 7.8: Costos del molino-Caso con aumento del 3% en rendimiento	55

Lista de figuras

Figura 2.1: Ubicación mina Chuquicamata	4
Figura 2.2: Planta Concentradora A0	5
Figura 2.3: Descripción General Concentradora	6
Figura 2.4: Eficiencia y tiempo de Servicio Molienda	7
Figura 3.1: Principio de funcionamiento motor síncrono	9
Figura 3.2: Devanado amortiguador colocado en los polos [34]	11
Figura 3.3: Máquina Sincrónica con 3 devanados estatóricos	11
Figura 3.4: Circuito equivalente de la maquina sincrónica en ejes dq0	12
Figura 3.5: Motor de Polos Salientes-Simulación	15
Figura 3.6: Gráfico de Corriente de partida motor de 800hp molino de barras	15
Figura 3.7: Circuito de Aplicación de Campo	16
Figura 4.1: Clasificación de accionamientos	17
Figura 4.2: Topología Inversor Fuente de Corriente	19
Figura 4.3: Topología Inversor Conmutado por Carga	19
Figura 4.4: Topología Cicloconvertidor	20
Figura 4.5: Inversor Fuente de Voltaje	21
Figura 4.6: Inversor multinivel en serie	22
Figura 4.7: Diagrama circuito inversor de siete niveles	23
Figura 4.8: Salida de voltaje inversor de siete niveles	24
Figura 4.9 Señales de ondas moduladoras y portadoras	25
Figura 4.10: Inversor multinivel Siemens	27
Figura 4.11: Celda interna del inversor multinivel	27
Figura 4.12: Secciones principales de cada celda	28
Figura 4.13: Cuadrantes de operación del motor	28

Figura 5.1: Mod_variable1	32
Figura 5.2: Mod_variable2	32
Figura 5.3: Mod_variable3	32
Figura 5.4: Moduladoras variables en amplitud y frecuencia desfasadas en 120°	33
Figura 6.1: Circuito de comportamiento actual	34
Figura 6.2: Corriente RMS de Partida Simulación	35
Figura 6.3: Moduladoras comportamiento actual	35
Figura 6.4: Voltajes de fases y corrientes de línea	36
Figura 6.5: Variables del motor simulación actual	37
Figura 6.6: Valores nominales simulación	37
Figura 6.7: Corrientes de partida motor 800hp	39
Figura 6.8: Corrientes de partida simulación motor 800hp	39
Figura 6.9: Conmutador PWM celda 1, celda 2 y celda 3	40
Figura 6.10: Conmutación celda 1, celda 2, celda 3, celda 4	41
Figura 6.11: Celdas inversor multinivel	41
Figura 6.12: Inversor multinivel y motor	42
Figura 6.13: Corriente y Voltaje de salida	43
Figura 6.14: Gráfico de las variables del motor con inversor multinivel (valores rms)	44
Figura 6.15: Armónicos de Voltaje y Corriente	44
Figura 6.16: Variación de velocidad con $G=3$	45
Figura 6.17: Variables del motor con $G=3$	46
Figura 6.18: Corriente de partida sin variación de velocidad (Partida simulada actual)	48
Figura 6.19: Corriente de partida con variación de velocidad (Partida simulada con $G=3$)	48
Figura 6.20: Diferentes valores de velocidad con $1/G$	49
Figura 7.1: Pérdidas promedio por día en motores de 800hp (2021-2022)	50
Figura 7.2: Aumento en costos de reparación de motores de 800hp.	50

Figura 7.3: Daños en motor	51
----------------------------------	----

Abreviaciones

Mayúsculas

DC	: Direct Current
AC	: Alternating Current
CSI	: Current Source Inverter
VSI	: Voltage Source Inverter
SPWM	: Sinusoidal Pulse Width Modulation
PWM	: Pulse Width Modulation
RMS	: Root Mean Squared
VDF	: Variable Frequency Drive
L.A.	: Lazo abierto.
L.C.	: Lazo Cerrado
F. de T.	: función de transferencia.
E.S.	: entrada/salida.
S.S.	: estado estacionario.
P.I.	: controlador proporcional integral.
P.I.D.	: controlador proporcional integral derivativo.

Minúsculas

c.i.	: condiciones iniciales.
c.c.	: corriente continua (en Inglés es d.c.).
c.a.	: corriente alterna (en Inglés es a.c.).
s.s	: estado estacionario (en Inglés es steady state)

Otras

BM _s	: Molino de Bolas
RM _s	: Molino de Barras
Sec	: Sección
I _f	: Corriente de campo
v _f	: Voltaje de campo

1. Introducción

1.1. Introducción General

Este estudio pretende evaluar y seleccionar diferentes topologías para el control de velocidad de molinos convencionales en el proceso de la Planta Concentradora, Codelco-Chuquicamata.

El control de la velocidad en los procesos actuales permitiría alcanzar un incremento entre 0.1% y un 1% en los niveles de producción de la molienda convencional, optimizando el proceso, reduciendo los desgastes y costos de mantenimiento.

1.2. Trabajos Previos

A partir de la revisión bibliográfica realizada, se concluye que, aunque existen numerosos estudios sobre inversores y sistemas de control en aplicaciones industriales de molienda [1][2][3][6][16], no se ha encontrado evidencia de un análisis comparativo de distintas topologías de accionamientos de velocidad variable específicamente aplicadas a molinos de molienda convencional en la gran minería del cobre. Tampoco se encontraron estudios que evalúen el impacto de estas topologías en términos de eficiencia operativa y rendimiento bajo condiciones reales de operación.

En este trabajo, el objetivo principal será evaluar las distintas topologías de accionamientos de velocidad variable aplicables a los molinos de molienda convencional.

1.3. Hipótesis de Trabajo

Se plantea que la implementación de un sistema de accionamiento de velocidad variable mediante drives de media tensión en los motores síncronos de la planta A0 de molienda convencional permitirá mejorar significativamente la eficiencia operativa del proceso. Se espera que esta mejora se refleje en un aumento del rendimiento de la molienda y una optimización en la utilización de los revestimientos, contribuyendo así a una reducción en los costos de mantenimiento y operación a largo plazo.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar topologías de accionamientos de velocidad variable para aplicarlos en molinos de molienda convencional de la gran minería del cobre, con el fin de mejorar la eficiencia operativa del proceso.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Realizar un levantamiento de la situación actual en la planta, recopilando información sobre el estado de los sistemas de accionamiento y las condiciones de operación.
- Simular el accionamiento vigente y verificar las diferentes condiciones de operación incluyendo las de partida.
- Identificar las topologías de accionamiento de velocidad variable más relevantes para su estudio y evaluación en molinos de molienda convencional.
- Crear recomendaciones prácticas para la selección de sistemas de velocidad variable en molinos de molienda convencional, con el objetivo de mejorar su eficiencia operativa en la industria.

1.5. Alcances y Limitaciones

I. Levantamiento de Información

- Revisión de los diagramas de flujo del proceso y esquemas eléctricos, para visualizar y entender el sistema de molienda y sus componentes.
- Recopilar datos de funcionamiento de los equipos actuales en la planta, para evaluar la situación actual.

II. Investigación y Selección de Topologías

- Revisión de literatura para identificar las topologías más relevantes en control de velocidad de molienda convencional.
- Selección de un conjunto representativo de topologías de accionamiento de velocidad variable que abarquen diferentes enfoques y tecnologías disponibles en el mercado.

III. Diseño y Simulación de Pruebas Experimentales

- Diseño y pruebas experimentales utilizando software de simulación adecuado para comparar el rendimiento de las diferentes topologías de accionamiento de velocidad variable en condiciones simuladas de operación.
- Definición de los parámetros de prueba, como carga de material, velocidad de rotación y condiciones de alimentación, para garantizar la representatividad de los resultados.

IV. Validación de los resultados

- Validación de los modelos mediante la comparación de los resultados de simulación con datos experimentales.

V. Análisis de datos, evaluación de resultados y generación de recomendaciones prácticas

- Realizar un análisis de los datos experimentales obtenidos de las pruebas simuladas para determinar las ventajas y limitaciones de cada topología de accionamiento en términos de eficiencia energética, control de velocidad y adaptabilidad a diferentes condiciones de operación.
- Finalmente, con los resultados obtenidos, generar recomendaciones prácticas para la selección de sistemas de accionamiento de velocidad variable en molinos de molienda convencional.

2. Descripción del Proceso y Situación Actual

2.1. Introducción General y Descripción de la División

El presente estudio se desarrollará en la industria de la minería del cobre, específicamente en la Minera Chuquicamata, ubicada en la II región de Chile a unos 15 Km al norte de Calama, en la Región de Antofagasta. Esta mina se considera la más grande del mundo en su tipo y actualmente está experimentando un importante proceso de transformación significativo. La ubicación de la mina se presenta en la Figura 2.1, proporcionando un contexto geográfico de su localización dentro de la región.



Figura 2.1: Ubicación mina Chuquicamata. Fuente: Elaboración Propia

La historia de Chuquicamata se remonta a 1925, cuando comenzó su construcción. Inicialmente, se extraía cobre de mineral oxidado mediante lixiviación. Sin embargo, en 1952, se inició la producción de cobre a partir de mineral sulfatado, con una capacidad de procesamiento de 25.000 toneladas diarias. En la actualidad, la capacidad nominal de tratamiento de Chuquicamata es de 182.000 toneladas diarias y el cobre se produce a partir del mineral sulfatado, mediante cuatro procesos principales: Mina, Planta Concentradora, Fundición y Refinería.

2.1.1 Caracterización del Proceso

La caracterización del proceso de molienda convencional involucra un análisis detallado de las variables operativas, los equipos involucrados y los objetivos del proceso.

2.1.2 Equipos Objetivos

Molienda Convencional A0: La molienda posee 13 líneas con motores síncronos de 800 HP a velocidad fija. Totalizando 38 motores con escobillas y acoplamiento directo.

En la Figura 2.2 se aprecia un esquema de la planta concentradora A0, en él se aprecian 13 secciones, cada sección con 1 molino de barras y 2 molinos de bolas, exceptuando la Sec-0, la cual está constituida solo por un molino de bolas y uno de barras.

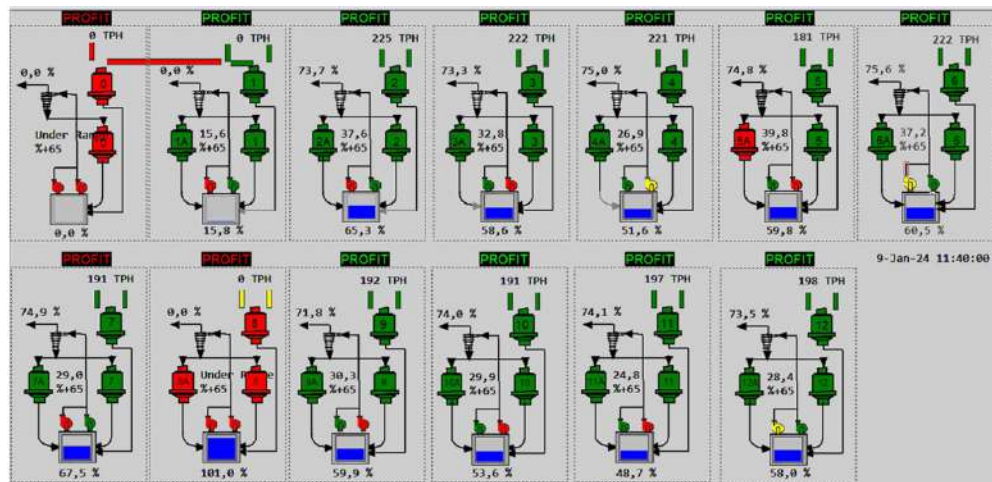


Figura 2.2: Planta Concentradora A0. Fuente: Codelco, Superintendencia de Mantenimiento eléctrico

2.1.3 Clasificación de Molinos y Descripción del Proceso de Molienda

Los molinos se clasifican en convencionales (bolas, barras y rodillos) y no convencionales (autógenos y semiautógenos). Cada tipo de molino se selecciona según los requerimientos del proceso. En la molienda convencional, la planta concentradora reduce el tamaño del mineral hasta 180 micrones para liberar el cobre. El proceso inicia con molinos de barras, que trituran el mineral mediante barras de acero, seguido por molinos de bolas que finalizan la reducción, alcanzando el 80% del tamaño objetivo en 20 minutos.

En la Figura 2.3 se presenta, un diagrama general de la planta concentradora que muestra las actividades relacionadas con el proceso.

En el siguiente gráfico se muestra la vida útil de los revestimientos del molino. Como se observa, el revestimiento presenta una vida útil reducida (~14 meses) debido a la ausencia de un grado de libertad como la velocidad. La implementación de este grado de libertad permitiría prolongar significativamente la duración del revestimiento, optimizando su desempeño y eficiencia. El incremento asociado a la introducción de velocidad variable se refleja en el área comprendida entre las dos curvas: la curva azul, que representa el comportamiento del sistema sin variación de velocidad, y la curva verde, que muestra el comportamiento con variación de velocidad. Esta área ilustra cómo la variabilidad de la velocidad contribuye a la mejora de la vida útil del revestimiento y a la optimización general del sistema.

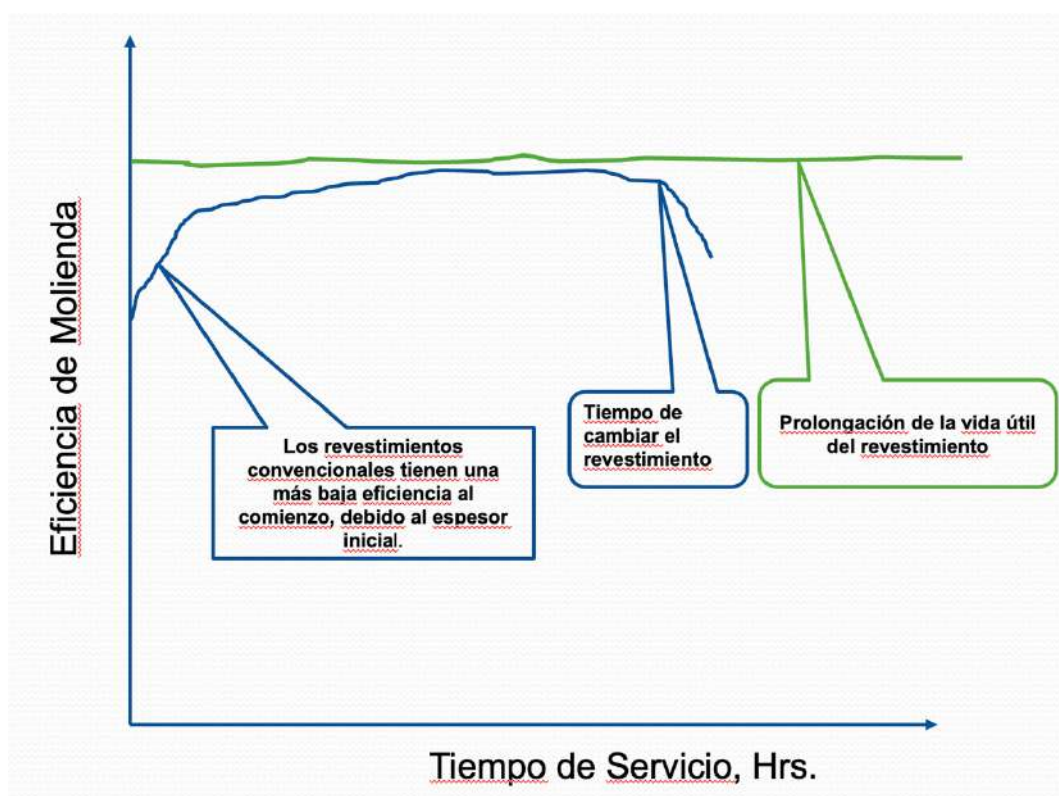


Figura 2.4: Eficiencia y tiempo de Servicio Molienda. Fuente: Codelco, Superintendencia de Mantenimiento eléctrico

2.2. Levantamiento de la Situación Actual

En la disposición actual, la planta opera con motores síncronos de 800hp de potencia nominal para molienda convencional A0 y una velocidad nominal de 230 rpm. Estos motores requieren un tiempo de arranque de 3 segundos para alcanzar el 40% de la velocidad nominal.

Los motores están equipados con un sistema donde la corriente de excitación es controlada

por un puente semi-controlado. El arranque inicial del motor se realiza como un motor de inducción, y el sistema de control detecta cuando el motor alcanza aproximadamente el 2-5% de la velocidad de deslizamiento. En este punto, se envía una señal al rectificador, que comienza a enviar pulsos de corriente al motor. A medida que el motor se acerca más al sincronismo, la corriente de campo aumenta hasta alcanzar el nivel de corriente de operación.

Es importante considerar que la planta utiliza un acoplamiento al molino (piñón-corona), sin la inclusión de un clutch.

Dada la antigüedad de estas máquinas, es imperativo tener en cuenta el desgaste en los sistemas aislantes y tomar precauciones respecto a los descansos de los motores.

2.2.1 Requerimientos del accionamiento

El equipo de terreno ha identificado la necesidad de realizar el control de velocidad en el proceso de molienda. En la planta, se cuenta actualmente con dos opciones de voltaje disponibles para la implementación: 2300V y 4160V (tensiones nominales). Es esencial analizar la factibilidad de integrar un drive de media tensión en el sistema existente, considerando tanto las características técnicas y mecánicas de los motores existentes como las condiciones operativas específicas de la planta.

Es importante destacar que los motores cuentan con una potencia nominal de 800 HP y que el sistema de control debe ser capaz de gestionar el torque de forma constante desde el reposo hasta alcanzar la velocidad nominal, garantizando el rendimiento adecuado. Además, la calidad de las formas de onda generadas por el drive debe ser óptima para evitar el estrés en los motores debido a su antigüedad.

Finalmente, cualquier solución propuesta deberá garantizar la compatibilidad con la configuración actual de los sistemas, resguardando la integridad de los sistemas de aislamiento y minimizando riesgos operativos.

3. Motor Sincrónico

3.1. Introducción

Los motores sincrónicos son máquinas síncronas que se utilizan para convertir potencia eléctrica en potencia mecánica de rotación. La característica principal de este tipo de motores es que trabajan a velocidad constante que depende solo de la frecuencia de la red y otros aspectos constructivos de la máquina.

3.1.1 Principio de Funcionamiento

Si a un alternador trifásico se le retira la máquina motriz y se alimenta su estator mediante corriente alterna, se genera en el estator un campo magnético giratorio. La velocidad de giro del motor viene expresada por la relación: $N = \frac{60 \cdot f}{P}$ donde N es la velocidad de giro (rpm), f es la frecuencia de la red (Hz), y P es el número de pares de polos del rotor [34].

En estas circunstancias, con el rotor detenido, si se alimenta el devanado del rotor con corriente continua, se produce un campo magnético rotórico fijo. Este campo fijo interactúa con el campo magnético giratorio del estator. Los polos del rotor experimentan atracciones y repulsiones en breves periodos de tiempo debido a los polos del estator, pero el rotor no logra girar, solo puede vibrar.

Al llevar el rotor a la velocidad de sincronismo mediante un motor auxiliar, los polos de signo opuesto se enfrentan y se establece un enganche magnético que obliga a ambos a girar juntos. En este punto, se puede retirar el motor auxiliar. Este enganche magnético se produce porque el campo giratorio del estator arrastra al rotor por atracción magnética en el mismo sentido y velocidad.

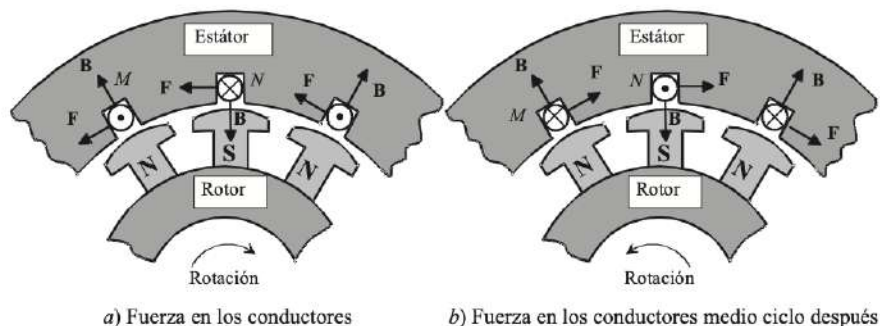


Figura 3.1: Principio de funcionamiento motor síncrono[34]

En la Figura 3.1 se muestran dos conductores del inducido enfrentando a dos polos consecutivos del rotor para dos instantes de tiempo consecutivos. Se puede concluir que, si el rotor está en reposo o gira a otra velocidad diferente a la de sincronismo, el torque medio que desarrolla al conectarlo a la red es nulo, impidiendo así el arranque del motor.

3.1.2 Métodos de arranque

Para evitar vibraciones excesivas y sobrecalentamiento al conectar directamente el motor a la red eléctrica, es necesario emplear métodos de arranque adecuados. Los tres métodos más utilizados son los siguientes:

1. **Arranque por medio de la reducción de la frecuencia eléctrica**

Consiste en disminuir la velocidad de los campos magnéticos del estator para permitir que el rotor se sincronice de manera gradual. Posteriormente, la frecuencia se incrementa progresivamente hasta alcanzar la nominal de 50 Hz. Utilizar dispositivos como los cicloconvertidores.

2. **Arranque con un motor externo**

Se emplea un motor externo que lleva al motor sincrónico a su velocidad nominal. Una vez alcanzada dicha velocidad, el motor sincrónico se conecta en paralelo a la red eléctrica y el motor primario se desconecta del eje.

3. **Arranque con devanados de amortiguamiento**

Éste es el método de arranque más utilizado, donde se utilizan barras conductoras dispuestas en el rotor, conectadas en cortocircuito en sus extremos, formando una estructura similar a un rotor tipo jaula de ardilla como se ve en la Figura 3.2. Este diseño permite que el motor arranque como un motor asincrónico trifásico y reduce las oscilaciones durante los transientes eléctricos y mecánicos.

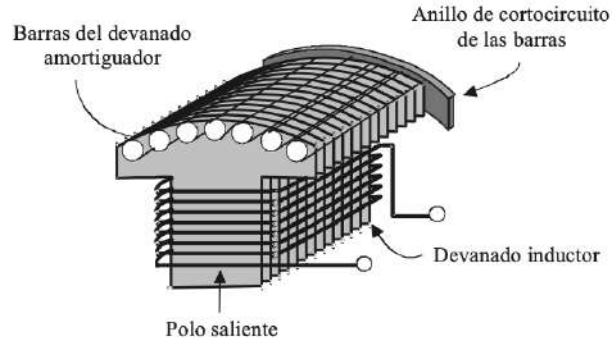


Figura 3.2: Devanado amortiguador colocado en los polos [34]

3.1.3 Modelo Dinámico del Motor

Dado que el motor utilizado en los accionamientos corresponde a un motor síncrono, se formulan las ecuaciones que describen su comportamiento dinámico [16]. En la Figura 3.3 se muestra los bobinados del estator denominados según los ejes abc. Además, se aprecian los devanados en los ejes dq, junto con los devanados amortiguadores kq y kd.

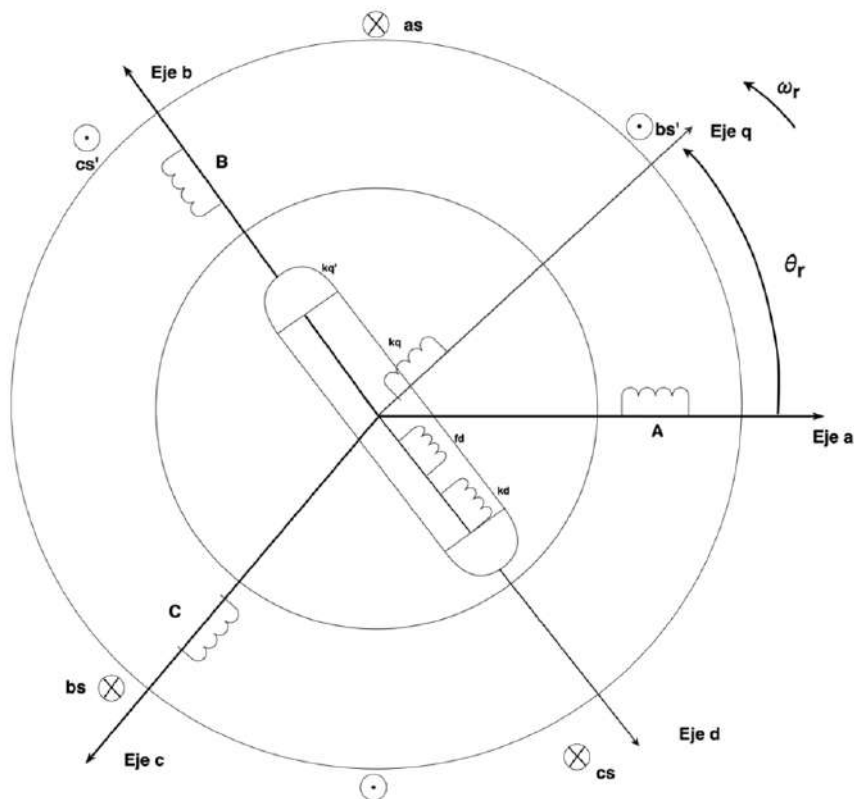


Figura 3.3: Máquina Síncrona con 3 devanados estatóricos [16]

3.1.4 Circuito Equivalente en ejes dq0

Las ecuaciones de voltaje correspondientes a los bobinados del estator y del rotor de la máquina, utilizando la convención de motor, se expresan a continuación. Los circuitos equivalentes que representan el modelo en los ejes dq0 se presentan en la Figura 3.4 .

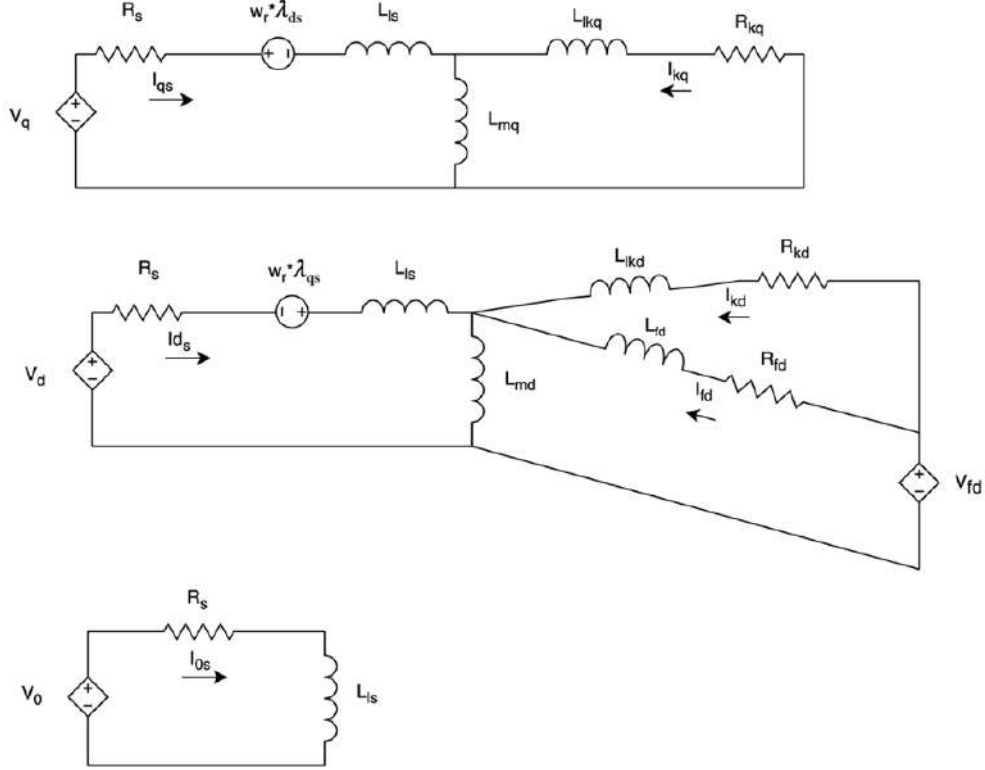


Figura 3.4: Circuito equivalente de la maquina sincrónica en ejes dq0 [3]

Considerando este circuito, se desarrollan las siguientes ecuaciones de voltaje [3]:

$$V_q = R_s \cdot I_{qs} + w_r \cdot \lambda_s + L_{ls} \cdot \frac{dI_{qs}}{dt} + L_{mq} \cdot \frac{d(I_{qs} + I_{kq})}{dt} \quad (3.1)$$

$$V_d = R_s \cdot I_{qs} - w_r \cdot \lambda_s + L_{ls} \cdot \frac{dI_{qs}}{dt} + L_{mq} \cdot \frac{d(I_{ds} + I_{kd} + I_{fd})}{dt} \quad (3.2)$$

$$V_0 = R_s \cdot I_{0s} + L_{ls} \cdot \frac{dI_{0s}}{dt} \quad (3.3)$$

$$0 = R_{kq} \cdot I_{kq} + L_{lkq} \cdot \frac{dI_{kq}}{dt} + L_{mq} \cdot \frac{d(I_{qs} + I_{kq})}{dt} \quad (3.4)$$

$$0 = R_{kd} \cdot I_{kq} + L_{lkq} \cdot \frac{dI_{kd}}{dt} + L_{md} \cdot \frac{d(I_{ds} + I_{kd} + I_{fd})}{dt} \quad (3.5)$$

$$V_{fd} = R_{fd} \cdot I_{fd} + L_{fd} \cdot \frac{dI_{fd}}{dt} + L_{md} \cdot \frac{d(I_{ds} + I_{kd} + I_{fd})}{dt} \quad (3.6)$$

Ecuaciones de flujos:

$$\lambda_d = L_{ls} \cdot i_{ds} + L_{md} \cdot (I_{ds} + I_{kd} + I_{fd}) \quad (3.7)$$

$$\lambda_q = L_{ls} \cdot i_{qs} + L_{mq} \cdot (I_{qs} + I_{kq}) \quad (3.8)$$

$$\lambda_0 = L_{ls} \cdot i_{0s} \quad (3.9)$$

Ecuaciones mecánicas:

Los torques desarrollados por la máquina sincrónica de 3 fases con P polos están dados por

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d) \quad (3.10)$$

$$T_e = J \cdot \frac{P}{2} \cdot \left(\frac{d\omega_r}{dt} + B_m \cdot \frac{P}{2} \cdot \omega_r + T_L \right) \quad (3.11)$$

$$\omega_r = \frac{P}{2} \cdot \omega_{rm} \quad (3.12)$$

3.1.5 Parámetros del Motor

Los parámetros del motor por unidad (p.u.) se detallan en el Anexo C, obtenidos de la referencia [2]. A continuación, se presentan las conversiones realizadas:

Cálculos de parámetros:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base\ nominal}} \quad (3.13)$$

$$Z_{base} = \frac{2300\text{ V}}{176\text{ A}} \quad (3.14)$$

$$Z_{base} = 13.07 \Omega \quad (3.15)$$

Convirtiendo los valores en p.u. a ohmios:

$$R_s = 0.0121 \cdot 13.07 \Omega = 0.0121 \Omega \quad (3.16)$$

$$L_{ls} = \frac{1.17 \cdot 13.07}{2\pi \cdot 50} \text{H} = 0.0489 \text{H} \quad (3.17)$$

En las inductancias magnetizantes no se dispone de información detallada sobre el comportamiento no lineal del motor debido a la saturación.

Por otro lado, realizando la conversión de resistencias e inductancias de campo, se obtiene:

$$R_{fd} = 0.00145 \cdot 13.07 \Omega = 0.0189 \Omega \quad (3.18)$$

$$X_{fd} = 1.297 \text{ p.u.} \quad (3.19)$$

$$L_{fd} = \frac{1.297 \cdot 13.07}{2\pi \cdot 50} \text{H} = 0.054 \text{H} \quad (3.20)$$

Utilizando estos parámetros del modelo de la máquina, se llevaron a cabo simulaciones del motor sincrónico en el programa Plecs®. Posteriormente, los valores obtenidos se modificaron para corresponder de manera más precisa a las condiciones reales de operación. A continuación, se muestran los valores implementados a un motor sincrónico de polos salientes.

Synchronous Machine (Salient Pole, Saturable) (mask) (link)

Salient-pole synchronous machine with main-flux saturation. All parameters and electrical quantities are referred to the stator side.

Parameters Assertions

Model:
Rotor reference frame

Stator resistance R_s (Ω):
10e-3*2

Stator leakage inductance L_{ls} (H):
3e-4

Unsat. magn. inductance [L_{md0} L_{mq0}] (H):
[4.3e-3 1.5e-3]*1.2

Saturated magn. inductance L_{mdsat} (H):
0.7e-1

Magn. flux at sat. transition Ψ_{sIT} (Vs):
0.2

Tightness of sat. transition f_T :
1

Field resistance R_f (Ω):
20e-3

Field leakage inductance L_{lf} (H):
50e-3

Damper resistance [R_{kd} R_{kq}] (Ω):
[1e-2 2e-2]

Damper leakage ind. [L_{lkd} L_{lkq}] (H):
[5e-4 1e-3]

Turns ratio N_s/N_f :
1/20

Inertia J (Nms²):
4.3e3

Friction coefficient F (Nms):
1e0

Number of pole pairs p :
13

Initial rotor speed ω_{m0} (rad/s):
 $2\pi \cdot 50 / 13 / 100 \cdot 0$

Initial rotor position θ_{m0} (rad):
0

Initial stator currents [i_{sa0} i_{sb0}] (A):
[0 0]

Initial field current i_{f0} (A):
0

Initial stator flux [Ψ_{sd0} Ψ_{sq0}] (Vs):
[0 0]

Figura 3.5: Motor de Polos Salientes-Simulación. Fuente: Plecs

3.1.6 Gráfico de corriente de partida del motor

Cada molino contiene un motor sincrónico como se ve en el anexo B el cual tiene el siguiente gráfico de partida:

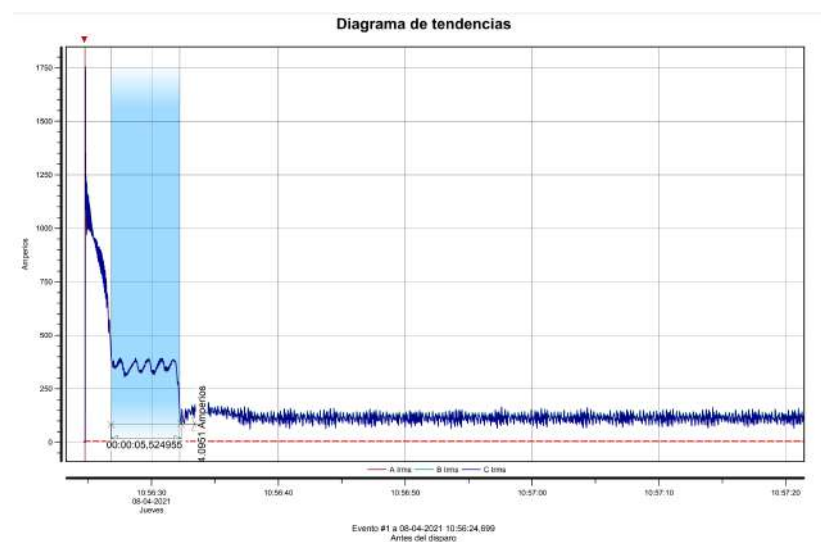


Figura 3.6: Gráfico de Corriente de partida motor de 800hp molino de barras. Fuente: Codelco, Superintendencia de Mantenimiento eléctrico

En el arranque, el motor síncronico se comporta de manera similar a un motor de inducción. En el gráfico, la línea azul muestra un aumento abrupto en la corriente de partida, alcanzando aproximadamente 1750 A.

Una vez que la velocidad del motor alcanza el valor de sincronía, se conecta el campo y el motor se sincroniza. A partir de este punto, la corriente disminuye y se estabiliza, como se observa en el gráfico, donde se muestran fluctuaciones menores y se mantienen cerca del valor nominal. Este comportamiento indica que el motor ha alcanzado su operación normal y estable.

3.1.7 Circuito de Sincronización de campo

Actualmente, el único circuito de sincronización del motor es el que se muestra en la Figura 3.7, en el cual se alimenta el campo del motor síncronico. Como se visualiza en el circuito, la excitación del campo comienza con un excitador trifásico que se rectifica a través de un puente de diodos para excitar el campo del rotor del motor síncronico. Además, existen dos rectificadores de silicio SCR1 y SCR2, donde SCR1 controla la aplicación de voltaje ya rectificado al circuito de excitación durante la fase de arranque y SCR2 el cual se activa en la fase inicial del arranque para proporcionar un camino de descarga a la corriente inducida en el rotor.

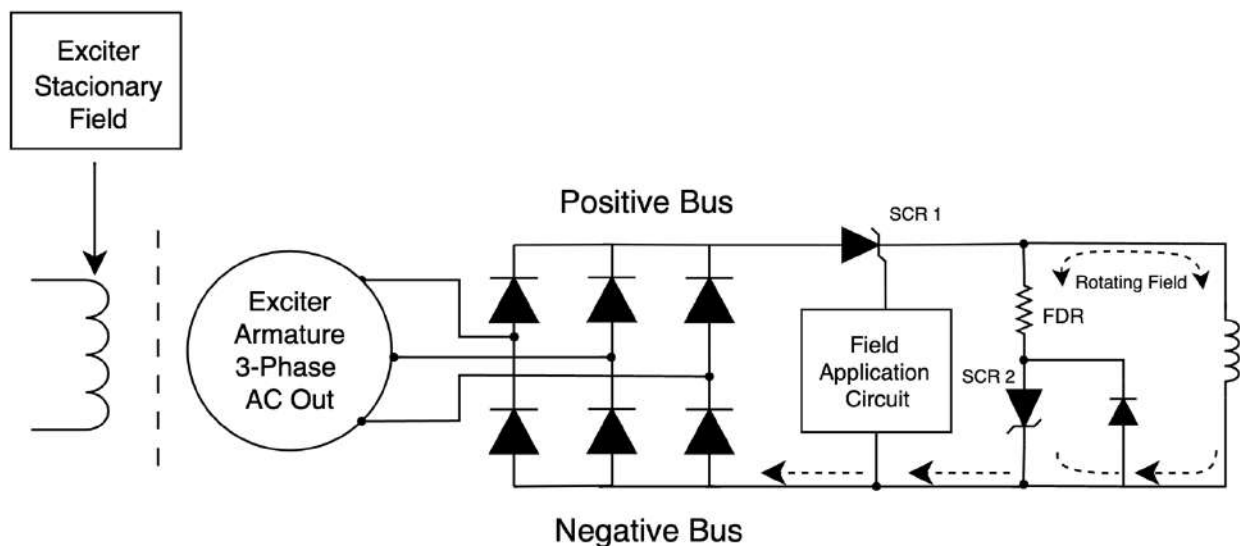


Figura 3.7: Circuito de Aplicación de Campo. Fuente: Codelco, Benshaw, Superintendencia de Mantenimiento eléctrico

4. Selección de Alternativas

De acuerdo con [17], los métodos de alimentación de las diferentes configuraciones de molinos pueden variar según la tecnología de accionamiento utilizada y los requisitos del proceso. La principal diferenciación entre las soluciones de velocidad fija y velocidad variable se muestra en la Figura 4.1. Dentro de las soluciones de velocidad variable, se pueden clasificar los accionamientos en 3 topologías principales: Cicloconvertor, Inversor Fuente de Corriente e Inversor de Fuente de Voltaje.

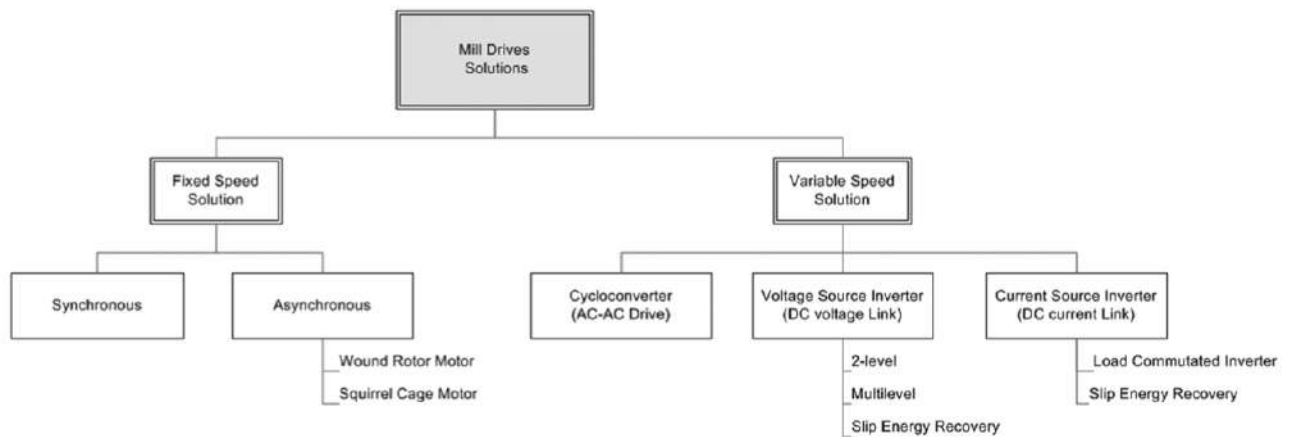


Figura 4.1: Clasificación de accionamientos [7]

La selección del equipo de accionamiento está influenciada por la demanda del mercado, el costo de capital y los requisitos del proceso. Los molinos pueden ser accionados por motores de baja velocidad conectados directamente a los piñones o por motores de alta velocidad que requieren un reductor entre los piñones y el motor.

En el pasado, los accionamientos de velocidad fija, con motores de rotor bobinados o máquinas sincrónicas, fueron comúnmente utilizados para girar los molinos. Sin embargo, presentaban limitaciones en flexibilidad operativa, generaban estrés en la red y en el equipo mecánico durante el arranque. Actualmente, la tecnología de convertidores de frecuencia ha dominado la industria, ofreciendo ventajas adicionales para el equipo mecánico, la red eléctrica y desde el punto de vista de operación y mantenimiento.

En la actualidad, los molinos SAG se accionan principalmente con variadores de velocidad, permitiendo al operador reaccionar fácilmente a los cambios en las características del mineral y el rendimiento. Aunque tradicionalmente los molinos de bolas no requerían esta característica si no se

necesitaba un control de velocidad aguas abajo, hoy en día los convertidores de frecuencia proporcionan beneficios adicionales, además de la velocidad variable, que mejoran el funcionamiento del molino de bolas.

Tabla 4.1: Posibles configuraciones de molinos eléctricos piñón simple [17]

		Motor Type	Motor Speed			Driving Equipment
			750 - 1500 rpm with Reducer	160 - 215 rpm without Reducer	9 - 15 rpm without Pinion	
Single Pinion	Fixed Speed	Wound rotor	x			Liquid, resistor starter
		Induction	x			DOL with air clutch
		Synchronous	x	x		DOL with air clutch
	Variable Speed	Wound rotor	x			SER
		Induction	x			VSI, CSI
		Synchronous	x			VSI, CSI, LCI
		Synchronous		x		VSI, LCI, CCV
		Permanent Magnet	x			VSI

Tabla 4.2 Posibles configuraciones de molinos eléctricos piñón doble [18]

Dual Pinion	Fixed Speed	Wound rotor	x			Liquid, resistor starter
		Synchronous	x	x		Quadramatic
	Variable Speed	Wound rotor	x			SER
		Induction	x			VSI
		Synchronous	x			VSI, LCI
		Synchronous		x		VSI, LCI, CCV
Gearless	Variable Speed	Synchronous			x	CCV

DOL: Direct On Line
 SER: Slip Energy Recovery
 VSI: Voltage Source Inverter
 CSI: Current Source Inverter
 LCI: Load Commutated Inverter
 CCV: Cycloconverter

4.1.1 Inversor Fuente de Corriente (CSI)

El Inversor Fuente de Corriente incluye un rectificador controlado en el lado de la línea, un enlace de DC con un reactor, y un inversor en el lado del motor, adecuado para pequeños molinos de un solo piñón. La amplitud de la corriente del motor se ajusta mediante el rectificador controlado, mientras que la frecuencia y, por lo tanto, la velocidad del motor, son operadas por el inversor.

Tabla 4.3: Ventajas y Desventajas del Inversor Fuente de Corriente. Fuente: Elaboración Propia

Ventajas	Desventajas
Forma de onda amigable para el motor	Factor de potencia variable a lo largo del rango de velocidad
Operación inherente en 4 cuadrantes	Rendimiento dinámico limitado en comparación con los accionamientos fuente de voltaje
Corriente de falla del inversor controlada por el reactor de DC	Filtro de capacitores de salida (riesgo de resonancias)
Operación bidireccional del motor	Control de torque difícil, especialmente a baja velocidad
Adecuado para motores sincrónicos y de inducción	No adecuado para velocidades < 10 % (creeping)
	Es inestable en caso de fallas, como la apertura de líneas
	El motor forma parte del circuito, lo que complica la estabilidad

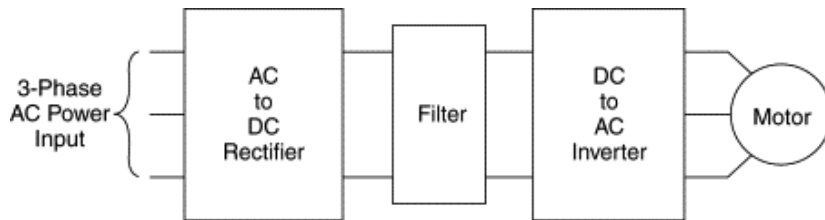


Figura 4.2: Topología Inversor Fuente de Corriente [17]

4.1.2 Inversor de Conmutación por Carga (LCI)

El Inversor de Conmutación por Carga es una topología que requiere un motor síncrono. Este inversor se compone de un rectificador de tiristores conmutado por línea, acompañado de un reactor en el enlace de corriente continua (DC). El reactor en el enlace DC tiene la función de suavizar la corriente continua y limitar las variaciones rápidas de corriente (di/dt) en caso de fallas.

Esta topología es utilizada principalmente para alimentar motores síncronos de baja velocidad, especialmente en aplicaciones como molinos de piñón simple y doble.

Tabla 4.4: Ventajas y Desventajas del Inversor de Conmutación por Carga

Ventajas	Desventajas
Operación inherente en 4 cuadrantes	Factor de potencia variable a lo largo del rango de velocidad
Accionamiento robusto, eficiente y económico	Rendimiento dinámico inferior en comparación con los accionamientos de fuente de voltaje
Corriente de falla del inversor controlada por el reactor de CC	Conmutación forzada entre 0 - 10 % de velocidad - > altos picos de torque durante el arranque
Operación bidireccional del motor	No adecuado para velocidades < 10 % (creeping)
Operación inherente en 4 cuadrantes	Factor de potencia pobre, variable a lo largo del rango de velocidad
	Alto costo
	Limitado rango de control

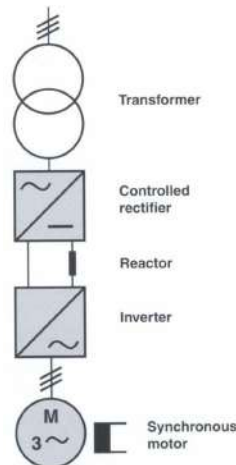


Figura 4.3: Topología Inversor Conmutado por Carga [17]

4.1.3 Cicloconvertidor

Un cicloconvertor es un tipo de convertidor de frecuencia que convierte la frecuencia de entrada en una fracción de esta, siendo ideal para molinos sin engranajes de baja velocidad. Cada fase del motor tiene un convertidor AC-AC que consiste en dos puentes de tiristores en antiparalelo. Proporciona alto torque a baja frecuencia y es adecuado para molinos de piñón simple y doble.

Tabla 4.5: Ventajas y Desventajas de los Cicloconvertidores. Fuente: Elaboración Propia

Ventajas	Desventajas
Operación en 4 cuadrantes	Limitación en la frecuencia máxima de salida.
Mayor eficiencia en comparación con otros accionamientos	
Excelente rendimiento a bajas velocidades	Factor de potencia no constante a lo largo de todo el rango de velocidad
Alto par de bloqueo y de retención disponible	Alto contenido armónico, lo que requiere un filtro
Alta capacidad de sobrecarga dinámica	Las transitorias y fallas de la red se reflejan directamente en el motor (cortocircuito)
Operación bidireccional del motor	
Menor número de polos para soluciones de baja velocidad	Se requiere un acoplamiento limitador de torque
Velocidades de arrastre y posicionamiento disponibles	
Protección contra carga congelada durante el arranque disponible	

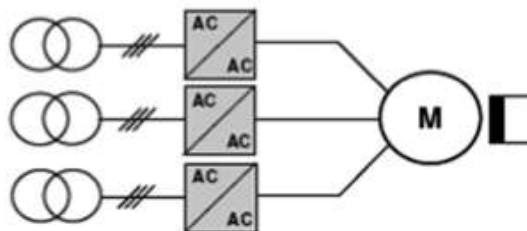


Figura 4.4: Topología Cicloconvertidor [17]

4.1.4 Inversor Fuente de Voltaje (VSI)

El Inversor Fuente de Voltaje (VSI) se compone de un rectificador que genera un voltaje de corriente continua (DC) constante en el enlace de DC, y una unidad de salida del inversor que puede ser de dos niveles o multinivel.

En las configuraciones de dos niveles, el elevado dV/dt producido por la conmutación de solo dos niveles de voltaje induce corrientes a través del acoplamiento capacitivo de los blindajes de los cables, lo que limita la longitud de estos. Además, las distorsiones armónicas de corriente resultantes

son considerables, provocando un aumento de temperatura en los motores que no están diseñados para operar con inversores de dos niveles.

Para mitigar estos problemas, se han desarrollado inversores fuente de voltaje multinivel, que permiten reducir la distorsión armónica total (THD) por debajo del 5 %, incluso a bajas frecuencias. Además, una solución multinivel permite trabajar con mayores voltajes en el motor, lo que reduce el tamaño de los cables.

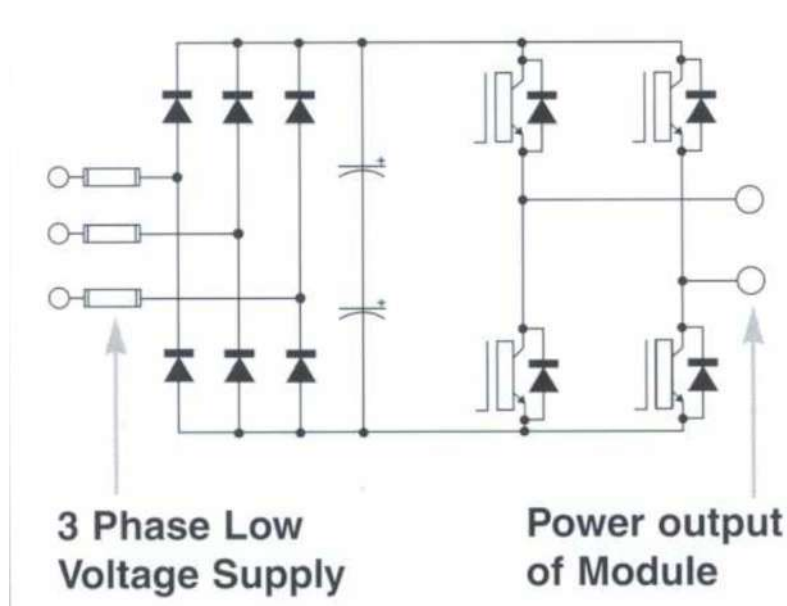


Figura 4.5: Inversor Fuente de Voltaje [17]

Tabla 4.6 Ventajas y Desventajas del Inversor Fuente de Voltaje. Fuente: Elaboración Propia

Ventajas	Desventajas
Factor de potencia superior a 0.95, no se requiere filtro	La corriente de falla no se controla en el lado del motor
Menor número de polos para soluciones de baja velocidad	Se requiere un transformador
Alto rendimiento dinámico en el control del torque a lo largo del rango operativo	Costo de capital más alto que un convertidor directo
No se generan pulsaciones relevantes de torque	Tamaño mayor que un convertidor directo
Velocidad de arrastre y posicionamiento disponibles	Limitaciones en la longitud del cable
Protección contra cargas congeladas durante el arranque	La corriente de falla no es controlada
Adecuado para motores sincrónicos e inductivos	
Operación bidireccional del motor	
Las transitorias y fallas en la red no se reflejan en el lado del motor	

4.1.5 Inversor Multinivel

Existen en la actualidad, y se ha podido constatar en la literatura [19][20], tres topologías fundamentales para el diseño de inversores multinivel:

1. Diode-Clamped.
2. Flying-Capacitor.
3. En cascada con varias fuentes de DC.

En este trabajo, se utiliza el diseño en cascada de forma de comparar la topología presentada a la empresa.

El inversor en cascada tiene como objetivo sintetizar la tensión deseada a partir de la superposición de varios niveles de tensiones DC, cada una de las salidas de las celdas se conectan en serie a las otras. En la Figura 4.6 se muestra el esquema para un inversor de este tipo.

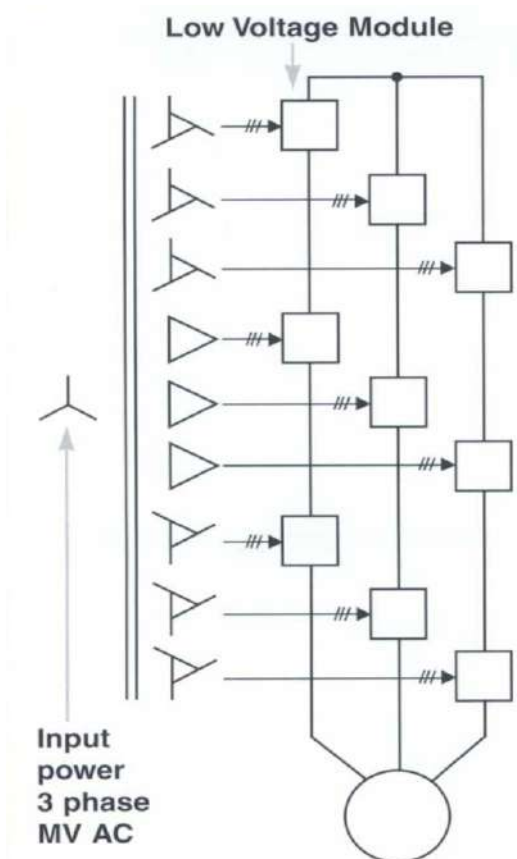


Figura 4.6: Inversor multinivel en serie [17]

En la Figura 4.7 se presenta el diagrama de un circuito correspondiente a este tipo de inversores, en el cual se emplean tres puentes H alimentados por fuentes de voltaje iguales (E , E , E). Esta configuración permite obtener un voltaje de salida de siete niveles, cuyo patrón de conmutación se detalla en la Tabla 4.7. La forma de onda de voltaje resultante se muestra en la Figura 4.8.

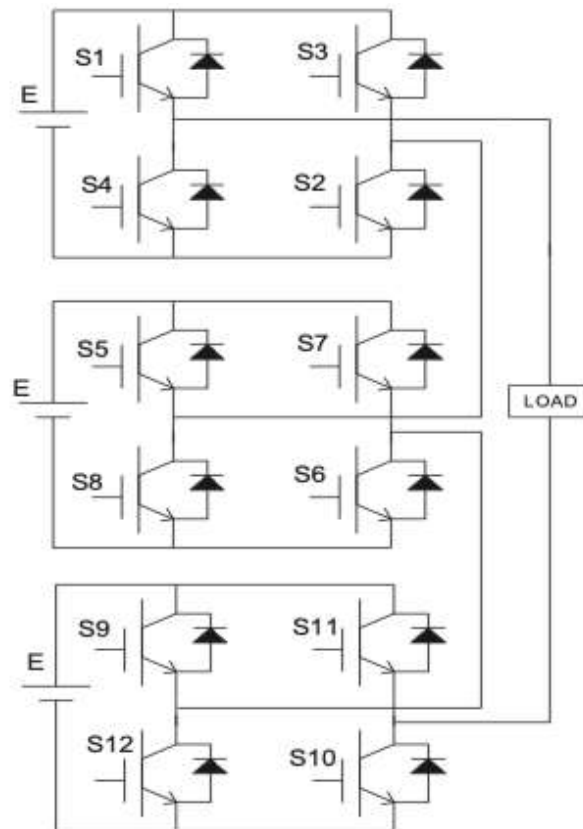


Figura 4.7: Diagrama circuito inversor de siete niveles [17]

Tabla 4.7: Patrón de conmutación de siete niveles con fuente de voltaje igual [17]

OUTPUT VOLTAGE	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
+3E	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
+2E	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0
+E	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
-3E	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
-2E	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1
-E	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1

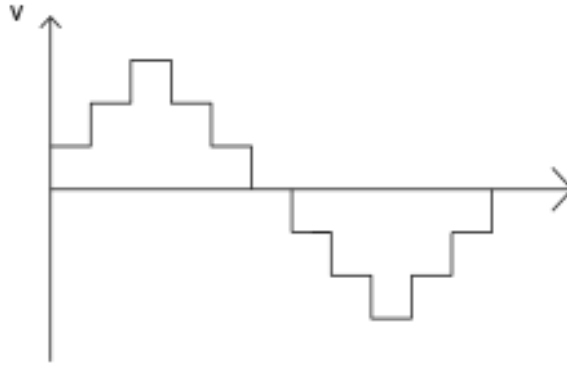


Figura 4.8: Salida de voltaje inversor de siete niveles [17]

Es crucial analizar las ventajas y desventajas de esta topología. La Tabla 4.8 resume estos puntos:

Tabla 4.8: Ventajas y Desventajas Inversor Multinivel

Ventajas	Desventajas
Bajos armónicos en la red eléctrica: Menos distorsión armónica, manteniendo la calidad de energía	Alto número de semiconductores, lo que da baja confiabilidad inherente
Salida de onda casi sinusoidal	Requiere una disposición adicional de celdas para garantizar la disponibilidad
Alta eficiencia: Menor estrés en el motor y mayor durabilidad	Tamaño mayor comparado con otros accionamientos
Estabilidad del sistema: Permite alimentar sin el motor conectado, evitando fallas catastróficas	Cada inversor se debe alimentar con una fuente independiente de DC
Funcionamiento suave a bajas velocidades y mayor tolerancia a diversas cargas	
Factor de potencia superior a 0.95, no se requiere filtro	
THD < 5%	
Adecuado para motores sincrónicos e inductivos	

4.1.6 Técnica de Modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM)

La técnica SPWM se utiliza como mecanismo de control en este tipo de inversor. En este método, la onda portadora se compara con la onda moduladora, que es de tipo sinusoidal. Cuando la onda sinusoidal tiene mayor magnitud que la portadora, la salida del comparador es 1; de lo contrario, es 0 [23]. Los pulsos de conmutación se generan a partir de esta comparación, y son utilizados para controlar los interruptores del puente H, regulando así el voltaje de salida del inversor. En inversores de siete niveles, la comparación de ondas se lleva a cabo con tres señales moduladoras y seis

portadoras como se muestra en la Figura 4.9.

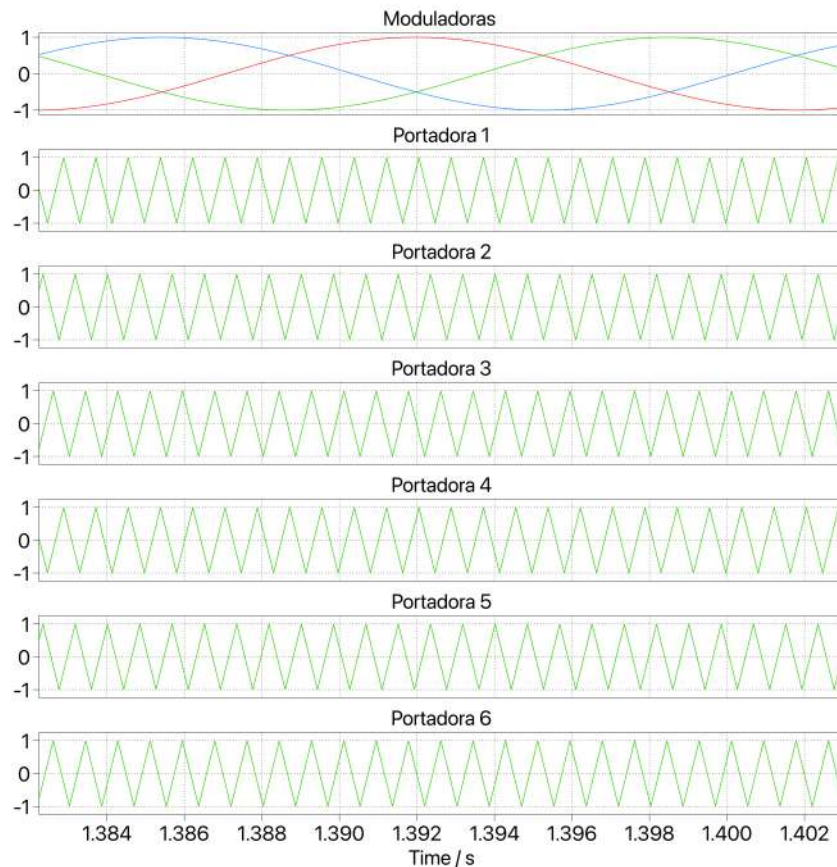


Figura 4.9 Señales de ondas moduladoras y portadoras. Fuente: Elaboración Propia

4.1.7 Topología seleccionada: VSI Multinivel

Una vez analizadas las distintas topologías de convertidores de frecuencia, se concluye que, para las aplicaciones actuales de la empresa, el inversor multinivel destaca por su capacidad de reducir armónicos y mejorar la eficiencia del sistema. No obstante, el cicloconvertidor también es una alternativa viable, especialmente en esta aplicación en donde se requiere de un alto torque de partida y una robustez en las condiciones operativas.

A continuación, se detalla la solución comercial disponible, evaluando cómo esta tecnología satisface las necesidades específicas de la operación.

4.2. Propuestas en el mercado

Aunque todas las topologías de convertidores analizadas cumplen con el objetivo fundamental de mitigar el estrés causado por un arranque directo a la red con velocidad fija. Cabe destacar que Siemens fue la única empresa que presentó una propuesta, lo que llevó a enfocar el análisis en esta

solución: un Inversor Multinivel en cascada (Figura 4.10). Este inversor opera con múltiples fuentes DC conectadas en serie y presenta las siguientes características:

Ventajas:

- **Bajos armónicos en la red eléctrica:** Genera menor distorsión armónica, lo que contribuye a mantener la calidad de la energía.
- **Salida de onda cuasi sinusoidal:** La forma de onda de salida se aproxima significativamente a una onda senoidal.
- **Alta eficiencia:** Reduce el estrés mecánico y térmico en el motor, lo que incrementa su durabilidad.
- **Estabilidad del sistema:** Permite operar el inversor sin necesidad de que el motor esté conectado, lo que previene fallas catastróficas.
- **Modulación por ancho de pulso (PWM):** Proporciona un funcionamiento suave a bajas velocidades, con una mayor tolerancia a diferentes tipos de cargas.

Desventajas:

- **Alto número de semiconductores,** lo que reduce la confiabilidad inherente del sistema.
- **Requiere una mayor cantidad de celdas adicionales** para asegurar la disponibilidad operativa.
- **Tamaño considerablemente mayor** en comparación con otros tipos de accionamientos.
- Cada inversor debe ser alimentado por una **fuentes DC independiente**

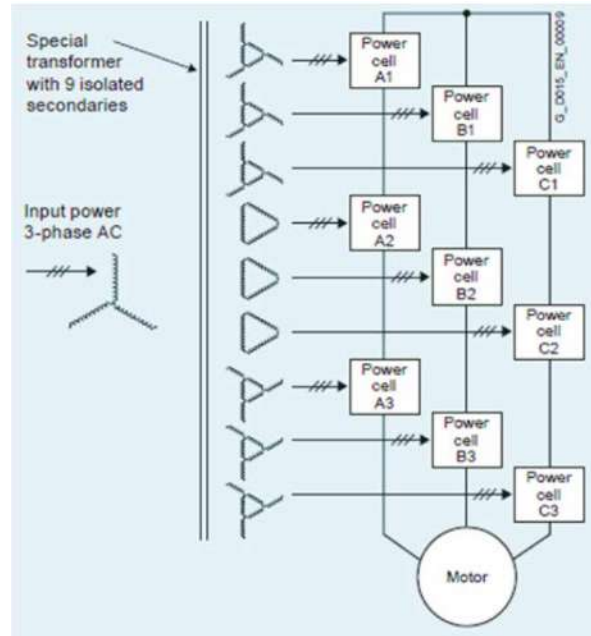


Figura 4.10: Inversor multinivel Siemens. Fuente: Siemens

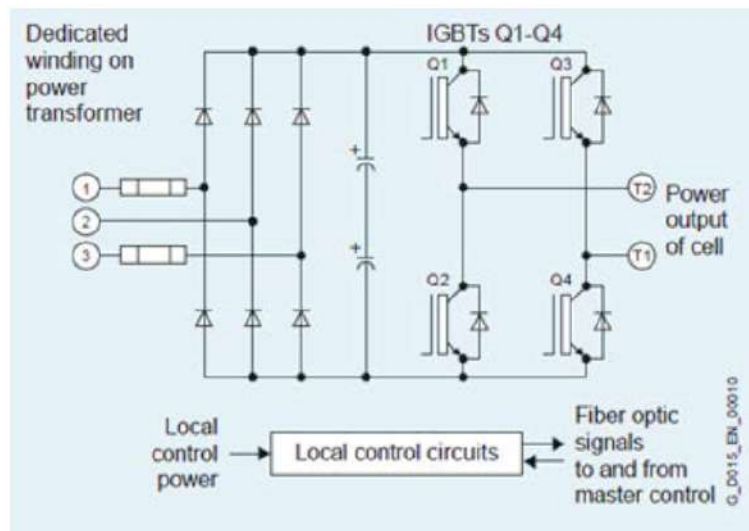


Figura 4.11: Celda interna del inversor multinivel. Fuente: Siemens

Cada celda del inversor se compone de tres secciones principales, las cuales desempeñan funciones específicas para garantizar un funcionamiento eficiente:

1. Sección rectificadora: Esta sección convierte la corriente alterna (AC) en corriente continua (DC), a través de un puente de diodos. Esto se detalla con mayor profundidad en el Anexo C.
2. Parte capacitiva: Los condensadores tienen la función de mantener el voltaje constante y

reducir el “ripple” del mismo, soportando variaciones abruptas de voltaje regenerativo y asegurando un suministro constante de energía a los IGBT.

3. Inversor VSI: Convierte la corriente continua (DC) nuevamente en corriente alterna (AC) para alimentar el motor, adaptando la energía en términos de frecuencia y amplitud.

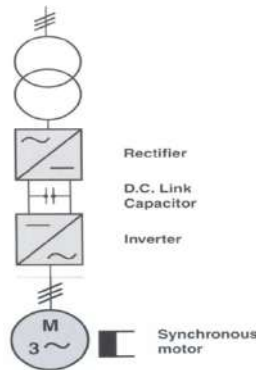


Figura 4.12: Secciones principales de cada celda. Fuente: Elaboración Propia

4.2.1 Regeneración de energía

En un inversor VSI multinivel, el circuito está diseñado para operar principalmente en los cuadrantes I y II, donde la corriente puede ser tanto positiva como negativa, mientras el voltaje permanece exclusivamente en el rango positivo. Un componente clave en este tipo de sistemas es el filtro de enlace, que está compuesto por condensadores. Estos condensadores deben ser diseñados para soportar el voltaje regenerativo que se genera durante la operación del sistema, garantizando así un rendimiento eficiente y seguro.

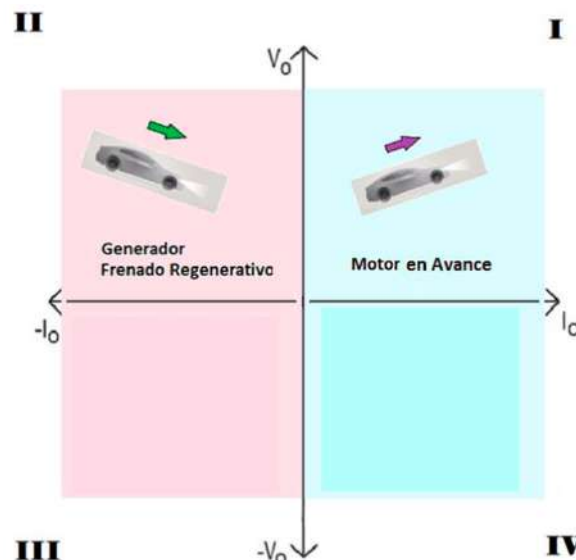


Figura 4.13: Cuadrantes de operación del motor. Fuente: Elaboración Propia

La regeneración de energía es posible cuando el molino se detiene, dado que se genera un efecto de péndulo que produce energía de retorno. Sin embargo, el diseño de protección del circuito actúa inhibiendo la corriente de campo, lo que impide la generación de corriente adicional durante este proceso.

Como se aprecia en la Figura 4.11 el puente de diodos solo admite voltaje positivo y no admite corrientes hacia él debido a la disposición de los diodos. Por lo tanto, no se produce regeneración a través del puente de diodos. En cambio, si la parte del inversor genera energía, esta se almacenará en los condensadores.

5. Variación de Velocidad

5.1. Estrategias de Control de velocidad

Existen dos categorías para el control de velocidad en motores eléctricos: el control escalar, el control vectorial y el control directo de torque (DTC).

5.1.1 Control Escalar

Este método controla la magnitud del flujo variando el voltaje de alimentación de forma proporcional a la frecuencia. Al mantener constante la relación entre el voltaje y la frecuencia, el motor opera con un flujo aproximadamente constante en régimen permanente. No obstante, la proporcionalidad entre V/f se pierde a bajas frecuencias. Además, la curva característica de torque depende tanto de la frecuencia del rotor como de su temperatura, por lo que es necesario que el dispositivo de control del convertidor incluya las correcciones correspondientes [26].

Esta estrategia de control se puede implementar de dos formas:

- Control Voltaje-Frecuencia (V/f).
- Control de la corriente del estator y de la frecuencia del deslizamiento.

El control escalar permite un control satisfactorio en lazo abierto cuando el motor trabaja con valores estables de torque y no se requiere un control preciso de velocidad. Sin embargo, en aplicaciones que demandan una respuesta dinámica rápida, con exactitud en la velocidad o control del torque, es necesario operar el motor en lazo cerrado [29].

5.1.2 Control Voltaje-Frecuencia (V/f)

Cuando se trabaja a velocidades inferiores a la velocidad base del motor es necesario reducir el voltaje aplicado a los terminales del estator. El voltaje aplicado debe disminuir linealmente con la disminución de la frecuencia. Este proceso se conoce como derating. Si esto no se hace, se satura el acero del núcleo del motor y fluyen corrientes de magnetización excesivas en las máquinas [27].

Matemáticamente, este fenómeno se obtiene al calcular el flujo en el núcleo de un motor aplicando la ley de Faraday:

$$v(t) = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (5.1)$$

Si se aplica un voltaje $v(t) = V_m \cdot \sin(\omega t)$ al núcleo, el flujo ϕ resultante es:

$$\phi(t) = \frac{1}{N} \int v(t) dt = \frac{1}{N} \int V_m \cdot \sin(\omega t) dt \quad (5.2)$$

$$\phi(t) = -\frac{V_M}{\omega \cdot N} \cdot \cos \omega t \quad (5.3)$$

Como se observa en la ecuación (5.3), la frecuencia eléctrica aparece en el denominador. Por lo tanto, si la frecuencia aplicada al estator disminuye en un 10%, mientras que la magnitud del voltaje permanece constante, el flujo en el núcleo del motor se incrementa cerca del 10% [27].

5.2. Función moduladora

Como se mencionó previamente, para variar la velocidad del motor, es necesario reducir/aumentar el voltaje en los terminales del estator, esto se logra reduciendo la frecuencia eléctrica.

En consecuencia, al utilizar modulación PWM, se presenta la interrogante de cómo realizar la variación del voltaje producido por este tipo de modulación. Para abordar esto, se implementan funciones matemáticas que permiten la modulación tanto en amplitud como en frecuencia.

Los bloques denominados “Gain” y “mod_variable” representan, la ganancia y la modulación variable aplicada al sistema. En particular, el bloque “Gain” incluye un parámetro G , que debe interpretarse como un factor que afecta el tiempo necesario para que las funciones moduladoras alcancen su valor máximo, es decir 1. A mayor G , mayor será este tiempo. Una descripción más detallada de este comportamiento se encuentra en la Sección 6.3.

La señal moduladora varía su amplitud entre 0 y 1, como se observa en la Figura 5.4. Se crearon tres señales de modulación variables, denominadas mod_variable1, mod_variable2, mod_variable3, las cuales están desfasadas 120° entre sí, representando el desfase de la red eléctrica trifásica. A continuación se presenta una de las tres moduladoras:

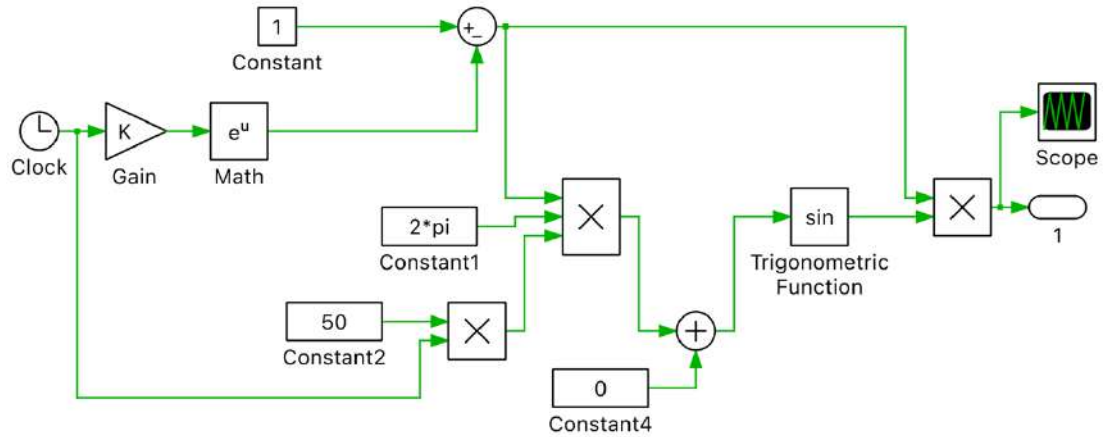


Figura 5.1: Mod_variable1. Fuente: Elaboración Propia

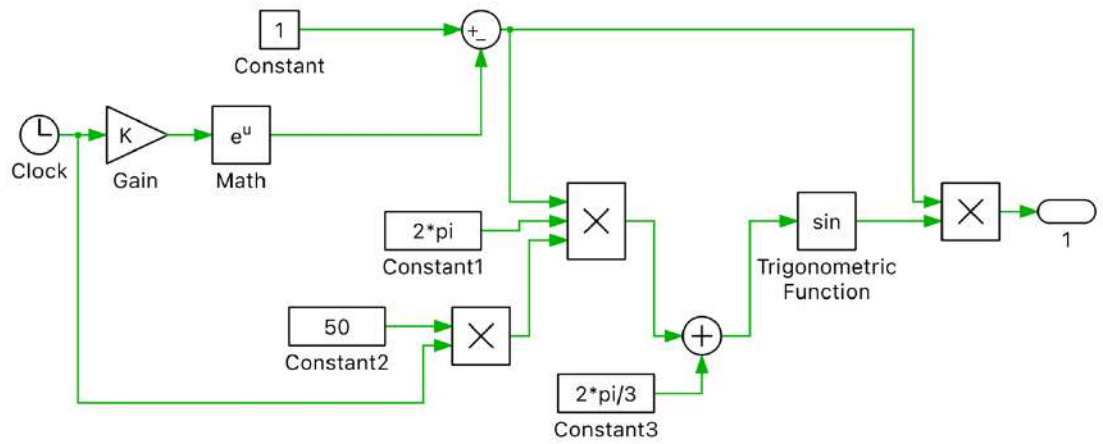


Figura 5.2: Mod_variable2. Fuente: Elaboración Propia

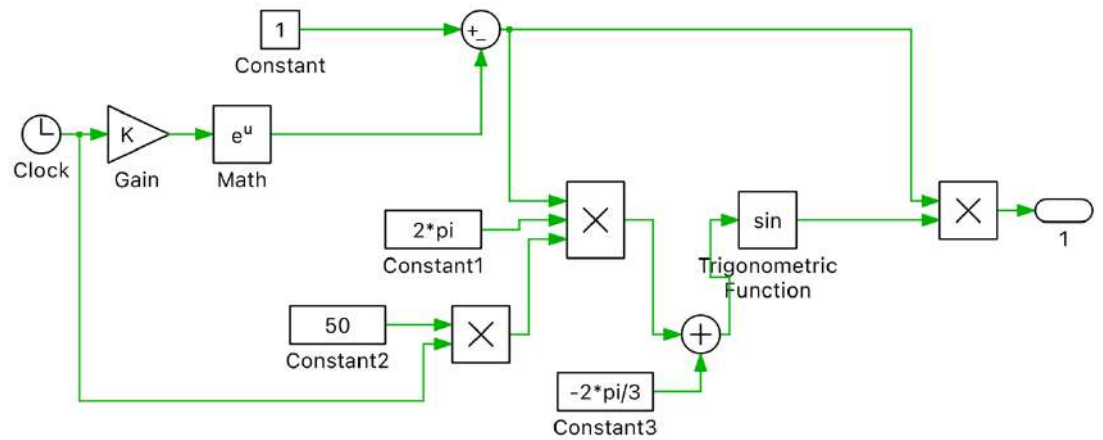


Figura 5.3: Mod_variable3. Fuente: Elaboración Propia

$$Gain = \frac{-1}{G} \quad (5.4)$$

$$mod_{variable1} = \left(1 - e^{\frac{-1}{G}}\right) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t) \quad (5.5)$$

$$mod_{variable2} = \left(1 - e^{\frac{-1}{G}}\right) \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5.6)$$

$$mod_{variable3} = \left(1 - e^{\frac{-1}{G}}\right) \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5.7)$$

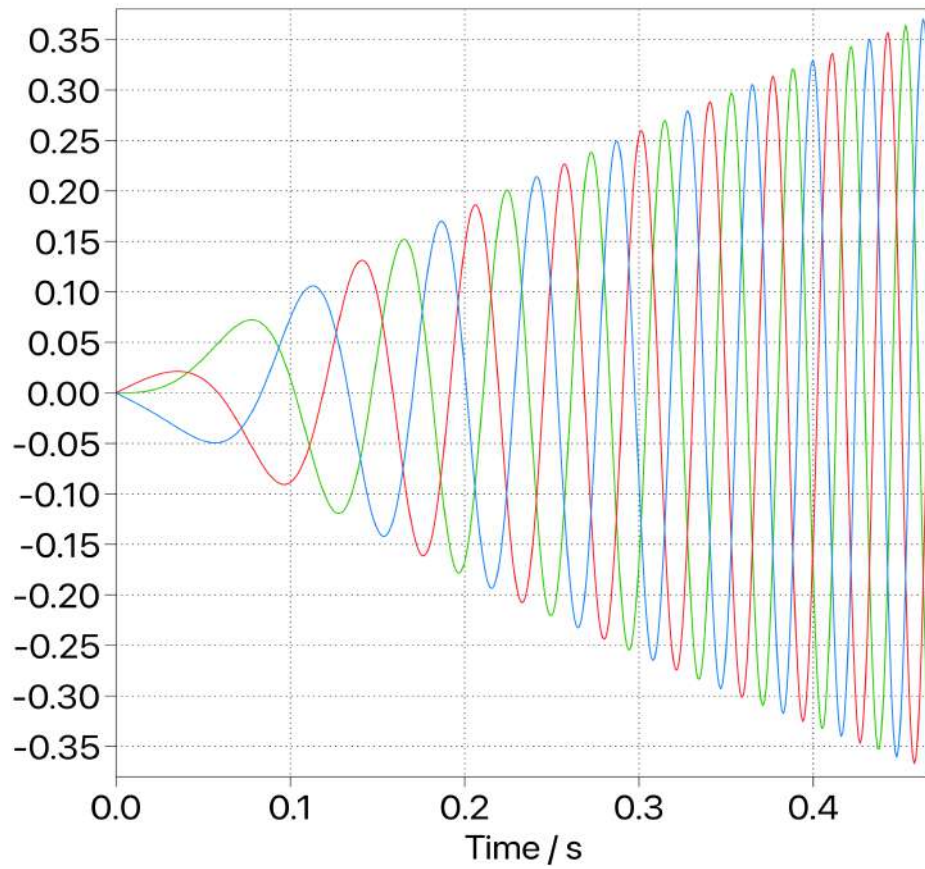


Figura 5.4: Moduladoras variables en amplitud y frecuencia desfasadas en 120°. Fuente: Elaboración Propia

6. Simulaciones

6.1. Conexión de motor con Moduladoras variables

A continuación, en la Figura 6.1 se presenta el circuito que describe el comportamiento actual del proceso. El motor empleado, descrito previamente, es alimentado por una excitación independiente. Por otro lado, en color morado, se visualiza la simulación del comportamiento mecánico y de la carga asociada al molino. Cabe destacar que el modelo correspondiente al torque de carga puede encontrarse en el Anexo F.

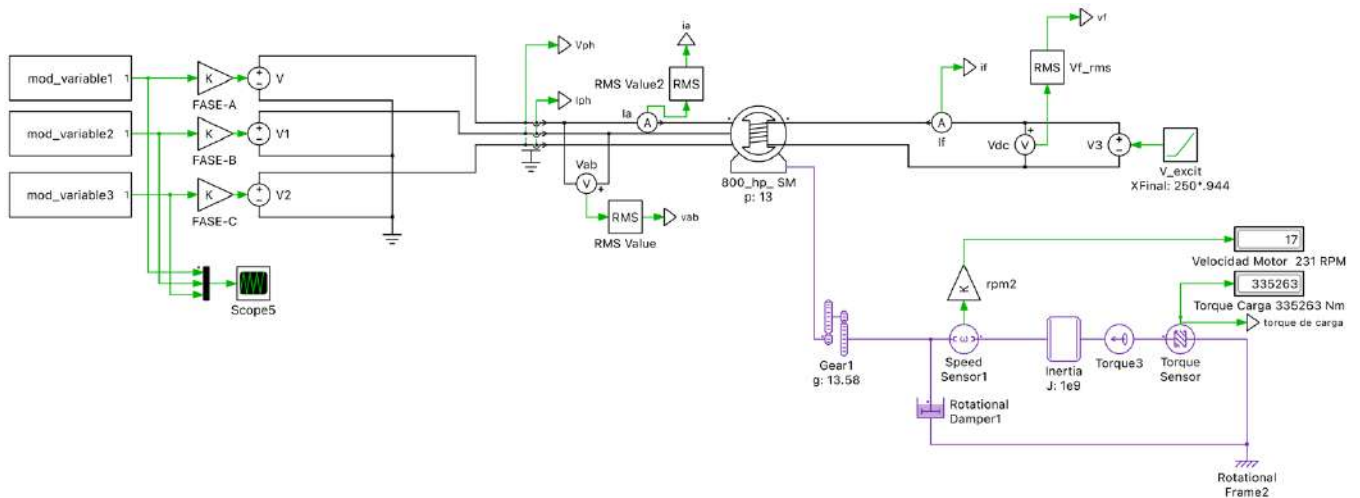


Figura 6.1: Circuito de comportamiento actual. Fuente: Elaboración Propia

Como se mencionó anteriormente en la Ecuación (5.4), al variar el parámetro G se modifica el comportamiento de las señales moduladoras que alimentan los terminales del estator del motor. Se observa que, al ajustar la ganancia a un valor específico ($G=1$), se puede replicar el comportamiento actual del proceso durante el arranque del motor.

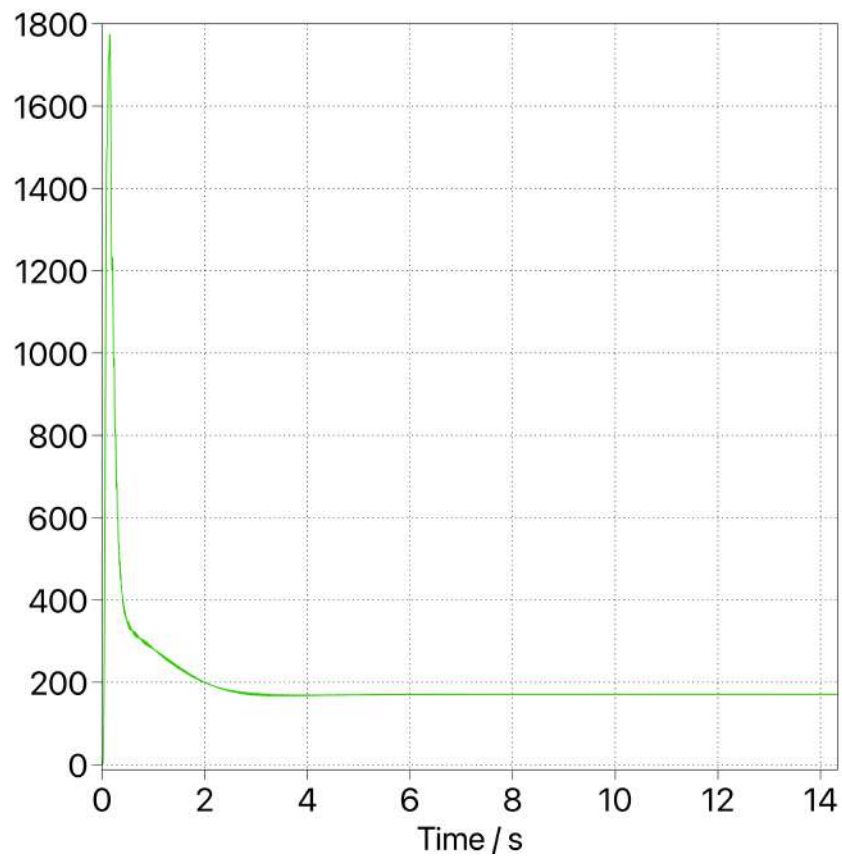


Figura 6.2: Corriente RMS de Partida Simulación. Fuente: Elaboración Propia

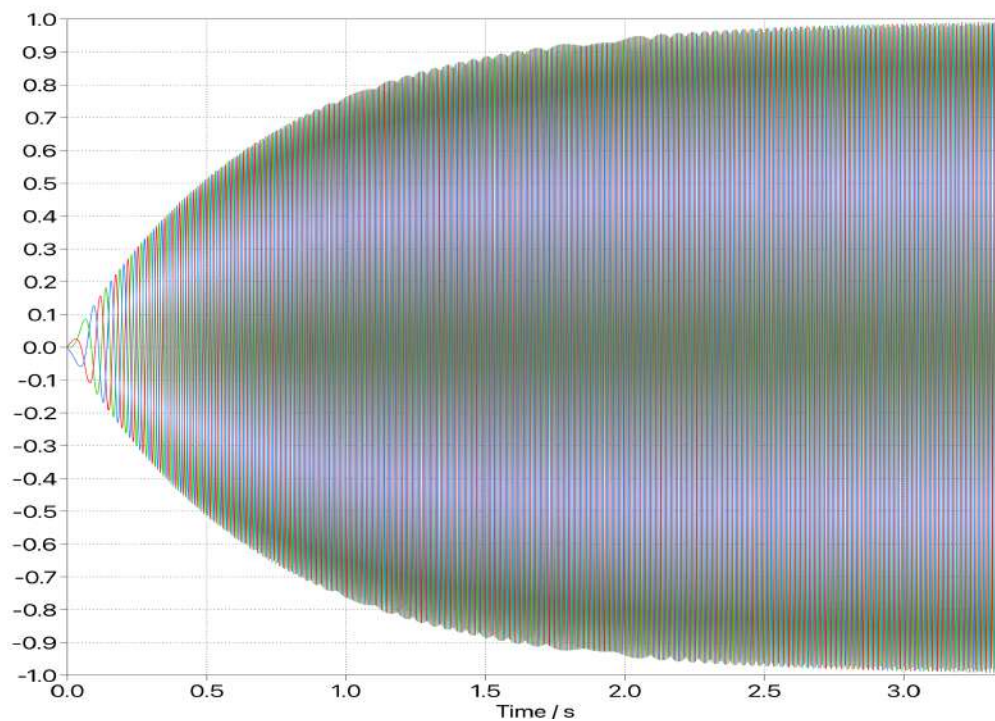


Figura 6.3: Moduladoras comportamiento actual. Fuente: Elaboración Propia

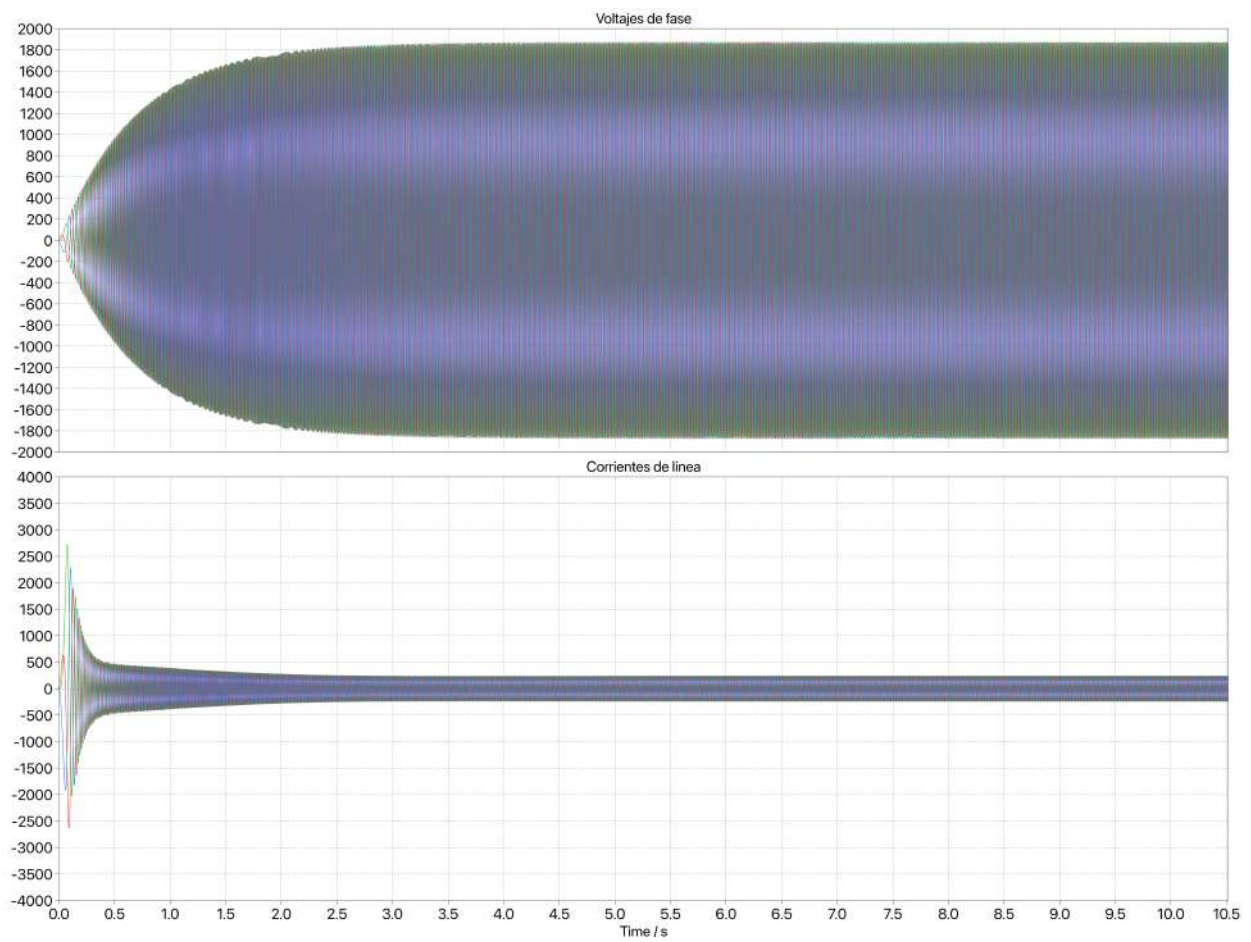


Figura 6.4: Voltajes de fases y corrientes de línea. Fuente: Elaboración Propia

6.1.1 Resultados y Comparación desempeño actual vs modelo propuesto

A continuación, se realizan las comparaciones del comportamiento actual del proceso vs la simulación:

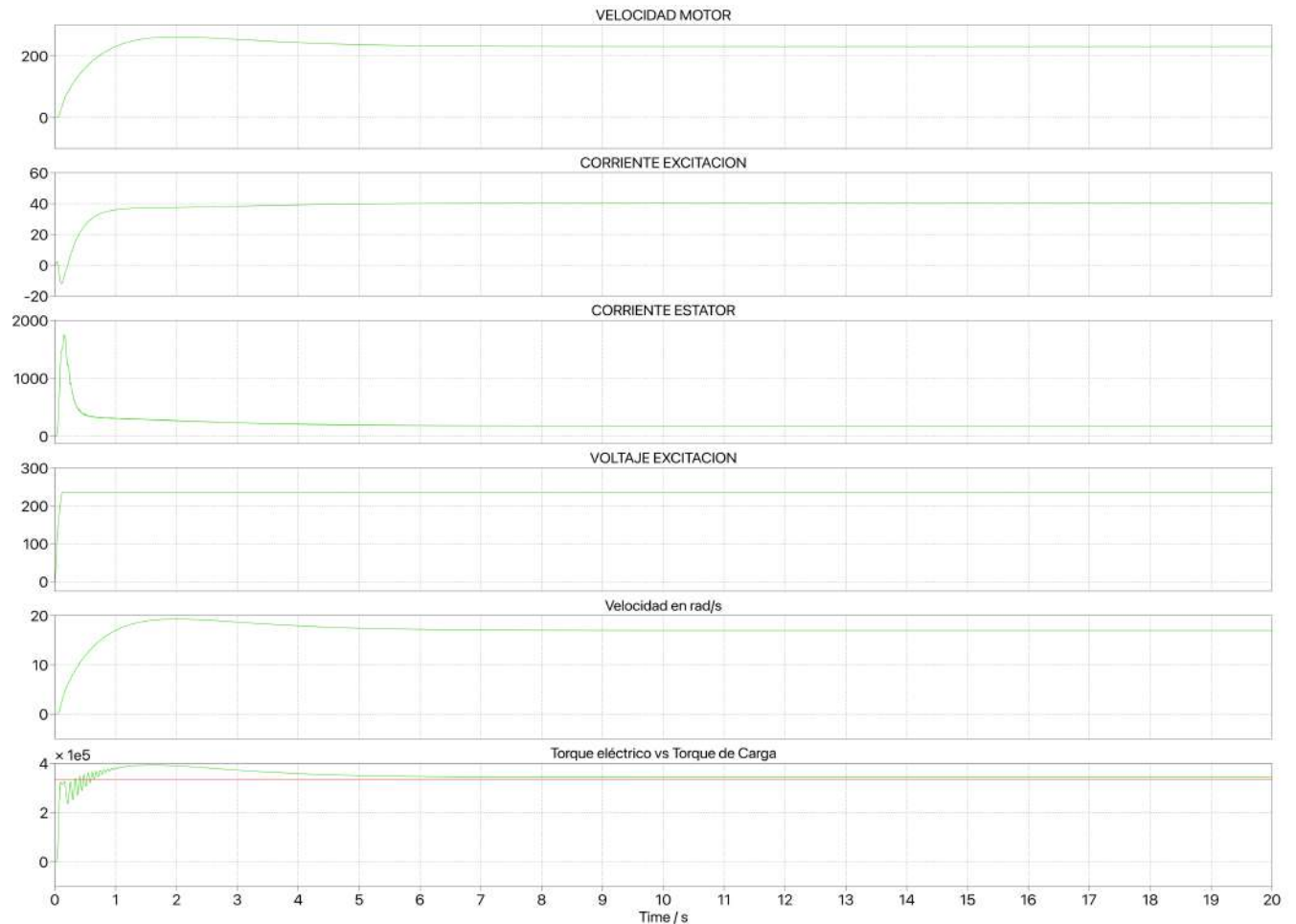


Figura 6.5: Variables del motor simulación actual. Fuente: Elaboración Propia

Name		Cursor 1
Time		10.007
✓ VELOCIDAD MOTOR	✓	
gain1	✓	230.88
✓ CORRIENTE EXCITACION	✓	
If:Measured current	✓	40.3942
✓ CORRIENTE ESTATOR	✓	
la_rms	✓	179.445
✓ VOLTAJE EXCITACION	✓	
Vf_rms	✓	236
✓ Plot 5	✓	
Gain1	✓	17.0015
✓ Plot 6	✓	
gain	✓	342993
Torque Sensor:Torque	✓	335263

Figura 6.6: Valores nominales simulación. Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se presenta una comparación entre los valores medidos en terreno y los obtenidos a partir de la simulación (con $G=1$). Esta comparación permite evaluar la precisión del modelo simulado respecto a las condiciones reales de operación del sistema.

Tabla 6.1: Comparación de Valores en terreno VS Valores de Simulación (s.s). Fuente: Elaboración Propia

Parámetros de Operación	Valores actuales	Valores de simulación
Voltaje	2300 V	2300 V
Corriente	176.8 A	179 A
Voltaje de Campo	236 V	236 V
Corriente de Campo	43 A	40 A
Velocidad	230.8 rpm	230.8 rpm
Factor de Potencia	0.9	0.9

Tabla 6.2: Comparación de valores en terreno vs valores de simulación en la partida. Fuente: Elaboración Propia

Parámetros de Operación	Valores actuales	Valores de simulación
Corriente	~1763 A	1765 A

Los resultados de la simulación muestran una alta concordancia con los valores actuales registrados en planta, lo que valida el modelo simulado. Esta correspondencia se utiliza como base para las siguientes simulaciones del sistema.

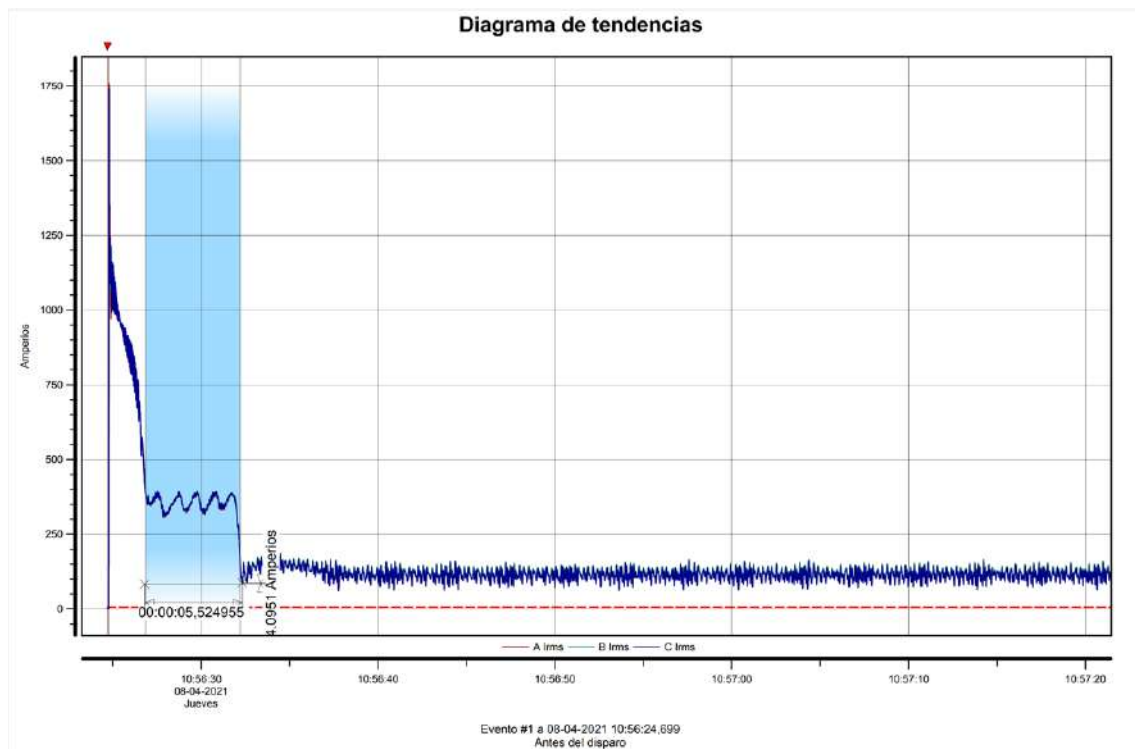


Figura 6.7: Corrientes de partida motor 800hp. Fuente: Codelco, Superintendencia de Mantenimiento eléctrico

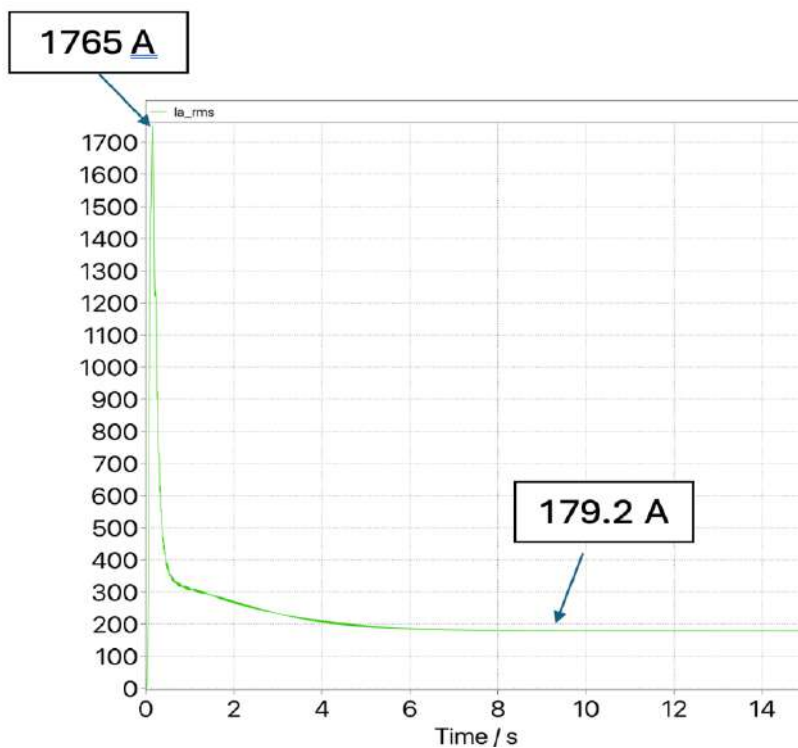


Figura 6.8: Corrientes de partida simulación motor 800hp. Fuente: Elaboración Propia

6.2. Simulación Inversor Multinivel

Para validar la propuesta, se realizó una simulación del equipo propuesto, incluyendo el inversor multinivel conectado al motor. A continuación, se implementó dicha simulación y, como se aprecia en la Figura 6.9, se observa la señal moduladora junto a tres portadoras encerradas en naranja, al realizar la comparación estas realizan la conmutación de los switches de cada inversor, lo que permite el correcto funcionamiento del sistema.

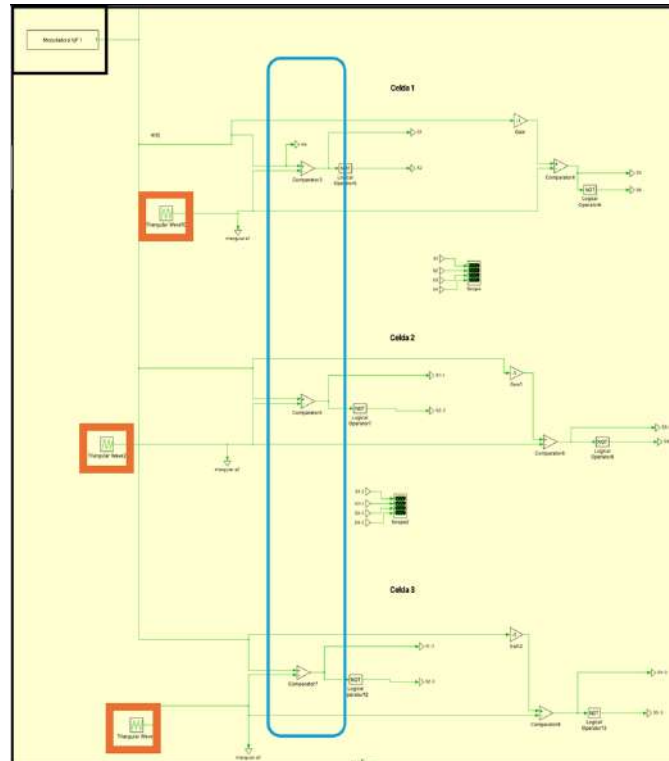


Figura 6.9: Conmutador PWM celda 1, celda 2 y celda 3. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 6.10, se observa el voltaje de salida de la Celda 1 y las conmutaciones S1, S2, S3 y S4 que corresponden a las señales de conmutación de dicha celda. Cada celda contiene su propia secuencia de conmutación, con cada columna operando con una moduladora y cada celda utilizando una portadora desfasada en 120° respecto a la celda anterior en su fila. Además, las columnas de celdas están compuesta por una moduladora que también están desfasadas 120° entre sí, lo que asegura que el voltaje de red trifásica mantenga el mismo desfase de 120° .

Para minimizar el contenido armónico en los voltajes de salida de cada celda, se emplean tres portadoras distintas entre sí ($360^\circ/3$), dado que hay tres celdas conectadas en serie. Este desfase entre las portadoras permite la cancelación armónica efectiva, asegurando un funcionamiento más eficiente y estable del sistema.

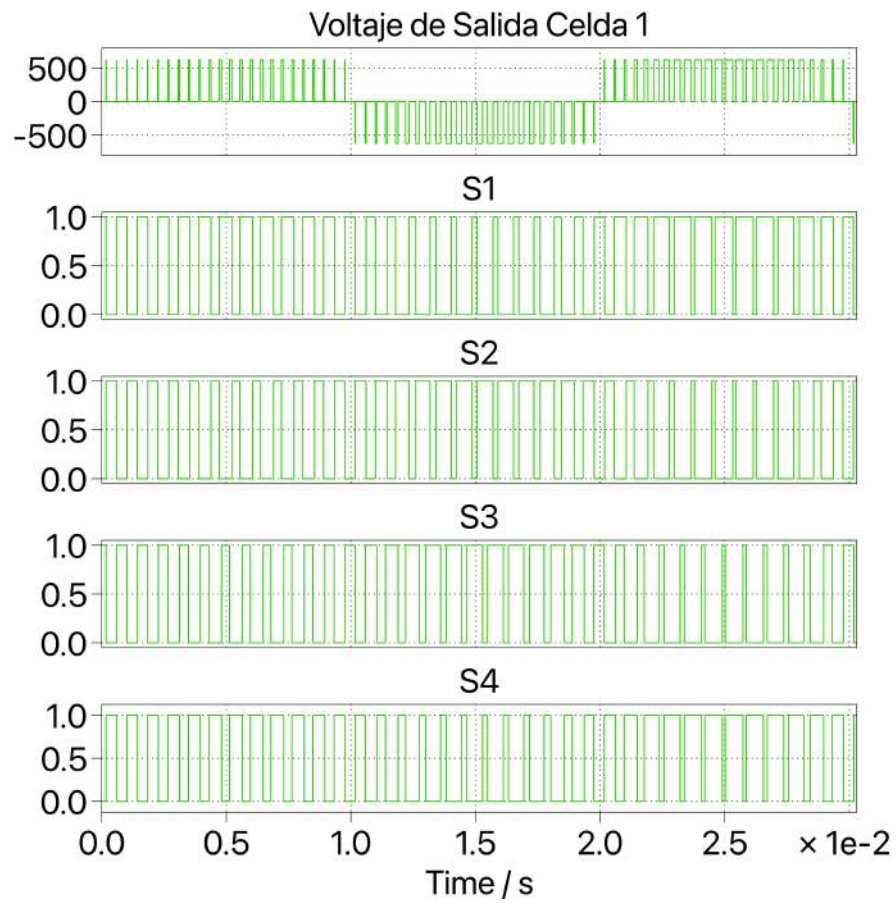


Figura 6.10: Conmutación celda 1, celda 2, celda 3, celda 4. Fuente: Elaboración Propia

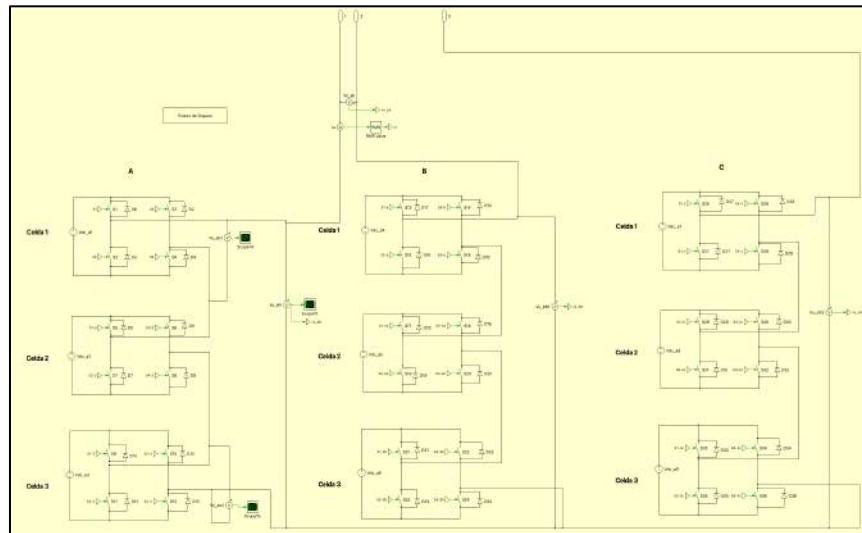


Figura 6.11: Celdas inversor multinivel. Fuente: Elaboración Propia

Con el objetivo de validar la propuesta, se realizó una simulación detallada del sistema, incluyendo el inversor multinivel al motor. Esta simulación permite analizar el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones operativas, evaluando la respuesta del inversor en términos de la calidad de la onda de salida, la conmutación de los semiconductores y la interacción con el motor. Además, se observaron los efectos de la modulación empleados.

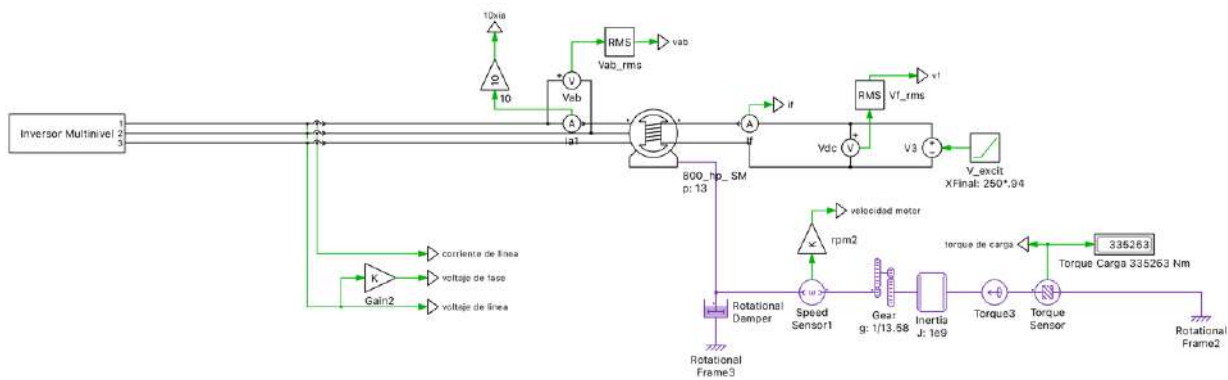


Figura 6.12: Inversor multinivel y motor. Fuente: Elaboración Propia

6.2.1 Gráficos del Inversor

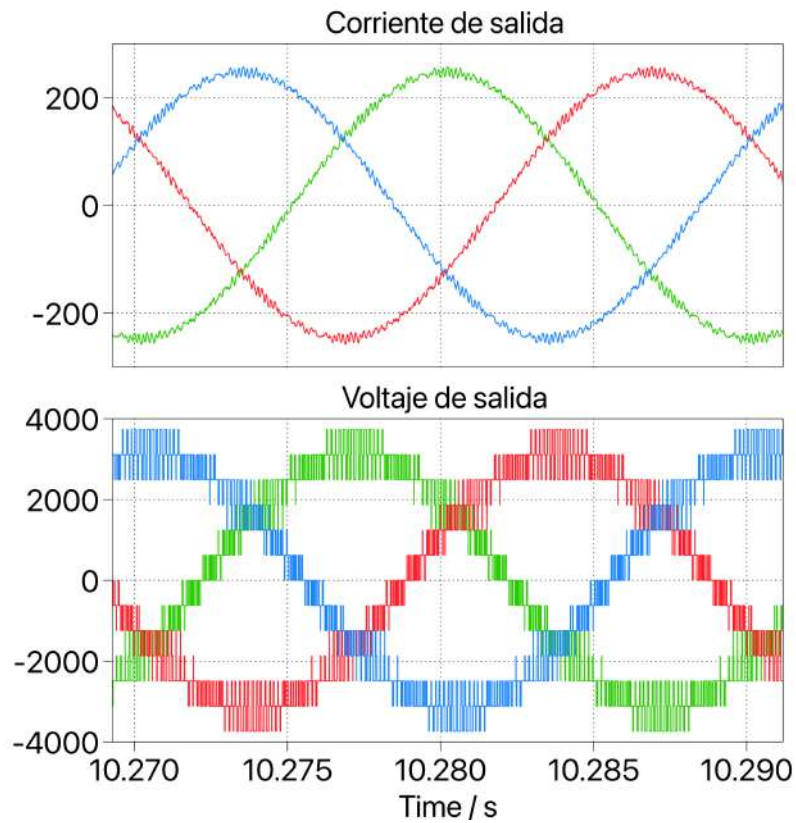


Figura 6.13: Corriente y Voltaje de salida. Fuente: Elaboración Propia

Una de las características más destacadas de este inversor, observada en el espectro armónico de las señales, es que la frecuencia de conmutación se duplica, alcanzando los 2400Hz (es decir, $2 \cdot 1200\text{Hz}$). Esta particularidad elimina la necesidad de filtros de salida, ya que el primer armónico surge en el armónico 48, lo que contribuye a una mejor calidad en la forma de onda de salida.

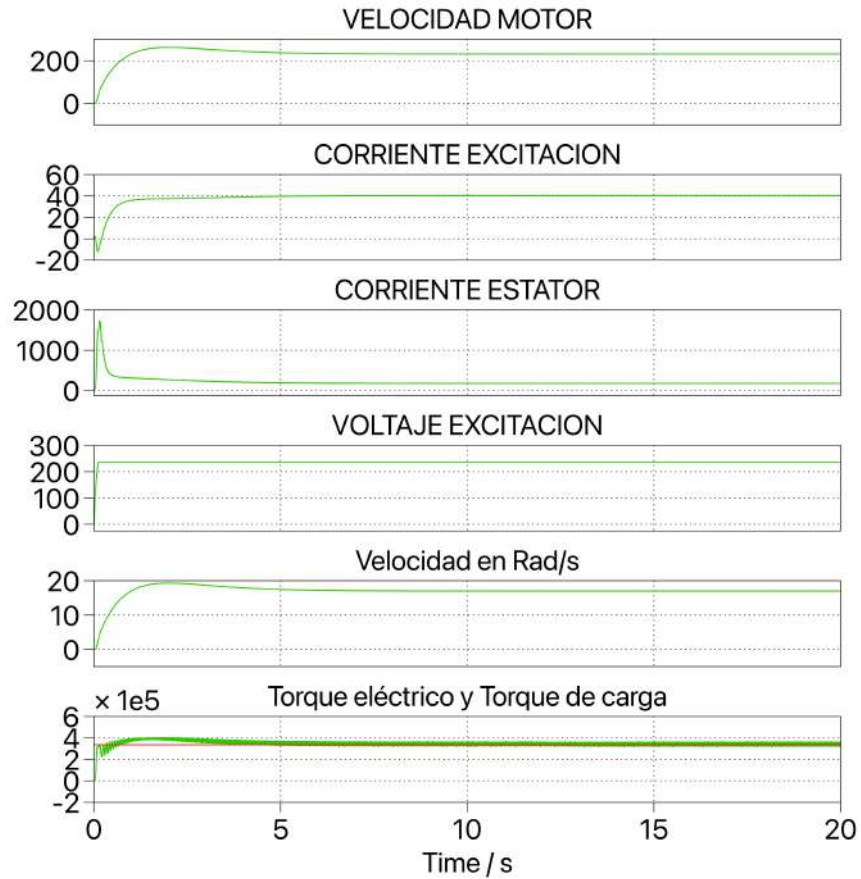


Figura 6.14: Gráfico de las variables del motor con inversor multinivel (valores rms). Fuente: Elaboración Propia

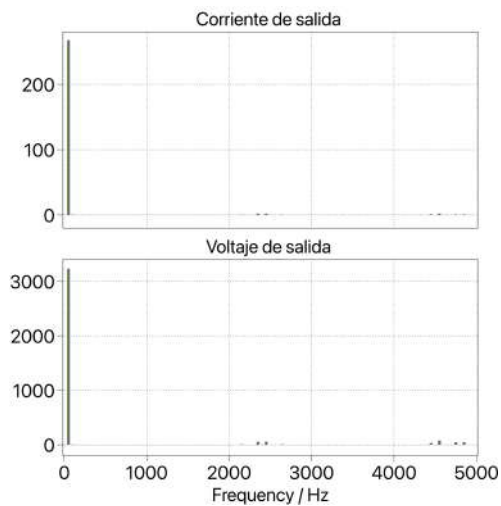


Figura 6.15: Armónicos de Voltaje y Corriente. Fuente: Elaboración Propia

6.3. Variación de Velocidad de partida

La variación de la ganancia ‘G’ tiene un impacto tanto en la frecuencia de la señal moduladora del inversor como en la velocidad del motor. Al ajustar este parámetro, es posible obtener un arranque más suave. No obstante, resulta crucial considerar la influencia de la formación de la cuña hidráulica en los descansos del motor. Al ajustar este parámetro, se consigue un arranque más suave. Sin embargo, es crucial tener en cuenta la influencia de la formación de la cuña hidráulica en los descansos del motor. Este fenómeno ocurre cuando se forma una película de lubricante bajo presión entre las superficies de contacto del eje del motor y los cojinetes (o descansos) durante la operación. La película, generada por el movimiento relativo de estas superficies, cumple la función de separar las partes metálicas, minimizando el contacto directo y, de este modo, reduciendo tanto el desgaste como la fricción. Esto ocurre al alcanzar aproximadamente el 40% de la velocidad nominal (92.4 rpm). Dado que este aspecto mecánico está estrechamente relacionado con la variación de velocidad, debe ser gestionado cuidadosamente para evitar inconvenientes operativos.

Por otro lado, la variación de velocidad también influye directamente en la corriente de partida y en el desempeño general del motor. En el gráfico siguiente se presenta un arranque, evidenciando la influencia de este valor en el proceso. De manera práctica, se observa que con $G=3$ se requiere un mayor tiempo para que el motor alcance la velocidad nominal.



Figura 6.16: Variación de velocidad con $G=3$. Fuente: Elaboración Propia

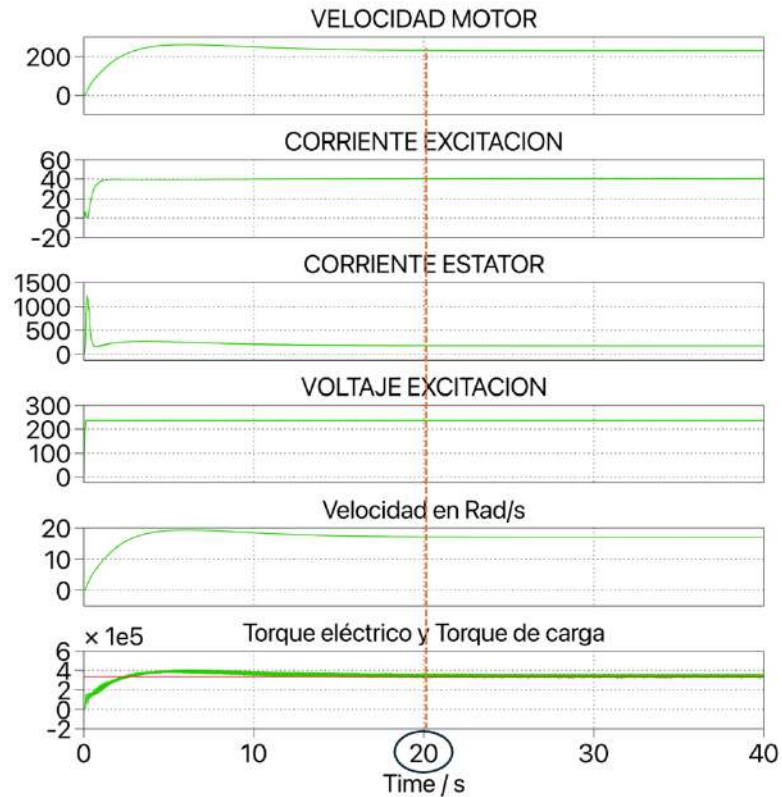


Figura 6.17: Variables del motor con $G=3$. Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la Figura 6.17, el tiempo que el motor tarda en alcanzar el estado estacionario es de aproximadamente 20 segundos. Cabe destacar que el torque de carga se considera constante, dado que el molino está a plena carga. A continuación, se presenta una comparación de las corrientes de partida.

6.3.1 Comparación de Corrientes de Partida

Al comparar las corrientes de arranque, se aprecia una reducción significativa al aumentar la ganancia ‘G’. Esta reducción conlleva varias ventajas importantes:

- **Menor calentamiento de los devanados:** Una corriente de arranque elevada, como los 1751 A mostrados en la Figura 6.18, genera un calentamiento excesivo en los devanados debido a las pérdidas por efecto Joule ($I^2 \cdot R$). Este calentamiento puede deteriorar con el tiempo la aislación de los devanados, disminuyendo la vida útil del motor. Al reducir la corriente de arranque a 1236 A (Figura 6.19), se reduce este calentamiento, reduciendo el riesgo de daños acumulativos.
- **Meno estrés mecánico:** Una corriente de arranque elevada produce un par motor considerablemente alto, lo que genera estrés mecánico significativo en el eje, los

rodamientos y otras partes del motor. Este estrés puede ocasionar un desgaste prematuro o fallos mecánicos. Al reducir la corriente de arranque, también disminuye el par de arranque, lo que reduce el estrés mecánico y las vibraciones internas.

En síntesis, la reducción de la corriente de arranque no solo mitiga el calentamiento en los devanados, lo que prolonga su vida útil, sino que también disminuye el estrés mecánico, al minimizar las fatigas y vibraciones internas, favoreciendo un funcionamiento más confiable y aumentando la durabilidad del motor.

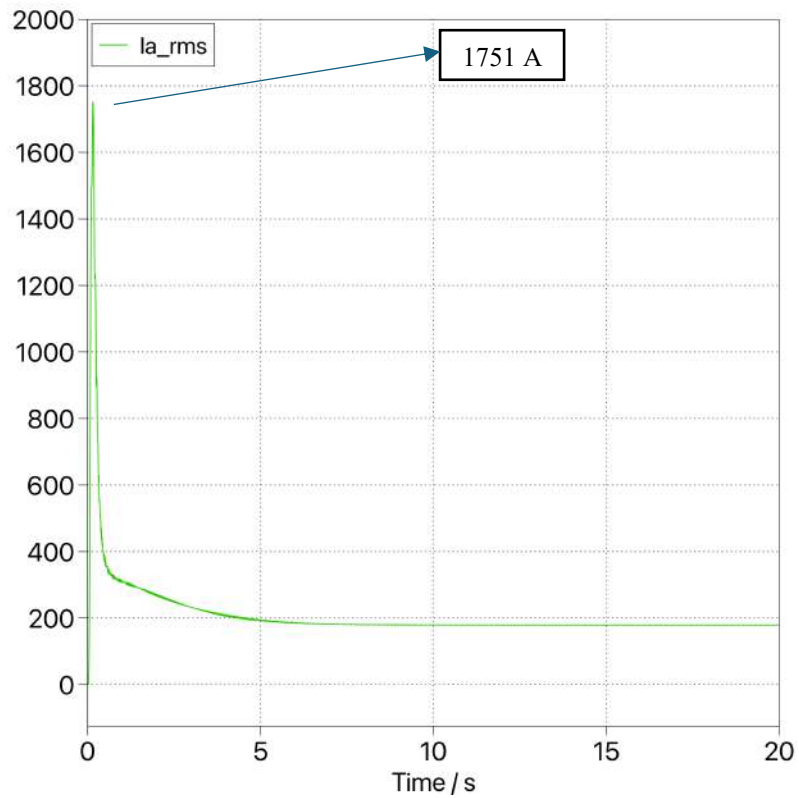


Figura 6.18: Corriente de partida sin variación de velocidad (Partida simulada actual $G=1$). Fuente: Elaboración Propia

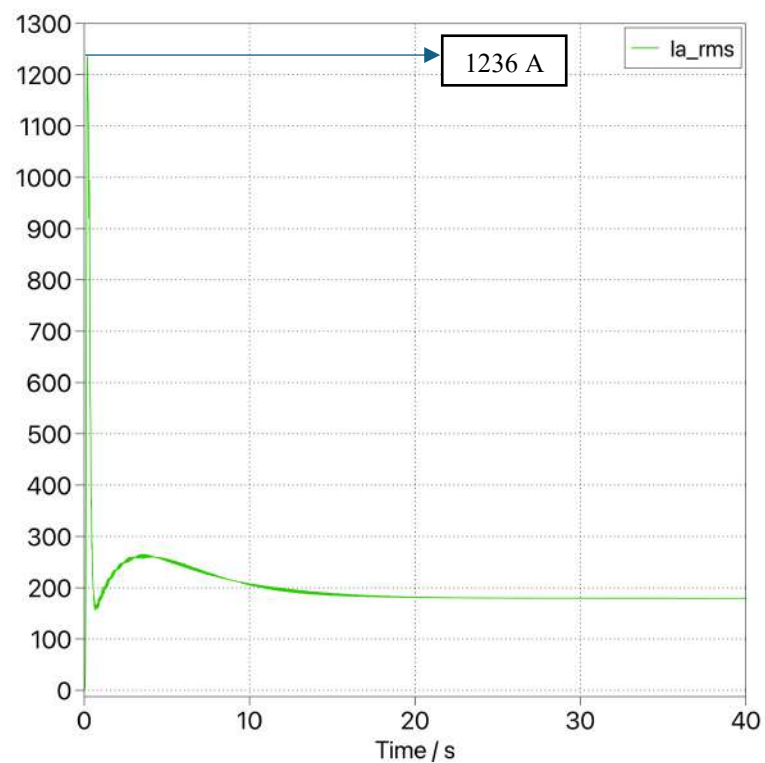


Figura 6.19: Corriente de partida con variación de velocidad (Partida simulada con $G=3$). Fuente: Elaboración Propia

6.3.2 Escenarios de Velocidad y Resultados en Lazo Abierto

En la Figura 6.20 se observan las respuestas ante diferentes escenarios de velocidad seleccionados de manera aleatoria, los cuales se caracterizan por una respuesta de segundo orden. Además, la Tabla 6.3 presenta algunas de las ganancias obtenidas para diversas velocidades del sistema en lazo abierto, mostrando la variación de las ganancias (G -Sección 5.2) y su relación inversa ($1/G$) en función de la velocidad medida en revoluciones por minuto (rpm). Estos valores permiten evaluar el comportamiento del sistema en diferentes condiciones operativas. Los resultados obtenidos son cruciales para entender el rendimiento del sistema bajo diferentes velocidades y son fundamentales para futuras decisiones de control.

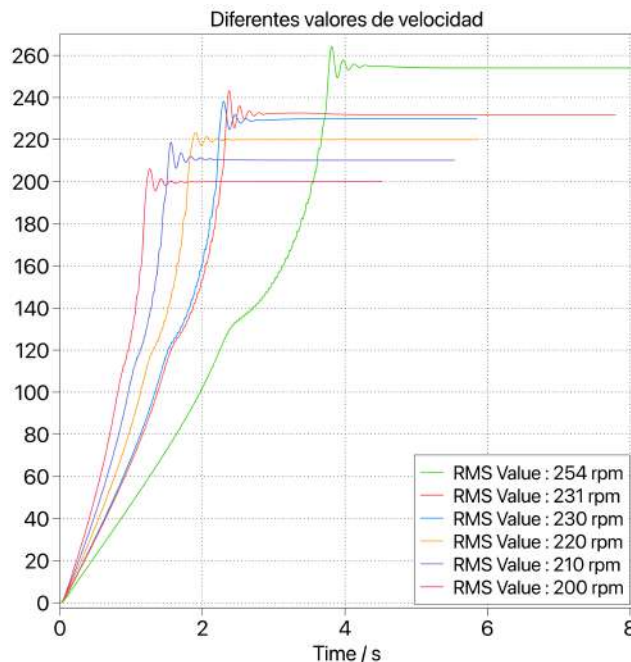


Figura 6.20: Diferentes valores de velocidad con $1/G$. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6.3: Tabla de Ganancias, Velocidades y Razón Inversa ($1/G$) . Fuente: Elaboración Propia

G	rpm	1/G
0.9086	254	1.10059432
0.996	231	1.00401606
1.003	230	0.99700897
1.049	220	0.95328885
1.098	210	0.91074681

7. Análisis Económico

7.1. Pérdidas y vulnerabilidades Molienda A0

Hasta agosto del año 2022, se cuantificaron pérdidas de 220.000 toneladas, equivalentes a 12M\$, asociados a motores de 800hp, con un promedio de 1.1ktpd en los últimos dos años, como se muestra en la Figura 7.1. Además, por concepto de reparación de motores síncronos (motores mojados, daños en ejes, ruedas polares y bobinas perforadas), se incurrió en un gasto aproximado de 3 millones de dólares por unidad.

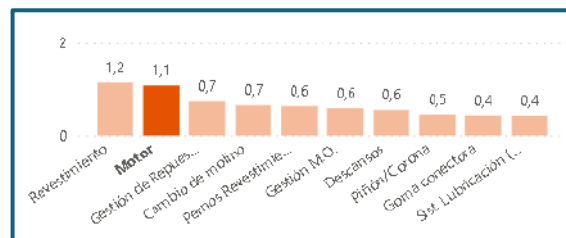


Figura 7.1: Pérdidas promedio por día en motores de 800hp (2021-2022). Fuente: Codelco, Superintendencia de Mantenimiento eléctrico

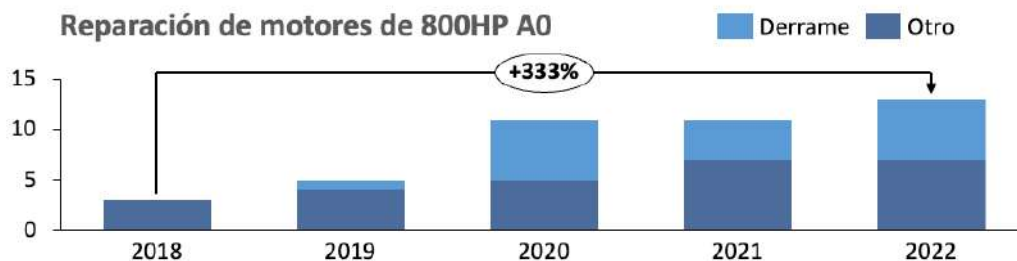


Figura 7.2: Aumento en costos de reparación de motores de 800hp. Fuente: Codelco, Superintendencia de Mantenimiento eléctrico

Las fallas ocurren por un factor clave: los motores actuales en RMs y BMs de la A0 son los originales (tras varias reparaciones y algunos nuevos) del año 1952. Sus principales fallas son: Motor mojado por derrames, daño en rotor y bobinas perforadas.

Y sus puntos críticos son: Motor vulnerable ante derrames ($\sim IP21$), partida directa a plena carga, generando alto torque mecánico en la partida, con corriente de puesta en servicio muy elevada ($\sim 10 \times I_{nom}$).



Figura 7.3: Daños en motor. Fuente: Elaboración Propia

7.1.1 Propuesta de Modernización Accionamiento de molinos A0- empresa

La propuesta incluye la implementación de un motor de inducción con protección IP55 y control de velocidad, lo que permitirá mejorar la eficiencia operativa. Aunque en este trabajo se utilizan los motores síncronos actuales, los resultados y estimaciones de costos que se presentan a continuación fueron realizados por parte de la empresa, considerando el cambio de los motores síncronos por motores de inducción.

Se estima que, actualmente, las pérdidas ascienden a 176.000 toneladas anuales, equivalentes a aproximadamente 9.6 millones de dólares, lo que representa el 80% de la pérdida acumulada hasta el 2022. Además, los costos de reparación se sitúan en 3.1 millones de dólares en servicios técnicos, lo que también corresponde al 80% del costo de reparación durante el mismo año. Por otro lado, se considera un gasto de 0.55 millones de dólares para la renovación de motores, basándose en la adquisición de un motor al año (se compraron cuatro motores en 2022).

La implementación de esta propuesta permitirá una reducción significativa de costos, estimándose en 13.3 millones de dólares anuales.

Características generales:

Tabla 7.1: Características VDF SINAMICS GH180. Fuente: Codelco, Superintendencia de Mantenimiento eléctrico

VDF SINAMICS GH180	
Tensión de alimentación	2.4 kV
Tensión de control	380 Vac
Frecuencia de red	50 Hz
Rampa de aceleración	0,5-3200 s
Eficiencia	96,5%
Número de pulsos rectificador	54

Tabla 7.2: Características Motor de inducción. Fuente: Codelco, Superintendencia de Mantenimiento eléctrico

Motor de inducción	
Potencia	1000 HP
Tensión	4000 V
Número de polos	8
Protección	IP55

Ventajas:

- Rampa de aceleración controlada en rango amplio, para evitar partidas a plena carga
- Menor cantidad de pérdidas por fatiga mecánica (eje flotante, pernos, daños en piñón/corona, rueda polar, eje de motor)
- Menor cantidad de pérdidas por fatiga eléctrica (daños en bobinado de estator)
- Capacidad de evaluar mejoras de rendimiento de tonelaje a distintas velocidades
- Bajo THD. Señal de 54 pulsos.
- Transformador incluido para alimentación de motor y de control
- Motor con IP55

A considerar:

Los molinos no cuentan con sistema de alta presión u otro para levantar molinos, se debe realizar un análisis cuidadoso de la velocidad y rampa mínima de partida para no dañar los descansos.

7.2. Costo/Beneficio

A continuación, se presentan diversos análisis de costos y beneficios para la molienda A0.

7.2.1 Modernización Accionamiento de molinos A0 (Caso conservador)

Tabla 7.3: Beneficios-Caso Conservador. Fuente: Codelco, Superintendencia de Mantenimiento eléctrico

Beneficios anuales	
Ítem	Valor escalado a 1 RM (USD\$)
Pérdidas productivas asociadas a disponibilidad de RMs	579.498
Costos de reparación para 1 RM	84.657
Costo de renovación	14.865
Beneficio en rendimiento por velocidad variable	Habilitador
Beneficio por menor fatiga en equipos mecánicos	No cuantificado
Total	679.120

Tabla 7.4: Costos del molino-Caso Conservador. Fuente: Codelco, Superintendencia de Mantenimiento eléctrico

Costos de un molino	
Ítem	Valor (USD\$)
VDF Sinamics GH180 (con repuestos)	357.800
Motor de inducción 750kW	241.600
Servicios de ingeniería y Project Management	585.800
Servicios de terreno	204.200
Pérdida productiva durante montaje	---
Total	1.389.400

$$\text{Payback} = \frac{\$1.389.400}{\$679.120} = 2.04 \text{ años}$$

7.2.2 Modernización Accionamiento de molinos A0 (Caso favorable)

Tabla 7.5: Beneficios-Caso Favorable. Fuente: Codelco, Superintendencia de Mantenimiento eléctrico

Beneficios anuales	
Ítem	Valor escalado a 1 RM (USD\$)
Pérdidas productivas asociadas a disponibilidad de RMs	724.372
Costos de reparación para 1 RM	0
Costo de renovación	550.000
Beneficio en rendimiento por velocidad variable	Habilitador
Beneficio por menor fatiga en equipos mecánicos	No cuantificado
Total	1.274.372

Tabla 7.6: Costos del molino-Caso Favorable. Fuente: Codelco, Superintendencia de Mantenimiento eléctrico

Costos de un molino	
Ítem	Valor (USD\$)
VDF Sinamics GH180 (con repuestos)	357.800
Motor de inducción 750kW	241.600
Servicios de ingeniería y Project Management	585.800
Servicios de terreno	204.200
Pérdida productiva durante montaje	---
Total	1.389.400

$$\text{Payback} = \frac{\$1.389.400}{\$1.274.372} = 1.09 \text{ años}$$

7.2.3 Modernización Accionamiento de molinos A0 (Caso con mejora del 3%)

Tabla 7.7: Beneficios-Caso con aumento del 3% en rendimiento. Fuente: Codelco, Superintendencia de Mantenimiento eléctrico

Beneficios anuales	
Ítem	Valor escalado a 1 RM (USD\$)
Pérdidas productivas asociadas a disponibilidad de RMs	579.498
Costos de reparación para 1 RM	84.657
Costo de renovación	14.865
Beneficio en rendimiento por velocidad variable*	2.008.800
Beneficio por menor fatiga en equipos mecánicos	No cuantificado
Total	2.687.900

Tabla 7.8: Costos del molino-Caso con aumento del 3% en rendimiento. Fuente: Codelco, Superintendencia de Mantenimiento eléctrico

Costos de un molino	
Ítem	Valor (USD\$)
VDF Sinamics GH180 (con repuestos)	357.800
Motor de inducción 750kW	241.600
Servicios de ingeniería y Project Management	585.800
Servicios de terreno	204.200
Pérdida productiva durante montaje	---
Total	1.389.400

$$Payback = \frac{\$1.389.400}{\$2.687.900} = 0.516 \text{ años}$$

La modernización del accionamiento de los molinos A0 presenta diferentes niveles de beneficios y el periodo de retorno según el escenario considerado. En el Caso Conservador, se estima un payback de 2.04 años, lo que sugiere un retorno de inversión moderado. En el Caso Favorable, el payback se reduce a 1.09 años, reflejando un beneficio significativamente mayor debido a la eliminación de costos de reparación. Finalmente, el Caso con Mejora del 3% en Rendimiento es el más ventajoso, con un payback de solo 0.516 años y beneficios anuales que alcanzan los 2.687.900 USD, lo que resalta la importancia de mejorar el rendimiento para maximizar los beneficios.

Cabe destacar que, aunque las estimaciones están basadas principalmente en el uso de motores de inducción, los costos proyectados también incluyen en la evaluación de la topología multinivel seleccionada para el variador de frecuencia. Finalmente, cada escenario debe ser evaluado en función de la capacidad de la empresa para asumir riesgos y su situación actual. Sin embargo, los resultados sugieren que la modernización del accionamiento puede ser una estrategia eficaz para mejorar el rendimiento en la molienda A0 (Sección 7.2).

8. Conclusiones

8.1. Sumario

Este estudio abordó la selección y evaluación de un sistema de variación de velocidad aplicado al proceso de molienda convencional A0 en la planta concentradora. Para ello, se realizó un levantamiento detallado de la situación actual, recopilando información sobre el estado de los sistemas de accionamiento existentes y sus condiciones operativas.

Se desarrollaron simulaciones del sistema de accionamiento vigente, las cuales incluyeron escenarios de operación y condiciones de arranque. Posteriormente, se identificaron y analizaron diversas topologías de accionamiento de velocidad variable, evaluando su potencial aplicación en el molino de molienda convencional.

Como parte del trabajo, se formularon recomendaciones prácticas orientadas a la selección e implementación de sistemas de velocidad variable, considerando tanto los requisitos técnicos como los desafíos operativos del sector.

Las limitaciones del estudio incluyeron la necesidad de respetar los límites de velocidad operativa para evitar daños en el sistema y garantizar una lubricación hidrodinámica adecuada como medida preventiva ante posibles fallas mecánicas. Estos factores son esenciales para preservar la integridad del equipo y asegurar la viabilidad de la implementación.

8.2. Conclusión

El presente estudio ha permitido establecer conclusiones significativas respecto a la implementación del sistema de variación de velocidad y su impacto en la operación minera, destacando tres aspectos fundamentales:

En primer lugar, la topología multinivel demuestra ser efectiva para lograr la variación de velocidad deseada. Sin embargo, el éxito de esta implementación está limitado a la revisión y consideración de los límites de velocidad operacionales, así como garantizar una lubricación hidrodinámica (cuña hidráulica) adecuada. Ambos factores son esenciales para mantener la integridad del sistema y prevenir fallas operativas.

En segundo lugar, el análisis del comportamiento durante el arranque revela la necesidad de implementar un control adicional sobre el torque de partida. Esta medida puede materializarse a través de dos alternativas: la implementación de un sistema de control específico para minimizar las variaciones durante la partida, o la instalación de un sistema de medición de velocidad mediante tacómetro que permita la retroalimentación del sistema de control para ejecutar el control vectorial efectivo.

Por último, se ha identificado que el impacto de la implementación en las operaciones subsiguientes constituye un factor crítico. Aunque la topología seleccionada permite cumplir los objetivos de variación de

velocidad, exige un control riguroso de los parámetros operacionales. La adecuada lubricación hidrodinámica y el cumplimiento estricto de los rangos de velocidad definidos emergen como condiciones fundamentales para asegurar la integridad y eficiencia del sistema en su totalidad.

Además, el análisis de costo/beneficio realizado en diferentes escenarios de modernización del accionamiento de la molienda A0 demuestra la viabilidad económica de esta implementación. En particular, el caso con una mejora del 3% en Rendimiento se destaca como el más favorable, con un payback de solo 0.516 años, lo que resalta la importancia de mejorar el rendimiento para maximizar los beneficios anuales. Si bien las estimaciones se centran en los motores de inducción, también se incluye en los costos proyectados la evaluación de la topología multinivel seleccionada. Sin embargo, es fundamental considerar con prudencia estas estimaciones, dado que no es posible prever, en el corto plazo, el grado de mejora en el tratamiento del mineral tras la instalación de esta topología.

En conclusión, la combinación de un sistema de variación de velocidad eficiente, un control adecuado del torque de partida y una evaluación económica favorable proporciona un enfoque integral para optimizar la operación minera, garantizando no solo la eficiencia operativa, sino también la sostenibilidad financiera del proyecto.

8.3. Recomendaciones

Se recomienda implementar un sistema de limitación de velocidad (límites mínimos y máximos) para proteger el motor y garantizar que no se excedan los rangos operativos seguros. Asimismo, es crucial evaluar el sistema de lubricación actual, considerando el uso de lubricantes con aditivos de extrema presión (EP) o implementar un sistema de lubricación forzada, lo que mejorará la protección contra el desgaste y extenderá la vida útil del equipo. Además, se sugiere optimizar la velocidad operativa ajustándola en función de la carga y las condiciones específicas del molino, evitando velocidades excesivamente bajas que puedan comprometer la integridad del motor y del equipo.

Es importante integrar la variable velocidad en las pantallas de operación y en el sistema de control PROFIT, lo que permitirá mejorar las condiciones operativas y mejorar el rendimiento general del sistema. Para molinos de tecnología antigua, se recomienda evaluar la instalación de un variador de frecuencia (VDF) y la sustitución del motor por uno de alta eficiencia, con el fin de mejorar el control del proceso y la eficiencia energética. Asimismo, se deben realizar inspecciones periódicas del estado de los revestimientos internos y del sistema de carguío de barras, asegurando que los niveles de potencia y el rendimiento del molino se mantengan en niveles óptimos.

También es fundamental. Controlar las condiciones ambientales en las salas eléctricas, gestionando la polución, la temperatura y la presurización para asegurar la durabilidad y el desempeño del equipo.

8.4. Trabajos Futuros

Se recomienda evaluar la implementación de inversores fuente de corriente (CSI). Adicionalmente, es fundamental investigar la aplicabilidad de inversores de punto neutro (NPC) en el contexto del proceso minero, en términos de eficiencia y confiabilidad. Asimismo, se considera de gran importancia explorar la integración de motores de imanes permanentes y su potencial para mejorar la eficiencia energética y el rendimiento global del sistema. Por último, se sugiere evaluar la viabilidad de migrar de la molienda convencional a un sistema de molienda SAG complementado con un molino de bolas, con el objetivo de mejorar la eficiencia del proceso.

Referencias

- [1] J. Holtz, G. da Cunha, N. Petry, y P. J. Torri, "Control of large salient-pole synchronous machines using synchronous optimal pulsewidth modulation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 6, pp. 3372-3379, 2014.
- [2] C. R. Falck, "Estudio y análisis del proceso de sincronización de los motores síncronos de polos salientes", Memoria de Título, Ing. Civil Eléctrica, Depto de Ing. Eléctrica, Univ. de Concepción, Concepción, Chile, 1983.
- [3] P. P. Castro, "Estimador robusto de carga compactada en molinos SAG", Memoria de Título, Ing. Civil Eléctrica, Depto de Ing. Eléctrica, Univ. de Concepción, Concepción, Chile, 2014.
- [4] J. R. Espinoza, *Apuntes Convertidores Estáticos Multinivel*, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- [5] S. B. Dewan y M. Agu, "A current source inverter for UPS," *INTELEC-1979 International Telecommunications Energy Conference*, 1979, pp. 342-349.
- [6] Y. Shakweh y E. A. Lewis, "Assessment of medium voltage PWM VSI topologies for multi-megawatt variable speed drive applications," *30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*.
- [7] Y. Shakweh y P. Aufleger, "Multi-megawatt, medium voltage, PWM, voltage source, sine-wave-output converter for industrial drive applications," *Seventh International Conference*, 1998.
- [8] J.-S. Lai y F. Z. Peng, "Multilevel converters - A new breed of power converters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 3, pp. 509-517, May/Jun. 1996.
- [9] V. Stefanovic y S. Vukoswic, "Space-vector PWM voltage control with optimized switching strategy," *Conf. Rec. IEEE-IAS'92*, 1992, pp. 1025-1032.
- [10] M. Ronkowski, K. Iwan, y R. Szczesny, "Simulation of converter-synchronous machine drives in normal and fault operation," *1993 Fifth European Conference on Power Electronics and Applications*, 1993, pp. 177-178.
- [11] L. Komma, A. M. Karlapudy, y G. Saraswathi, "State feedback controller stratagem for permanent magnet synchronous motor drive," *2022 IEEE North Karnataka Subsection Flagship International Conference (NKCon)*, Vijaypur, India, 2022, pp. 1-6.
- [12] M. Poorfakhraei, M. Narimani, y A. Emadi, "A review of multilevel inverter topologies in electric vehicles: Current status and future trends," *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 2, pp. 155-170, 2021.

- [13] J. I. Leon, S. Vazquez, y L. G. Franquelo, "Multilevel converters: Control and modulation techniques for their operation and industrial applications," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2066–2081, Nov. 2017.
- [14] N. S. Hasan, N. Rosmin, D. A. A. Osman, y A. H. Musta'amal, "Reviews on multilevel converter and modulation techniques," *Renewable Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 163–174, Dec. 2017.
- [15] M. Wang, Y. Hu, W. Zhao, Y. Wang, y G. Chen, "Application of modular multilevel converter in medium voltage high power permanent magnet synchronous generator wind energy conversion systems," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 6, pp. 824–833, Jul. 2016.
- [16] P. R. Fernández Urrea, "Análisis de Molienda SAG", Memoria de Título, Ing. Civil Eléctrica, Depto. de Ing. Eléctrica, Univ. de Concepción, Concepción, Chile, 2021.
- [17] F. F. Guerra, "Análisis Multivariable para la Gestión Operativa para Molienda Línea SAG, CODELCO División Andina", Memoria de Título, Doctorado en Ingeniería, Pontificia Univ. Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile, 2015.
- [18] T. R. Von Ow, "*Molienda—alto consumo de energía y altos requerimientos de mantención, cómo superar los desafíos mediante el uso de convertidores de frecuencia.*"
- [19] R. Andrade-Cedeno y J. A. Pérez-Rodríguez, "Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable," *Dominio de las Ciencias*, vol. 7, no. 6, pp. 44–62, 2021.
- [20] B. Yznaga, B. Corral, y A. Costa, "Inversores multinivel para aplicaciones de gran potencia. Estado del arte," *Energética*, vol. 25, no. 3, 2004.
- [21] G. M. Martínez, "Diseño e implementación de un inversor multinivel, de cinco niveles", Tesis de Maestría, Depto. de Ing. Eléctrica, Univ. Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, 2013.
- [22] N. P. Schibli, T. Nguyen, y A. C. Rufer, "A three-phase multilevel converter for high-power induction motors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 13, no. 5, pp. 978–986, Sep. 1998.
- [23] G. Deshmukh, P. Chaturvedi, y V. Rajderkar, "Single phase Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter Topology," *2022 International Conference on Futuristic Technologies (INCOFT)*, 2022, pp. 1–6.
- [24] P. S. Bhimbra, *Power Electronics Handbook*, 5ª ed., Florida Polytechnic University, USA: Academic Press, Pearson, Prentice-Hall y Cengage, 2012.

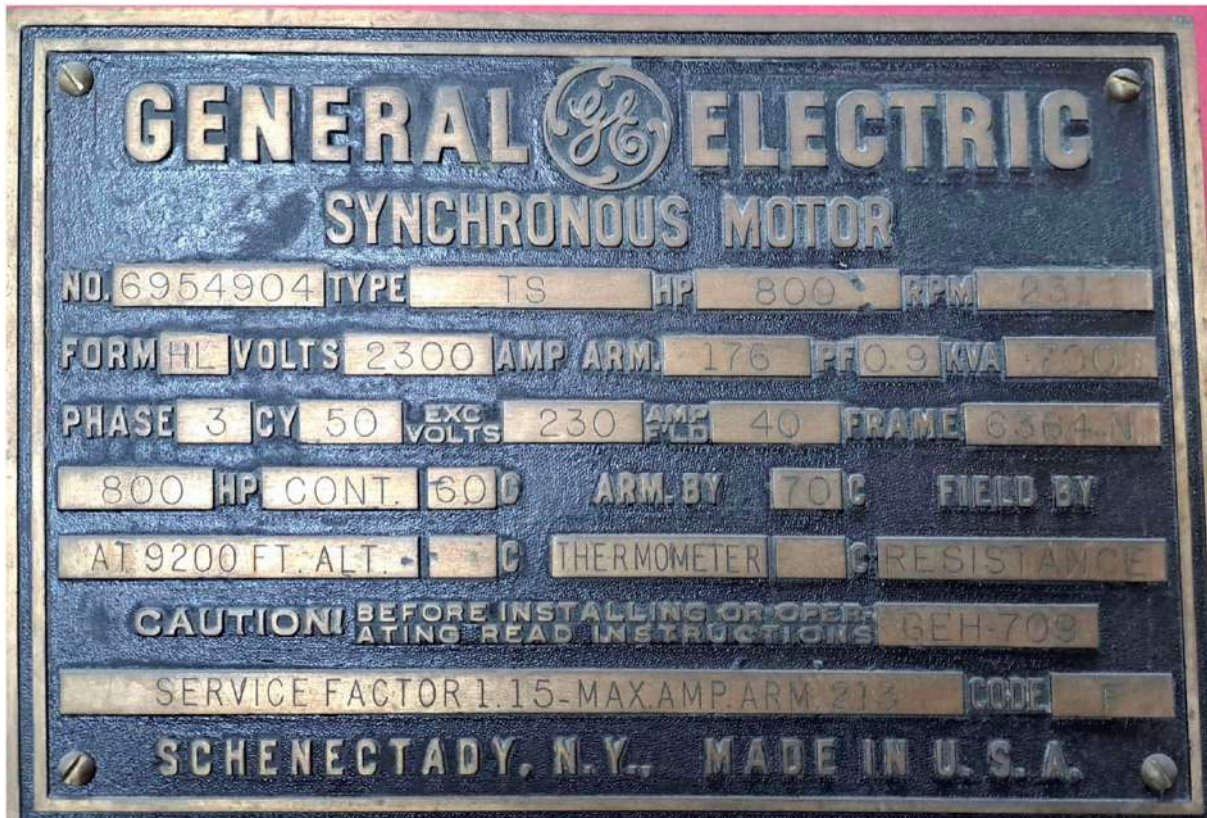
- [25] Z. Du, L. M. Tolbert, J. N. Chiasson, y B. Özpineci, “A Cascade Multilevel Inverter Using a Single DC Source,” *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '06*, 2006, pp. 426–430.
- [26] Kiruthika, T. Ambika, y R. Seyezhai, “Simulation of cascaded multilevel inverter using hybrid PWM technique,” *International Journal of Systems, Algorithms & Applications*, vol. 1, no. 1, p. 18, 2011.
- [27] Álzate, D. M. Yarce, y M. G. Valencia, “Control de velocidad mediante relación voltaje-frecuencia,” *Scientia et Technica*, vol. 3, no. 49, pp. 19–24, 2011.
- [28] R. F. Schiferl y C. M. Ong, “Six Phase Synchronous Machine with AC and DC Stator Connections, Part I: Equivalent Circuit Representation and Steady-State Analysis,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 8, pp. 2685–2693, 1983.
- [29] V. D. Prasad Ruddy y J. V. G. Rama Rao, “Modeling, Simulation of Single Phase Multilevel Inverter for Different Loads by Using Various Switching Topologies,” *Journal of Emerging Trends in Engineering and Development*, vol. 4, no. 2, pp. 402–413, 2012.
- [30] P. Ponce y J. Sampé, *Máquinas Eléctricas y Técnicas Modernas de Control*, Alfaomega, 2008.
- [31] S. Kouro et al., “Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 8, pp. 2553–2580, Aug. 2010.
- [32] Larenas García, “Estudio de accionamiento cicloconvertidor-motor sincrónico en anillo para la gran minería,” Memoria de Título, Ing. Civil Eléctrica, Univ. de Concepción, Concepción, Chile, 1989.
- [33] S. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, 5ª ed., McGraw-Hill, 2012.
- [34] J. Fraile Mora, *Máquinas Eléctricas*, 6ª ed., McGraw-Hill Interamericana, Madrid, España, 2008.
- [35] M. H. Rashid y G. Sánchez García, *Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*, 2ª ed., Prentice Hall, 1995.

A.1 Diagrama eléctrico Concentradora A-0 y A-1



Anexo B. Datos de placa motor

B.1 Parámetros de placa del motor



Anexo B.1: Datos de placa motor síncrono

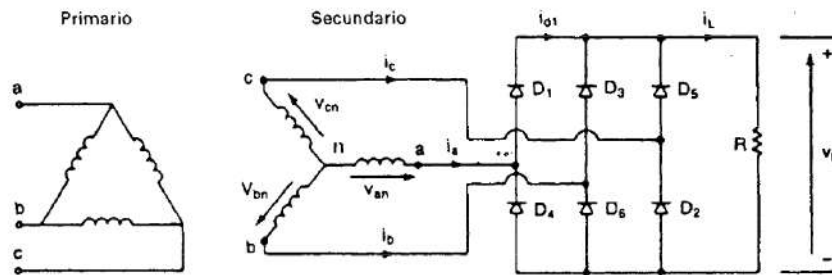
Anexo C. Parámetros p.u y Rectificador trifásico

C.1 Parámetros del motor

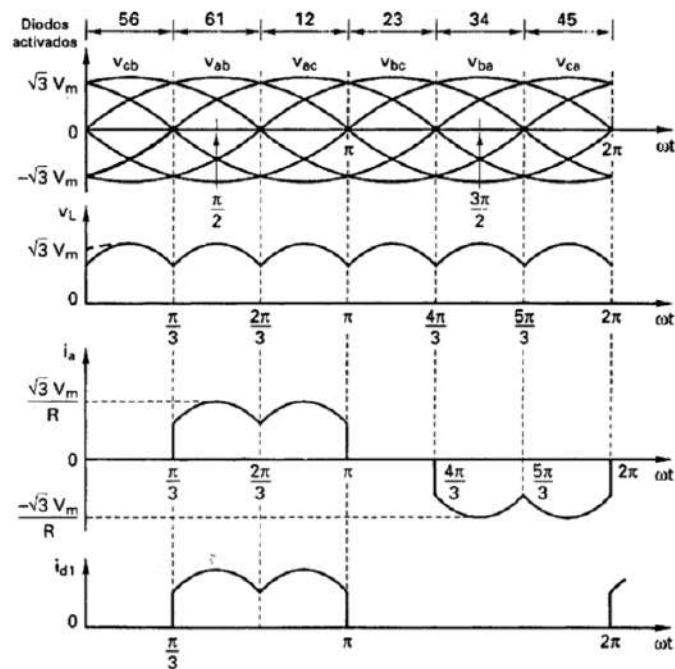
Reactancia sincrónica eje directo:	$x_d=1.17$
Reactancia sincrónica eje de cuadratura:	$x_q=0.75$
Reactancia propia del enrollado de campo:	$x_{ffd}=1.297$
Reactancia propia en el eje directo del circuito equivalente del enrollado de partida:	$x_{11d}=1.122$
Reactancia propia en el eje de cuadratura del circuito equivalente del enrollado de partida:	$x_{11q}=0.725$
Reactancia mutua entre la fase "A" y el enrollado de campo:	$x_{afd}=1.03$
Reactancia mutua entre la fase "A" y el circuito equivalente del enrollado de partida en el eje directo:	$x_{ald}=1.03$
Reactancia mutua entre la fase "A" y el circuito equivalente del enrollado de partida en el eje de cuadratura:	$x_{alq}=0.61$
Reactancia mutua entre el enrollado de campo y el circuito equivalente del enrollado de partida en el eje directo:	$x_{alq}=1.03$
Resistencia de armadura:	$x_{fld}=0.01221$
Resistencia del enrollado de campo:	$R_{fd}=0.00145$
Resistencia de descarga:	$R_{des}=0.02855$
Resistencia del circuito equivalente del enrollado de partida en el eje directo:	$R_{11d}=0.0302$
Resistencia del circuito equivalente del enrollado de partida en el eje de cuadratura:	$R_{11q}=0.039$
Voltaje de alimentación del enrollado de campo:	$V_{fd}=0.0015$
Constante de tiempo del circuito de campo:	$\tau=2.37(\text{seg})$

C.2 Rectificador trifásico en puente

Un rectificador trifásico en puente como el que se muestra en el Anexo C.1 es de uso común en aplicaciones de alta energía. Este es un rectificador de onda completa. Puede operar sin o con transformador y genera componentes ondulatorias de seis pulsos en el voltaje de salida. Los diodos están enumerados en orden de secuencia de conducción, cada uno de ellos conduce durante 120° . La secuencia de conducción de los diodos es 12, 23, 34, 45, 56 y 61. Las formas de onda y los tiempos de conducción de los diodos aparecen en el Anexo C1.2 [34].



Anexo C.1: Rectificador puente trifásico



Anexo C1.2 : Formas de onda y tiempos de conducción de los diodos

Anexo D. Código variación de velocidad en lazo abierto

D.1 Resultados en lazo abierto

Para realizar una variación en lazo abierto, se generó un polinomio de cuarto grado a partir de los datos tabulados en la sección 6.2.4. Con los datos obtenidos de esta tabla, se llevó a cabo una regresión polinómica utilizando el lenguaje de programación Python. A continuación, se presenta el código de la utilizado para el ajuste polinómico de cuarto orden.

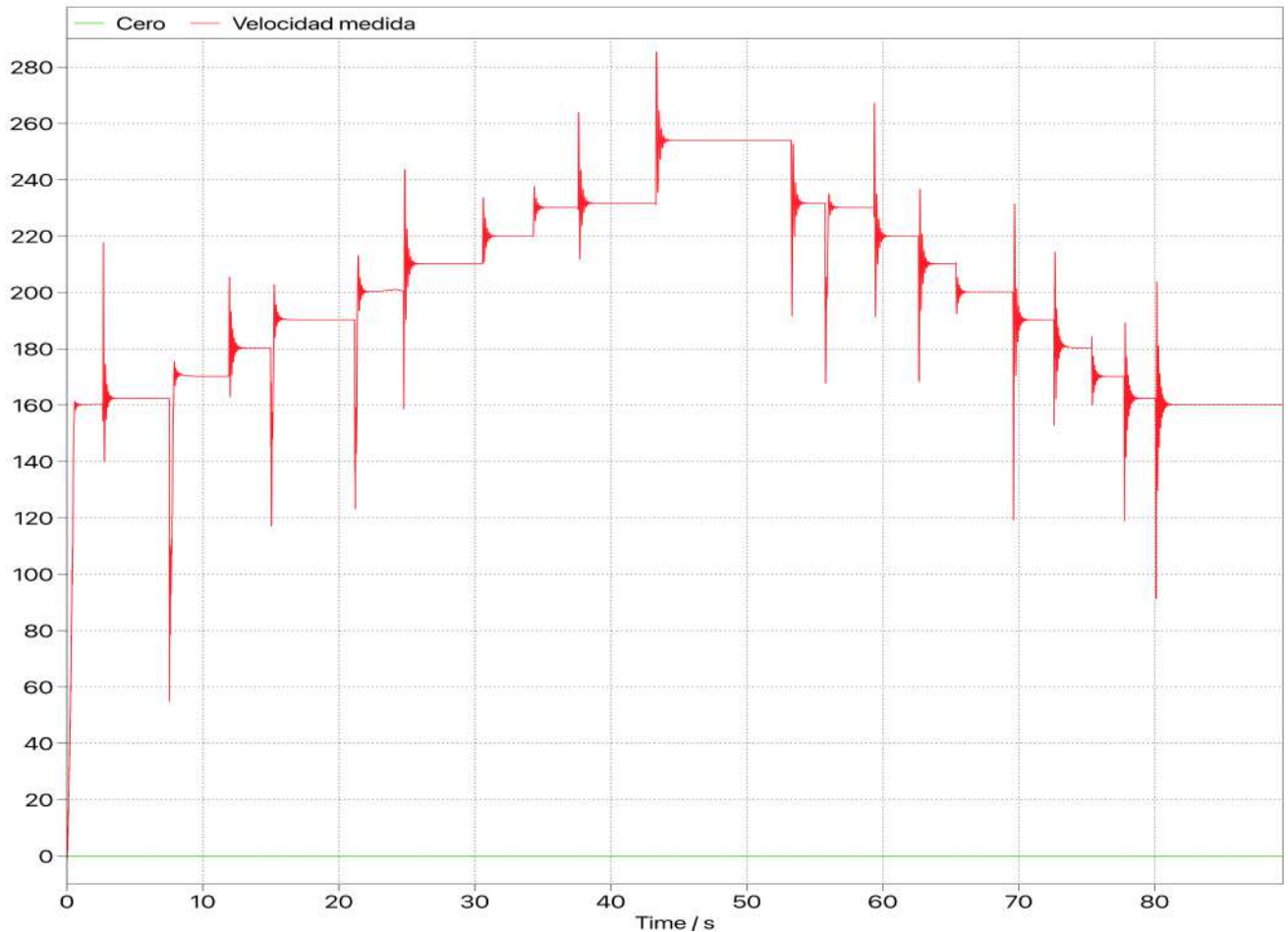
```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Se Definen los arrays de datos obtenidos
g = np.array([0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0])
rpm = np.array([256, 231, 210, 192, 178, 165, 154, 144, 136, 128, 121, 115])
# Función para ajustar y mostrar ecuaciones polinómicas de varios grados
def fit_polynomial(rpm, g, degree):
    coefficients = np.polyfit(rpm, g, degree)
    poly_eq = " + ".join([f"{coeff} * rpm**{degree - i}" for i, coeff in enumerate(coefficients)])
    print(f"La ecuación de grado {degree} es: g = {poly_eq}")
    # Función para obtener el valor de g dado un valor de rpm usando la ecuación polinómica
    def get_g_value(rpm_value):
        return sum([coeff * rpm_value**(degree - i) for i, coeff in enumerate(coefficients)])
    return get_g_value
# Ajuste y visualización para el polinomio de grado 4
degree = 4
get_g_value = fit_polynomial(rpm, g, degree)
rpm_range = np.linspace(min(rpm), max(rpm), 100)
g_fit = [get_g_value(rpm_val) for rpm_val in rpm_range]
plt.scatter(rpm, g, color='red', label='Datos')
plt.plot(rpm_range, g_fit, label=f'Ajuste polinómico grado {degree}')
plt.xlabel('RPM')
plt.ylabel('g')
plt.legend()
plt.show()
```

Este código permite ajustar los datos experimentales a un modelo, proporcionando una representación gráfica de la relación entre la velocidad y el parámetro ‘G’, que facilita el análisis y la interpretación de la variación en lazo abierto en el sistema.

Como resultado de realizar la variación de velocidad mediante escalones, se generan corrientes de arranque abruptas, lo que provoca una distorsión entre el setpoint y el valor de referencia, como se observa en el Anexo E.2. Sin embargo, la ecuación polinómica utilizada permite realizar ajustes en distintas velocidades.

D.2 Resultado Simulación

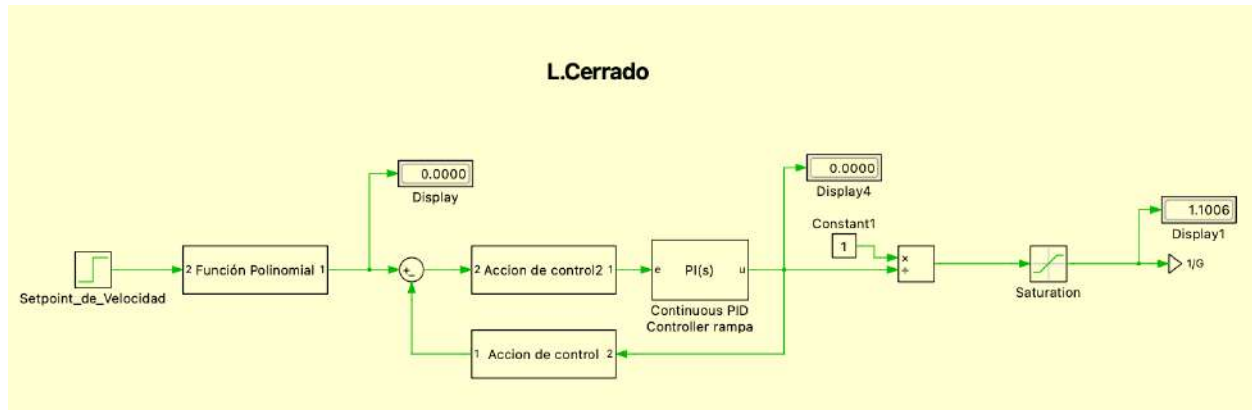


Anexo D.2 : Variación de velocidad en lazo abierto

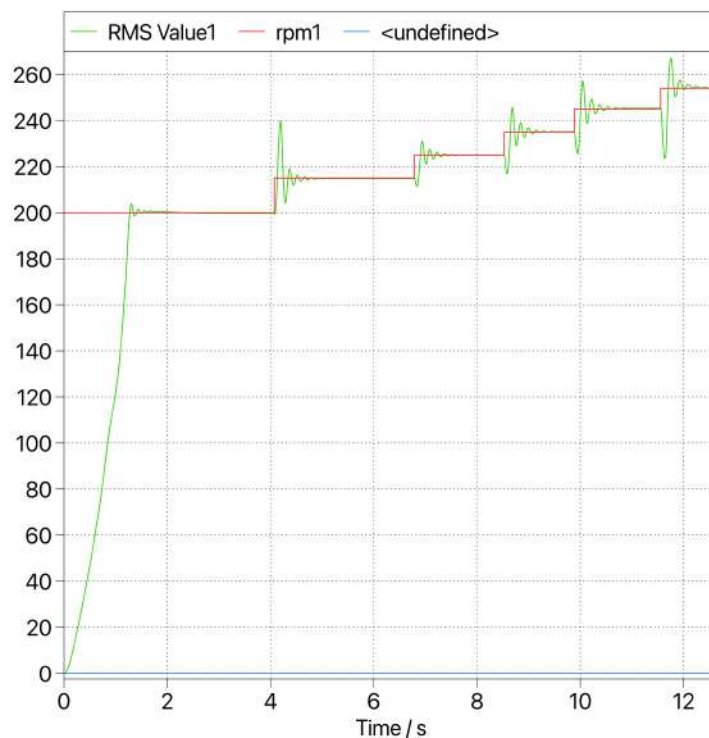
Anexo E. Variación de velocidad en lazo cerrado

E.1 Resultados en Lazo Cerrado

A diferencia del lazo abierto, se implementa un control PI para sintonizar el controlador y mejorar la respuesta de la función polinómica. Cabe destacar que el control se aplica a la modulación del inversor multinivel, lo que permite gestionar la corriente estática al motor.



Anexo E.1: Diagrama de Lazo Cerrado para la variación de velocidad



Anexo E1.2: Variación de velocidad en lazo cerrado

Anexo F. Modelo Torque de carga

F.1 Cálculos de torque y momentos de inercia

VOLTAJE	CORRIENTE	VELOCIDAD	EFICIENCIA	POTENCIA	FACTOR DE POT	TORQUE NOMINAL	TORQUE MAX 200%	TORQUE CARGA	POTENCIA
(V)	(A)	RPM	%	KW	%	Nm	Nm	Nm	Kwatt
2300	176	231	95	597	0.9	24673	49346	27287	660

Anexo F.1 : Torques de carga gravitacional

		(ft)	(m)	RADIO (m)	(Kgm^2)
CILINDRO	DIAMETRO EXTERIOR MANTO	11.6	3.54	1.77	2273
	DIAMETRO INTERIOR MANTO	9.4	2.87	1.43	
	LARGO MANTO	12.0	3.66	3.66	
	VOLUMEN			12.33	
TAPA DE ALIMENTACION	DIAMETRO EXTERIOR	11.6	3.54	1.77	178
	DIAMETRO INTERIOR	4.0	1.22	0.61	
	ESPESOR	1.0	0.30	0.30	
	VOLUMEN			2.64	
TAPA DE DESCARGA	DIAMETRO EXTERIOR	11.6	3.54	1.77	178
	DIAMETRO INTERIOR	4.0	1.22	0.61	
	ESPESOR	1.0	0.30	0.30	
	VOLUMEN			2.64	

Anexo F.2 : Momentos de inercia

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA
RESUMEN DE MEMORIA DE TITULO**

Departamento	: Departamento de Ingeniería Eléctrica
Carrera	: Ingeniería civil electrónica
Nombre del memorista	: Gonzalo Ignacio Oyanadel Morgado
Título de la memoria	: Selección y Evaluación de Topologías de Accionamiento de Velocidad Variable en Molinos de Molienda Convencional Codelco, División Chuquicamata
Fecha de la presentación oral	: 22/01/2025
Profesor guía	: José Espinoza Castro
Profesor revisor	: Alejandro Rojas N. – Manuel Valenzuela L.
Profesional supervisor externo	: Eric Larenas G.
Concepto	:
Calificación	:

Resumen (máximo 200 palabras)

Este documento estudia la implementación de un sistema de variación de velocidad en la molienda convencional A0 de la división Chuquicamata de Codelco, analizando su influencia en la eficiencia operativa y los costos asociados en la minería. Se examinan diferentes topologías de accionamiento, destacando su capacidad para mejorar el control de la velocidad. El estudio identifica que la efectividad de la topología seleccionada está condicionada por factores como los límites de velocidad operacionales y la adecuada lubricación hidrodinámica. Además, se reconoce la importancia de un control eficiente del torque durante el arranque para minimizar el impacto negativo en el sistema. Finalmente, a través de un análisis de costo/beneficio en distintos escenarios de modernización propuestos por la empresa, se concluye que la opción de mejorar el rendimiento en un 3% es la más ventajosa, con un retorno de inversión relativamente rápido. Sin embargo, se subraya la necesidad de cautela al interpretar estas estimaciones, ya que las mejoras a corto plazo son inciertas.
