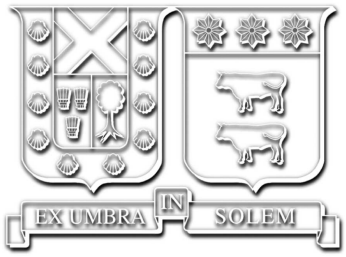
Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Valparaíso, Chile



Análisis técnico-económico para la implementación de partidores suaves a motores de media tensión en la Central Termoeléctrica Nehuenco ante la contingencia del ciclado

Amparo Muriel Fuentes Arancibia

2026

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniera Electricista
Profesor Guía:
Dr.-Ing Margarita Norambuena (UTFSM)

Profesor Correferente:
Dr.-Ing Jorge Andrés Juliet Avilés (UTFSM)

Comisión:
Dr.-Ing Margarita Norambuena (UTFSM)
Dr.-Ing Jorge Andrés Juliet Avilés (UTFSM)
Alain Massicot Sepulveda (Colbun S.A)

Valparaíso, abril, 2026.

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Análisis técnico-económico para la implementación de partidores suaves a motores de media tensión en la Central Termoeléctrica Nehuenco ante la contingencia del ciclado.

Nombre del candidato(a): Amparo Muriel Fuentes Arancibia

Carrera / Grado: Ingeniería Eléctrica

Campus: Casa Central **Departamento:** Ingeniería Eléctrica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Margarita Norambuena Valdivia, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

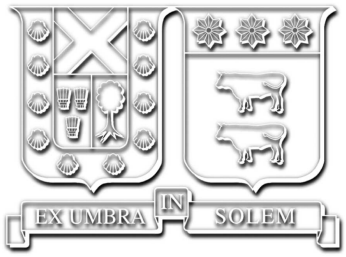
Fecha: 10-04-2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 10-04-2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Valparaíso, Chile



Análisis técnico-económico para la implementación de partidores suaves a motores de media tensión en la Central Termoeléctrica Nehuenco ante la contingencia del ciclado

Amparo Muriel Fuentes Arancibia

2026

"No importa que tan lento vayas mientras no te detengas"
— Confucio

Agradecimientos

Este trabajo está dedicado, en primer lugar, a mis padres, quienes han estado a mi lado a lo largo de toda mi vida, brindándome un apoyo incondicional y acompañándome en cada etapa de este proceso. Gracias por darme la educación y enseñarme los valores que permitieron formarme tanto personal como académicamente, este logro es tanto de ustedes como mío.

A mi hermana, por su cariño constante y por ser una fuente de ánimo incluso en los momentos más difíciles.

Así mismo, agradezco a toda mi familia, a quienes me han acompañado y apoyado durante toda mi vida y a quienes me cuidan desde el cielo, sé que están orgullosos de mí, un beso al cielo.

Un agradecimiento especial a mi mejor amiga, Fernanda, quien, a pesar de la distancia estuvo siempre presente, brindándome apoyo constante a través de llamadas y mensajes, demostrando una amistad incondicional a lo largo de todo este proceso.

Agradezco sinceramente a todas las personas que conocí durante mi etapa universitaria, con quienes compartí extensas jornadas de estudio, momentos de frustración y también de alegría. Sin duda, fue un camino largo , desafiante y exigente, algo que comprendimos desde los primeros días. De esta etapa, sin duda, lo más valioso que me llevo son las amistades que formé.

A mi profesora guía, Margarita, expreso mi más sincero agradecimiento por su permanente disposición, orientación y apoyo durante el desarrollo de esta investigación. Su acompañamiento, sus oportunas observaciones y el seguimiento constante de mis avances fueron fundamentales para la concreción de este trabajo.

Finalmente, agradezco a Colbun S.A, en especial a la central Nehuenco, a sus trabajadores, a don Cristian y a Alain, gracias por la cordial acogida y la valiosa oportunidad de desarrollar este tema de memoria. Agradezco especialmente la disposición y el apoyo brindado durante todo el proceso de investigación, los cuales fueron clave para el desarrollo.

Índice de Contenidos

Índice de Contenidos I

Índice de Figuras IV

Índice de Tablas VI

Resumen 1

1. Introducción 2
- 1.1. Contexto y justificación . . . 2
  - 1.1.1. Descripción del proyecto . . . 3
- 1.2. Objetivos . . . 5
  - 1.2.1. Objetivo general . . . 5
  - 1.2.2. Objetivos específicos . . . 5

2. Marco Teórico 6
- 2.1. Máquina de inducción . . . 6
  - 2.1.1. Modelo estacionario de una máquina de inducción . . . 6
  - 2.1.2. Principio de funcionamiento . . . 8
  - 2.1.3. Rotor y estator . . . 9
  - 2.1.4. Método de arranque en motores de inducción . . . 10
  - 2.1.5. Corriente de arranque . . . 11
  - 2.1.6. Potencias y pérdidas . . . 13
- 2.2. Desgaste y vida útil en motores de inducción . . . 14
- 2.3. Partidor suave . . . 16
  - 2.3.1. Características . . . 17
  - 2.3.2. Esquema básico de diseño de un partidor suave . . . 17
  - 2.3.3. Principio de funcionamiento . . . 18
  - 2.3.4. Tiristores . . . 19
  - 2.3.5. Control angular . . . 19
  - 2.3.6. Ventajas y desventajas . . . 20

3. Análisis del comportamiento dinámico y mecánico del motor eléctrico 21
- 3.1. Datos de motores analizados . . . 21
- 3.2. Operación de motores y brechas . . . 25
  - 3.2.1. Arranques y detenciones . . . 26
    - 3.2.1.a. Análisis del incremento anual de arranques . . . 28
  - 3.2.2. Corrientes inrush . . . 28

3.2.3. Temperatura en los cojinetes y devanados durante los arranques . . 30
3.3. Comparación de arranques mediante simulación 31
3.3.1. Descripción de la simulación 31
3.3.2. Carga 33
3.3.3. Escenario 1: Partida directa 33
3.3.4. Escenario 2: Partida con partidor suave 36
3.4. Análisis de la reducción de vida útil 41
3.4.0.a. Severidad térmica 41
3.4.0.b. Pérdidas de cobre 46
3.4.0.c. Horas equivalentes de operación nominal 50
3.4.0.d. Horas equivalentes consumidas 54
3.4.1. Resultados y análisis 63

4. Comparación del desempeño energético y operativo 66
4.1. Metodología de evaluación energética 66
4.2. Escenarios analizados 67
4.2.1. Arranque directo con y sin carga 68
4.2.2. Arranque con partidor suave 68
4.2.2.a. Caso 1 68
4.2.2.b. Caso 2 69
4.2.2.c. Caso 3 72
4.3. Resultados obtenidos 73
4.4. Comparación del desempeño energético durante el arranque 74
4.5. Comparación del perfil de velocidad 75
4.6. Comparación del torque electromagnético 76
4.7. Tiempo de aceleración y estabilidad operativa 76
4.8. Implicancias operativas 76

5. Evaluación de la conveniencia técnica y económica 78
5.1. Análisis técnico del uso de partidores suaves 78
5.1.1. Criterios de evaluación técnica 78
5.1.2. Evaluación de equipos 79
5.1.2.a. Partidor suave SOLCON 79
5.1.2.b. Partidor suave AUCOM 81
5.1.2.c. Partidor suave WEG 83
5.1.2.d. Partidor suave MOTORTRONICS 84
5.2. Análisis económico del uso de partidores suaves 85
5.2.1. Costos asociados al escenario actual de operación 86
5.2.2. Costos de implementación de partidores suaves 87
5.2.2.a. Evaluación de propuestas comerciales 87
5.3. Síntesis comparativa 90
5.4. Comparación final de la propuesta proyectada en el tiempo 91
5.5. Análisis económico desde la perspectiva de mitigación de riesgos 91
5.6. Recomendaciones finales 93

6. Propuesta de estrategia de operación **94**
6.1. Implementación de plan piloto 94
6.2. Indicadores de desempeño y criterios de evaluación 95
6.3. Recomendaciones técnicas para la operación 95
6.4. Gestión del riesgo operacional 96
6.5. Proyección y escalabilidad 96
6.6. Visión de largo plazo 96

7. Conclusiones **97**

Apéndices **100**

A. Códigos de las Figuras y Tablas **100**
A.1. Operación de Servicio Octubre 2023 y 2025 100
A.2. Costos de Operación actual 101
A.2.1. Reparación Motor APH101 101
A.3. Costos directos e indirectos para la implementación de partidores suaves . 101
A.3.1. Empresa Emotron 101
A.3.2. Empresa Rhona 102
A.3.3. Empresa Flopower 102
A.3.4. Empresa Vignolia 103
A.3.5. Empresa Primser 103
A.3.6. Empresa INSAA Ingeniería 103
A.4. Espacio físico disponible para la instalación de nuevos equipos 104
A.5. Diagrama Unilineal Central Nehuenco 106
A.6. Diagrama Unilineal de Motores 6,6kV, Central Nehuenco 107

Índice de Figuras

2.1. Circuito equivalente por fase de un motor de inducción [5] 7
2.2. Circuito equivalente por fase de la máquina asincrónica [5] 8
2.3. Circuito Thevenin del circuito equivalente [5] 8
2.4. Corriente fase a de arranque directo en motor de inducción 11
2.5. Esquema básico de un partidor suave 17
2.6. Corriente fase a de arranque con partidor suave en motor de inducción . . 18
2.7. Tiristor SCR 19

3.1. Placa motor APH101/201 23
3.2. Placa motor CEX101/201 24
3.3. Placa motor CRF101/201 25
3.4. Sistema de arranque con partida directa diseñado en PLECS 31
3.5. Sistema de arranque con partidor suave diseñado en PLECS 32
3.6. Simulación de operación con partida directa: (1)Corrientes; (2)Tensión; (3)Corriente RMS; (4)Tensión RMS; (5)Velocidad mecánica; (6)Torque electromagnético 35
3.7. Simulación de operación con partidor suave: (1)Corrientes; (2)Tensión; (3)Corriente RMS; (4)Tensión RMS; (5)Velocidad mecánica; (6)Torque electromagnético 37
3.8. Vista detallada de un intervalo de la simulación de operación con partidor suave: (1)Corrientes; (2)Tensión; (3)Corriente RMS; (4)Tensión RMS; (5)Velocidad mecánica; (6)Torque electromagnético 38
3.9. Vista detallada de un intervalo de la simulación de operación con partidor suave: (1)Corrientes; (2)Tensión; (3)Corriente RMS; (4)Tensión RMS; (5)Velocidad mecánica; (6)Torque electromagnético 39
3.10. Vista detallada de un intervalo de la simulación de operación con partidor suave, ampliada al final: (1)Corrientes; (2)Tensión; (3)Corriente RMS; (4)Tensión RMS; (5)Velocidad mecánica; (6)Torque electromagnético . . 40

4.1. Implementación en PLECS del cálculo de la energía asociada a las corrientes del estator y del rotor para el arranque directo en línea (DOL). . 67
4.2. Implementación en PLECS del cálculo de la energía asociada a las corrientes del estator y del rotor para el arranque mediante partidor suave (SS). 67
4.3. Curvas de energía acumulada asociadas a las corrientes del estator y del rotor para el arranque directo. 68
4.4. Comparación de la energía acumulada asociada a las corrientes del estator y del rotor durante el arranque con carga. 69

4.5. Comparación de la energía acumulada asociada a las corrientes del estator y del rotor durante el arranque con carga. 70
4.6. Simulación de operación del motor mediante partidor suave para el Caso 2 (rampa rápida), considerando condición con carga y sin carga. En ambas gráficas se presentan: (1) corrientes, (2) tensión, (3) corriente RMS, (4) tensión RMS, (5) velocidad mecánica y (6) torque electromagnético. . . . 71
4.7. Comparación de la energía acumulada asociada a las corrientes del estator y del rotor durante el arranque con carga. 72
4.8. Simulación de operación del motor mediante partidor suave para el Caso 3 (rampa lenta), considerando condición con carga y sin carga. En ambas gráficas se presentan: (1) corrientes, (2) tensión, (3) corriente RMS, (4) tensión RMS, (5) velocidad mecánica y (6) torque electromagnético. . . . 73

A.1. Estado de servicio Octubre 2023 100
A.2. Estado de servicio Octubre 2025 101
A.3. Espacio disponible para la ubicación de los nuevos equipos 104
A.4. Espacio disponible para la ubicación de los nuevos equipos 105
A.5. Unilineal central Nehuenco 106
A.6. Unilineal motores de 6,6kV, central Nehuenco 107

Índice de Tablas

2.1. Clasificación según la clase de aislamiento 15

3.1. Motores bajo estudio Nehuenco 2 22
3.2. Parámetros Motor BBA APH 101/102 22
3.3. Parámetros Motor BBA CEX 101/201 23
3.4. Parámetros Motor BBA CRF 101/201 24
3.5. Arranques meses de 2023 26
3.6. Detenciones meses de 2023 26
3.7. Arranques meses de 2025 27
3.8. Detenciones meses de 2025 27
3.9. Resumen operación 2023 28
3.10. Resumen operación 2025 28
3.11. Promedio corrientes inrush en meses de 2023 29
3.12. Promedio corrientes inrush en meses de 2025 29
3.13. Parámetros para la simulación de la máquina de Inducción 32
3.14. Parámetros en configuración PLECS 33
3.15. Datos de los motores de inducción 41
3.16. Datos de arranques diarios motor APH101 42
3.17. Severidad acumulada en periodo semanal y mensual del motor APH101 . 42
3.18. Datos de arranques diarios motor APH201 43
3.19. Severidad acumulada en periodo semanal y mensual del motor APH201 . 43
3.20. Datos de arranques diarios motor CEX101 44
3.21. Severidad acumulada en periodo semanal y mensual del motor CEX101 . 44
3.22. Datos de arranques motor CEX201 44
3.23. Severidad acumulada en periodo semanal y mensual del motor CEX201 . 44
3.24. Datos de arranques diarios motor CRF101 45
3.25. Severidad acumulada en periodo semanal y mensual del motor CRF101 . 45
3.26. Datos de arranques diarios motor CRF201 46
3.27. Severidad acumulada en periodo semanal y mensual del motor CRF201 . 46
3.28. Energía disipada en el cobre en arranques correctos en motor APH101 . . 47
3.29. Energía disipada en el cobre en arranques correctos en motor APH201 . . 47
3.30. Energía disipada en el cobre en arranques correctos en motor CEX101 . . 48
3.31. Energía disipada en el cobre en arranques correctos en motor CEX201 . . 49
3.32. Energía disipada en el cobre en arranques correctos en motor CRF101 . . 49
3.33. Energía disipada en el cobre en arranques correctos en motor CRF201 . . 50
3.34. Severidad nominal por hora de cada motor 51
3.35. Horas nominales equivalentes en periodos de arranque para motor APH101 51
3.36. Horas nominales equivalentes en periodos de arranque para motor APH201 52

3.37. Horas nominales equivalentes en periodos de arranque para motor CEX101 52
3.38. Horas nominales equivalentes en periodos de arranque para motor CEX201 53
3.39. Horas nominales equivalentes en periodos de arranque para motor CRF101 53
3.40. Horas nominales equivalentes en periodos de arranque para motor CRF201 54
3.41. Horas equivalentes consumidas con respecto a Tref, motor APH101 55
3.42. Horas equivalentes consumidas por periodos con respecto a Tref, motor APH101 56
3.43. Horas equivalentes consumidas con respecto a Tref, motor APH201 57
3.44. Horas equivalentes consumidas por periodos con respecto a Tref, motor APH201 57
3.45. Horas equivalentes consumidas con respecto a Tref, motor CEX101 58
3.46. Horas equivalentes consumidas por periodos con respecto a Tref, motor CEX101 58
3.47. Horas equivalentes consumidas con respecto a Tref, motor CEX201 59
3.48. Horas equivalentes consumidas por periodos con respecto a Tref, motor CEX201 60
3.49. Horas equivalentes consumidas con respecto a Tref, motor CRF101 61
3.50. Horas equivalentes consumidas por periodos con respecto a Tref, motor CRF101 61
3.51. Horas equivalentes consumidas con respecto a Tref, motor CRF201 62
3.52. Horas equivalentes consumidas por periodos con respecto a Tref, motor CRF201 62
3.53. Cuadro resumen de resultados obtenidos por motores en partida directa, datos históricos 64

4.1. Comparación de la energía total disipada durante el arranque para los distintos casos analizados 74

5.1. Especificaciones técnicas partidor Solcon 79
5.2. Resumen de ventajas y desventajas técnicas del partidor suave SOLCON HRVS-DN 80
5.3. Especificaciones técnicas Partidor AUCOM L-Series MVE E1 81
5.4. Resumen de ventajas y desventajas técnicas del partidor suave AUCOM L-Series MVE E1 82
5.5. Especificaciones técnicas partidor suave WEG SSW7000 83
5.6. Resumen de ventajas y desventajas técnicas del partidor suave WEG SSW7000 83
5.7. Especificaciones técnicas Partidor suave Motortronics 84
5.8. Resumen de ventajas y desventajas técnicas del partidor suave Motortronics MVC4 85
5.9. Síntesis comparativa de alternativas 91
5.10. Comparación de alternativas 91
5.11. Indicador económico de conveniencia para la implementación de partidores suaves 92

A.1. Detalle de Costo de Reparación del Motor en Empresa Maisver 101
A.2. Detalle de cotización comercial Emotron para partidores suaves de media tensión 101

A.3. Detalle de cotización comercial Rhona para partidores suaves de media tensión 102
A.4. Detalle de cotización comercial Flopower para partidores suaves de media tensión 102
A.5. Detalle de cotización comercial Vignolia para partidores suaves de media tensión 103
A.6. Detalle de cotización comercial Primser para partidores suaves de media tensión 103
A.7. Detalle de cotización comercial INSAA Ingeniería para partidores suaves de media tensión 103

Resumen

La operación de la Central Termoeléctrica Nehuenco se ha visto fuertemente influenciada por la creciente participación de la Generación Renovable No Convencional (GRNC), lo que ha provocado un aumento significativo de los ciclos de arranque y detención de la unidad. Este régimen operacional, conocido como ciclado, ha incrementado la exigencia sobre los motores de media tensión que operan con arranques directos, generando elevadas corrientes de irrupción, mayor estrés térmico acumulado y un acelerado desgaste mecánico. Estas condiciones afectan la confiabilidad de los equipos auxiliares y aumentan el riesgo de fallas no programadas.

El presente trabajo desarrolla un análisis técnico y operativo basado en datos reales correspondientes a los años 2023 y 2025, evaluando la frecuencia de arranques, los niveles de corriente de partida y el impacto del ciclado sobre la vida útil de los motores. Se estudia el comportamiento eléctrico mediante el modelo equivalente de la máquina de inducción y se identifican los efectos del arranque directo sobre la red de 6,6 kV.

A partir de estos antecedentes, se evalúa la conveniencia de implementar partidores suaves como medida de mitigación, considerando sus beneficios en la reducción de la corriente de arranque, la disminución del esfuerzo mecánico y la mejora de la estabilidad durante la partida. Finalmente, se desarrolla una evaluación técnico–económica que compara la situación actual con la alternativa de integración de partidores suaves, proponiendo una estrategia de operación que permite reducir el impacto del ciclado y mejorar la confiabilidad global de los sistemas auxiliares de la central.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto y justificación

En los últimos años, el sistema eléctrico nacional ha experimentado un cambio profundo con la incorporación masiva de energías renovables no convencionales, en particular de la generación solar fotovoltaica. Este fenómeno ha modificado sustancialmente la operación de centrales de respaldo como Nehuenco, que anteriormente trabajaban en régimen de base con un número reducido de arranques anuales, manteniendo sus unidades en operación continua durante gran parte del año.

Con el nuevo esquema de operación, las unidades de Nehuenco deben entrar en servicio principalmente durante las tardes o noches, y salir de operación al amanecer, cuando la generación solar comienza a inyectar masivamente al sistema. Como resultado, los motores de media tensión, que antes se enfrentaban a menos de 15-20 arranques anuales, hoy superan los 100 arranques por año. Este incremento tan marcado en la frecuencia de arranque representa un desafío técnico considerable, ya que los motores de media tensión de la planta fueron diseñados para un servicio continuo y estable, y no para enfrentar múltiples ciclos de encendido y apagado en cortos períodos de tiempo. El principal problema asociado es que estos motores operan con partida directa (DOL – Direct On Line). Bajo este esquema, en cada arranque se generan corrientes transitorias muy elevadas, que pueden alcanzar entre 6 y 8 veces la corriente nominal del motor [1].

Estas corrientes impactan directamente en la red eléctrica local, produciendo caídas de tensión y aumentando las pérdidas, pero también afectan severamente la vida útil de los motores al generar sobrecalentamientos en el bobinado y esfuerzos mecánicos en los ejes, acoplamientos y sistemas de transmisión. En el largo plazo, este tipo de operación incrementa la probabilidad de fallas, eleva los costos de mantenimiento y reduce la disponibilidad de los equipos para la operación de la central. En este contexto, surge la necesidad de evaluar alternativas tecnológicas que permitan adaptar la operación de los motores a las nuevas condiciones impuestas por la variabilidad de las energías renovables. Una solución técnica viable es la incorporación de partidores suaves de estado sólido en motores seleccionados de media tensión.

Los partidores suaves ofrecen múltiples ventajas frente a la partida directa, ya que permiten controlar la tensión aplicado durante el arranque, limitando la corriente de arranque y reduciendo significativamente los esfuerzos mecánicos [2]. Entre los beneficios más re-

levantes se encuentran la reducción de picos de corriente y caídas de tensión en la red de alimentación, protección del motor eléctrico, prolongando su vida útil y mejorando la durabilidad del aislamiento, eliminación de choques mecánicos, lo que reduce el desgaste de acoplamientos, engranajes y sistemas de transmisión, minimización del golpe de ariete en bombas, mejorando la confiabilidad en aplicaciones hidráulicas, facilidad de operación y mantenimiento, al incorporar protecciones electrónicas integradas, funciones de monitoreo, registros de eventos y comunicación digital [3].

De este modo, la implementación de partidores suaves no solo permitiría adaptar los motores al nuevo esquema operativo de la central, sino también mejorar la confiabilidad de la planta y reducir costos asociados a fallas y mantenimientos no programados.

La propuesta técnica inicial considera instalar partidores suaves en los motores principales de Nehuenco 1 y Nehuenco 2 (seis y ocho motores respectivamente), manteniendo los motores de respaldo con partida directa, para asegurar disponibilidad inmediata en caso de contingencia. Asimismo, se plantea un análisis comparativo de rentabilidad, evaluando la conveniencia económica de esta medida frente a alternativas como la adquisición de motores de repuesto para reemplazo inmediato.

En conclusión, este estudio busca analizar la problemática operativa que enfrentan los motores de media tensión en la central termoeléctrica Nehuenco debido al aumento en la frecuencia de arranques producto de la alta penetración de energías renovables en el sistema eléctrico. Se realizará un estudio técnico-económico que considere la evaluación de la implementación de partidores suaves y su comparación con otras alternativas, como la adquisición de motores de repuesto, con el propósito de seleccionar la opción que otorgue mayor confiabilidad operativa y que al mismo tiempo permita optimizar los costos de mantenimiento, asegurando la eficiencia y sostenibilidad de la planta a lo largo del tiempo.

1.1.1. Descripción del proyecto

Este proyecto propone realizar un análisis técnico-económico de la implementación de partidores suaves en motores de media tensión en la Central Termoeléctrica Nehuenco. Estos equipos permiten controlar la tensión aplicado durante el arranque del motor, reduciendo la corriente de irrupción y suavizando los esfuerzos mecánicos, lo que en consecuencia extiende la vida útil de los motores y disminuye la probabilidad de fallas.

Inicialmente, el estudio se enfocará en los motores más críticos de la unidad Nehuenco 2, tales como las bombas de alimentación, enfriamiento y condensado, los cuales actualmente operan bajo arranque directo y han visto incrementado su número de partidas debido al nuevo esquema de operación cíclica. En cuanto a la unidad Nehuenco 1, esta cuenta con bombas del mismo tipo, por lo que se espera un comportamiento similar.

La propuesta inicial contempla instalar partidores suaves en los motores principales, manteniendo los de respaldo con arranque directo, para asegurar una rápida respuesta en caso de contingencia.

Para alcanzar este objetivo, se realizará un análisis comparativo entre el arranque directo y el arranque con partidor suave, evaluando el impacto en la vida útil de los motores, su comportamiento dinámico y mecánico, así como las diferencias en desempeño energético y operativo bajo condiciones similares. El proyecto también contempla la evaluación económica, considerando tanto los beneficios en confiabilidad y eficiencia como los costos

asociados a la adquisición, integración y eventual mantenimiento de los partidores suaves, en comparación con otras alternativas como la compra de motores de repuesto.

La metodología del trabajo combinará simulaciones en *software* especializado (PLECS/MATLAB) para caracterizar los parámetros eléctricos y mecánicos de ambos tipos de arranque, con la recopilación de información técnica y económica de mercado sobre los partidores suaves disponibles. Adicionalmente, se realizará un análisis de las señales analógicas de los motores correspondientes a los años previos y posteriores al inicio del nuevo esquema de operación, evaluando los arranques registrados de cada máquina, mes a mes en cada periodo. Esto permitirá fundamentar la propuesta con base en resultados concretos y datos reales.

En lo esencial, este proyecto busca determinar la conveniencia de implementar partidores suaves en Nehuenco como estrategia de mejora de la operación de sus motores auxiliares en el nuevo contexto energético. El análisis permitirá entregar una recomendación integral que combine criterios técnicos y económicos, orientada a maximizar la confiabilidad y prolongar la vida útil de los equipos, al mismo tiempo que se optimizan los costos de operación y mantenimiento.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Estudio técnico y económico de la implementación de partidores suaves en motores de media tensión en operación diaria de la central termoeléctrica Nehuenco.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar el impacto en la vida útil (extensión o disminución de la vida útil de la maquina) que genera el arranque directo frente al arranque mediante partidor suave en motores de media tensión.
- Analizar el comportamiento dinámico y mecánico del motor eléctrico al ser puesto en marcha con un partidor suave.
- Comparar el desempeño energético y operativo entre un motor con arranque directo y con arranque mediante partidor suave, en condiciones de operación similares, en operación paralela.
- Evaluar la conveniencia técnica y económica de implementar partidores suaves en la instalación, considerando tanto los beneficios en eficiencia y vida útil del motor como los costos asociados a su adquisición e integraciónm dado el tipo de uso de los motores.
- Proponer una estrategia de operación mediante motores con partidores suaves y/o directos en caso de cualquier inconveniente o falla, desde un punto de vista económico.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Máquina de inducción

La máquina asincrónica o de inducción se utiliza ampliamente en diversas aplicaciones, principalmente en la conversión de energía eléctrica en energía mecánica. Se caracteriza por su construcción sencilla, robusta y de bajo mantenimiento.

Esta máquina se diferencia de la máquina sincrónica en que no existe una conexión eléctrica directa entre el estator y el rotor. En lugar de ello, la corriente en el rotor se induce por acción del campo magnético giratorio generado en el estator, razón por la cual se denomina máquina de inducción [4]. Asimismo, se llama asincrónica, porque es capaz de convertir energía a cualquier velocidad, menos a la velocidad sincrónica.

Este tipo de máquina no requiere una corriente de campo de corriente continua (CD) para su funcionamiento y se clasifica principalmente en dos tipos: el motor de rotor bobinado y el motor de rotor tipo jaula de ardilla, los cuales se diferencian principalmente en la construcción del rotor.

2.1.1. Modelo estacionario de una máquina de inducción

El estudio de la máquina de inducción se realiza mediante un modelo equivalente.En este modelo, el circuito del rotor se representa referido al lado del estator, de manera que todos los parámetros puedan expresarse en una misma base. De esta forma, los efectos asociados a la variación de velocidad del rotor se concentran en el término de impedancia, lo que permite analizar con mayor precisión el comportamiento eléctrico de la máquina bajo diferentes condiciones de operación.

Este modelo se obtiene a partir de las ecuaciones dinámicas del rotor y del estator, aplicando posteriormente la transformación por deslizamiento y la reducción del rotor al estator.

$$0 = \frac{R_2}{s}\mathbf{I}_2 + j\omega_1(L_{s2} + L_{m2})\mathbf{I}_2 + j\omega_1 L_{m1}\mathbf{I}_1. \tag{2.1}$$

Para construir el circuito equivalente por fase, el devanado rotor se reemplaza por un devanado trifásico ficticio cuyas corrientes I_2' producen la misma fuerza magnetomotriz en el entrehierro, cumpliéndose:

$$L_{m1}I_2 = L_{12}I_2'. \tag{2.2}$$

La reducción del rotor al estator conduce a las impedancias equivalentes:

$$R_2' = R_2\left(\frac{m_2}{3}\frac{L_{m1}}{L_{12}}\right)^2, \tag{2.3}$$

$$L_{\sigma 2}' = L_{\sigma 2}\left(\frac{m_2}{3}\frac{L_{m1}}{L_{12}}\right)^2. \tag{2.4}$$

Con estas transformaciones, las ecuaciones del estator y del rotor quedan:

$$\mathbf{V}_1 = (R_1\mathbf{I}_1 + j\omega_1 L_{\sigma 1})\mathbf{I}_1 + j\omega_1 L_{m1}\mathbf{I}_m, \tag{2.5}$$

$$0 = \left(\frac{R_2'}{s} + j\omega_1 L_{\sigma 2}'\right)\mathbf{I}_2' + j\omega_1 L_{m1}\mathbf{I}_1. \tag{2.6}$$

Se introduce la corriente magnetizante:

$$I_m = I_1 + I_2', \tag{2.7}$$

Representante de la fuerza magnetomotriz resultante en el entrehierro.

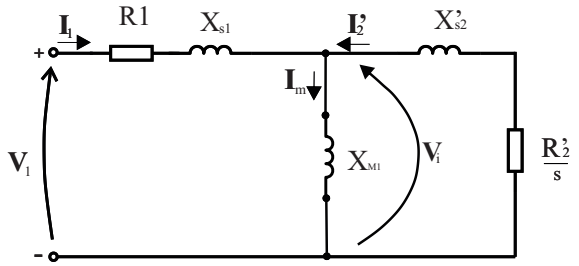


Figura 2.1: Circuito equivalente por fase de un motor de inducción [5]

El circuito equivalente resultante, Fig. 2.1, consiste en la serie R_1 y X_{s1}, la rama magnetizante jX_m, y el conjunto rotor referido formado por X_{s2}' y la resistencia dependiente del deslizamiento R_2'/s. Este modelo puede representarse también como una doble malla, Fig. 2.2, donde la resistencia del rotor se separa en:

$$\frac{R_2'}{s} = R_2' + R_2'\left(\frac{1-s}{s}\right), \tag{2.8}$$

permitiendo identificar la porción asociada a pérdidas y la asociada a potencia mecánica.

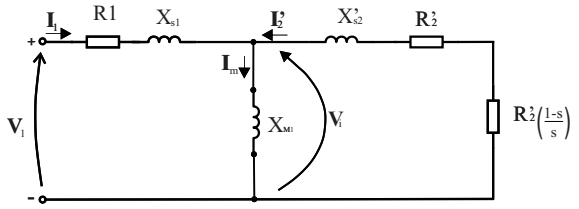


Figura 2.2: Circuito equivalente por fase de la máquina asincrónica [5]

El circuito equivalente resultante permite analizar el flujo de potencia interno de la máquina y la interacción entre las corrientes del estator y del rotor. Sin embargo, su forma original puede ser algebraicamente compleja para determinar la corriente del rotor bajo diferentes condiciones de operación. Por ello, es habitual simplificar la malla del estator mediante la aplicación del *Teorema de Thevenin*, obteniendo un circuito reducido que conserva de manera exacta el comportamiento eléctrico visto desde los terminales del rotor.

La obtención de la corriente del rotor, I_2', se logra aplicando el Teorema de Thevenin al circuito anteriormente mencionado. A continuación se muestra el equivalente Thevenin del circuito equivalente de la maquina asincrónica. [5]

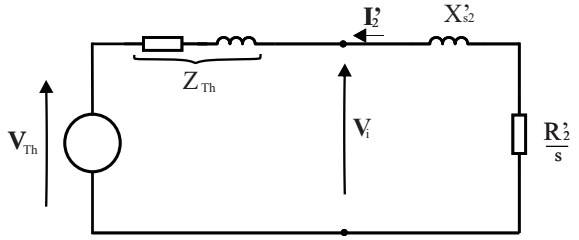


Figura 2.3: Circuito Thevenin del circuito equivalente [5]

A partir de la figura 2.3, la tensión y la impedancia de Thevenin se determinan, con $\mathbf{I}_2'$=0, como:

$$\mathbf{V}_{th} = jX_{m1} \cdot \frac{\mathbf{V}_1}{R_1 + j(X_{\sigma 1} + X_{m1})} \tag{2.9}$$

$$\mathbf{Z}_{th} = \frac{(R_1 + jX_{\sigma 1}) \cdot jX_{m1}}{R_1 + j(X_{\sigma 1} + X_{m1})} = R_{th} + jX_{th} \tag{2.10}$$

De esta manera, la corriente del rotor referida al estator se puede obtener de forma directa mediante:

$$\mathbf{I'}_2 = -\frac{\mathbf{V}_{th}}{\mathbf{Z}_{th} + (\frac{R_2'}{s} + jX_{\sigma 2}')} \tag{2.11}$$

Así se permite estudiar con mayor claridad el efecto del deslizamiento, condiciones de carga y comportamiento estacionario del motor de inducción.

2.1.2. Principio de funcionamiento

El funcionamiento de la máquina de inducción se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética [4].

Cuando se aplica una tensión trifásica al estator, se genera un campo magnético giratorio, cuya velocidad depende exclusivamente de la frecuencia de alimentación y del número de polos. Este campo variable enlaza los conductores del rotor e induce en ellos una fuerza electromotriz según la ley de Faraday [6], produciendo corrientes que interactúan con el campo del estator para generar el momento electromagnético que hace girar el rotor.

La velocidad de giro en RPM del campo magnético del estator, conocida como *velocidad sincrónica*, se define como:

$$n_s = \frac{120 f_e}{p}, \tag{2.12}$$

donde f_e es la frecuencia eléctrica y p el número de pares de polos del motor.

La tensión inducido en los conductores del rotor se debe al movimiento relativo entre el rotor y el campo magnético del estator.

Para describir esta relación, se introduce el *deslizamiento* (s), que corresponde a la diferencia relativa entre la velocidad del campo giratorio y la velocidad mecánica del rotor:

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s}, \tag{2.13}$$

y también la *velocidad de deslizamiento*, definida como:

$$n_{des} = n_s - n_m, \tag{2.14}$$

donde ya se definió n_s es la velocidad sincrónica y n_m la velocidad mecánica del eje.

Si el rotor alcanzara la velocidad sincrónica, el deslizamiento sería cero ($s = 0$), lo que implica ausencia de fuerza electromotriz inducida en el rotor. Durante el arranque, el rotor está detenido ($n_m = 0$), por lo que el deslizamiento es máximo ($s = 1$).

Este principio se relaciona directamente con el modelo equivalente presentado anteriormente, donde el efecto del deslizamiento se refleja en el término resistivo dependiente de s en el rotor, representado como R_2'/s. En el arranque el deslizamiento es $s = 1$, condición en la cual se induce corriente en el rotor y se genera el momento de arranque. A medida que el rotor se aproxima a la velocidad sincrónica, el deslizamiento disminuye y la corriente inducida se reduce hasta hacerse prácticamente nula. Esta interacción entre el campo del estator, las corrientes inducidas y el deslizamiento determina la formación del momento electromagnético y el comportamiento del motor de inducción.

2.1.3. Rotor y estator

La máquina de inducción está conformada por un estator y un rotor. El estator es la parte fija del motor es alimentado por la red trifásica y está formado por un apilamiento de chapas de acero al silicio con ranuras internas donde se alojan los devanados trifásicos.

El rotor, elemento móvil del motor que actúa como el inducido, ya que las corrientes que circulan en él son producto de la interacción con el flujo magnético generado por el estator. Está construido mediante chapas apiladas que conforman un cilindro con ranuras cerca de su superficie exterior.

Tal como se mencionó anteriormente, estas máquinas de inducción se clasifican en dos tipos según el tipo de rotor: jaula de ardilla (o en cortocircuito) y rotor devanado (o con anillos). En el caso del rotor de jaula de ardilla, consiste en una serie de barras conductoras dispuestas dentro de ranuras mecanizadas en la cara del rotor y en cortocircuito en sus extremos mediante grandes anillos, formando una estructura robusta, simple y de bajo mantenimiento. El rotor devanado se caracteriza por poseer un devanado trifásico, generalmente dispuesto de manera similar al del estator [6]. En esta configuración, los extremos de los devanados se conectan a anillos rozantes aislados, sobre los cuales actúan escobillas que permiten la inserción de resistores externos en el circuito del rotor. De esta forma, es posible controlar y limitar la corriente de arranque, mejorando el comportamiento dinámico del motor durante el encendido [4].

2.1.4. Método de arranque en motores de inducción

Arranque se denomina a la puesta en marcha de un motor. Los motores de inducción tienen la posibilidad de conectarse directamente a la red **6**, lo cual no siempre resulta conveniente para su operación. Para que el motor acelere, el momento de arranque debe ser superior al par de carga, generándose así un momento de aceleración que permite al rotor incrementar su velocidad hasta alcanzar el punto de operación.

En aplicaciones industriales, el arranque de un motor de inducción puede realizarse de diversas maneras: conexión directa a línea (DOL), arranque con autotransformador, conexión estrella-triángulo, variador de frecuencia o partidor suave.

En la partida directa, el motor se conecta directamente a la tensión de red, por lo que este tipo de arranque viene acompañado de una corriente de arranque que puede alcanzar entre 5 y 8 veces la corriente nominal. Estas elevadas corrientes generan un incremento significativo de las pérdidas en los devanados, produciendo un aumento de temperatura que puede afectar la vida útil del motor. Asimismo, el elevado momento desarrollado durante el arranque puede generar esfuerzos mecánicos en los acoplamientos y en la carga accionada. Además, la caída de tensión generada puede impactar negativamente la red auxiliar de la planta.

El valor de corriente de arranque se puede calcular utilizando las características del motor que se encuentran en su respectiva placa:

El consumo elevado de corriente se justifica mediante el circuito equivalente estudiado anteriormente 2.1.

Desde el punto de vista del modelo equivalente, cuando $s = 1$ la impedancia del rotor es pequeña debido a que el término resistivo equivalente se expresa como R'_2/s.

Dado que estas corrientes elevadas afectan tanto al motor como a la infraestructura eléctrica, existen diversos métodos de arranque destinados a reducir la tensión aplicada durante el transitorio. En este trabajo se analizará particularmente el uso de partidores suaves, cuyo funcionamiento se presenta en la siguiente sección.

Mediante la figura 2.4 se representa la curva de simulación de un motor de inducción en partida directa, en la cual se logra apreciar el inicio de la corriente, magnitud de sobrecargas transitorias que afectan tanto al motor, como a la infraestructura de la planta.

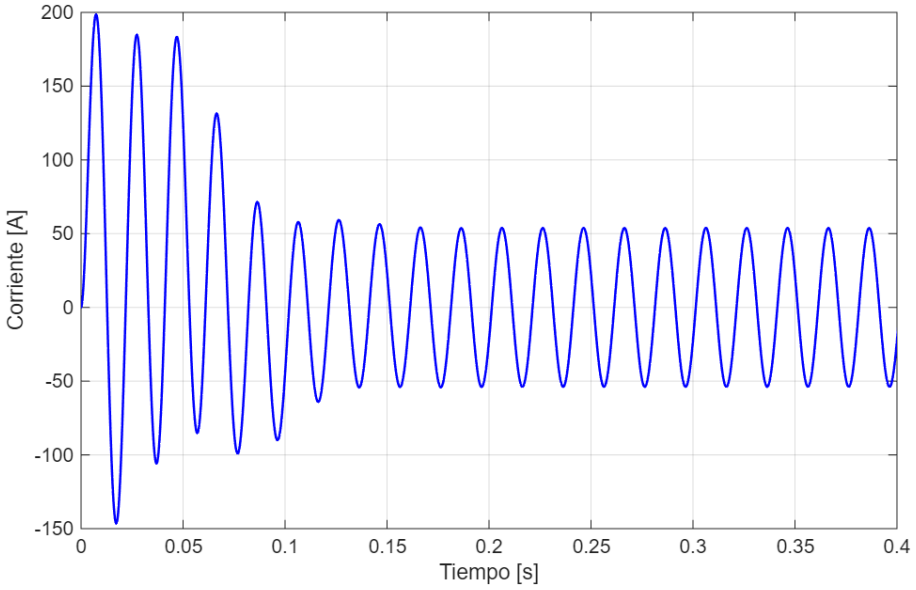


Figura 2.4: Corriente fase a de arranque directo en motor de inducción

2.1.5. Corriente de arranque

Tal como se mencionó anteriormente, el arranque directo de los motores de inducción produce corrientes elevadas, típicamente entre 5 y 8 veces la corriente nominal, lo que puede generar efectos eléctricos y mecánicos relevantes en la máquina. Entre estos se encuentran el incremento de las pérdidas por efecto Joule en los devanados, el deterioro del aislamiento y la aparición de esfuerzos mecánicos asociados al elevado momento electromagnético transitorio.

Debido a estas elevadas corrientes, durante el proceso de arranque se produce un calentamiento significativo del motor. Este fenómeno se explica a partir del funcionamiento asincrónico del motor, el cual está regido por la ley de división de la potencia del campo giratorio en potencia mecánica y potencia transferida inductivamente al rotor, expresada como [7]:

$$P_{CG} = P_{mec} + P_{cu2} \tag{2.15}$$

donde la potencia mecánica y las pérdidas en el rotor vienen dadas por:

$$P_{mec} = (1 - s)P_{CG} \tag{2.16}$$

$$P_{cu2} = sP_{CG} \tag{2.17}$$

En las etapas iniciales del arranque, el deslizamiento es cercano a la unidad ($s \approx 1$), por lo que prácticamente toda la potencia del campo giratorio se disipa en forma de calor en el rotor, incrementando significativamente su temperatura.

Desde el punto de vista dinámico, el proceso de aceleración del motor está gobernado por la ecuación del movimiento:

$$J\frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_c \tag{2.18}$$

donde J es el momento de inercia total del sistema, T_m el torque desarrollado por el motor y T_c el torque resistente de la carga. Expresando esta relación en función del deslizamiento, se obtiene:

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{p}{J\omega_1}(T_m - T_c) \tag{2.19}$$

lo cual permite calcular el tiempo de arranque como:

$$t_a = 2H \int_0^1 \frac{T_n}{T_e - T_c}\, ds \tag{2.20}$$

donde $T_n = \frac{pS_n}{\omega_1}$ corresponde al torque base y $H = \frac{J\omega_1^2}{2p^2 S_n}$ la constante de inercia [7].

La energía térmica transferida al rotor durante una maniobra se obtiene integrando las pérdidas de cobre del rotor:

$$Q_2 = \int_{t_{inicial}}^{t_{final}} P_{cu2}\, dt \tag{2.21}$$

Para el caso particular de un arranque en vacío ($T_c = 0$), la energía disipada en el rotor resulta igual a la energía cinética asociada a la velocidad sincrónica:

$$Q_{20} = \frac{1}{2} J \left(\frac{\omega_1}{p}\right)^2 \tag{2.22}$$

Si se considera un proceso caracterizado por un deslizamiento inicial s_1 y un deslizamiento final s_f, la energía disipada en el rotor depende del intervalo de deslizamiento recorrido durante la maniobra.

En el caso de inversión de marcha en vacío ($T_c = 0$, $s_1 = 2$, $s_f = 0$) el calentamiento se cuadruplica, $Q_{2inv} = 4Q_{20}$, mientras que en un frenado por contracorriente ($T_c = 0$, $s_1 = 2$, $s_f = 1$) se triplica, $Q_{2fcc} = 3Q_{20}$.

Por lo tanto, se puede determinar que el calentamiento es directamente proporcional al momento de inercia de la masa acelerada. Debido a la corta duración del arranque, el calentamiento puede considerarse esencialmente adiabático, es decir, no existe transferencia de calor significativa desde las barras de la jaula hacia el hierro del rotor. En consecuencia, el aumento de temperatura del rotor puede estimarse como:

$$\Delta T = \frac{Q_2}{m_2 c_2} \tag{2.23}$$

donde m_2 es la masa del rotor y c_2 el calor específico del material. Este aumento de temperatura produce dilataciones térmicas que generan esfuerzos mecánicos adicionales, razón por la cual el número de arranques por hora debe ser limitado y suele ser especificado por el fabricante.

En presencia de torque de carga ($T_c \neq 0$), el calentamiento del motor aumenta y pasa a depender del torque acelerante ($T_m - T_c$).

Como caso ilustrativo, si el torque de carga es igual a la mitad del torque desarrollado por el motor ($T_c = 0{,}5\,T_m$), el calentamiento del rotor resulta aproximadamente el doble en comparación con el arranque en vacío.

Además debe considerarse el calentamiento del devanado del estator, el cual afecta las propiedades dieléctricas del aislamiento. En arranques directos de motores de jaula simple, la energía disipada en el estator es comparable a la disipada en el rotor, reforzando la necesidad de emplear métodos de arranque que reduzcan las corrientes transitorias.

Es posible estimar el número de partidas por hora (Nph) admisibles si se supone que el calor de los arranques no debe superar el nominal, el cual es el disipado por la máquina a la hora de estar en régimen estacionario sin sobrepasar temperaturas admisibles.

$$Nph = \frac{P_{cu2n} \cdot 3600}{Q_2} \tag{2.24}$$

Donde P_{cu2n} corresponde a las pérdidas de cobre en el rotor en condiciones nominales, por lo que $P_{cu2n} \cdot 3600$ representa el calor disipado por el rotor en una hora de operación a régimen nominal, mientras que Q_2 corresponde al calor disipado en el rotor durante cada partida.

2.1.6. Potencias y pérdidas

Tal como se discutió en la sección anterior, la potencia transferida desde el estator hacia el rotor a través del entrehierro, denominada potencia del campo giratorio (P_{CG}), se divide entre la potencia mecánica desarrollada y las pérdidas de cobre del rotor, de acuerdo con el deslizamiento del motor.

A partir de esta potencia es posible establecer el balance energético global de la máquina de inducción considerando las distintas pérdidas presentes en el estator, el rotor y los elementos mecánicos del sistema.

En el estator, las principales pérdidas corresponden a las pérdidas de cobre en los devanados, las cuales se expresan como

$$P_{cu1} = 3I_1^2 R_1, \tag{2.25}$$

y a las pérdidas en el hierro (P_{fe}), originadas por fenómenos de histéresis y corrientes parásitas producidas por la variación temporal del flujo magnético en el núcleo [6].

Por otra parte, durante la rotación del motor también se producen pérdidas mecánicas asociadas a la fricción en los rodamientos y a la ventilación generada por el rotor. Estas pérdidas pueden representarse como

$$P_{mec,loss} = P_{fr} + P_{vent}. \tag{2.26}$$

Considerando todas estas contribuciones, el flujo de potencias en la máquina de inducción puede describirse mediante el siguiente balance energético:

$$P_1 = P_{cu1} + P_{fe} + P_{CG}, \tag{2.27}$$

donde P_1 corresponde a la potencia eléctrica suministrada al estator. A su vez, la potencia del campo giratorio se reparte entre las pérdidas de cobre del rotor y la potencia mecánica convertida, la cual, al descontar las pérdidas mecánicas, determina la potencia útil disponible en el eje del motor.

De esta forma, el rendimiento del motor depende directamente de las pérdidas presentes en el estator, el rotor, el núcleo magnético y los elementos mecánicos de la máquina.

2.2. Desgaste y vida útil en motores de inducción

La vida útil de los motores eléctricos depende de diversos factores, tales como el tipo y tamaño del motor, las condiciones de operación, el entorno, la calidad del suministro eléctrico, las prácticas de mantenimiento y la robustez del sistema de aislamiento. Este aislamiento puede verse afectado por humedad, vibraciones, contaminantes corrosivos y otros agentes ambientales, lo que acelera su envejecimiento.

En condiciones normales, los motores presentan una vida útil típica entre 30.000 y 40.000 horas, pudiendo prolongarse si se aplican mantenimientos adecuados. Sin embargo, esta duración disminuye drásticamente bajo altas temperaturas, ambientes agresivos o regímenes de operación exigentes. Las principales causas de falla en motores de inducción tipo jaula de ardilla corresponden a fallas mecánicas, especialmente en rodamientos, y fallas eléctricas asociadas a la degradación del aislamiento del estator, fenómenos que se ven exacerbados por las sobrecargas térmicas, arranques frecuentes, desbalance de tensiones y vibraciones [8].

El desgaste del motor se encuentra directamente ligado al deterioro del aislamiento de los devanados, el cual puede deberse a degradación térmica, impulsos de sobretensión, efecto corona, ciclos térmicos repetitivos y desbalance de tensión. La mayoría de estos fenómenos tienen en común el aumento de la temperatura en los devanados, variable crítica en la predicción de la vida útil.

El calentamiento se define como la sobretemperatura respecto al medio refrigerante y está directamente relacionado con las pérdidas internas del motor.

Además del efecto térmico general, en el análisis térmico de máquinas eléctricas se utiliza el concepto de *punto caliente* (*hot spot*), el cual corresponde a la región del devanado del estator donde se alcanza la mayor temperatura durante la operación del motor. Este punto no coincide necesariamente con la temperatura promedio del devanado, ya que la distribución térmica en la máquina no es uniforme debido a las pérdidas localizadas y a las condiciones de enfriamiento.

Estudios recientes han demostrado que la temperatura del punto caliente del estator constituye el indicador más representativo para evaluar la condición del aislamiento y estimar la vida útil del motor [8]. Esto se debe a que la degradación del aislamiento depende principalmente de la temperatura de operación y del tiempo de exposición, siendo el estrés térmico el factor dominante frente a los esfuerzos eléctricos o mecánicos.

En motores industriales, el incremento térmico está asociado principalmente a las pérdidas eléctricas de la máquina, tanto en el estator como en el rotor. Las pérdidas de cobre

en los devanados del estator constituyen una fracción importante de la energía disipada, mientras que en el rotor pueden generarse elevadas temperaturas, especialmente durante condiciones transitorias como el arranque, donde el deslizamiento es elevado y la evacuación del calor resulta más limitada [8].

Cabe destacar que cada material tiene una temperatura máxima de funcionamiento, por encima de la cual se deteriorará rápidamente. En la siguiente Tabla 2.1 se muestra el tipo de clase de aislamiento, el límite térmico y el aumento de temperatura permitido a una temperatura ambiente de 40° C [9].

Tabla 2.1: Clasificación según la clase de aislamiento

Clase	**Máxima temperatura(°C)**	**Aumento de Temperatura (°C)**
A	105	65
B	130	90
F	155	115
H	180	140
H'	220	180

De acuerdo con la literatura técnica, los mecanismos de envejecimiento del aislamiento pueden modelarse mediante la ecuación de Arrhenius, ampliamente utilizada para describir reacciones termoactivadas [10]:

$$L = Be^{\frac{E}{kT}} \tag{2.28}$$

Donde

- L: La vida en unidades de tiempo.
- B: Un valor constante
- E: La energía de activación de la reacción de envejecimiento, según clase de aislamiento
- k: Constante de Boltzmann
- T: Temperatura absoluta en Kelvin

Aplicando logaritmo en ambos lados de la ecuación 2.28:

$$\ln L = \ln B + \frac{E}{kT} \tag{2.29}$$

donde se muestra que el logaritmo de la vida útil del aislamiento presenta una relación lineal con el inverso de la temperatura absoluta $(1/T)$. En consecuencia, al aumentar la temperatura de operación del aislamiento, su vida útil disminuye de forma exponencial. Por lo tanto, si se conoce la vida útil a cierta temperatura, se puede relacionar la vida útil a dos temperaturas distintas:

$$\ln t_1 - \ln t_2 = \left(\frac{E}{k}\right)\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \tag{2.30}$$

Donde:

- t1: Tiempo de envejecimiento a una temperatura absoluta T1 (K).
- t2: Tiempo de envejecimiento a una temperatura absoluta T2 (K),

lo que permite estimar la reducción de la vida útil cuando el motor opera a temperaturas superiores.

Además, se utiliza ampliamente la regla empírica del envejecimiento térmico de 10°C, la cual establece que la vida útil del aislamiento se reduce aproximadamente a la mitad por cada incremento de 10°C en la temperatura del punto caliente. Esta relación puede expresarse como:

$$L_X = L_0 \cdot 2^{\frac{(T_B - T_X)}{HIC}} \tag{2.31}$$

donde L_0 corresponde a la vida útil del aislamiento a la temperatura de referencia T_B, L_X es la vida útil estimada a la temperatura de operación T_X, y HIC depende de la clase térmica del sistema de aislamiento, siendo típicamente 14, 11, 9.3, 8 y 10 °C para las clases A, B, F, H y H', respectivamente.

Existe un método práctico basado en pérdidas de cobre para estimar la vida útil del motor de inducción, asumiendo proporcionalidad entre la temperatura del estator y las pérdidas térmicas:

$$L_X = L_0 \cdot 2^{\frac{(T_B - R_{El} \cdot P_{\text{pérdida}})}{HIC}} \tag{2.32}$$

donde R_{El} es la resistencia térmica equivalente del estator y $P_{\text{pérdida}}$ corresponde a las pérdidas de cobre. Así se permite cuantificar cómo las corrientes elevadas, como las presentes en arranques directos o desbalances de tensión, reducen la vida útil del motor al incrementar significativamente la temperatura interna.

2.3. Partidor suave

Un partidor suave o *soft starter* es un dispositivo electrónico de potencia, diseñado para controlar el arranque y la detención de motores eléctricos, regulando la tensión aplicada en cada fase. Se utiliza principalmente en motores de inducción trifásicos de media y baja tensión.

Estos dispositivos permiten que el motor arranque de manera gradual, donde su función principal es mitigar los peaks de corriente y reducir el estrés mecánico en el motor y en el sistema eléctrico en el momento del encendido. Esto se logra mediante la variación de la tensión al motor en la partida [1].

Estos pueden ser utilizados en diferentes aplicaciones, donde sea necesario, cuando se desea tener una rampa suave de aceleración y control de momento en el arranque o parada, para limitar la corriente de arranque de motores, a fin de evitar problemas en la red, como caída de tensión. Para un arranque suave así se evitan choques mecánicos en la carga. Generalmente son utilizados en bombas, así se reduce el riesgo de sobretensiones, en fajas transportadoras, también en otras aplicaciones como ascensores, escaleras mecánicas, autos, laminadoras, minería, molienda de cobre.

En general ningún motor necesita obligatoriamente un partidor suave, sin embargo, el contar con este dispositivo electrónico puede beneficiar directamente la vida útil del motor, ya que permite gestionar y reducir la severidad de los arranques térmicos y mecánicos.

2.3.1. Características

Los partidores suaves presentan una serie de características técnicas que los distinguen de los métodos de arranque convencionales. Entre las más importantes se encuentra su capacidad de aplicar una rampa de voltaje progresiva, permitiendo que el motor incremente su tensión de forma controlada desde un valor inicial reducido hasta alcanzar el nivel nominal. Este control progresivo limita la corriente de arranque, evitando las sobrecorrientes típicas del arranque directo y reduciendo el esfuerzo térmico sobre los devanados del estator.Los partidores suaves también destacan por su capacidad de ajustar parámetros como el tiempo de rampa, el nivel inicial de tensión y la corriente máxima permitida, ofreciendo un nivel de flexibilidad superior al de otros métodos de arranque como estrella–delta o autotransformador. Gracias a estas prestaciones, se han convertido en una solución versátil y eficiente para aplicaciones industriales que requieren un control preciso del arranque, una mayor protección del motor y una reducción de las perturbaciones eléctricas en la red.

2.3.2. Esquema básico de diseño de un partidor suave

Un partidor suave se compone esencialmente de tres bloques principales: la unidad de control, el circuito de potencia y los sistemas de protección. Estos elementos trabajan de manera coordinada, para permitir un arranque progresivo del motor, reducir el esfuerzo eléctrico y mecánico y garantizar una operación segura del sistema.

La **unidad de control** está formada por microprocesadores o microcontroladores que ejecutan el algoritmo de control de fase angular, mediante el cual se ajusta el ángulo de disparo de los tiristores, para modificar el valor eficaz de la tensión aplicada al motor. Esta unidad genera la secuencia lógica de operación, administra los parámetros configurados por el usuario (como tiempo de rampa, tensión inicial o límite de corriente) y envía las señales de disparo hacia la tarjeta de fuerza y las tarjetas de impulso que gobiernan los dispositivos semiconductores [11].

El **circuito de potencia** está constituido por dos tiristores conectados en antiparalelo por fase, permitiendo un control total de onda en el suministro trifásico. Estos dispositivos reciben las señales de disparo en instantes precisos del ciclo de tensión, lo que posibilita regular la tensión RMS aplicada al motor durante el arranque.

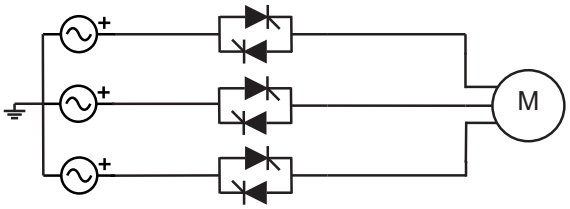


Figura 2.5: Esquema básico de un partidor suave

Los **sistemas de protección** supervisan tanto el estado del motor como el del propio equipo electrónico. Entre las funciones de protección más comunes se encuentran la protección por sobrecorriente, sobretemperatura, pérdida de fase, desbalance de tensión, cortocircuitos, fallas a tierra y bloqueo de disparo de los tiristores. Estas protecciones permiten detectar condiciones anómalas y desconectar el motor rápidamente, evitando daños en los semiconductores, en los devanados del estator y en la carga acoplada. Además, mu-

chos partidores suaves incorporan funciones de diagnóstico y registro de eventos, lo que facilita la detección de fallas recurrentes y mejora la confiabilidad del sistema.

En conjunto, la unidad de control, el circuito de potencia y los sistemas de protección constituyen la estructura fundamental de un partidor suave, permitiendo un arranque controlado, seguro y altamente configurable para una amplia variedad de aplicaciones industriales.

2.3.3. Principio de funcionamiento

Un partidor suave está constituido por tres pares de tiristores o SCR (rectificador controlado de silicio) conectados en antiparalelo entre la línea y el motor, los cuales son controlados mediante pulsos de disparo generados por una tarjeta electrónica que, a través de optoacopladores o transformadores de pulsos, asegura el aislamiento galvánico entre el circuito de control y el de potencia. Durante el arranque, los SCR inicialmente permiten el paso solo de la parte final de cada semiciclo de la tensión de alimentación, y mediante un algoritmo de control se va adelantando progresivamente el ángulo de disparo, dejando pasar una porción cada vez mayor de la onda sinusoidal hasta alcanzar el 100 % de la tensión nominal, logrando así un incremento gradual de la tensión aplicada al motor y, por ende, un arranque suave y controlado. De manera inversa, durante la parada, el control retrasa cada vez más el disparo, reduciendo gradualmente la tensión aplicada hasta llegar a cero, logrando una detención suave del motor sin golpes mecánicos ni picos de corriente [1].

En la figura 2.6 se presenta la simulación del arranque mediante un partidor suave, donde se aprecia cómo la corriente de arranque se limita gradualmente, reduciendo los picos de corriente y suavizando los esfuerzos mecánicos.

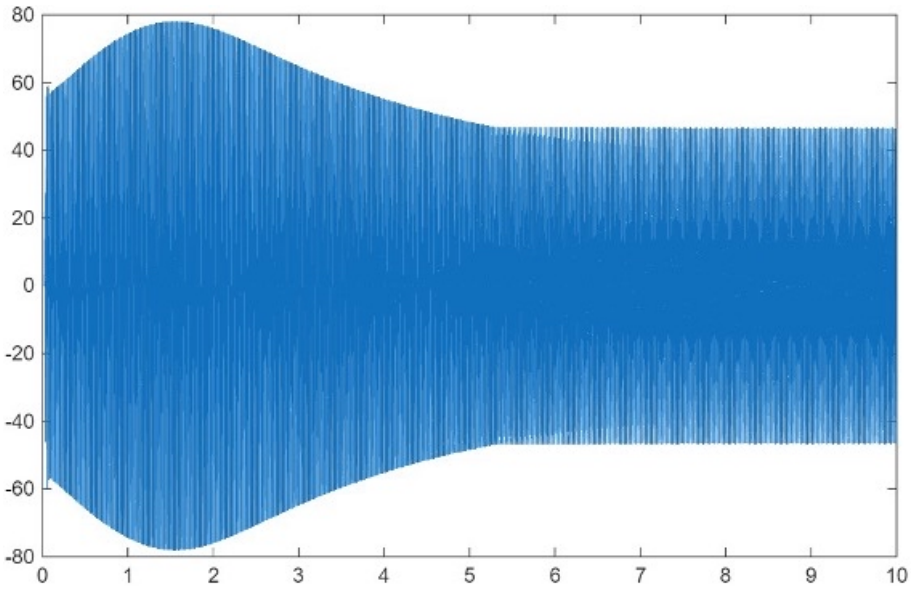
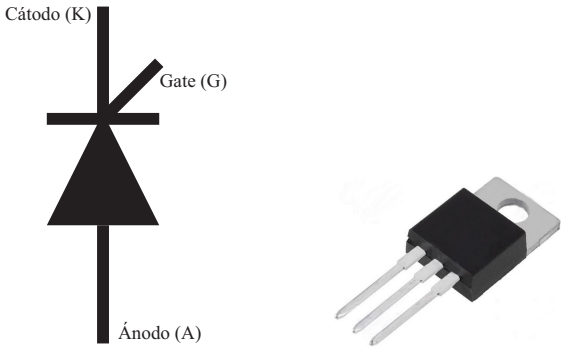


Figura 2.6: Corriente fase a de arranque con partidor suave en motor de inducción

2.3.4. Tiristores

Los tiristores son componentes electrónicos semiconductores que trabajan en conmutación, es decir, funcionan como un interruptor estático que abre o cierra, permitiendo o no la conducción de corriente. El tipo de este semiconductor más conocido se le denomina rectificador controlado de silicio (SCR), el cual cuenta con 3 terminales: ánodo, cátodo y gate, siendo la unión de los tres semiconductores (P-N-P-N) [4].



Símbolo del tiristor SCR

Tiristor real SCR

Figura 2.7: Tiristor SCR

Los SCR se utilizan para el control de grandes corrientes y voltajes. Su funcionamiento en la activación mediante el terminal de compuerta o *gate*. Para que el SCR entre en conducción deben cumplirse dos condiciones: que exista una polarización directa entre ánodo y cátodo (tensión ánodo–cátodo v_{AK} positiva) y que se aplique un pulso de corriente en el *gate*, dirigido hacia el cátodo, con una amplitud y duración suficientes para activar el dispositivo. Una vez disparado, el SCR permanece en conducción incluso si la señal en el *gate* desaparece, siempre que la corriente que circula entre ánodo y cátodo se mantenga por encima de la corriente de mantenimiento. Para que el dispositivo se desactive, la corriente ánodo–cátodo debe disminuir por debajo de dicho valor o bien aplicarse una polarización inversa entre ánodo y cátodo durante un tiempo mínimo necesario para permitir su apagado.

Por lo tanto, este dispositivo electrónico se encarga netamente de controlar el paso de la corriente entre las dos terminales, ánodo y cátodo.

2.3.5. Control angular

Los partidores suaves operan modificando el valor eficaz (RMS) de la tensión aplicada al motor mediante un circuito de potencia basado en tiristores (SCR) conectados en configuración antiparalelo. Estos dispositivos pueden instalarse en una, dos o tres fases dependiendo de la estrategia de control utilizada [1].

El principio de funcionamiento se basa en el *control angular*, mediante el cual se ajusta el ángulo de disparo de los tiristores en cada semiciclo de la tensión de alimentación. Al retrasar el instante de disparo, el tiristor conduce durante una fracción menor del semiciclo, reduciendo el área efectiva de la onda de tensión aplicada al motor y, en consecuencia, su valor eficaz.

Al variar el ángulo de disparo α, la tensión RMS aplicada al motor puede regularse de forma continua. Durante el arranque, el sistema incrementa progresivamente esta tensión hasta alcanzar el valor nominal.

2.3.6. Ventajas y desventajas

Como todos los dispositivos, los partidores suaves cuentan con ventajas y desventajas a la hora de analizar su comportamiento.

Dentro de las ventajas que proporcionan, si se analiza primero la red de alimentación, estos dispositivos permiten reducir la corriente de arranque y limitar los picos de corriente y las caídas de tensión, disminuyendo la demanda máxima de potencia y optimizando la instalación de contactores, cables y transformadores. Además, facilitan un mayor control de la demanda energética. En cuanto al motor de inducción, los partidores suaves proporcionan una protección electrónica integral frente a sobrecarga, subcorriente, sobrecorriente, asimetría, falta o inversión de fases, lo que incrementa la seguridad, prolonga la vida útil del motor, mejora la durabilidad del aislamiento y reduce los esfuerzos térmicos y los picos de corriente en el bobinado. Respecto a la carga o máquina accionada, eliminan choques mecánicos, reducen los esfuerzos sobre acoplamientos y elementos de transmisión, y minimizan fenómenos, contribuyendo a una operación más suave y confiable [1].

Debido a estas ventajas, los partidores suaves se han convertido en una de las opciones más utilizadas en aplicaciones industriales que requieren un arranque eficiente, seguro y con menor impacto eléctrico y mecánico, además de ofrecer flexibilidad de configuración, facilidad de instalación, mayor vida útil del sistema y compatibilidad con procesos de automatización mediante comunicación con PLC.

No obstante, los partidores suaves también presentan desventajas, entre las que se incluyen la generación de armónicos debido al uso de electrónica de potencia, aunque estos se presentan sólo durante el arranque; la necesidad de una adecuada ventilación y protección térmica; la limitación en aplicaciones que requieren un par de arranque elevado; una menor eficiencia frente a variadores de frecuencia cuando se requiere control de velocidad; y un costo inicial más alto en comparación con el arranque directo, aunque esta inversión puede recuperarse a mediano plazo gracias a los beneficios operativos y energéticos.

Otra desventaja relevante se relaciona con las pérdidas de energía durante el proceso de arranque cuando el motor acciona una carga. Del análisis desarrollado en la Sección 2.1.5 se obtiene una relación para la energía disipada durante el arranque que depende inversamente de la diferencia entre el par electromagnético del motor T y el par de carga T_c, es decir, proporcional a $\frac{1}{T-T_c}$.

En un partidor suave el par electromagnético disponible se reduce debido a la disminución del voltaje aplicado al motor durante el arranque, lo que hace que T se aproxime al par de carga T_c. Como consecuencia, la energía disipada durante la maniobra puede aumentar en comparación con un arranque directo, especialmente cuando el motor parte con carga significativa.

Este efecto no se presenta en la misma medida en los convertidores de frecuencia, ya que el arranque se realiza con baja frecuencia de deslizamiento y manteniendo un control más directo del par del motor.

Capítulo 3

Análisis del comportamiento dinámico y mecánico del motor eléctrico

El análisis integral del comportamiento operativo, eléctrico y mecánico de los motores eléctricos en estudio se realiza considerando tanto datos reales de operación de la central Nehuenco como simulaciones dinámicas realizadas mediante *software* especializado, PLECS.

Para el análisis del comportamiento real de los motores se utilizaron registros históricos obtenidos desde el sistema de control y monitoreo de la central, los cuales permitieron caracterizar la operación mensual y anual de cada motor, cuantificando la cantidad de arranques y paradas, así como los valores promedio de corriente inrush asociados a cada evento de arranque y las temperaturas de estator asociadas en los arranques. Estos antecedentes permiten identificar cambios significativos en el régimen operacional entre los distintos períodos analizados y establecer los meses de mayor exigencia para los equipos.

Adicionalmente, con el fin de comprender en mayor profundidad los fenómenos eléctricos y mecánicos que se producen durante el arranque de los motores, se desarrollaron simulaciones dinámicas mediante el *software PLECS*. Para asegurar la representatividad de los resultados, los parámetros eléctricos y mecánicos de las máquinas y de la carga fueron ajustados de acuerdo con condiciones reales de operación, permitiendo analizar los fenómenos eléctricos y mecánicos asociados al proceso de arranque.

3.1. Datos de motores analizados

La central termoeléctrica Nehuenco cuenta con tres unidades de generación, de las cuales en el presente estudio se analizan dos: **Nehuenco 1** y **Nehuenco 2**. Dado que ambas unidades utilizan motores con características técnicas y aplicaciones similares, el análisis se centra inicialmente en los motores de media tensión correspondientes a la unidad **Nehuenco 2**, considerándolos representativos del comportamiento general de los equipos instalados en la central.

Los motores seleccionados para el estudio corresponden a motores de inducción trifási-

cos de media tensión, utilizados en sistemas críticos de la central, tales como bombas de condensado, de enfriamiento y bombas asociadas al proceso de agua de alimentación. Estos equipos cumplen un rol fundamental en la operación continua de la planta, por lo que su confiabilidad y desempeño frente a distintos regímenes de operación resulta clave para la seguridad y disponibilidad del sistema de generación.

La selección de estos motores se fundamenta en su alta frecuencia de operación y en la significativa variación en la cantidad de arranques y detenciones observada durante los períodos analizados, lo cual los convierte en elementos especialmente sensibles a fenómenos transitorios eléctricos y mecánicos.

En la tabla 3.1 se presentan las principales características técnicas de los motores en estudio, incluyendo su fabricante, potencia nominal, tensión de operación, corriente nominal y otros parámetros relevantes para el análisis eléctrico y mecánico desarrollado en los apartados siguientes.

Tabla 3.1: Motores bajo estudio Nehuenco 2

Equipo	Marca	Potencia	Corriente	Tensión	Conexión	RPM	FP
MOT.BBA.1 CTO.CERRADO ENFR.	ALSTOM	670 kW	73,9 A	6.600 V	Y	593	0,83
MOT.BBA.2 CTO.CERRADO ENFR.	ALSTOM	670 kW	73,9 A	6.600 V	Y	593	0,83
MOT.BBA.EXTRACCION COND.	ALSTOM	400 kW	40,7 A	6.600 V	Y	1485	0,90
MOT.BBA.EXTRACCION COND.	ALSTOM	400 kW	40,7 A	6.600 V	Y	1485	0,90
BBA.AGUA ALIMENT.HRSG/SIST.APH	ALSTOM	1900 kW	187,6 A	6.600 V	Y	2980	0,92
BBA.AGUA ALIMENT.HRSG/SIST.APH	ALSTOM	1900 kW	187,6 A	6.600 V	Y	2980	0,92

A continuación, en las tablas 3.2 a 3.4 y figuras 3.1 a 3.3 se presentan las placas y otros parámetros de cada motor bajo estudio de la unidad Nehuenco 2.

Tabla 3.2: Parámetros Motor BBA APH 101/102

MOTOR BOMBA DE ALTA PRESIÓN PARA ALIMENTACIÓN DE CALDERAS (APH 101/201)	
Tipo motor	Asincrónico MT6600V
Typ	F3HXC 500 (024ALV 001)
Tensión nominal	6.600V
Frecuencia nominal	50 Hz
Potencia nominal	1.900 kW
Corriente nominal	187,6A
Velocidad sincrónica	2.980 RPM
Factor de Potencia	0,92 (0.88 /0.91/0.92 según carga 2/4, 3/4, 4/4)
Eficiencia	95.6 / 96.2 / 96.3 (%) según carga (aparecen varias columnas 2/4, 3/4, 4/4).
Conexión	Estrella
Clase de aislamiento	F
IP	IEC/IP55
T°	37°C
Rotor	Cage
Momento de inercia a velocidad de rotación	31 kgm^2
Deslizamiento	0,67 %
Momento nominal (4/4)	6090 Nm
Pares de polos	1
Año de fabricación	2002
T°cobre estator	120°C
Rs	0,1402 ohm



Figura 3.1: Placa motor APH101/201

Tabla 3.3: Parámetros Motor BBA CEX 101/201

MOTOR BBA EXTRACCIÓN CONDENSADO (CEX P 101/201)	
Tipo motor	Asincrónico MT6600V
Typ	F3HXC 400 G/4 (024AL 002)
Tensión nominal	6.600V
Frecuencia nominal	50 Hz
Potencia nominal	400 kW
Corriente nominal	40,7A
Velocidad sincrónica	1.485 RPM
Factor de Potencia	0,9 (0.84 /0.89/0.9 según carga 2/4, 3/4, 4/4)
Eficiencia	95.1 / 95.6 / 95.6 (%) según carga (aparecen varias columnas 2/4, 3/4, 4/4).
Conexión	Estrella
Clase de aislamiento	F
IP	IEC/IP55
T°	40°C
Rotor	Cage
Momento de inercia a velocidad de rotación	8 kgm^2
Deslizamiento	1 %
Momento nominal (4/4)	2572Nm
Pares de polos	2
Año de fabricación	2002
T°cobre estator	120°C
Rs	0,76342 ohm



Figura 3.2: Placa motor CEX101/201

Tabla 3.4: Parámetros Motor BBA CRF 101/201

MOTOR BBA CERRADO ENFRIAMIENTO (CRF 101/201)	
Tipo motor	Asincrónico MT6600V
Typ	N3RXC 560 G/10 (024ALT 001)
Tensión nominal	6.600V
Frecuencia nominal	50 Hz
Potencia nominal	670 kW
Corriente nominal	73,9A
Velocidad sincrónica	593 RPM
Factor de Potencia	0,83
Eficiencia	87.0 / 81.1/ 84.8 (%) según carga (aparecen varias columnas 2/4, 3/4, 4/4).
Conexión	Estrella
Clase de aislamiento	F
IP	IEC/IP55
T°	40°C
Rotor	Cage
Momento de inercia a velocidad de rotación	-
Deslizamiento	1,17 %
Momento nominal (4/4)	10785Nm
Pares de Polos (p)	5
Año de fabricación	2003
T°cobre estator	-
Rs	0,47308



Figura 3.3: Placa motor CRF101/201

3.2. Operación de motores y brechas

Para lograr evidenciar la operación de los motores, inicialmente se llevó a cabo un análisis anual para realizar la comparación durante el mes más adecuado, donde se registraron la mayor cantidad de arranques y detenciones. Así se evalúa meses donde la operación no fue interrumpida por mantenimientos o fallas.

La extracción de los datos a analizar se obtuvieron mediante el equipo de medición y su *software* ***SPPA-T3000 Siemens***, donde se lograron obtener los registros de los arranques y detenciones de ambos años a estudiar para cada motor. Además se lograron obtener otras variables analógicas, como la corriente de cada motor, voltaje de la barra, temperatura de los devanados y la potencia.

En el estudio de implementación de partidores suaves para los motores se estudiaron los años 2023 y 2025, donde el año 2023 fue aquél en el que la central termoeléctrica aún se encontraba con una operación igual a la de los años anteriores, sin ser afectados por el ingreso de las energías renovables. En cambio, en el 2025 ya se presentaba la nueva forma de operación, en la cual predominaban los arranques por las tardes y detenciones en las mañanas para las unidades de la central Nehuenco.

En los años seleccionados se analizaron los meses detalladamente para los seis motores de la unidad Nehuenco 2, y se pudo tabular la cantidad de arranques y detenciones por meses que tuvo cada motor, el promedio de corrientes inrush evidenciadas en los arranques, como se veía afectada la tensión de la barra ante los arranques y cuando se conectaba más de un motor.

El análisis de los datos de operación evidencia un cambio significativo en el régimen operacional de los motores bomba de la central Nehuenco entre los años 2023 y 2025.

Dicho cambio se manifiesta principalmente en el aumento de la frecuencia de arranques y detenciones, así como en el incremento de las corrientes inrush asociadas a cada evento de arranque.

Por otro lado, los motores analizados fueron fabricados en el año 2002 y 2003, por lo que presentan una condición de obsolescencia asociada a su antigüedad. Adicionalmente, los cambios estructurales en el portafolio industrial del fabricante Alstom a lo largo de los años han limitado la disponibilidad de repuestos originales y el soporte directo para equipos de generaciones anteriores, lo que introduce restricciones adicionales desde el punto de vista de la mantenibilidad y la continuidad operativa.

Si bien en la actualidad estos motores operan de manera correcta y cumplen con los requerimientos funcionales del proceso, su vida útil remanente es limitada, por lo que, a mediano y largo plazo, es esperable la aparición de problemas de mayor envergadura asociadas a fallas, mantenimiento y disponibilidad de repuestos.

3.2.1. Arranques y detenciones

A modo de resumen, la información se presenta en siguiente tabla, donde por cada año se tienen los arranques y detenciones de cada motor en cada mes. Este análisis se generó con el *software* Matlab, en el cual se creo un código que analiza la data extraída de los servidores de la central. Cada vez que existe el cambio de no servicio a estar en servicio se define como arranque y viceversa como parada.

En las tablas 3.5 y 3.6 se representa valores del año 2023, en el cual la central presentaba una operación normal, donde se logran evidenciar pocos arranques durante los meses del año.

Tabla 3.5: Arranques meses de 2023

Bomba	Ene	Feb	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep	Oct
APH_101	0	5	4	1	0	1	0	3	1	2
APH_201	2	1	4	0	3	2	0	3	9	7
CEX_101	0	0	3	1	0	0	1	3	1	4
CEX_201	1	3	1	0	2	1	0	3	9	6
CRF_101	0	1	1	2	2	1	0	4	5	5
CRF_201	1	2	1	1	1	1	0	5	5	4

Tabla 3.6: Detenciones meses de 2023

Bomba	Ene	Feb	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep	Oct
APH_101	0	4	4	1	1	1	0	3	1	2
APH_201	2	2	4	0	2	2	0	4	8	8
CEX_101	0	0	2	1	1	0	0	4	1	4
CEX_201	1	3	2	0	1	1	1	3	8	7
CRF_101	0	1	1	2	2	1	0	5	4	6
CRF_201	1	2	1	1	1	1	0	6	4	5

En las tablas 3.7 y 3.8 se representa valores del año 2023, en el cual la central presentaba una operación normal, donde se logran evidenciar pocos arranques durante los meses del año.

Tabla 3.7: Arranques meses de 2025

Bomba	Ene	Feb	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep	Oct
APH_101	10	15	2	6	6	4	0	6	0	28
APH_201	27	22	9	8	7	15	3	9	0	14
CEX_101	9	4	0	1	1	0	3	1	0	1
CEX_201	14	12	8	5	5	13	5	7	0	12
CRF_101	4	4	1	1	3	9	2	5	2	10
CRF_201	5	5	2	4	4	9	0	7	1	9

Tabla 3.8: Detenciones meses de 2025

Bomba	Ene	Feb	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep	Oct
APH_101	11	15	2	6	6	4	0	6	0	28
APH_201	26	22	9	8	8	14	4	9	0	13
CEX_101	8	5	0	1	1	0	3	1	0	1
CEX_201	14	11	8	5	6	12	6	7	0	11
CRF_101	3	4	1	1	4	8	3	5	2	9
CRF_201	4	5	2	4	5	8	1	7	1	8

El mes de octubre fue seleccionado como período de análisis detallado, debido a que concentra los mayores niveles de exigencia operacional en ambos años evaluados. Al comparar los arranques registrados en octubre de 2023 y octubre de 2025, se observa un incremento generalizado en la mayoría de los motores bomba, particularmente en aquellos pertenecientes al sistema APH.

El motor **APH_101** incrementó sus arranques desde dos eventos en octubre de 2023 hasta 28 eventos en octubre de 2025, lo que representa un aumento de 14 veces, equivalente a un incremento porcentual del 1300 %. De forma similar, el motor **APH_201** duplicó su número de arranques, pasando de seis a 14 eventos, lo que corresponde a un aumento del 100 %.

En el sistema **CEX**, el motor **CEX_201** incrementó sus arranques desde seis hasta 12 eventos, representando un aumento de dos veces (100 %), mientras que el motor **CEX_101** presentó una baja frecuencia de arranques, pasando de cuatro a un evento, lo que indica una menor afectación por el nuevo régimen operacional.

Por su parte, los motores del sistema **CRF** también evidenciaron incrementos relevantes. El motor **CRF_101** aumentó sus arranques desde cinco hasta 10 eventos, duplicando su operación mensual (100 %), mientras que el motor **CRF_201** pasó de cuatro a nueve arranques, lo que equivale a un incremento de 2,25 veces (125 %).

Con respecto a los valores obtenidos de arranques y paradas, se debe tener en cuenta que durante el año 2023 en el mes de septiembre se tiene corriente inrush cero para todos los motores, debido que existió un mantenimiento a la unidad de Nehuenco 2. De igual manera, en el año 2025 el mismo mes de Septiembre se obtuvo corriente inrush en promedio cero, lo que se debe a una falla o mantenimiento.

El número de detenciones presenta una tendencia prácticamente idéntica a la de los arranques, manteniendo una relación cercana a uno a uno, lo que confirma que el aumento observado responde a un patrón sistemático de operación intermitente y no a eventos aislados o fallas puntuales.

3.2.1.a. Análisis del incremento anual de arranques

El análisis anual de los datos de operación, presentado en las tablas 3.9 y 3.10, confirma que el cambio en el régimen operacional no se limita a eventos mensuales, sino que representa una modificación estructural en la operación de la central.

Comparando los totales anuales de arranques entre los años 2023 y 2025, se obtienen los siguientes incrementos:

- **APH_101**: de 17 a 77 arranques, equivalente a un aumento de 4,5 veces (353 %).
- **APH_201**: de 31 a 114 arranques, equivalente a un aumento de 3,7 veces (268 %).
- **CEX_101**: de 13 a 20 arranques, equivalente a un aumento de 1,5 veces (54 %).
- **CEX_201**: de 26 a 81 arranques, equivalente a un aumento de 3,1 veces (212 %).
- **CRF_101**: de 21 a 41 arranques, equivalente a un aumento de 2,0 veces (95 %).
- **CRF_201**: de 21 a 46 arranques, equivalente a un aumento de 2,2 veces (119 %).

En términos globales, la central Nehuenco, en los motores 6,6kV, presenta un incremento promedio cercano al 193,7 % en la cantidad de arranques anuales, lo que confirma un cambio sustancial en la estrategia de operación de la planta.

Finalmente, se obtuvieron los siguientes resúmenes en las tablas 3.9 y 3.10 de operación anuales de cada motor bomba.

Tabla 3.9: Resumen operación 2023

Bomba	Arranques total 2023	Paradas total 2023
APH_101	17	17
APH_201	31	32
CEX_101	13	13
CEX_201	26	27
CRF_101	21	22
CRF_201	21	22

Tabla 3.10: Resumen operación 2025

Bomba	Arranques total 2025	Paradas total 2025
APH_101	77	78
APH_201	114	113
CEX_101	20	20
CEX_201	81	80
CRF_101	41	40
CRF_201	46	45

3.2.2. Corrientes inrush

Además de analizar la operación mensual y anual, también se llevó a cabo el análisis y estudio de las corrientes inrush que presentan los motores a la hora de arrancar. Para este

análisis se realizó un código de Matlab, el cual procesa la data de la central. Al registrar una elevación de corriente guarda el valor y, cuando completa los registros, calcula el promedio de las corrientes elevadas presentes en los arranques. De igual forma se obtuvieron los promedios de los valores inrush en cada mes para cada periodo evaluado en las tablas 3.11 y3.12.

Tabla 3.11: Promedio corrientes inrush en meses de 2023

Bomba	Ene	Feb	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep	Oct
I_{APH101}	0,0	150,8	171,7	167,8	171,4	0,0	0,0	147,6	0,0	148,7
I_{APH201}	161,1	160,9	29,0	0,0	162,1	161,6	161,5	156,9	0,0	139,6
I_{CEX101}	0,0	0,0	31,5	30,2	29,8	0,0	30,5	28,0	0,0	23,6
I_{CEX201}	30,4	30,7	30,6	0,0	28,3	30,2	7,3	30,2	0,0	24,4
I_{CRF101}	64,4	64,6	64,5	63,0	64,3	64,3	63,6	64,9	0,0	64,0
I_{CRF201}	68,3	68,2	68,3	68,8	67,6	67,4	66,7	68,5	0,0	68,4

Tabla 3.12: Promedio corrientes inrush en meses de 2025

Bomba	Ene	Feb	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep	Oct
I_{APH101}	168,0	1051,8	1077,4	1060,2	1071,6	1049,8	0,0	1024,5	0,0	974,4
I_{APH201}	165,0	975,4	235,7	1010,6	1000,2	1004,3	698,8	1018,8	0,0	1002,2
I_{CEX101}	31,5	132,1	0,0	85,5	241,2	0,0	223,0	0,0	0,0	26,5
I_{CEX201}	30,4	142,1	37,1	137,8	36,9	174,0	135,1	203,8	0,0	134,2
I_{CRF101}	75,5	83,9	78,8	74,0	274,6	215,6	75,1	280,1	397,6	164,9
I_{CRF201}	68,2	361,0	71,1	200,5	162,1	288,6	67,0	231,9	415,7	130,8

Conocidos los valores promedio de las corrientes inrush registradas por los motores durante cada mes de los años 2023 y 2025, se seleccionó el mes de octubre para realizar un análisis comparativo más detallado, con el objetivo de evidenciar las variaciones observadas entre ambos periodos.

Al comparar los valores promedio de corriente inrush registrados en octubre de 2023 y octubre de 2025, se observa un aumento significativo en los valores medidos, particularmente en los motores de mayor potencia. Esta diferencia se asocia principalmente al incremento en la frecuencia de arranques registrada durante el periodo más reciente.

El motor **APH_101** presenta un valor promedio de corriente inrush de 148,7 A en octubre de 2023, mientras que en octubre de 2025 el promedio registrado alcanza 974,4 A. De manera similar, el motor **APH_201** presenta un aumento en el valor promedio registrado desde 139,6 A hasta 1002,2 A.

En los motores del sistema **CEX**, el motor **CEX_201** muestra un incremento en su valor promedio de corriente inrush desde 24,4 A hasta 134,2 A. El motor **CEX_101**, en contraste, mantiene valores similares en ambos años, lo cual es consistente con la baja frecuencia de arranques observada durante el mes analizado.

Los motores del sistema **CRF** presentan un comportamiento intermedio. El motor **CRF_101** registra un incremento en el valor promedio de corriente inrush desde 64,0 A en octubre de 2023 hasta 164,9 A en octubre de 2025. Por su parte, el motor **CRF_201** presenta un aumento desde 68,4 A hasta 130,8 A.

Cabe destacar que estas variaciones corresponden a los valores promedio registrados de corriente inrush y no necesariamente a un cambio en la corriente de arranque característica

del motor. Sin embargo, el aumento en la frecuencia de arranques implica una mayor repetición de estos eventos transitorios, lo que genera un mayor estrés térmico, eléctrico y mecánico sobre los motores bomba.

Este fenómeno puede acelerar el envejecimiento del aislamiento del bobinado, incrementar la solicitación de los sistemas de protección y producir caídas de tensión transitorias más frecuentes en la barra de 6,6 kV.

Bajo el régimen operacional observado en el año 2025, la repetición constante de eventos de arranque con corrientes elevadas incrementa la probabilidad de perturbaciones eléctricas, afectando no solo a los motores analizados, sino también a otros equipos conectados a la misma barra. En consecuencia, los resultados obtenidos justifican la necesidad de evaluar medidas de mitigación orientadas a reducir el impacto eléctrico y mecánico asociado al nuevo esquema de operación.

3.2.3. Temperatura en los cojinetes y devanados durante los arranques

La temperatura constituye uno de los factores más relevantes en la determinación de la vida útil de los motores eléctricos, dado que el envejecimiento del aislamiento del estator es un fenómeno predominantemente térmico. Incrementos sostenidos o repetitivos de temperatura aceleran los procesos de degradación de la aislación, reduciendo la vida útil del motor y aumentando la probabilidad de fallas prematuras. Por esta razón, el análisis térmico resulta fundamental para evaluar el impacto real de las condiciones de operación, particularmente en escenarios con múltiples arranques y paradas.

En una máquina de inducción, la principal fuente de calentamiento eléctrico durante el arranque corresponde a las pérdidas de cobre en los devanados del estator y rotor, las cuales pueden reflejarse, directa o indirectamente, en la temperatura medida en los devanados y, en menor medida, en los cojinetes. Si bien los arranques suelen ser eventos de corta duración, su ocurrencia reiterada puede contribuir al calentamiento acumulado del motor, especialmente cuando el tiempo entre arranques no permite una disipación térmica completa.

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento térmico de las máquinas bajo condiciones reales de operación, se utilizaron los registros históricos de temperatura correspondientes al año 2025, específicamente del mes de octubre. Estos datos incluyen las mediciones de temperatura en los devanados de los motores analizados, permitiendo disponer de una referencia directa sobre la evolución térmica del sistema durante los procesos de arranque y operación.

La información de temperatura obtenida no se emplea únicamente para observar variaciones instantáneas asociadas a cada arranque, sino que constituye la base para reconstruir un perfil térmico temporal del motor. Dicho perfil permite estimar el envejecimiento térmico acumulado del aislamiento mediante modelos basados en la ley de Arrhenius, expresados en forma práctica a través de la regla de los 10 °C. De esta manera, las temperaturas medidas se utilizan para calcular factores de aceleración térmica relativos a una temperatura de referencia T_{ref}, lo que posibilita cuantificar el daño térmico en términos de horas equivalentes de vida útil consumidas respecto a dicha referencia.

Este enfoque permite evaluar el impacto térmico real de la operación y de los arranques, incluso en aquellos casos en que los incrementos de temperatura durante el arranque no

son claramente distinguibles de forma instantánea, pero sí relevantes desde un punto de vista acumulativo a lo largo del tiempo.

3.3. Comparación de arranques mediante simulación

En este apartado se procede a la descripción del modelo del sistema implementado en PLECS. Mediante esta simulación se evaluaron dos escenarios para comprobar y validar la operación en los arranques de la máquina de inducción, así como también el estudio e interpretación de los resultados en el escenario correspondiente.

3.3.1. Descripción de la simulación

Para llevar acabo la simulación se describe la estructura base de los modelos implementados en PLECS, ilustrados en las figuras 3.4 y 3.5. Este modelo de simulación comienza con una fuente de tensión trifásica conectada directamente a una máquina de inducción. Así se visualizará el arranque DOL, Direct On Line. Por otro lado, se tiene la conexión de la fuente trifásica mediante el esquema de partidor suave a la máquina.

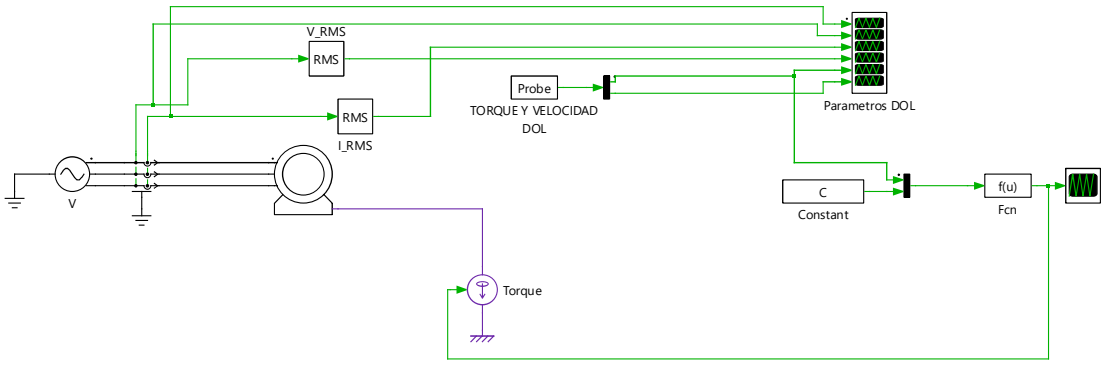


Figura 3.4: Sistema de arranque con partida directa diseñado en PLECS

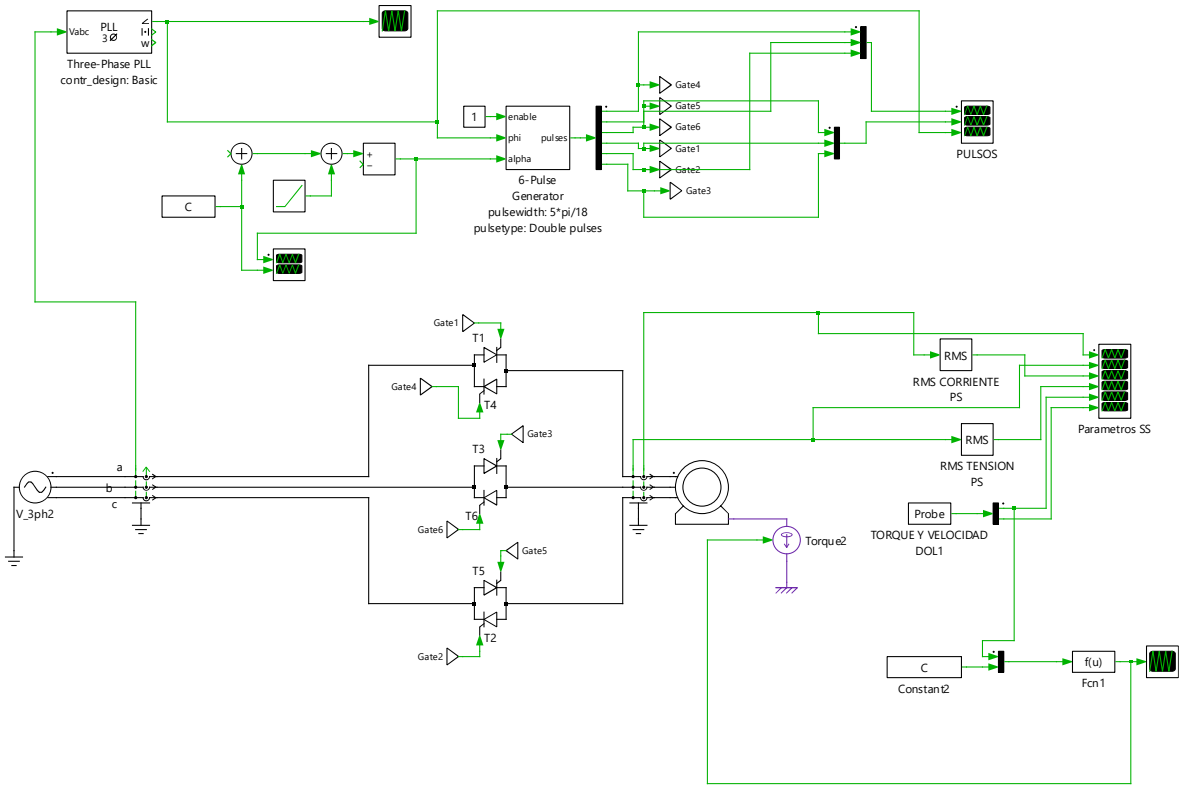


Figura 3.5: Sistema de arranque con partidor suave diseñado en PLECS

Para la modelación de la máquina asincrónica se utilizó el bloque Induction Machine (Squirrel Cage), correspondiente a un motor de inducción de jaula de ardilla. El modelo de la máquina de inducción fue parametrizado utilizando un código desarrollado en MATLAB, proporcionado para el desarrollo de este trabajo, el cual calcula los parámetros eléctricos del modelo a partir de las características nominales disponibles del motor. Posteriormente, dichos parámetros fueron ajustados de manera iterativa con el objetivo de obtener una representación adecuada del comportamiento dinámico del motor durante el proceso de arranque. Cabe señalar que, si bien los parámetros permiten reproducir de forma consistente la respuesta del sistema en la simulación, en la etapa de arranque estos no necesariamente permiten representar de manera exacta los valores nominales reales del motor. Los valores finales utilizados en el modelo corresponden a la simulación del motor APH y se presentan en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13: Parámetros para la simulación de la máquina de Inducción

	Parámetro APH
Resistencia del estator (Rs)	0,3982 Ω
Inductancia de fuga del estator (Lls)	0,0031 Ω
Resistencia de Rotor (Rr)	0,6977 Ω
Inductancia de fuga del rotor (Llr)	0,0062 H
Inductancia magnetizante (Lm)	0,168 H
Inercia (J)	33,9 kgm^2
Numero de pares de polos (p)	1

Las especificaciones sobre la configuración de PLECS al realizar las simulaciones son

descritos en la tabla 3.14.

Tabla 3.14: Parámetros en configuración PLECS

Característica	**Valor**
Tiempo de simulación	2 u 8 [s]
Solver	Variable-Step
Tamaño máximo de paso	1e-5 [s]
Tamaño de paso inicial	auto
Factor de refinación	1
Tolerancia relativa	1e-1
Tolerancia absoluta	auto

Las simulaciones abarcan dos escenarios, que permiten evaluar diferentes aspectos del sistema de la máquina de inducción. Este análisis de los diferentes tipos de arranques en motores tiende a ser de gran relevancia dadas las características que se presentan cada uno.

3.3.2. Carga

Un elemento fundamental en la simulación de los motores asociados a bombas es la correcta representación de la carga mecánica. En este caso, se trata de bombas centrífugas de alta presión destinadas a la alimentación de calderas, sistemas principales de agua de enfriamiento y extracción de condensado. Debido a su naturaleza centrífuga, la carga mecánica debe modelarse mediante un par resistente dependiente de la velocidad de rotación.

Para este tipo de bombas, el par de carga se modela mediante una relación cuadrática con la velocidad del rotor, según:

$$T_L = k_{pump} \cdot \omega^2 \tag{3.1}$$

donde T_L corresponde al par de carga de la bomba, k_{pump} es la constante característica de la bomba y ω es la velocidad angular del rotor en rad/s.

En consecuencia, la potencia mecánica requerida por la bomba puede expresarse como:

$$P_L = k_{pump} \cdot \omega^3 \tag{3.2}$$

lo que refleja el comportamiento típico de las bombas centrífugas, cuya potencia es proporcional al cubo de la velocidad.

3.3.3. Escenario 1: Partida directa

Con el objetivo de analizar el comportamiento del motor bajo arranque directo en línea (DOL), se parametriza la máquina en el entorno de simulación y se ejecuta el modelo dinámico correspondiente. El esquema utilizado se presenta en la figura 3.4.

La configuración de motor que se modela es la del APH, motor de 1.900 kW. En esta configuración, el motor es energizado directamente a tensión nominal desde el instante

inicial. La figura 3.6 muestra las formas de onda instantáneas y valores RMS de corriente y tensión, junto con la evolución de la velocidad mecánica y el torque electromagnético.

Se observa que la tensión aplicada es constante, ya que se mide la de la fuente, mientras que la corriente presenta un elevado valor inicial característico del arranque directo, disminuyendo progresivamente hasta alcanzar régimen permanente. Asimismo, la velocidad aumenta rápidamente hasta su valor nominal y el torque electromagnético exhibe un pico inicial asociado a la aplicación inmediata de tensión.

Estos resultados permiten caracterizar el comportamiento dinámico del motor bajo partida directa, los cuales serán utilizados posteriormente para la comparación energética y operativa con el escenario de partidor suave.

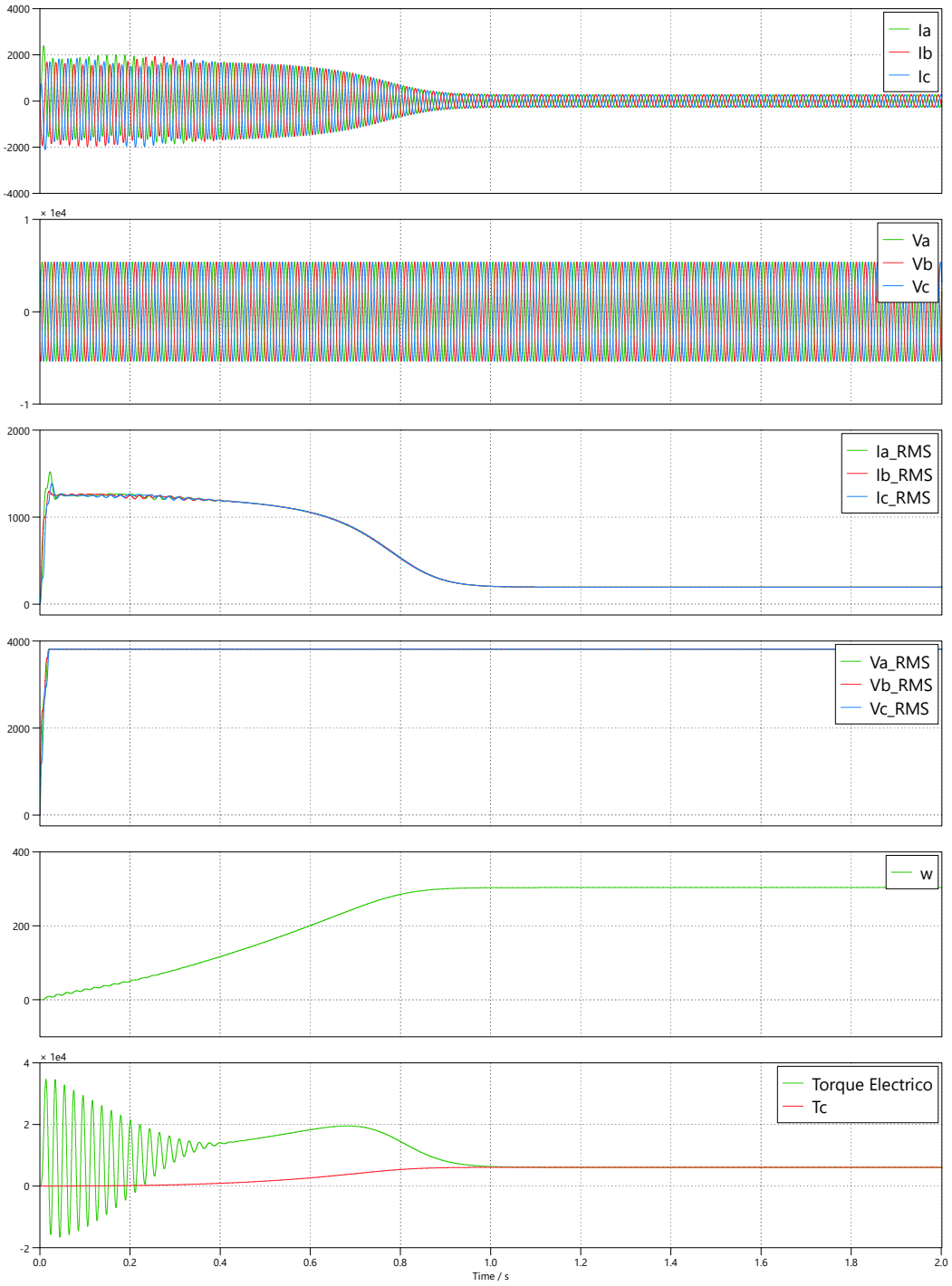


Figura 3.6: Simulación de operación con partida directa: (1)Corrientes; (2)Tensión; (3)Corriente RMS; (4)Tensión RMS; (5)Velocidad mecánica; (6)Torque electromagnético

3.3.4. Escenario 2: Partida con partidor suave

Para este caso, se implementa en PLECS la simulación del sistema motor bomba utilizando un partidor suave, cuyo esquema se muestra en la Figura 3.5.

La configuración corresponde al mismo motor analizado en el caso anterior, el cual ha sido identificado como el más crítico y que ha presentado fallas en la central.

En la Figura 3.7 se presentan los resultados obtenidos durante el proceso de arranque mediante partidor suave. En este caso, el partidor fue modelado utilizando una rampa lineal de tensión, aplicada de forma progresiva durante el intervalo de arranque. El ajuste de esta rampa se definió con el objetivo de reducir la corriente de irrupción y suavizar el desarrollo del torque electromagnético, evitando picos excesivos respecto al arranque directo en línea, pero asegurando simultáneamente que el motor dispusiera del torque suficiente para acelerar la carga dentro de un tiempo aceptable. Bajo este criterio, se muestran las formas de onda instantáneas de corriente y tensión trifásica, sus respectivos valores RMS, así como la evolución de la velocidad mecánica, el torque electromagnético y el torque de carga.

Dado que en la visualización global del transitorio algunos detalles de la tensión aplicada al motor no se distinguen con suficiente claridad, en las Figuras 3.8 a 3.10 se incluyen ampliaciones de tramos representativos del arranque. Estas ampliaciones permiten apreciar de mejor forma la variación progresiva de la tensión durante la rampa impuesta por el partidor suave, así como su efecto sobre la corriente, el desarrollo del torque y la aceleración del conjunto motor–bomba.

Se observa que la tensión aplicada al motor aumenta de manera gradual conforme a la rampa configurada en el partidor suave, lo que se traduce en un incremento controlado de la corriente de arranque. En consecuencia, la velocidad mecánica evoluciona progresivamente hasta alcanzar el régimen permanente, mientras que el torque desarrollado por el motor sigue la dinámica impuesta tanto por la rampa de tensión como por la característica mecánica de la carga.

Estos resultados permiten caracterizar el comportamiento dinámico del conjunto motor–bomba bajo partida con partidor suave. No obstante, el análisis presentado en esta sección tiene un carácter principalmente descriptivo. En el Capítulo 4 se abordará con mayor profundidad el desempeño energético y operativo del sistema, mediante la comparación de distintos casos en los que se varía el tiempo de rampa del partidor suave, con el fin de evaluar la sensibilidad de las variables eléctricas, mecánicas y térmicas frente a este parámetro.

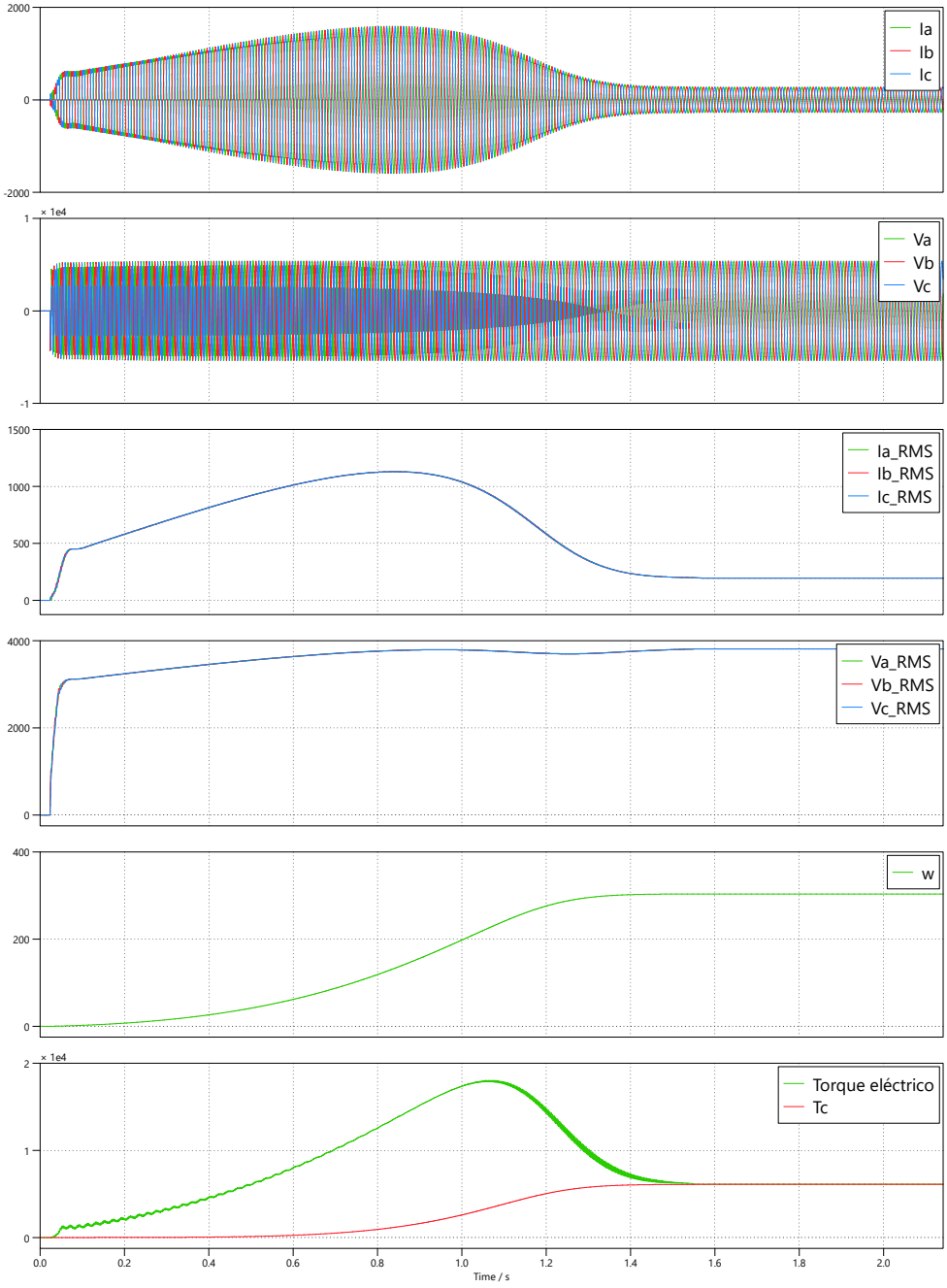


Figura 3.7: Simulación de operación con partidor suave: (1)Corrientes; (2)Tensión; (3)Corriente RMS; (4)Tensión RMS; (5)Velocidad mecánica; (6)Torque electromagnético

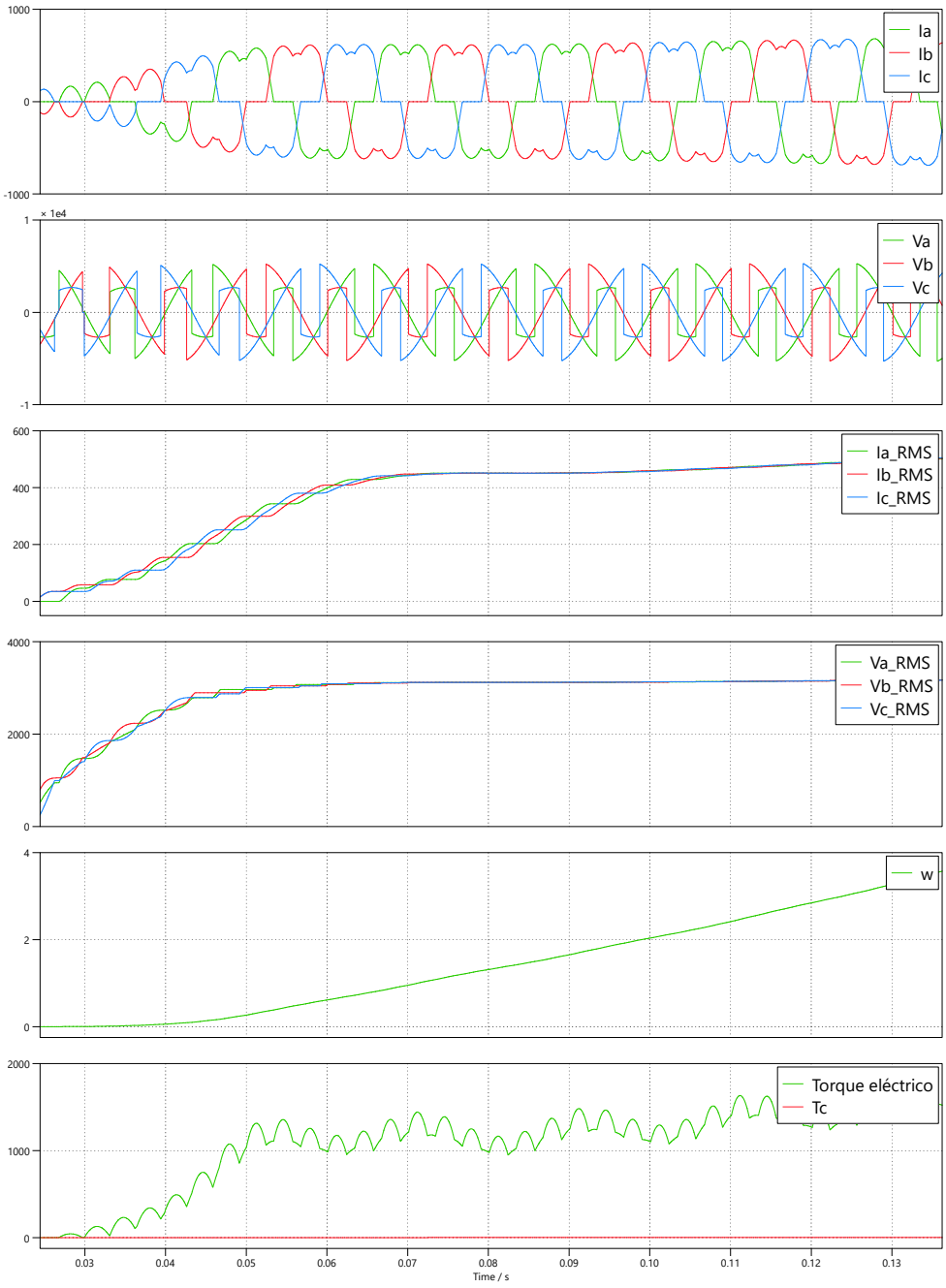


Figura 3.8: Vista detallada de un intervalo de la simulación de operación con partidor suave: (1)Corrientes; (2)Tensión; (3)Corriente RMS; (4)Tensión RMS; (5)Velocidad mecánica; (6)Torque electromagnético

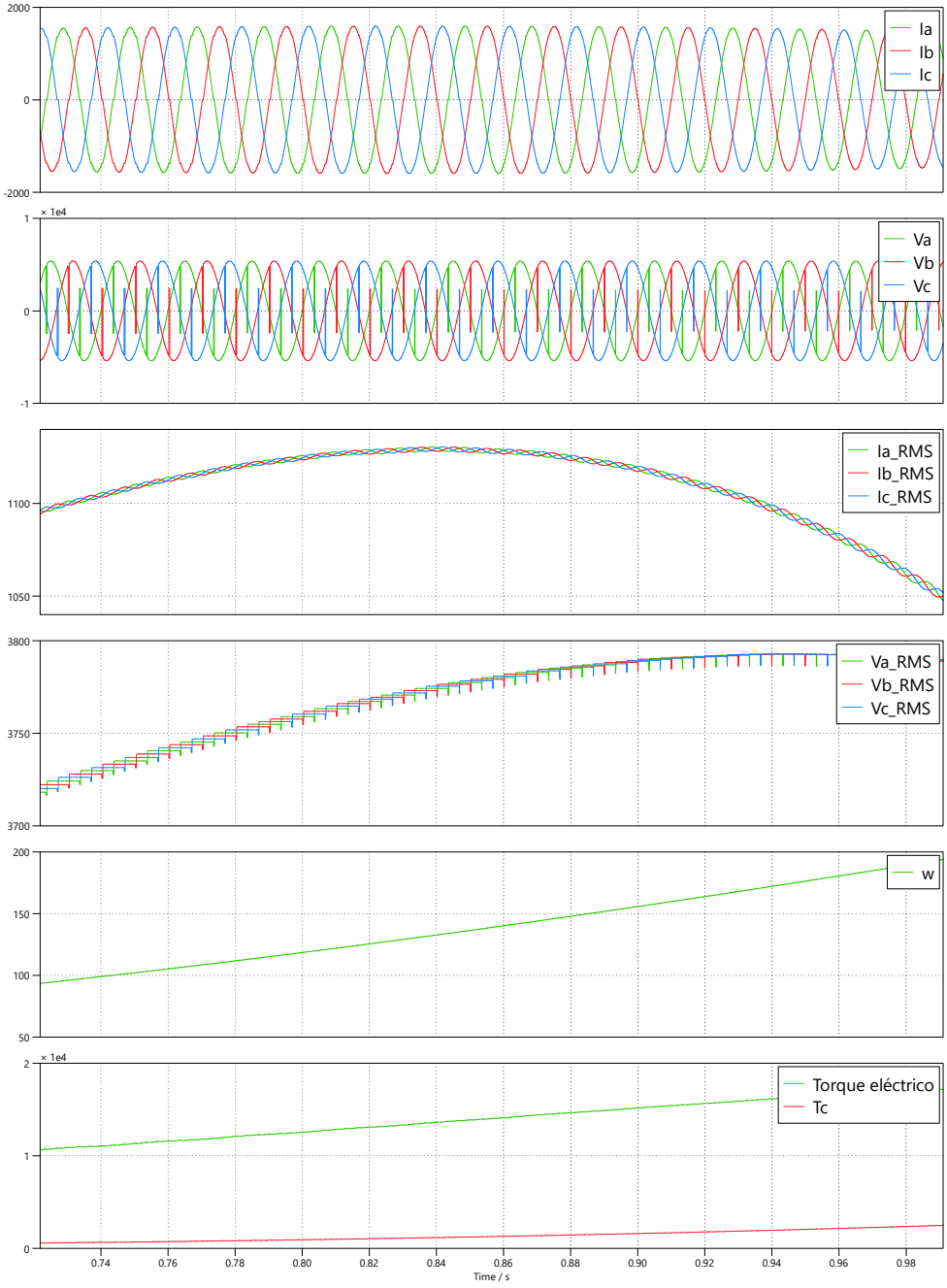


Figura 3.9: Vista detallada de un intervalo de la simulación de operación con partidor suave: (1)Corrientes; (2)Tensión; (3)Corriente RMS; (4)Tensión RMS; (5)Velocidad mecánica; (6)Torque electromagnético

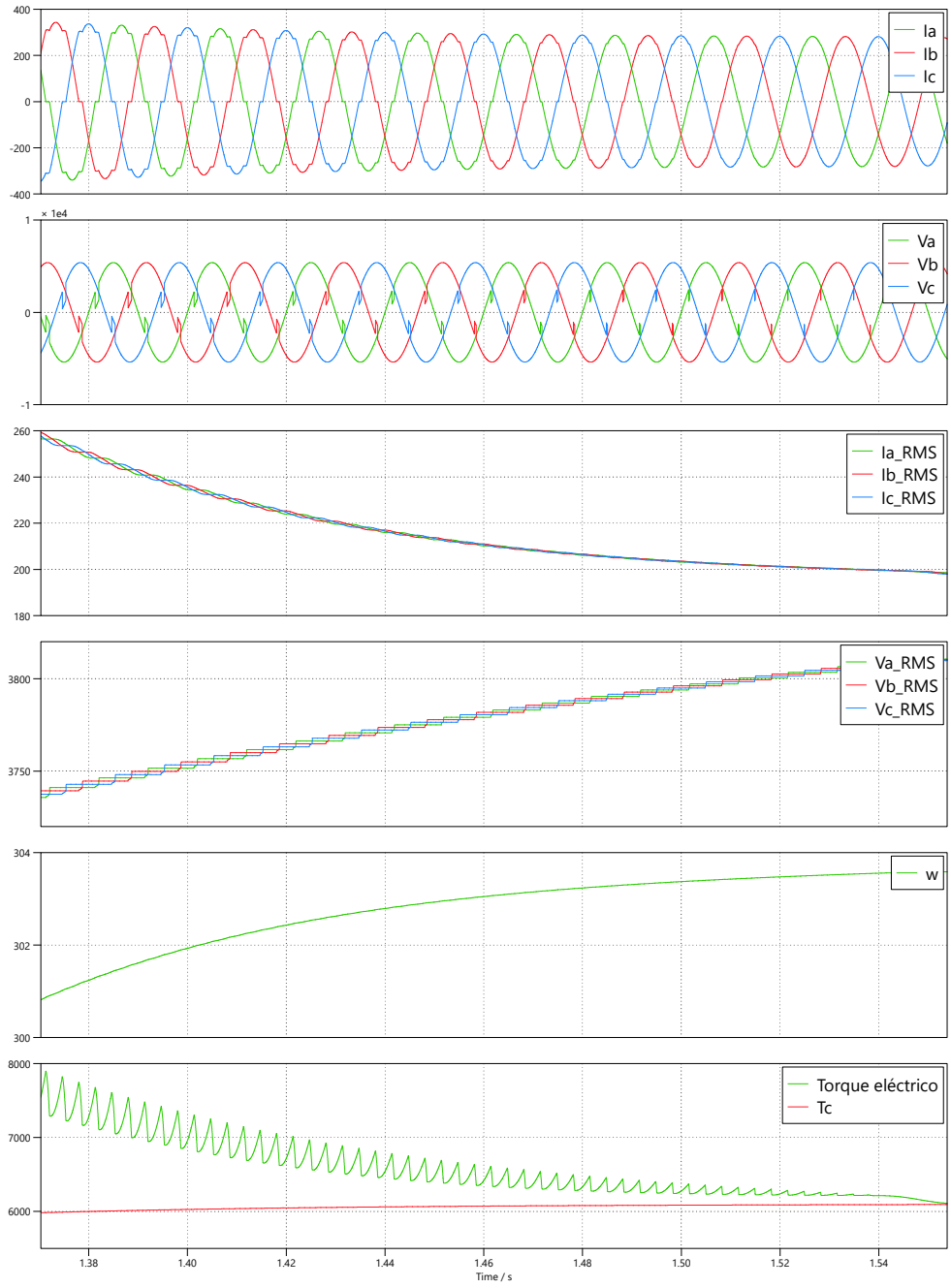


Figura 3.10: Vista detallada de un intervalo de la simulación de operación con partidor suave, ampliada al final: (1)Corrientes; (2)Tensión; (3)Corriente RMS; (4)Tensión RMS; (5)Velocidad mecánica; (6)Torque electromagnético

3.4. Análisis de la reducción de vida útil

La vida útil de las máquinas de inducción constituye un aspecto crítico en aplicaciones industriales, ya que se ve directamente afectada por las condiciones eléctricas y térmicas a las que el motor es sometido durante su operación. En particular, los procesos de arranque y parada representan uno de los escenarios más severos desde el punto de vista térmico, debido a las elevadas corrientes que circulan por los devanados del estator, generando incrementos significativos de las pérdidas por efecto Joule.

Para evaluar el impacto térmico de múltiples arranques sobre el aislamiento del estator de motores de inducción, se realizó el estudio de los datos históricos para poder analizar como se ve afectada la vida útil del aislamiento del estator de un motor de inducción cuando opera ante muchos arranques/paradas.

Para cada motor inicialmente se consideraron las siguientes variables:

- Número de arranques mes de Octubre N_{oct}.
- Corriente nominal del motor I_n.
- Resistencia del estator por fase R_s
- Clase de aislamiento del motor.

Para cada motor se tiene lo siguiente.

Tabla 3.15: Datos de los motores de inducción

Motor	N_{OCT}	$t_{arranque\ fabricante}$ **[s]**	**In [A]**	**Rs [Ohm] a 20°C**	**Clase Ails**	**T° Cobre estator [°C]**
APH 101	28	2,5	187,6	0,1407	F	120
APH 201	14	2,5	187,6	0,1407	F	120
CEX 101	10	2,5	40,7	0,7630	F	120
CEX 201	9	2,5	40,7	0,7630	F	120
CRF 101	1	N/A	73,9	0,4730	F	N/A
CRF 201	12	N/A	73,9	0,4730	F	N/A

3.4.0.a. Severidad térmica

Inicialmente el análisis se lleva a cabo con el indicador de **severidad térmica**, el cual representa la energía térmica relativa disipada en el estator durante el arranque. Así se analizará cada arranque de cada motor, mediante la siguiente ecuación:

$$S_{\text{arr}} = I_{\text{arr}}^2 \cdot t_{\text{arr}} \tag{3.3}$$

Este indicador se calcula mediante periodos, por día/por arranque, semanalmente y mensualmente. Para calcular la severidad térmica acumulada se obtiene de la suma de las severidades individuales de cada arranque por periodo y así se obtiene el impacto térmico global de los arranque múltiples sobre el aislamiento del estator.

$$S_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^{N} S_{\text{arr},i} \tag{3.4}$$

Considerado los periodos anteriormente mencionados, en las siguientes tablas se demuestran los resultados obtenidos para cada motor.

En adelante, la severidad térmica S_{arr} se expresa en unidades de $A^2 \cdot s$ y es un indicador térmico relativo, no una energía.

- APH 101

Tabla 3.16: Datos de arranques diarios motor APH101

Fecha/hora	**Operación**	**Observaciones**	**Modo de arranque**	$I_{arr}[A]$	$t_{arr}[s]$	V_{min} **o** $V_{prom}[V]$	$S_{arr}[A^2s]$
2025-10-04 14:06:50,819 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,64	0,00
2025-10-04 14:08:31,221 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,64	0,00
2025-10-04 14:08:34,521 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,63	0,00
2025-10-09 14:54:47,630 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,60	0,00
2025-10-09 14:54:54,129 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,60	0,00
2025-10-09 14:55:00,629 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,60	0,00
2025-10-09 14:55:13,728 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,61	0,00
2025-10-09 14:55:17,028 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,58	0,00
2025-10-09 14:55:20,329 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,60	0,00
2025-10-09 14:55:30,242 UTC	[EN-SERV]	Sin arranque, solo corriente	DOL	863,97	3,00	6,18	2239332,48
2025-10-09 14:55:33,429 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,61	0,00
2025-10-09 14:55:36,729 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,60	0,00
2025-10-09 14:55:43,230 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,61	0,00
2025-10-09 14:55:46,530 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,61	0,00
2025-10-09 14:55:49,830 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,60	0,00
2025-10-09 14:55:53,130 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,60	0,00
2025-10-09 14:55:59,631 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,61	0,00
2025-10-09 14:56:02,931 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,58	0,00
2025-10-09 14:56:09,431 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,61	0,00
2025-10-09 14:56:12,731 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,60	0,00
2025-10-09 14:56:19,231 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,60	0,00
2025-10-09 14:56:22,530 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,60	0,00
2025-10-09 14:56:29,030 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,60	0,00
2025-10-09 14:56:32,330 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,60	0,00
2025-10-09 20:15:43,936 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	1084,70	3,00	6,53	3529722,27
2025-10-09 22:27:51,129 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,68	0,00
2025-10-09 22:27:54,429 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,69	0,00
2025-10-09 22:28:03,928 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,67	0,00
2025-10-09 22:28:07,329 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,67	0,00

Tabla 3.17: Severidad acumulada en periodo semanal y mensual del motor APH101

Fecha	$S_{sem_{tot,DOL}}[A^2s]$	$S_{mes_{tot,DOL}}[A^2s]$
01/10-05/10	0,00	5769054,75
06/10-12/10	5769054,75	
13/10-19/10	0,00	
20/10-26/10	0,00	
27/10-31/10	0,00	

A partir de la tabla 3.16, se observa que predominan eventos catalogados como arranques fallidos, los cuales no presentan un aporte térmico relevante al estator, dado que la corriente de arranque registrada es nula o despreciable. En consecuencia, estos eventos no generan un consumo apreciable de vida útil del aislamiento del estator y su contribución al desgaste térmico del motor es despreciable.

No obstante, se identifican dos eventos correspondientes a arranques correctos, caracterizados por valores elevados de corriente de arranque y tiempos cercanos a los 3 segundos. Estos eventos concentran prácticamente la totalidad de la severidad térmica acumulada durante el período analizado, lo que indica que la energía térmica asociada a pérdidas de cobre durante el arranque se denomina solo por dos arranques efectivos. Cabe destacar que esta máquina, durante el periodo estudiado, mes

de Octubre, sufrió una falla por lo que salió de servicio el día 13 de ese mes, por lo tanto, se puede decir que estos arranques fallidos indican esa falla.

En la tabla 3.17 se logra apreciar que la severidad térmica acumulada semanal y mensual se concentra exclusivamente en el período comprendido entre el 06/10 y el 12/10, coincidente con la ocurrencia de los arranques efectivos registrados.

En consecuencia, para el motor APH101, ante la falla presentada en el mes estudiado se puede apreciar que el estrés térmico aplicado al aislamiento del estator igual es de valor elevado durante los dos arranque, lo cual igual desgasta a la máquina.

- APH 201

Tabla 3.18: Datos de arranques diarios motor APH201

Fecha/hora	**Operación**	**Observaciones**	**Modo de arranque**	$I_{arr}[A]$	$t_{arr}[s]$	V_{min} **o** $V_{prom}[V]$	$S_{arr}[A^2s]$
2025-10-04 14:18:20,127 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,63	0,00
2025-10-04 14:19:48,028 UTC	EN-SERV	Arranque fallido	DOL	0,00	0,00	6,64	0,00
2025-10-10 19:02:33,327 UTC	EN-SERV	Arranque corto	DOL	1031,00	3,00	6,58	3188883,00
2025-10-10 19:16:17,436 UTC	EN-SERV	Arranque corto	DOL	1013,00	3,00	6,45	3078507,00
2025-10-10 19:29:27,244 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	971,13	3,00	6,31	2829280,43
2025-10-10 20:09:37,971 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	974,67	3,00	6,69	2849944,83
2025-10-13 22:06:39,733 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	1030,10	3,00	6,44	3183318,03
2025-10-18 17:04:38,054 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	964,13	3,00	6,40	2788639,97
2025-10-20 15:38:19,785 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	981,78	3,00	6,40	2891675,91
2025-10-21 20:52:48,703 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	977,98	3,00	6,50	2869334,64
2025-10-22 16:32:57,717 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	1049,50	3,00	6,48	3304350,75
2025-10-26 15:32:14,375 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	992,69	3,00	6,46	2956300,31
2025-10-28 22:54:29,105 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	1028,90	3,00	6,59	3175905,63
2025-10-31 16:38:57,748 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	964,31	3,00	6,45	2789681,33

Tabla 3.19: Severidad acumulada en periodo semanal y mensual del motor APH201

Fecha	$S_{sem_{tot,DOL}}[A^2s]$	$S_{mes_{tot,DOL}}[A^2s]$
01/10-05/10	0,00	35905821,82
06/10-12/10	11946615,26	
13/10-19/10	5971958,00	
20/10-26/10	12021661,60	
27/10-31/10	5965586,96	

Para el motor APH201, los registros muestran una mayor cantidad de arranques efectivos, lo que se traduce en una severidad térmica distribuida de manera más uniforme a lo largo del período analizado, como se observa en la tabla 3.18. A diferencia del caso anterior, la mayoría de los eventos corresponde a arranques efectivos con valores de corriente de arranque del mismo orden y tiempos de arranque cercanos a los 3 segundos.

La severidad térmica asociada a cada arranque presenta valores moderados pero recurrentes, lo que implica un aporte acumulativo relevante al envejecimiento térmico del aislamiento del estator. En este caso, el desgaste no se encuentra dominado por eventos aislados de alta severidad, sino por la repetición de arranques con características similares a lo largo del mes.

Este comportamiento se refleja en la tabla 3.19, donde la severidad térmica acumulada semanal presenta valores distintos de cero en la mayoría de los períodos analizados, contribuyendo de manera progresiva a la severidad mensual total.

- CEX 101

Tabla 3.20: Datos de arranques diarios motor CEX101

Fecha/hora	Operación	Observaciones	Modo de arranque	$I_{arr}[A]$	$t_{arr}[s]$	V_{min} o $V_{prom}[V]$	$S_{arr}[A^2s]$
2025-10-09 14:38:30,702 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	26,07	3,00	6,58	2038,93

Tabla 3.21: Severidad acumulada en periodo semanal y mensual del motor CEX101

Fecha	$S_{sem_{tot,DOL}}[A^2s]$	$S_{mes_{tot,DOL}}[A^2s]$
01/10-05/10	0,00	2038,93
06/10-12/10	2038,93	
13/10-19/10	0,00	
20/10-26/10	0,00	
27/10-31/10	0,00	

Para el motor CEX101, los registros operacionales muestran la ocurrencia de un único evento de arranque efectivo durante el período analizado, tal como se observa en la tabla 3.20. Este arranque se caracteriza por un valor reducido de corriente de arranque y un tiempo de arranque cercano a los 3 s, lo que se traduce en una severidad térmica significativamente menor en comparación con los motores de mayor potencia analizados previamente.

La severidad térmica asociada a este evento presenta un valor acotado, reflejando un impacto térmico puntual y de baja magnitud sobre el motor. En consecuencia, la severidad acumulada semanal y mensual, mostrada en la tabla correspondiente, se concentra exclusivamente en el período en que ocurre el arranque, permaneciendo nula en los restantes intervalos analizados.

- CEX 201

Tabla 3.22: Datos de arranques motor CEX201

Fecha/hora	Operación	Observaciones	Modo de arranque	$I_{arr}[A]$	$t_{arr}[s]$	V_{min} o $V_{prom}[V]$	$S_{arr}[A^2s]$
2025-10-09 13:50:14,157 UTC	EN-SERV	Arranque sin peak	DOL	58,71	3,00	6,63	10340,59
2025-10-09 18:22:34,404 UTC	EN-SERV	Arranque sin peak	DOL	46,10	3,00	6,60	6376,46
2025-10-10 00:51:58,656 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	209,49	3,00	6,71	131658,18
2025-10-10 18:51:38,829 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	218,82	3,00	6,59	143646,58
2025-10-13 22:02:12,902 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	221,79	3,20	6,54	157410,57
2025-10-18 17:02:24,474 UTC	EN-SERV	Arranque sin peak	DOL	28,34	2,80	6,69	2245,62
2025-10-20 15:36:27,604 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	188,44	3,00	6,52	106528,90
2025-10-21 20:49:31,898 UTC	EN-SERV	Arranque sin peak	DOL	19,04	3,00	6,62	1087,56
2025-10-22 16:31:52,773 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	217,40	3,00	6,62	141788,28
2025-10-26 15:29:10,757 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	215,18	3,00	6,59	138907,30
2025-10-28 22:52:33,496 UTC	EN-SERV	Arranque sin peak	DOL	31,06	3,10	6,67	2990,64
2025-10-31 23:59:00,000 UTC	EN-SERV	Arranque sin peak	DOL	30,31	2,90	6,57	2664,22

Tabla 3.23: Severidad acumulada en periodo semanal y mensual del motor CEX201

Fecha	$S_{sem_{tot,DOL}}[A^2s]$	$S_{mes_{tot,DOL}}[A^2s]$
01/10-05/10	0,00	845644,91
06/10-12/10	292021,81	
13/10-19/10	159656,20	
20/10-26/10	388312,04	
27/10-31/10	5654,86	

Para el motor CEX201, los registros operacionales evidencian la presencia de arranques de distinta naturaleza, incluyendo eventos catalogados como arranques sin peak y arranques correctos, tal como se observa en la tabla 3.22. Los arranques sin peak, son aquellos que no se evidencia corriente peak pero en el evento se demuestra que el motor había arrancado, en consecuencia, tiene una severidad térmica baja, mientras que los arranques correctos presentan corrientes significativamente mayores y tiempos de arranque del orden de los 3 s, concentrando la mayor parte del aporte térmico.

En particular, los arranques correctos dominan el aporte total de severidad, a pesar de no ser los más frecuentes, lo que indica que el envejecimiento térmico del aislamiento está gobernado principalmente por estos eventos.

Este comportamiento se ve reflejado en la tabla 3.23, donde se observa que el daño térmico se distribuye de manera no uniforme a lo largo del período analizado.

- CRF 101

Tabla 3.24: Datos de arranques diarios motor CRF101

Fecha/hora	**Operación**	**Observaciones**	**Modo de arranque**	$I_{arr}[A]$	$t_{arr}[s]$	V_{min} **o** $V_{prom}[V]$	$S_{arr}[A^2s]$
2025-10-03 13:01:38,725 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	71,41	2,88	6,63	14686,24
2025-10-05 11:31:31,439 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	70,68	2,80	6,71	13987,85
2025-10-09 13:59:38,265 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	377,45	3,00	6,55	427405,51
2025-10-10 18:33:48,215 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	377,11	3,00	6,62	426635,86
2025-10-13 21:42:19,984 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	69,29	6,10	6,57	29286,74
2025-10-18 16:52:28,465 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	75,98	2,90	6,58	16741,59
2025-10-20 15:29:53,598 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	75,29	3,00	6,51	17005,75
2025-10-21 20:40:22,287 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	77,33	3,10	6,65	18537,78
2025-10-26 13:38:39,955 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	390,38	3,10	6,54	472429,29
2025-10-28 23:18:59,018 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	324,62	3,00	6,71	316134,43

Tabla 3.25: Severidad acumulada en periodo semanal y mensual del motor CRF101

Fecha	$S_{sem_{tot,DOL}}[A^2s]$	$S_{mes_{tot,DOL}}[A^2s]$
01/10-05/10	28674,09	1752851,03
06/10-12/10	854041,36	
13/10-19/10	46028,32	
20/10-26/10	507972,82	
27/10-31/10	316134,43	

Para el motor bomba CRF101, los registros de operación evidencian la presencia de arranques de distinta severidad, incluyendo eventos catalogados como arranques cortos sin peak y arranques correctos, tal como se observa en la tabla 3.24. Los arranques cortos sin peak se caracterizan por valores moderados de corriente de arranque y, en algunos casos, por tiempos de arranque superiores a los observados en los arranques correctos, lo que genera un aporte térmico no despreciable, aunque de menor magnitud relativa.

Por otra parte, los arranques correctos presentan corrientes de arranque significativamente mayores, concentrando la mayor parte de la severidad térmica individual registrada para este motor, donde el aporte al envejecimiento térmico del aislamiento se encuentra dominado por estos eventos, a pesar de que los arranques cortos sin peak son más frecuentes.

Este comportamiento se refleja en la severidad acumulada semanal y mensual, tabla 3.25 donde se observa una distribución no uniforme del daño térmico a lo largo del

período analizado.

- CRF 201

Tabla 3.26: Datos de arranques diarios motor CRF201

Fecha/hora	Operación	Observaciones	Modo de arranque	$I_{arr}[A]$	$t_{arr}[s]$	V_{min} o $V_{prom}[V]$	$S_{arr}[A^2s]$
2025-10-03 13:03:17,427 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	71,23	2,89	6,61	14663,03
2025-10-09 14:03:24,869 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	402,22	3,18	6,48	514463,35
2025-10-10 18:37:58,117 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	63,23	3,00	6,61	11994,10
2025-10-13 21:56:20,697 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	60,23	3,00	6,59	10882,96
2025-10-18 16:56:29,669 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	398,84	3,00	6,51	477220,04
2025-10-20 15:33:14,801 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	66,03	3,20	6,50	13951,87
2025-10-21 20:43:41,391 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	86,62	3,00	6,59	22509,07
2025-10-26 17:01:10,140 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	58,32	3,10	6,62	10543,79
2025-10-28 23:22:31,523 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	69,94	3,00	6,69	14674,81

Tabla 3.27: Severidad acumulada en periodo semanal y mensual del motor CRF201

Fecha	$S_{sem_{tot,DOL}}$	$S_{mes_{tot,DOL}}$
01/10-05/10	14663,03	1090903,03
06/10-12/10	526457,45	
13/10-19/10	488103,00	
20/10-26/10	47004,74	
27/10-31/10	14674,81	

Para el motor CRF201, los registros de arranques diarios muestran un predominio de eventos clasificados como arranques cortos sin peak, caracterizados por corrientes de arranque relativamente bajas y tiempos de arranque moderados. Estos eventos generan aportes individuales de severidad reducidos, lo que se traduce en contribuciones térmicas menores al desgaste térmico del aislamiento del motor.

En particular, los arranques ocurridos durante la segunda y tercera semana del mes presentan valores elevados de severidad individual, dominando el comportamiento global del indicador I^2t.

En la tabla 3.27, la severidad acumulada semanal refleja este comportamiento, observándose semanas con valores bajos cuando sólo se presentan arranques cortos sin peak, y semanas con incrementos abruptos asociados a la ocurrencia de arranques correctos. Entonces la severidad mensual se encuentra fuertemente condicionada por un número reducido de eventos de alta exigencia térmica.

El envejecimiento térmico del motor CRF201 no se distribuye de manera uniforme en el tiempo, sino que se concentra en instantes específicos de operación.

3.4.0.b. Pérdidas de cobre

Una forma de lograr saber cuanta energía aproximada se disipa en el cobre durante los arranques se logra teniendo el valor de la resistencia del estator y mediante la siguiente ecuación se calcula:

$$E_{\text{cu}} \approx 3R_s S_{\text{arr}} \tag{3.5}$$

Porque se sabe que las pérdidas de cobre del estator se calculan.

$$P_{cu} = 3I^2 \cdot R_s \tag{3.6}$$

Dado que la severidad térmica S_{arr} posee unidades de $A^2 \cdot s$, su multiplicación por la resistencia del estator R_s, expresada en ohm, permite obtener una magnitud con unidades de energía, Joule. Para facilitar la interpretación de los resultados, esta energía se expresa finalmente en kiloJoule (kJ).

De esta forma, la severidad térmica asociada a los arranques puede transformarse en una estimación de la energía disipada en el cobre del estator durante dichos eventos, lo que permite comparar de manera homogénea el impacto térmico entre motores con distintas características eléctricas y condiciones de operación.

En base a este criterio, se calculó la energía disipada en el cobre del estator para cada evento de arranque de los motores analizados.

- APH 101

Tabla 3.28: Energía disipada en el cobre en arranques correctos en motor APH101

Fecha/hora	**Operación**	**Observaciones**	**Modo de arranque**	$E_{cu}[kJ]$
2025-10-09 14:55:30,242 UTC	[EN-SERV]	Sin arranque, solos corriente	-	945,222
2025-10-09 20:15:43,936 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	1489,896

Con los resultados anteriores se observa que la energía disipada en el cobre del estator durante los eventos analizados presenta una diferencia clara entre condiciones de circulación de corriente sin aceleración mecánica y eventos de arranque efectivo. El registro asociado a una condición sin proceso de arranque muestra una energía disipada considerablemente menor, mientras que el arranque correcto concentra un aporte térmico significativamente superior.

Este comportamiento confirma que la principal contribución térmica asociada a los arranques no proviene únicamente de la presencia de corriente, sino de la combinación de elevados niveles de corriente y su sostenimiento durante el tiempo necesario para la aceleración del conjunto motor–carga.

- APH 201

Tabla 3.29: Energía disipada en el cobre en arranques correctos en motor APH201

Fecha/hora	**Operación**	**Observaciones**	**Modo de arranque**	$E_{cu}[kJ]$
2025-10-10 19:02:33,327 UTC	EN-SERV	Arranque corto	DOL	1346,028
2025-10-10 19:16:17,436 UTC	EN-SERV	Arranque corto	DOL	1299,438
2025-10-10 19:29:27,244 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	1194,239
2025-10-10 20:09:37,971 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	1202,962
2025-10-13 22:06:39,733 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	1343,679
2025-10-18 17:04:38,054 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	1177,085
2025-10-20 15:38:19,785 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	1220,576
2025-10-21 20:52:48,703 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	1211,146
2025-10-22 16:32:57,717 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	1394,766
2025-10-26 15:32:14,375 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	1247,854
2025-10-28 22:54:29,105 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	1340,550
2025-10-31 16:38:57,748 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	1177,524

En el motor APH201 se observa que la energía disipada en el cobre del estator durante los arranques presenta valores relativamente consistentes entre los distintos eventos analizados, con magnitudes del orden de 1,17 a 1,39 MJ por arranque. Esta dispersión moderada indica que los arranques se realizan bajo condiciones operativas

similares, tanto en términos de corriente de arranque como de duración del proceso de aceleración.

Los eventos clasificados como "arranque corto" muestran niveles de energía disipada comparables e, incluso, en algunos casos superiores a los arranques correctos. Esto sugiere que, aun cuando la duración del evento sea menor, la presencia de corrientes elevadas durante el transitorio puede generar un aporte térmico significativo al estator. En consecuencia, no solo los arranques completos, sino también aquellos interrumpidos o incompletos, contribuyen al calentamiento acumulado del devanado.

Desde una perspectiva de envejecimiento térmico, este comportamiento implica que el impacto de los arranques en la vida útil del aislamiento del estator no está dominado por eventos excepcionales de alta severidad, sino por la repetición de arranques con niveles de energía disipada relativamente similares. Por lo tanto, la frecuencia de arranques adquiere un rol relevante en la degradación térmica del motor APH201, reforzando la necesidad de considerar estos eventos en la evaluación de la vida útil y en eventuales estrategias de mitigación.

- CEX 101

Tabla 3.30: Energía disipada en el cobre en arranques correctos en motor CEX101

Fecha/hora	**Operación**	**Observaciones**	**Modo de arranque**	$E_{cu}[kJ]$
2025-10-09 14:38:30,702 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	4,667

En el motor CEX101 se identifica un único evento de arranque correcto durante el período analizado, el cual presenta una energía disipada en el cobre del estator significativamente menor en comparación con los motores de mayor potencia analizados previamente. El valor obtenido, del orden de 4,67 kJ, refleja directamente las menores corrientes de arranque asociadas a este equipo, así como su menor demanda mecánica durante el proceso de aceleración.

Este resultado evidencia que, si bien el arranque constituye un fenómeno térmico relevante en cualquier máquina eléctrica, la magnitud del impacto debe analizarse considerando las características eléctricas y la potencia nominal de cada motor. En términos absolutos, el aporte energético asociado a un arranque individual puede parecer reducido; sin embargo, su relevancia térmica debe evaluarse de manera relativa a la capacidad térmica y a la potencia del motor.

De esta forma, un valor absoluto de energía disipado durante el arranque que resulta bajo en comparación con motores de mayor potencia podría representar, proporcionalmente, una solicitación térmica significativa para un motor de menor tamaño. Por lo tanto, el análisis del impacto térmico del arranque debe interpretarse considerando la relación entre la energía disipada y las características nominales de cada máquina, particularmente su potencia y capacidad térmica.

No obstante, debe considerarse que, aun con niveles de energía disipada bajos por evento, un elevado número de arranques podría generar un efecto acumulativo relevante a largo plazo.

- CEX 201

Tabla 3.31: Energía disipada en el cobre en arranques correctos en motor CEX201

Fecha/hora	Operación	Observaciones	Modo de arranque	$E_{cu}[kJ]$
2025-10-09 13:50:14,157 UTC	EN-SERV	Arranque sin peak	DOL	23,670
2025-10-09 18:22:34,404 UTC	EN-SERV	Arranque sin peak	DOL	14,596
2025-10-10 00:51:58,656 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	301,366
2025-10-10 18:51:38,829 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	328,807
2025-10-13 22:02:12,902 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	360,313
2025-10-18 17:02:24,474 UTC	EN-SERV	Arranque sin peak	DOL	5,140
2025-10-20 15:36:27,604 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	243,845
2025-10-21 20:49:31,898 UTC	EN-SERV	Arranque sin peak	DOL	2,489
2025-10-22 16:31:52,773 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	324,553
2025-10-26 15:29:10,757 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	317,959
2025-10-28 22:52:33,496 UTC	EN-SERV	Arranque sin peak	DOL	6,846
2025-10-31 23:59:00,000 UTC	EN-SERV	Arranque sin peak	DOL	6,098

En el motor CEX201 se observa una clara diferenciación entre eventos de arranque correcto y arranques sin peak, lo cual se refleja directamente en la energía disipada en el cobre del estator. Los arranques catalogados como "sin peak" presentan valores de energía significativamente menores, generalmente inferiores a 25 kJ, lo que indica una circulación de corriente reducida y una exigencia térmica poco relevante durante el proceso transitorio.

Por el contrario, los arranques correctos concentran los mayores aportes térmicos, con energías disipadas que varían aproximadamente entre 240 kJ y 360 kJ. Estos valores evidencian la presencia de corrientes de arranque elevadas sostenidas durante el tiempo de aceleración, constituyendo los eventos térmicamente más exigentes para el estator del motor.

Este comportamiento confirma que, en el caso del CEX201, la severidad térmica asociada a los arranques está dominada por aquellos eventos en los que se produce una aceleración efectiva del conjunto motor–carga. Aun cuando los arranques sin peak sean más frecuentes, su contribución al calentamiento total resulta marginal frente al impacto acumulado de los arranques correctos.

Desde el punto de vista de la vida útil del aislamiento, estos resultados indican que el envejecimiento térmico del motor CEX201 está principalmente condicionado por la ocurrencia y repetición de arranques correctos, más que por la cantidad total de intentos de arranque, reforzando la importancia de limitar este tipo de eventos en la operación del equipo.

- CRF 101

Tabla 3.32: Energía disipada en el cobre en arranques correctos en motor CRF101

Fecha/hora	Operación	Observaciones	Modo de arranque	$E_{cu}[kJ]$
2025-10-03 13:01:38,725 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	20,840
2025-10-05 11:31:31,439 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	19,849
2025-10-09 13:59:38,265 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	606,488
2025-10-10 18:33:48,215 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	605,396
2025-10-13 21:42:19,984 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	41,558
2025-10-18 16:52:28,465 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	23,756
2025-10-20 15:29:53,598 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	24,131
2025-10-21 20:40:22,287 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	26,305
2025-10-26 13:38:39,955 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	670,377
2025-10-28 23:18:59,018 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	448,595

Con los datos anteriores se evidencia una diferencia entre los arranques clasificados como correctos y aquellos catalogados como cortos sin peak. Los eventos sin peak presentan valores de energía reducidos, típicamente entre 20 kJ y 40 kJ, lo que indica una solicitación térmica acotada y de corta duración.

En contraste, los arranques correctos concentran los mayores aportes térmicos del período analizado, con energías disipadas que alcanzan valores del orden de 600 kJ, e incluso superiores en algunos eventos. Estos arranques implican la circulación de corrientes elevadas sostenidas durante el proceso completo de aceleración, lo que se traduce en un calentamiento significativo del devanado del estator.

- CRF 201

Tabla 3.33: Energía disipada en el cobre en arranques correctos en motor CRF201

Fecha/hora	Operación	Observaciones	Modo de arranque	$E_{cu}[kJ]$
2025-10-09 14:03:24,869 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	730,023
2025-10-10 18:37:58,117 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	17,020
2025-10-13 21:56:20,697 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	15,443
2025-10-18 16:56:29,669 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	677,175
2025-10-20 15:33:14,801 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	19,798
2025-10-21 20:43:41,391 UTC	EN-SERV	Arranque correcto	DOL	31,940
2025-10-26 17:01:10,140 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	14,962
2025-10-28 23:22:31,523 UTC	EN-SERV	Arranque corto sin peak	DOL	20,824

Para el motor CRF201 también se observa una diferenciación clara entre los arranques correctos y los eventos catalogados como cortos sin peak, lo cual se refleja directamente en la energía disipada en el cobre del estator. Los arranques sin peak presentan valores de energía bajos, típicamente inferiores a 25 kJ, asociados a corrientes reducidas y a una solicitación térmica de corta duración, cuyo impacto sobre el envejecimiento del aislamiento resulta marginal.

Por el contrario, los arranques correctos concentran los mayores aportes térmicos del período analizado, con valores de energía disipada que alcanzan aproximadamente 680 kJ y hasta 730 kJ. Estos eventos corresponden a procesos de aceleración completos del conjunto motor–carga, en los cuales se mantienen corrientes elevadas durante el tiempo de arranque, generando un calentamiento significativo del devanado del estator.

Cabe destacar que, a diferencia de otros motores analizados, en el CRF201 se identifican pocos arranques correctos, pero con un impacto térmico individual elevado. Esto indica que la severidad térmica acumulada en este motor está dominada por eventos puntuales de alta energía, más que por la repetición de arranques parciales o incompletos.

En este motor, desde el punto de vista de la vida útil del aislamiento, los arranques correctos representan los eventos más críticos, siendo fundamental su control operativo para evitar un deterioro térmico acelerado, especialmente en escenarios de operación con arranques frecuentes o consecutivos.

3.4.0.c. Horas equivalentes de operación nominal

Con el fin de interpretar la severidad térmica acumulada en términos operativos, se definió una condición de referencia correspondiente a una hora de operación a corriente

nominal.

La severidad nominal por hora se expresa como:

$$S_{\text{nom,1h}} = I_n^2 \cdot 3600 \tag{3.7}$$

Las horas equivalentes de operación nominal asociadas a los arranques del período se calculan como:

$$H_{\text{eq}} = \frac{S_{\text{tot}}}{S_{\text{nom,1h}}} \tag{3.8}$$

Por lo tanto, calculada la severidad en hora de cada motor, luego se calcularon las horas equivalentes de operación nominal de cada motor y en cada periodo.

Tabla 3.34: Severidad nominal por hora de cada motor

Motor	$S_{n,1hora}$
APH 101	126697536
APH 201	126697536
CEX 101	5963364
CEX 201	5963364
CRF 101	19660356
CRF 201	19660356

- APH 101

Tabla 3.35: Horas nominales equivalentes en periodos de arranque para motor APH101

Fecha	$H_{eq_{tot,DOL}}[h]$	$H_{eq_{mes_{tot,DOL}}}[h]$
01/10-05/10	0,0000	0,0455
06/10-12/10	0,0455	
13/10-19/10	0,0000	
20/10-26/10	0,0000	
27/10-31/10	0,0000	

Los resultados muestran que la severidad térmica asociada a los arranques del período analizado equivale a aproximadamente 0,0455 h de operación continua a corriente nominal. Este valor corresponde a poco menos de tres minutos de funcionamiento nominal, concentrados exclusivamente en la semana comprendida entre el 06/10 y el 12/10, coincidente con la ocurrencia de los arranques correctos identificados previamente. Durante el resto del mes no se registran aportes adicionales relevantes en términos de horas equivalentes, dado que el motor presentó falla en los bobinados.

Desde un punto de vista operativo, el bajo valor de horas equivalentes indica que, para el período analizado, los arranques del motor APH101 representan una fracción muy pequeña respecto del tiempo total de operación nominal. No obstante, estos resultados también evidencian que la repetición frecuente de este tipo de eventos, o su ocurrencia en intervalos cortos de tiempo, podría incrementar de forma no despreciable la carga térmica acumulada y, por ende, acelerar el envejecimiento del aislamiento.

- APH 201

Tabla 3.36: Horas nominales equivalentes en periodos de arranque para motor APH201

Fecha	$H_{eq_{tot,DOL}}[h]$	$H_{eq_{mes_{tot,DOL}}}[h]$
01/10-05/10	0,0000	0,2834
06/10-12/10	0,0943	
13/10-19/10	0,0471	
20/10-26/10	0,0949	
27/10-31/10	0,0471	

Para el motor APH201, los arranques del período, durante el mes de Octubre, equivalen térmicamente a 0,2834 h horas de operación nominal en el estator, lo que representa un desgaste térmico considerablemente mayor en comparación con el motor APH101. Este resultado evidencia una mayor contribución de los arranques al envejecimiento térmico del devanado del estator.

En términos operativos, esto se traduce en un consumo de vida útil más progresivo y sostenido, el cual puede resultar más crítico a largo plazo que la ocurrencia esporádica de arranques de alta severidad.

Desde el punto de vista de la gestión operacional, estos resultados sugieren que el APH201 presenta una mayor sensibilidad a la operación transitoria asociada a los procesos de arranque. Por lo tanto, la reducción del número de arranques, o la mitigación de su severidad mediante estrategias de arranque controlado, podría generar un impacto relevante en la extensión de la vida útil del motor.

- CEX 101

Tabla 3.37: Horas nominales equivalentes en periodos de arranque para motor CEX101

Fecha	$H_{eq_{tot,DOL}}[h]$	$H_{eq_{mes_{tot,DOL}}}[h]$
01/10-05/10	0,0000	0,0003
06/10-12/10	0,0003	
13/10-19/10	0,0000	
20/10-26/10	0,0000	
27/10-31/10	0,0000	

Las horas equivalentes de operación nominal asociadas a los arranques del período resultan prácticamente despreciables, alcanzando un valor mensual del orden de 0,0003 h. Este valor corresponde a apenas unos segundos de operación a corriente nominal, lo que evidencia un impacto térmico muy reducido de los arranques sobre el devanado del estator.

Este comportamiento es coherente con los resultados obtenidos en el análisis de severidad y energía disipada, donde se observó que los arranques del CEX101 presentan corrientes significativamente menores en comparación con los motores de mayor potencia. En consecuencia, aun cuando se produzcan eventos de arranque, su contribución al desgaste térmico acumulado resulta mínima.

Desde el punto de vista operativo, estos resultados indican que el proceso de arranque no constituye un mecanismo relevante de envejecimiento térmico durante el período analizado. En este caso, la vida útil del aislamiento estará dominada principalmente por las condiciones de operación en régimen permanente, más que por los transitorios asociados al arranque.

- CEX 201

Tabla 3.38: Horas nominales equivalentes en periodos de arranque para motor CEX201

Fecha	$H_{eq_{tot,DOL}}[h]$	$H_{eq_{mes_{tot,DOL}}}[h]$
01/10-05/10	0,0000	0,1418
06/10-12/10	0,0490	
13/10-19/10	0,0268	
20/10-26/10	0,0651	
27/10-31/10	0,0009	

En el motor CEX201, las horas equivalentes de operación nominal asociadas a los arranques alcanzan un valor mensual de 0,1418 h, lo que representa un impacto térmico moderado en comparación con los motores APH, pero significativamente mayor que el observado en el CEX101. Este resultado confirma el carácter intermedio de este motor tanto en términos de potencia como de severidad térmica durante los procesos de arranque.

Desde el punto de vista operativo, los resultados sugieren que, si bien los arranques no constituyen el principal mecanismo de deterioro térmico para este motor, sí representan una contribución relevante que no debe ser despreciada en la estimación de vida útil. En particular, una mayor frecuencia de arranques o un aumento en la severidad de estos eventos podría llevar a que el impacto térmico acumulado se aproxime al observado en motores de mayor potencia.

- CRF 101

Tabla 3.39: Horas nominales equivalentes en periodos de arranque para motor CRF101

Fecha	$H_{eq_{tot,DOL}}[h]$	$H_{eq_{mes_{tot,DOL}}}[h]$
01/10-05/10	0,0015	0,0892
06/10-12/10	0,0434	
13/10-19/10	0,0023	
20/10-26/10	0,0258	
27/10-31/10	0,0161	

Con respecto a los valores de la tabla anterior se logra apreciar que las horas nominales equivalentes asociadas a los arranques alcanzan un valor mensual de 0,0892 h. Donde la distribución temporal de este desgaste no es uniforme, observándose una concentración clara en dos ventanas principales del período analizado. El intervalo comprendido entre el 06/10–12/10 presenta el mayor aporte individual, seguido por el período 20/10–26/10, lo que indica que el impacto térmico de los arranques se agrupa en episodios específicos y no responde a un patrón regular semanal.

Los períodos restantes muestran contribuciones de menor magnitud, aunque no despreciables, lo que sugiere la coexistencia de eventos de arranque con severidades variables. Esta variabilidad temporal refleja diferencias en las condiciones de arranque, tales como duración del transitorio o perfil de corriente, que se traducen directamente en distintos valores de severidad acumulada.

En conjunto, los resultados evidencian que el comportamiento térmico asociado a los arranques en el CRF101 está dominado por eventos puntuales de mayor impacto, los cuales definen gran parte del valor mensual de horas equivalentes.

- CRF 201

Tabla 3.40: Horas nominales equivalentes en periodos de arranque para motor CRF201

Fecha	$H_{eq_{tot,DOL}}[h]$	$H_{eq_{mes_{tot,DOL}}}[h]$
01/10-05/10	0,0007	0,0555
06/10-12/10	0,0268	
13/10-19/10	0,0248	
20/10-26/10	0,0024	
27/10-31/10	0,0007	

Para el motor CRF201, los arranques del período equivalen térmicamente a 0,0555h horas de operación nominal en el estator, lo cual corresponde aproximadamente a 3,33 min , siendo inferior al observado en el CRF101.

La primera y ultima semana del mes muestran valores prácticamente despreciables, lo que sugiere una menor incidencia de arranques relevantes fuera de las semanas intermedias.

En términos comparativos internos, el perfil del CRF201 se caracteriza por una menor dispersión entre períodos y una contribución mensual más homogénea, reflejando un comportamiento de arranques térmicamente más estable dentro del intervalo analizado.

3.4.0.d. Horas equivalentes consumidas

La estimación de la reducción de vida útil del aislamiento del estator se realizó mediante un modelo térmico, considerando el envejecimiento térmico acumulado en el tiempo, de acuerdo con modelos basados en la ley de Arrhenius y su formulación práctica mediante la regla empírica de los 10 °C. Este enfoque permite evaluar el daño térmico del aislamiento a partir de la historia de temperatura del estator, sin requerir la definición de incrementos de temperatura asociados a eventos individuales de arranque.

A partir de los datos históricos disponibles, se reconstruyó un perfil térmico discreto $T(t)$ con una resolución temporal correspondiente al intervalo de muestreo de los registros. En cada instante de tiempo, la temperatura del estator se aproximó como el valor máximo medido entre los tres devanados, adoptando así un criterio conservador para representar la temperatura del punto caliente del aislamiento.

El envejecimiento térmico instantáneo se cuantificó mediante un factor de aceleración térmica $AF(t)$, definido según la regla de los 10 °C como:

$$AF(t) = 2^{\frac{T(t)-T_{\text{ref}}}{HIC}} \tag{3.9}$$

donde $T(t)$ corresponde a la temperatura instantánea del estator, T_{ref} es la temperatura de referencia del aislamiento y HIC corresponde al intervalo de mitadez térmica. Para los motores analizados, equipados con aislamiento clase F, se adoptó un valor de $HIC = 9{,}3$, de acuerdo con valores típicos reportados en la literatura técnica para este tipo de aislamiento. Asimismo, se consideró como temperatura de referencia $T_{\text{ref}} = 120\ °\text{C}$, correspondiente a la temperatura nominal del cobre del estator indicada por el fabricante.

El consumo incremental de vida útil en cada intervalo de tiempo Δt se estimó como:

$$\Delta L(t) = AF(t)\,\Delta t \tag{3.10}$$

donde Δt se expresa en horas. En el caso de registros con una resolución temporal de un minuto, se adoptó $\Delta t = 1/60$ h.

Finalmente, el consumo de vida útil acumulado se obtuvo mediante la suma de los aportes incrementales en ventanas temporales definidas, tales como un día, una semana o un mes. En particular, el consumo diario de vida útil se calculó como:

$$L_{\text{día}} = \sum_{i \in \text{día}} AF(t_i)\,\Delta t \tag{3.11}$$

Este indicador representa las horas equivalentes de envejecimiento térmico consumidas en un día, referidas a la temperatura de referencia T_{ref}. De forma análoga, se calcularon los consumos semanales y mensuales, los cuales se presentan y analizan en la sección siguiente para cada motor.

- APH 101

Tabla 3.41: Horas equivalentes consumidas con respecto a Tref, motor APH101

Día	L_{Dia}
01-10-2025	0,0031
02-10-2025	459,7609
03-10-2025	0,0111
04-10-2025	0,0101
05-10-2025	0,0099
06-10-2025	0,0096
07-10-2025	0,0098
08-10-2025	0,0100
09-10-2025	0,0226
10-10-2025	0,0289
11-10-2025	0,0109
12-10-2025	0,0007
13-10-2025	0,0007
14-10-2025	0,0007
15-10-2025	0,0007
16-10-2025	0,0007
17-10-2025	0,0007
18-10-2025	0,0007
19-10-2025	0,0007
20-10-2025	0,0007
21-10-2025	0,0007
22-10-2025	0,0007
23-10-2025	0,0007
24-10-2025	0,0007
25-10-2025	0,0007
26-10-2025	0,0007
27-10-2025	0,0007
28-10-2025	0,0007
29-10-2025	0,0007
30-10-2025	0,0007
31-10-2025	0,0007

Tabla 3.42: Horas equivalentes consumidas por periodos con respecto a Tref, motor APH101

Semana	L_{Semana}	L_{Mes}
01/10-05/10	459,7852	0,1060
06/10-12/10	0,0925	
13/10-19/10	0,0049	
20/10-26/10	0,0049	
27/10-31/10	0,0035	

Durante el análisis de la serie térmica de los devanados del estator se identificó un conjunto acotado de valores atípicos concentrados el día 02-10-2025, caracterizados por factores de aceleración térmica significativamente superiores al resto del período analizado. Dichos valores se registraron además en una fecha en la cual el motor no se encontraba en operación.

Dado que estos registros no presentan continuidad temporal ni recurrencia en los días posteriores, y que las mediciones retornan inmediatamente a rangos consistentes con la operación normal del equipo, se interpretan como errores puntuales de medición y no como un fenómeno térmico real del motor.

En consecuencia, estos datos fueron excluidos del cálculo del envejecimiento térmico acumulado, como parte del proceso de depuración y control de calidad de la información, evitando así una sobreestimación artificial del consumo de vida útil del aislamiento.

Este hecho se presenta en ambos motores bomba, APH101 y APH201, en las mismas fechas, por lo que se realizó de igual manera en la otra bomba.

- APH 201

Tabla 3.43: Horas equivalentes consumidas con respecto a Tref, motor APH201

Día	L_{Dia}
01-10-2025	0,0031
02-10-2025	459,7607
03-10-2025	0,0107
04-10-2025	0,0097
05-10-2025	0,0096
06-10-2025	0,0095
07-10-2025	0,0098
08-10-2025	0,0099
09-10-2025	0,0096
10-10-2025	0,0599
11-10-2025	0,5792
12-10-2025	0,0300
13-10-2025	0,0310
14-10-2025	1,5807
15-10-2025	2,6976
16-10-2025	2,1104
17-10-2025	2,0559
18-10-2025	1,4701
19-10-2025	1,2785
20-10-2025	0,3496
21-10-2025	1,1924
22-10-2025	1,4629
23-10-2025	2,3572
24-10-2025	2,4472
25-10-2025	1,1748
26-10-2025	0,4345
27-10-2025	2,4400
28-10-2025	1,5652
29-10-2025	1,9263
30-10-2025	2,1346
31-10-2025	1,3957

Tabla 3.44: Horas equivalentes consumidas por periodos con respecto a Tref, motor APH201

Semana	L_{Semana}	L_{Mes}
01/10-05/10	459,7939	30,8126
06/10-12/10	0,7078	
13/10-19/10	11,2243	
20/10-26/10	9,4186	
27/10-31/10	9,4619	

El motor APH201 presenta un comportamiento térmico fuertemente no uniforme a lo largo del período analizado. En la serie diaria de horas equivalentes consumidas con respecto a la temperatura de referencia T_{ref}, se identifica un valor excepcionalmente elevado el día 02-10-2025, con un consumo de $L_{\text{día}} \approx 459{,}76$ h, el cual domina completamente los valores acumulados semanales y mensuales.

Tal como se indicó previamente, este registro corresponde a una medición atípica asociada a temperaturas anormalmente altas en un día en que el motor no se encontraba en operación, por lo que no representa un fenómeno térmico real del equipo. Dado que estos valores no se repiten en los días adyacentes y que posteriormente las mediciones retornan a rangos coherentes con la operación normal, dichos datos fueron excluidos del cálculo del daño térmico acumulado.

Al considerar únicamente los registros válidos, se observa que a partir de mediados de mes el motor presenta una secuencia sostenida de días con consumos diarios del orden de 1 a 3 horas equivalentes, lo que se traduce en aportes semanales relevantes en los períodos 13/10–19/10, 20/10–26/10 y 27/10–31/10. Este comportamiento indica que el envejecimiento térmico del aislamiento se encuentra asociado principalmente a una operación prolongada a temperaturas elevadas, más que a eventos térmicos aislados.

- CEX 101

Tabla 3.45: Horas equivalentes consumidas con respecto a Tref, motor CEX101

Día	L_{Dia}
01-10-2025	0,0147
02-10-2025	0,0145
03-10-2025	0,0143
04-10-2025	0,0143
05-10-2025	0,0142
06-10-2025	0,0130
07-10-2025	0,0132
08-10-2025	0,0135
09-10-2025	0,0275
10-10-2025	0,0185
11-10-2025	0,0159
12-10-2025	0,0202
13-10-2025	0,0191
14-10-2025	0,0160
15-10-2025	0,0175
16-10-2025	0,0186
17-10-2025	0,0194
18-10-2025	0,0194
19-10-2025	0,0195
20-10-2025	0,0189
21-10-2025	0,0184
22-10-2025	0,0179
23-10-2025	0,0178
24-10-2025	0,0183
25-10-2025	0,0179
26-10-2025	0,0205
27-10-2025	0,0196
28-10-2025	0,0196
29-10-2025	0,0189
30-10-2025	0,0185
31-10-2025	0,0179

Tabla 3.46: Horas equivalentes consumidas por periodos con respecto a Tref, motor CEX101

Semana	L_{Semana}	L_{Mes}
01/10-05/10	0,0718	0,5474
06/10-12/10	0,1218	
13/10-19/10	0,1294	
20/10-26/10	0,1298	
27/10-31/10	0,0946	

El análisis del motor CEX101 evidencia un comportamiento térmico estable y homogéneo durante todo el período considerado. Los valores diarios de horas equivalentes consumidas con respecto a T_{ref} se mantienen en un rango estrecho, sin la presencia de incrementos abruptos o valores atípicos que indiquen episodios de sobretemperatura.

La consistencia de los valores diarios se refleja también en los acumulados semanales, los cuales presentan variaciones acotadas entre períodos consecutivos. El consumo mensual total de horas equivalentes resulta bajo en comparación con otros motores analizados, lo que sugiere que el envejecimiento térmico del aislamiento del estator en este equipo está dominado por una operación cercana a condiciones térmicas estacionarias.

Este patrón térmico indica que, para el motor CEX101, el daño por temperatura real se distribuye de forma continua en el tiempo y no se concentra en intervalos específicos de operación.

- CEX 201

Tabla 3.47: Horas equivalentes consumidas con respecto a Tref, motor CEX201

Día	L_{Dia}
01-10-2025	0,0137
02-10-2025	0,0136
03-10-2025	0,0133
04-10-2025	0,0132
05-10-2025	0,0132
06-10-2025	0,0132
07-10-2025	0,0127
08-10-2025	0,0125
09-10-2025	0,0292
10-10-2025	0,0474
11-10-2025	0,0933
12-10-2025	0,0222
13-10-2025	0,0218
14-10-2025	0,1740
15-10-2025	0,2576
16-10-2025	0,2304
17-10-2025	0,2376
18-10-2025	0,1788
19-10-2025	0,1481
20-10-2025	0,0726
21-10-2025	0,1585
22-10-2025	0,1823
23-10-2025	0,2288
24-10-2025	0,2462
25-10-2025	0,1371
26-10-2025	0,0888
27-10-2025	0,2413
28-10-2025	0,1640
29-10-2025	0,2209
30-10-2025	0,2330
31-10-2025	0,1730

Tabla 3.48: Horas equivalentes consumidas por periodos con respecto a Tref, motor CEX201

Semana	L_{Semana}	L_{Mes}
01/10-05/10	0,0669	
06/10-12/10	0,2305	
13/10-19/10	1,2483	3,6923
20/10-26/10	1,1143	
27/10-31/10	1,0322	

El motor CEX201 presenta un comportamiento térmico claramente diferenciado respecto a CEX101, con un aumento progresivo de las horas equivalentes consumidas a lo largo del mes. Durante la primera semana, los valores diarios de $L_{\text{día}}$ se mantienen bajos y relativamente constantes, lo que se traduce en un aporte semanal reducido al envejecimiento térmico del aislamiento.

A partir de la segunda semana se observa un incremento gradual en los valores diarios, destacando especialmente el período comprendido entre el 14 y el 19 de octubre, donde se registran consumos diarios significativamente mayores. Este comportamiento se refleja en el acumulado semanal 13/10–19/10, que concentra el mayor aporte de horas equivalentes del mes.

En las semanas siguientes, el motor mantiene niveles elevados de consumo térmico diario, sin retornar a los valores bajos observados al inicio del período. Los acumulados semanales de los intervalos 20/10–26/10 y 27/10–31/10 muestran magnitudes comparables entre sí, lo que indica una operación sostenida a temperaturas superiores a la referencia durante la segunda mitad del mes.

El valor mensual total de horas equivalentes consumidas confirma que el envejecimiento térmico del motor CEX201 no está dominado por un evento aislado, sino por una condición de operación prolongada con temperaturas reales elevadas, concentrada principalmente en las últimas tres semanas del período analizado.

- CRF 101

Tabla 3.49: Horas equivalentes consumidas con respecto a Tref, motor CRF101

Día	L_{Dia}
01-10-2025	0,0146
02-10-2025	0,0139
03-10-2025	0,0118
04-10-2025	0,0122
05-10-2025	0,0274
06-10-2025	0,0131
07-10-2025	0,0144
08-10-2025	0,0143
09-10-2025	0,0911
10-10-2025	0,0715
11-10-2025	0,1441
12-10-2025	0,0178
13-10-2025	0,0255
14-10-2025	0,1849
15-10-2025	0,2506
16-10-2025	0,3149
17-10-2025	0,3425
18-10-2025	0,1972
19-10-2025	0,1285
20-10-2025	0,1264
21-10-2025	0,1657
22-10-2025	0,2738
23-10-2025	0,2236
24-10-2025	0,2452
25-10-2025	0,2215
26-10-2025	0,2310
27-10-2025	0,2544
28-10-2025	0,1126
29-10-2025	0,2592
30-10-2025	0,2695
31-10-2025	0,2422

Tabla 3.50: Horas equivalentes consumidas por periodos con respecto a Tref, motor CRF101

Semana	L_{Semana}	L_{Mes}
01/10-05/10	0,0799	4,5154
06/10-12/10	0,3662	
13/10-19/10	1,4441	
20/10-26/10	1,4871	
27/10-31/10	1,1380	

El análisis de las horas equivalentes consumidas respecto a Tref representa un comportamiento no uniforme a lo largo del período analizado. Durante la primera semana, los valores diarios se mantienen bajos y cercanos a la temperatura de referencia, resultando en un consumo semanal reducido de vida útil térmica. A partir de la segunda semana se observa un incremento progresivo de horas equivalentes consumida. En dos semanas se registran los mayores aportes semanales.

El consumo mensual total alcanza un valor de $L_{\text{Mes}} = 4{,}5154$ horas equivalentes, evidenciando que el envejecimiento térmico del motor CRF101 está dominado por la

operación en régimen térmico exigente durante la segunda mitad del mes, más que por eventos puntuales aislados.

- CRF 201

Tabla 3.51: Horas equivalentes consumidas con respecto a Tref, motor CRF201

Día	L_{Dia}
01-10-2025	0,0112
02-10-2025	0,0107
03-10-2025	0,0284
04-10-2025	0,0131
05-10-2025	0,0109
06-10-2025	0,0098
07-10-2025	0,0113
08-10-2025	0,0111
09-10-2025	0,1273
10-10-2025	0,0885
11-10-2025	0,1576
12-10-2025	0,0150
13-10-2025	0,0231
14-10-2025	0,2696
15-10-2025	0,3500
16-10-2025	0,4261
17-10-2025	0,4598
18-10-2025	0,2705
19-10-2025	0,1803
20-10-2025	0,1604
21-10-2025	0,2310
22-10-2025	0,3727
23-10-2025	0,3042
24-10-2025	0,3424
25-10-2025	0,3097
26-10-2025	0,1928
27-10-2025	0,3495
28-10-2025	0,1438
29-10-2025	0,3537
30-10-2025	0,3640
31-10-2025	0,3411

Tabla 3.52: Horas equivalentes consumidas por periodos con respecto a Tref, motor CRF201

Semana	L_{Semana}	L_{Mes}
01/10-05/10	0,0743	5,9398
06/10-12/10	0,4207	
13/10-19/10	1,9794	
20/10-26/10	1,9133	
27/10-31/10	1,5520	

Para el motor CRF201, el análisis de las horas equivalentes consumidas con respecto a la temperatura de referencia evidencia un comportamiento similar al observado en CRF101, aunque con una mayor magnitud del daño térmico acumulado. Durante la

primera semana del período analizado, el consumo diario de vida útil se mantiene bajo, resultando en un aporte marginal al envejecimiento total.

A partir de la segunda semana, y especialmente entre los períodos 13/10–19/10 y 20/10–26/10, se registra un incremento sostenido de los valores diarios. Estos intervalos concentran la mayor parte del envejecimiento térmico mensual, con aportes semanales significativamente superiores a los del inicio del mes.

El consumo total mensual alcanza un valor de $L_{\text{Mes}} = 5{,}9398$ horas equivalentes, posicionando al motor CRF201 como el más afectado térmicamente dentro del conjunto analizado. Este resultado sugiere una mayor severidad térmica en su régimen de operación, lo que podría tener un impacto relevante en la reducción de la vida útil del aislamiento del estator si estas condiciones se mantienen en el tiempo.

La vida útil térmica del aislamiento se evaluó en términos relativos, a partir de un indicador equivalente asociado a la exposición acumulada por arranques. Este parámetro se expresa como horas equivalentes de referencia y se utiliza con fines comparativos entre motores, sin pretender representar de forma directa el envejecimiento térmico real del aislamiento.

Dado que no se dispone de información sobre el estado inicial real del aislamiento, se adoptó una vida térmica nominal de referencia $L_0 = 20\,000\,\text{h}$, correspondiente a aislamiento clase F [8], empleada exclusivamente como base de normalización para construir un indicador porcentual relativo.

La reducción porcentual equivalente se estimó como:

$$\%\Delta L = \frac{L_{\text{período}}}{L_0} \times 100 \tag{3.12}$$

Este indicador se representa en la tabla resumen 3.53 y permite cuantificar, en términos relativos, la severidad acumulada asociada a la operación observada. En consecuencia, su interpretación debe entenderse como una herramienta de comparación y priorización entre motores bajo sus condiciones históricas de operación, y no como una estimación exacta de la vida útil térmica realmente consumida.

A partir de los datos históricos de arranque extraídos de la central, se observa que los motores con mayor número de arranques diarios presentan una mayor severidad acumulada mensual asociada al proceso de arranque, aun cuando cada evento individual represente una contribución acotada dentro del total.

3.4.1. Resultados y análisis

Los resultados obtenidos para cada motor se resumen en la tabla 3.53

Tabla 3.53: Cuadro resumen de resultados obtenidos por motores en partida directa, datos históricos

	Motores					
Indicador	**APH101**	**APH201**	**CEX101**	**CEX201**	**CRF101**	**CRF201**
$S_{mes_{tot,DOL}[kA^2s]}$	5769054,75	35905821,82	2038,93	845644,91	1752851,03	1090903,03
$H_{eq_{mes_{tot,DOL}}[h]}$	0,0455	0,2834	0,0003	0,1418	0,0892	0,0555
$E_{cu_{mes}}[kJ]$	2435,118	15155,847	4,667	1935,681	2487,296	1527,185
$L_{Mes}[h]$	0,1060	30,8126	0,5474	3,6923	5,9398	4,5154
Reducción estimada de vida útil $[\%]L_{reducción}$	0,0005 %	0,1541 %	0,0027 %	0,0185 %	0,0297 %	0,0226 %

A partir del análisis de las horas equivalentes de operación nominal acumuladas en el mes, se observa que los motores de la familia APH concentran la mayor exigencia térmica del conjunto evaluado. En particular, el motor APH 201 presenta el valor más alto de severidad mensual (0,2834 h), superando ampliamente al resto de los equipos. Este comportamiento no responde a un evento aislado, sino a una acumulación progresiva distribuida a lo largo de varias semanas, lo que evidencia una condición operativa sostenidamente exigente.

El motor APH 101, si bien presenta un valor mensual inferior, adquiere especial relevancia debido a la ocurrencia de falla durante el período analizado, lo que confirma la criticidad de esta familia de equipos frente a esfuerzos térmicos por arranque.

En un nivel intermedio se ubican los motores CEX 201 y CRF 101, con contribuciones moderadas y distribuidas en el tiempo. Por su parte, CRF 201 y especialmente CEX 101 presentan los menores impactos térmicos acumulados, siendo este último prácticamente despreciable dentro del conjunto estudiado.

El análisis de la energía disipada en el cobre durante los arranques complementa la evaluación anterior, al incorporar explícitamente el efecto resistivo asociado a corrientes elevadas en régimen transitorio. En términos generales, los motores con mayores corrientes y mayor duración de arranque concentran los mayores niveles de energía disipada. En este contexto, los equipos de la familia CRF presentan valores energéticos elevados por evento, mientras que los motores CEX exhiben un comportamiento menos exigente.

No obstante, al integrar ambos criterios, horas equivalentes y energía disipada, se confirma que los motores APH, y particularmente APH 201, corresponden a los equipos más críticamente afectados por la severidad térmica asociada a los arranques durante el período evaluado.

En cuanto al análisis de mitigación mediante la simulación de un partidor suave, el estudio se centró en los dos motores más críticos: APH 101, que presentó la falla en el mes de octubre, y su paralelo APH 201, que registra la mayor frecuencia de arranques.

Para el motor APH 101, el índice de mejora mensual obtenido fue de 10,77, lo que indica que el arranque directo genera una severidad térmica acumulada aproximadamente 10,8 veces superior a la que se obtendría con partidor suave. Esto equivale a una reducción cercana al 90,7 % en la severidad mensual asociada a los arranques. Cabe destacar que este resultado se obtuvo considerando únicamente dos arranques correctos previos a la falla, lo que refuerza la relevancia del impacto térmico incluso con baja cantidad de eventos.

Para el motor APH 201 se obtuvo un índice mensual de 11,17, lo que implica que la implementación de partidor suave permitiría reducir la severidad térmica en un orden

similar, cercano al 91 %. Este resultado confirma que la disminución de la corriente de arranque, característica principal del partidor suave, reduce significativamente la energía disipada en el cobre y, por consiguiente, el esfuerzo térmico acumulado en el devanado.

En términos físicos, dado que la potencia térmica disipada es proporcional al cuadrado de la corriente, pequeñas reducciones en la magnitud de corriente generan disminuciones sustanciales en la energía térmica liberada durante el transitorio. Por lo tanto, la reducción de corriente no solo atenúa el esfuerzo instantáneo, sino que disminuye de manera significativa la severidad acumulada mensual, contribuyendo directamente a la preservación de la vida útil del aislamiento.

En consecuencia, los resultados obtenidos permiten concluir que los motores de la familia APH constituyen los equipos más críticamente exigidos térmicamente por sus condiciones de arranque, y que la incorporación de partidores suaves representa una medida técnicamente efectiva para mitigar dicha severidad.

Capítulo 4

Comparación del desempeño energético y operativo

En este capítulo se realiza una comparación entre el arranque directo en línea (DOL) y el arranque mediante partidor suave (SS), utilizando los resultados de simulación obtenidos en el Capítulo 3, presentados en las Figuras 3.6 y 3.7. A partir de estas simulaciones se evalúa la energía asociada a las corrientes del estator y del rotor durante el transitorio de arranque, con el objetivo de comparar el desempeño energético de ambos métodos.

El análisis se realiza considerando dos condiciones de operación: arranque con carga y arranque sin carga. De esta forma, se comparan los métodos de arranque DOL y SS en ambos escenarios, evaluando la energía disipada en los devanados del motor como indicador del esfuerzo eléctrico y térmico asociado al proceso de puesta en marcha.

4.1. Metodología de evaluación energética

Con el objetivo de evaluar el impacto energético de los distintos métodos de arranque, se calculó la energía asociada a las pedidas resistivas del estator y del rotor durante el transitorio de arranque. Para ello se utilizó el indicador I^2t, el cual se obtiene mediante la integración temporal del cuadrado de la corriente. Este indicador es proporcional a las pérdidas resistivas en los devanados y permite estimar el esfuerzo térmico al que se somete la máquina durante el proceso de arranque.

Este procedimiento fue implementado en el entorno de simulación PLECS mediante bloques matemáticos e integradores. La implementación utilizada para el cálculo de la energía asociada a las corrientes del estator y del rotor se muestra en las Figuras 4.1 y 4.2.

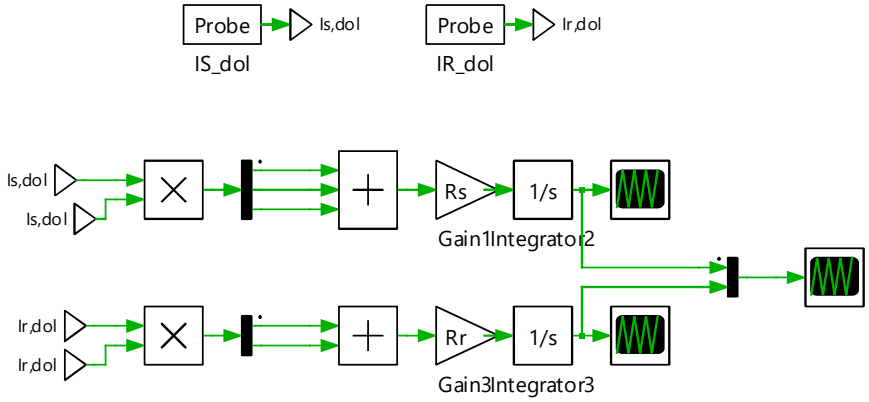


Figura 4.1: Implementación en PLECS del cálculo de la energía asociada a las corrientes del estator y del rotor para el arranque directo en línea (DOL).

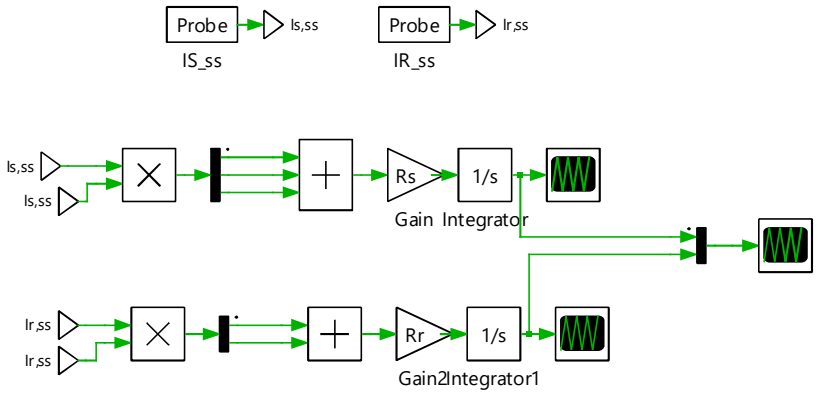


Figura 4.2: Implementación en PLECS del cálculo de la energía asociada a las corrientes del estator y del rotor para el arranque mediante partidor suave (SS).

4.2. Escenarios analizados

Con el objetivo de evaluar el efecto del método de arranque sobre la severidad del transitorio, se analizaron tres casos asociados a distintos ajustes del tiempo de rampa del partidor suave: una rampa rápida, una rampa intermedia y una rampa lenta. La incorporación de estos tres casos responde a la necesidad de realizar un análisis de sensibilidad respecto a la influencia del tiempo de rampa sobre los resultados obtenidos, ya que considerar un único ajuste podría conducir a conclusiones arbitrarias fuertemente condicionadas por esa selección particular.

Para cada uno de estos casos se consideraron los siguientes escenarios de simulación:

- Arranque directo en línea (DOL) con carga.
- Arranque mediante partidor suave (SS) con carga.

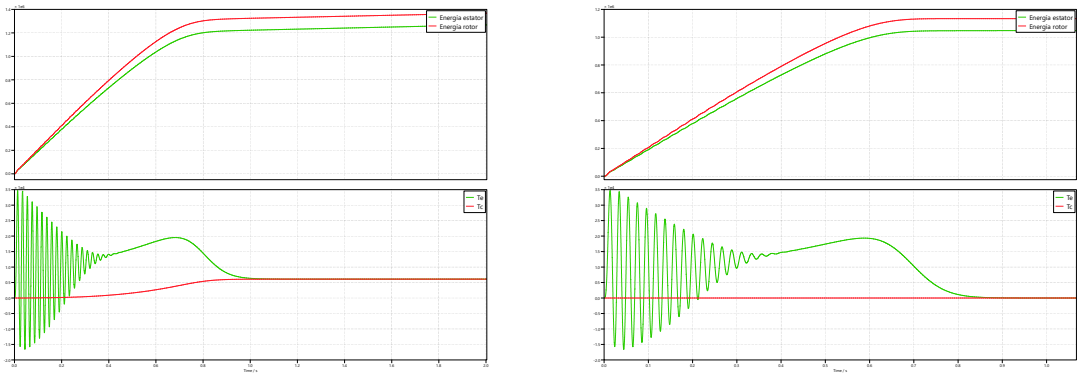
- Arranque directo en línea (DOL) sin carga.
- Arranque mediante partidor suave (SS) sin carga.

En cada escenario se evaluó la evolución de la corriente, el torque electromagnético y la energía disipada durante el transitorio de arranque. En particular, la energía acumulada se estimó a partir de las pérdidas asociadas al estator y al rotor, definiéndose la energía total disipada como la suma de ambas contribuciones. Este análisis permite complementar la comparación entre métodos de arranque, considerando tanto indicadores eléctricos y mecánicos como una métrica térmica asociada al proceso de partida.

4.2.1. Arranque directo con y sin carga

Dado que las curvas de energía asociadas al arranque directo en línea no varían entre los casos analizados, estas se presentan una única vez como referencia para la comparación con los distintos tiempos de rampa del partidor suave.

Para efectos de comparación, la energía de arranque se evalúa hasta el instante de fin del transitorio de arranque, definido como el momento en que las variables principales del motor (corriente, torque y velocidad) alcanzan su condición de régimen y dejan de presentar variaciones significativas asociadas al proceso de aceleración. Bajo este criterio, se considera que el arranque ha finalizado cuando la respuesta del sistema se estabiliza, y es en ese instante donde se compara la energía acumulada.



DOL con carga. DOL sin carga.

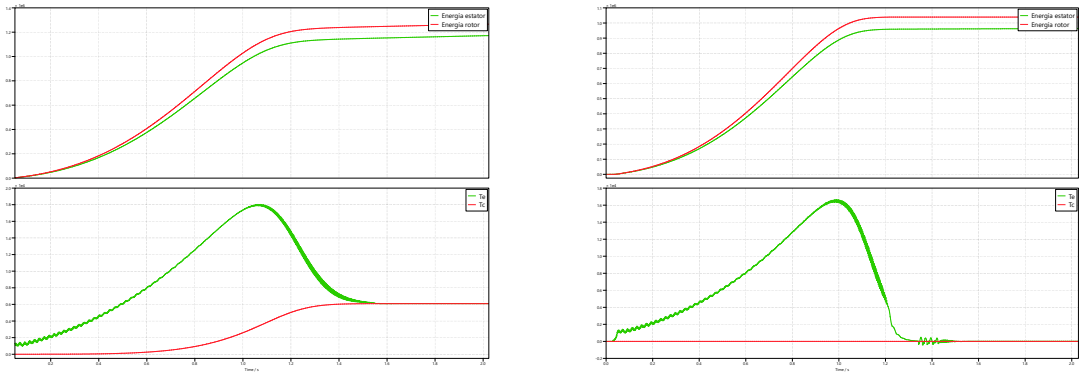
Figura 4.3: Curvas de energía acumulada asociadas a las corrientes del estator y del rotor para el arranque directo.

4.2.2. Arranque con partidor suave

4.2.2.a. Caso 1

En este caso se utilizó una rampa de tiempo intermedio. Las gráficas de las variables de tensión, corriente y velocidad asociadas a este escenario fueron presentadas previamente en la figura 3.7. Por su parte, en la figura 4.4 se muestra la evolución temporal de la energía

acumulada asociada a las corrientes del estator y del rotor durante el arranque del motor, tanto en condición con carga como sin carga, para los métodos de arranque analizados.



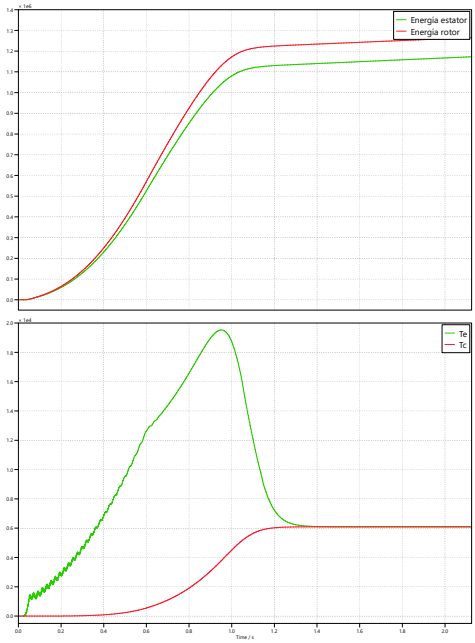
Arranque SS con carga. Arranque con SS con carga.

Figura 4.4: Comparación de la energía acumulada asociada a las corrientes del estator y del rotor durante el arranque con carga.

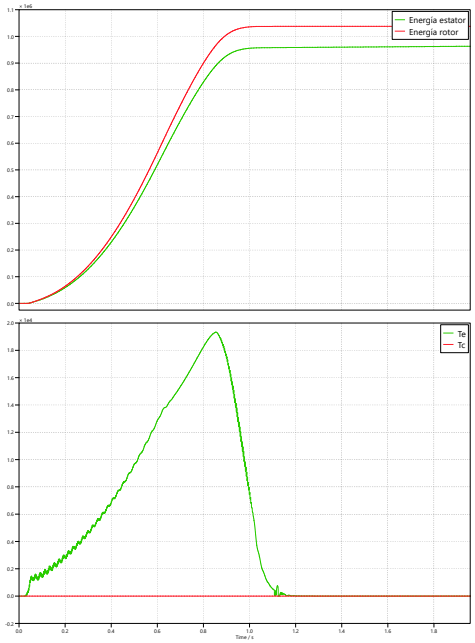
En la figura 4.4 se observa que, para este ajuste de rampa, el arranque mediante partidor suave presenta una menor energía acumulada final que el arranque directo, tanto en condición con carga como sin carga. Esto sugiere una reducción de las pérdidas asociadas al transitorio, aunque la diferencia es moderada.

4.2.2.b. Caso 2

En este caso se consideró un tiempo de rampa rápido. La figura 4.5 presentan la evolución temporal de la energía acumulada asociada a las corrientes del estator y del rotor durante el arranque, tanto en condición con carga como sin carga. Por su parte, en la figura 4.6 se muestran las variables de tensión, corriente y velocidad del motor.



Arranque SS con carga.



Arranque con SS con carga.

Figura 4.5: Comparación de la energía acumulada asociada a las corrientes del estator y del rotor durante el arranque con carga.

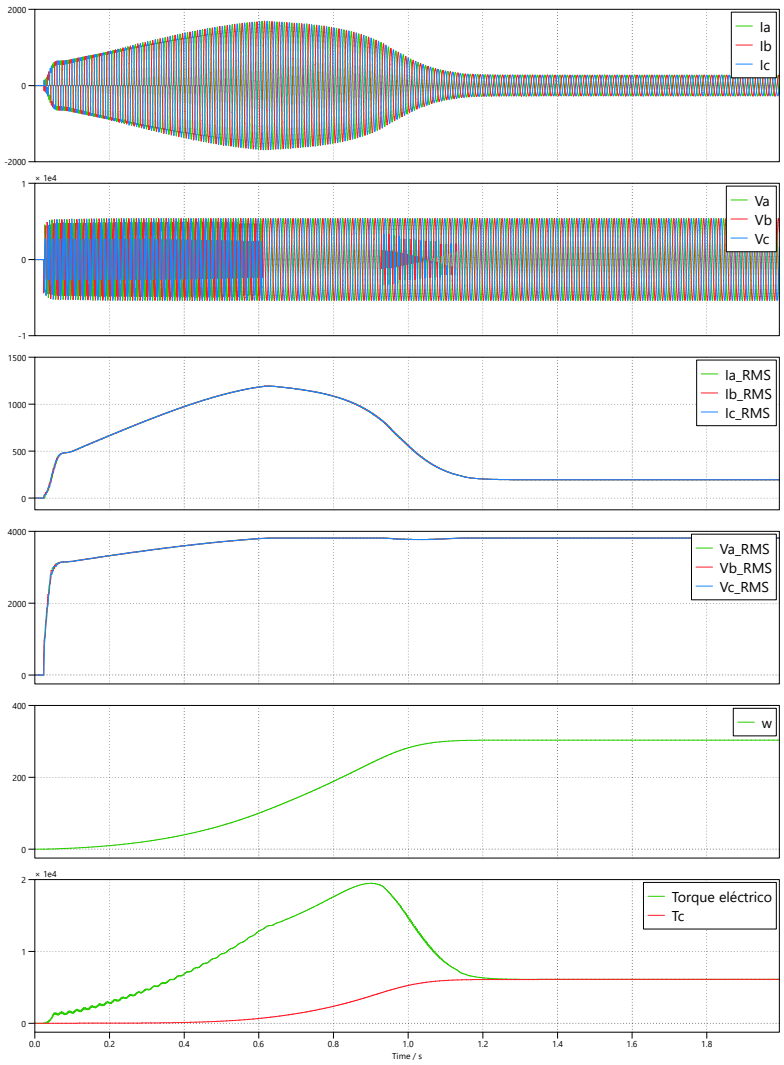


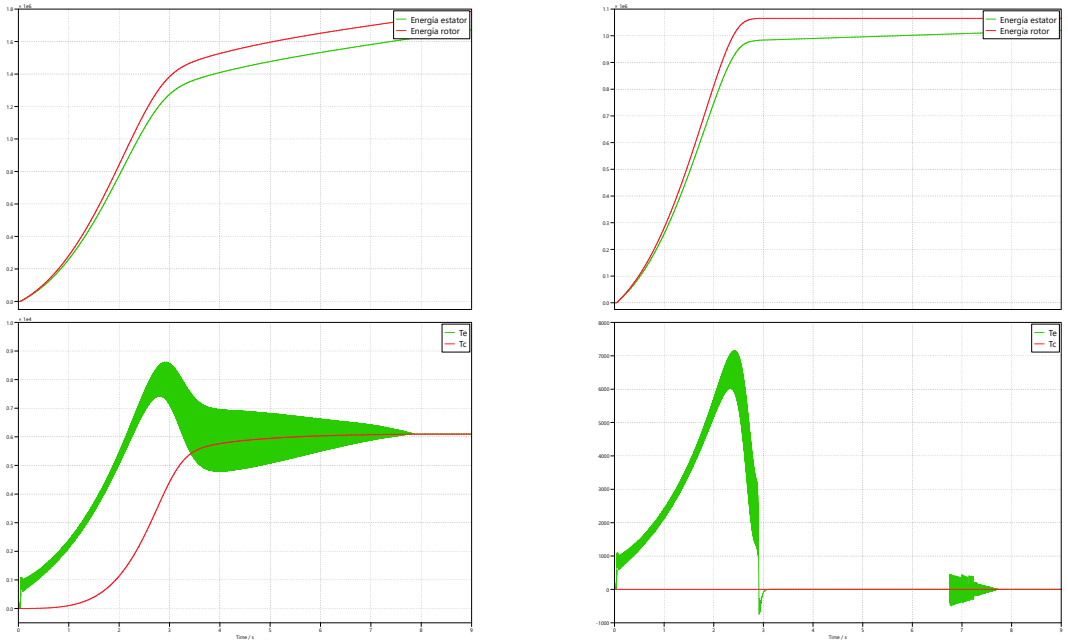
Figura 4.6: Simulación de operación del motor mediante partidor suave para el Caso 2 (rampa rápida), considerando condición con carga y sin carga. En ambas gráficas se presentan: (1) corrientes, (2) tensión, (3) corriente RMS, (4) tensión RMS, (5) velocidad mecánica y (6) torque electromagnético.

En la figura 4.5 se observa que, para el ajuste de rampa rápida, el arranque mediante partidor suave presenta una menor energía disipada final que el arranque directo en línea, tanto en condición con carga como sin carga. Esta tendencia indica una reducción de las pérdidas asociadas al transitorio, manteniendo un tiempo de aceleración relativamente acotado.

Por su parte, en la figura 4.6 se aprecia que la rampa rápida permite limitar parcialmente la severidad del transitorio sin incrementar de forma significativa el tiempo de arranque. No obstante, la corriente de partida continúa aumentando de manera progresiva hasta alcanzar valores elevados, del orden de 1000 A.

4.2.2.c. Caso 3

En este caso se consideró un tiempo de rampa lento. La figura 4.7 muestran la evolución temporal de la energía acumulada asociada a las corrientes del estator y del rotor durante el arranque, en condición con carga y sin carga. Asimismo, en la figura 4.8 se presentan las variables de tensión, corriente, corriente eficaz y velocidad, con el fin de evidenciar el efecto de una rampa más prolongada sobre la evolución del transitorio de arranque.



Arranque SS con carga. Arranque con SS con carga.

Figura 4.7: Comparación de la energía acumulada asociada a las corrientes del estator y del rotor durante el arranque con carga.

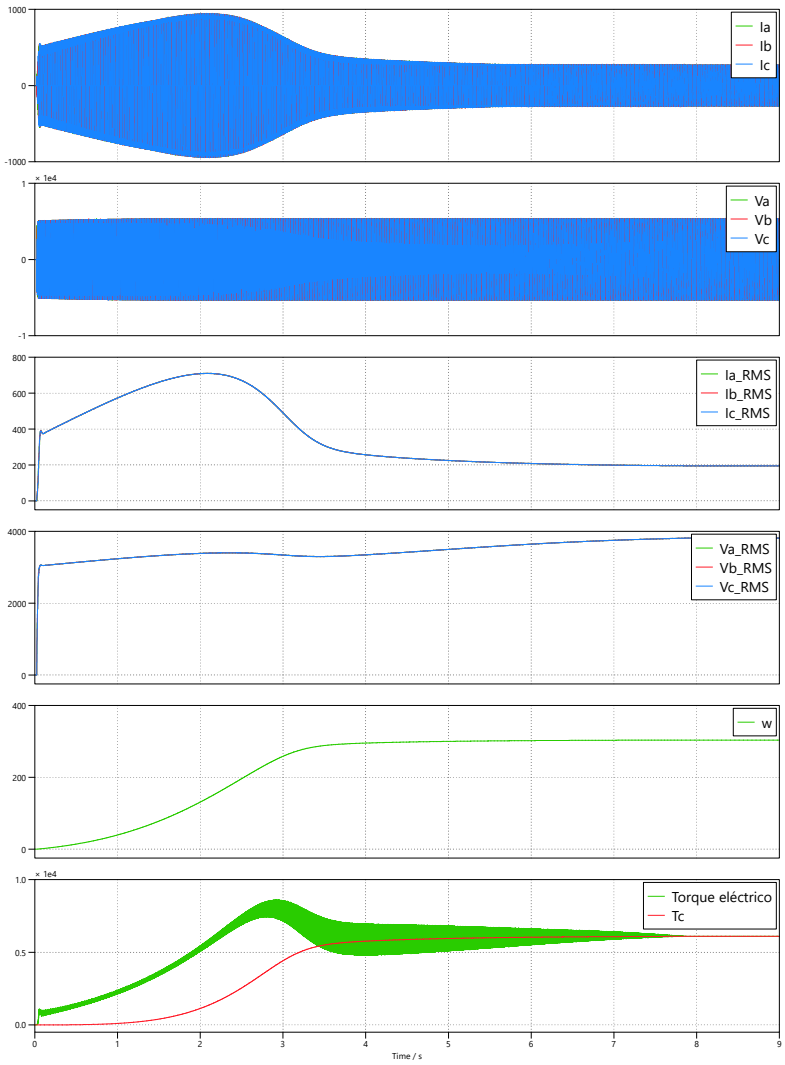


Figura 4.8: Simulación de operación del motor mediante partidor suave para el Caso 3 (rampa lenta), considerando condición con carga y sin carga. En ambas gráficas se presentan: (1) corrientes, (2) tensión, (3) corriente RMS, (4) tensión RMS, (5) velocidad mecánica y (6) torque electromagnético.

En la figura 4.7 se aprecia que, en condición con carga, la energía acumulada final del partidor suave supera a la del arranque directo. Este comportamiento se asocia al mayor tiempo de aceleración impuesto por la rampa lenta, lo que incrementa la duración del transitorio y, con ello, la energía disipada total.

4.3. Resultados obtenidos

En la siguiente tabla 4.1 se demuestran los valores de energía total para cada caso evaluado, con y sin carga.

Tabla 4.1: Comparación de la energía total disipada durante el arranque para los distintos casos analizados

Caso	Condición	$\mathbf{E_{tot,DOL}}$ [J]	$\mathbf{E_{tot,SS}}$ [J]	$\frac{\mathbf{E_{DOL}}}{\mathbf{E_{SS}}}$
Caso 1 (rampa intermedia)	Con carga	2564850	2398870	1.069
Caso 1 (rampa intermedia)	Sin carga	2181360	1999920	1.091
Caso 2 (rampa rápida)	Con carga	2564850	2374110	1.080
Caso 2 (rampa rápida)	Sin carga	2181360	1993694	1.094
Caso 3 (rampa lenta)	Con carga	2564850	2934940	0.874
Caso 3 (rampa lenta)	Sin carga	2181360	2049227	1.064

A partir de los resultados obtenidos, se observa que el partidor suave no presenta una reducción uniforme de la energía total disipada durante el arranque, ya que su desempeño depende significativamente del tiempo de rampa configurado. En los casos de rampa intermedia y rampa rápida se obtiene una disminución de la energía total, tanto con carga como sin carga, con reducciones del orden de 6 % a 9 % respecto del arranque directo en línea.

Sin embargo, en estos casos la corriente de arranque aún alcanza valores cercanos a 1100 A, equivalentes aproximadamente a cinco veces la corriente nominal del motor. Por lo tanto, aunque existe una mejora energética, la severidad eléctrica del arranque sigue siendo elevada.

En contraste, el caso de rampa lenta reduce la corriente de arranque hasta valores cercanos a 500 A, pero prolonga considerablemente el tiempo de aceleración. Como consecuencia, aumentan las pérdidas durante el transitorio y, en condición con carga, la energía disipada mediante partidor suave supera a la del arranque directo en línea. Este comportamiento evidencia que el incremento de pérdidas no se explica únicamente por la reducción de la pendiente de aceleración, sino también por la exigencia mecánica impuesta por la carga, la cual obliga al motor a desarrollar torque durante un intervalo más prolongado. En estas condiciones, la permanencia del motor en la zona transitoria se extiende, aumentando la circulación de corriente y, con ello, la energía acumulada en el estator y el rotor. Esto demuestra que una menor corriente *peak* no garantiza necesariamente una mejor respuesta térmica global.

En consecuencia, los resultados muestran que el beneficio del partidor suave depende fuertemente del ajuste de rampa, de la condición de carga y del tiempo total de aceleración. Por ello, la energía disipada durante el arranque debe considerarse como una métrica complementaria, pero no como el único criterio para evaluar el impacto sobre la vida útil del motor. En particular, parámetros como la corriente pico, el torque pico y la severidad del transitorio resultan más representativos para analizar el efecto del arranque sobre el desgaste térmico y mecánico del sistema.

4.4. Comparación del desempeño energético durante el arranque

A partir de las simulaciones realizadas en el capítulo 3, se observó que el arranque directo en línea (DOL) y el arranque mediante partidor suave (SS) presentan comportamientos claramente diferenciados durante el transitorio. En el caso del arranque directo, la

corriente absorbida por el motor alcanza valores elevados desde el instante inicial, evidenciando un incremento abrupto tanto en la corriente instantánea como en su valor eficaz. En contraste, el partidor suave impone una aplicación progresiva de tensión, lo que se traduce en una evolución más gradual de la corriente y una reducción de sus valores máximos durante el arranque, dependiendo del ajuste de rampa, tal como se aprecia en las figuras 3.6 y 3.7.

Desde el punto de vista térmico, esta diferencia es especialmente relevante, ya que las pérdidas resistivas en los devanados dependen del cuadrado de la corriente. En el estator, dichas pérdidas pueden expresarse como:

$$P_{Joule} = 3 \cdot I^2 R_s \tag{4.1}$$

Por lo tanto, una disminución en la magnitud de la corriente durante el arranque reduce de forma importante la potencia térmica instantánea disipada en la máquina. Sin embargo, el comportamiento energético no depende únicamente del valor máximo de corriente, sino también del tiempo durante el cual esta permanece circulando. En consecuencia, un arranque con menor corriente pero con mayor duración puede generar una energía total disipada comparable o incluso superior a la de un arranque más brusco y breve.

Para capturar este efecto de forma integral, se empleó el indicador I^2t, el cual permite cuantificar la severidad térmica acumulada durante el transitorio:

$$S = \int I^2(t)\, dt \tag{4.2}$$

Este parámetro resulta más representativo que la sola observación de la corriente *peak*, ya que incorpora simultáneamente la magnitud de la corriente y la duración del arranque. No obstante, en el caso analizado, una eventual mejora en el indicador I^2t no implica necesariamente una reducción significativa de las solicitaciones máximas del sistema, dado que las corrientes de arranque y los momentos desarrollados continúan siendo elevados, aunque durante un intervalo más breve. En consecuencia, la aplicación del partidor suave en este escenario no debe interpretarse como una solución que permita justificar una reducción en la capacidad del cableado, de los equipos asociados, de las protecciones o de los elementos mecánicos, sino más bien como una alternativa cuya eventual conveniencia debe evaluarse principalmente desde el punto de vista energético. Aun así, dicha ventaja tampoco es general, ya que en presencia de carga y bajo rampas excesivamente lentas, la energía disipada durante el arranque puede incluso superar a la correspondiente al arranque directo en línea.

4.5. Comparación del perfil de velocidad

El arranque directo presenta una pendiente de aceleración elevada durante los primeros instantes del transitorio, lo que permite que el motor alcance el régimen permanente en un menor tiempo. Esta rápida variación puede analizarse mediante la ecuación dinámica del sistema rotacional:

$$J\frac{d\omega}{dt} = T_e - T_c \tag{4.3}$$

donde J corresponde al momento de inercia del sistema, T_e al torque electromagnético y T_c al torque de carga.

En estas condiciones, el elevado torque inicial disponible en el arranque directo genera un mayor torque acelerante durante los primeros instantes, lo que se traduce en una aceleración angular más pronunciada y en un menor tiempo de llegada al régimen permanente.

En contraste, el arranque con partidor suave presenta una variación más gradual de la velocidad, reflejando una aceleración más progresiva durante el transitorio. Aunque el torque electromagnético máximo puede ser del mismo orden que en el arranque directo, cuando se alcanzan valores elevados de torque la carga ya presenta valores significativos; por lo tanto, el torque dinámico o acelerante, definido como $T_d = T_e - T_c$, resulta menor. Como consecuencia, la pendiente de aceleración disminuye y el motor alcanza la velocidad de régimen en un mayor tiempo, pero con una evolución más uniforme. Esta característica resulta especialmente favorable en aplicaciones con bombas centrífugas, donde cambios rápidos de velocidad pueden inducir solicitaciones transitorias en el sistema hidráulico y mecánico.

4.6. Comparación del torque electromagnético

Las diferencias en el torque electromagnético constituyen un aspecto relevante del análisis comparativo.

En el arranque directo, el torque presenta una respuesta inicial más brusca, con oscilaciones y picos elevados durante los primeros instantes del transitorio, producto de la aplicación directa de tensión a frecuencia industrial. Este comportamiento genera una transferencia de par menos uniforme hacia la carga.

En contraste, bajo partidor suave, el torque electromagnético evoluciona de manera más gradual y con menores oscilaciones instantáneas. No obstante, ello no implica necesariamente una reducción importante del torque medio máximo respecto al arranque directo, ya que ambos pueden alcanzar valores del mismo orden. La principal diferencia radica en la ausencia de los picos oscilatorios elevados característicos del arranque directo, lo que permite una entrega de par más progresiva hacia el conjunto motor–bomba.

4.7. Tiempo de aceleración y estabilidad operativa

El arranque directo permite alcanzar el régimen permanente en un tiempo menor, sin embargo, lo hace a costa de transitorios eléctricos y mecánicos más severos.

El partidor suave, aunque incrementa el tiempo de aceleración, proporciona una transición más estable hacia el régimen permanente, reduciendo oscilaciones y solicitaciones abruptas. Para la aplicación analizada, el mayor tiempo de arranque no compromete la operación del sistema, manteniéndose dentro de márgenes funcionales aceptables.

4.8. Implicancias operativas

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que la disminución de los picos de corriente y la suavización del torque electromagnético, junto con una aceleración más con-

trolada, contribuyen a reducir las solicitaciones térmicas y mecánicas durante el arranque del motor.

Es importante considerar que los motores analizados no corresponden a equipos nuevos, sino que se encuentran en operación desde el año 2002. En consecuencia, el sistema de aislamiento presenta un envejecimiento acumulado producto de ciclos térmicos previos y años de servicio continuo.

El envejecimiento térmico del aislamiento sigue un comportamiento dependiente de la temperatura, por lo que incrementos repetitivos de temperatura durante los arranques aceleran la degradación del material aislante. Aunque el efecto de un único arranque pueda parecer reducido, la repetición sistemática de arranques con alta severidad térmica a lo largo del tiempo produce un deterioro acumulativo que disminuye la vida útil remanente del motor.

En este contexto, la reducción de la severidad térmica y mecánica por evento de arranque mediante el uso de partidor suave adquiere especial relevancia. Desde una perspectiva de gestión de activos, la implementación de partidores suaves no solo mejora el comportamiento dinámico del sistema durante el transitorio, sino que también constituye una medida de mitigación del desgaste acumulativo, particularmente significativa en motores con más de dos décadas de operación.

Capítulo 5

Evaluación de la conveniencia técnica y económica

La evaluación de la conveniencia técnica y económica de la implementación de partidores suaves en los motores de media tensión, inicialmente se realiza mediante una revisión comparativa de distintas alternativas comerciales disponibles en el mercado, considerando su compatibilidad eléctrica y así como su adecuación a las condiciones reales de operación del sistema.

Dentro de este capítulo se evaluarán las propuestas de alternativas de equipos que se proporcionó de las diferentes empresas disponibles en la industria, como Rhona, Vignolia, Emotron, Flopower, Primser e Insaa.

Las alternativas evaluadas corresponden a partidores suaves de media tensión en función de la tensión nominal de la red de 6,6 kV y de las corrientes nominales de cada motor. El análisis se llevará a cabo según los criterios técnicos, verificando sus características, mantenibilidad, cumplimiento normativo, etcétera.

5.1. Análisis técnico del uso de partidores suaves

5.1.1. Criterios de evaluación técnica

Con el propósito de seleccionar la alternativa más adecuada para la aplicación analizada, se definieron criterios de evaluación técnica orientados a asegurar la correcta operación del sistema, la confiabilidad del equipo y su integración con la infraestructura existente. Estos criterios permiten comparar objetivamente las distintas propuestas recibidas en función de su desempeño técnico y su adecuación a las condiciones reales de operación.

- **Adecuación técnica al sistema existente:** Evaluación del cumplimiento de los requerimientos eléctricos y operacionales del sistema, tales como niveles de tensión, corriente nominal y condiciones de arranque, asegurando la compatibilidad del equipo propuesto con los motores y la red existente, sin requerir modificaciones mayores en la instalación.
- **Confiabilidad operativa y facilidad de mantenimiento:** Evaluación del diseño constructivo, robustez del equipo y requerimientos de mantenimiento, priorizando

soluciones que reduzcan la frecuencia de intervenciones y el riesgo de fallas en operación continua.

- **Compatibilidad con las condiciones del entorno:** Verificación de la capacidad del equipo para operar de manera confiable bajo las condiciones ambientales propias de la instalación, tales como altitud elevada, presencia de polvo y variaciones térmicas, sin degradación prematura de sus componentes.
- **Conformidad con estándares técnicos internacionales:** Revisión del cumplimiento de normas técnicas aplicables, tales como IEC y NEMA, así como la disponibilidad de ensayos de rutina y pruebas de fábrica que respalden el desempeño y la calidad del equipo propuesto.
- **Capacidad de integración funcional y supervisión:** Evaluación de las capacidades de instrumentación, comunicación y monitoreo del equipo, considerando su integración con los sistemas de protección, control y supervisión existentes, así como la disponibilidad de registro de eventos y variables eléctricas relevantes.

Cabe destacar que, si bien las propuestas técnicas son presentadas por distintas empresas proveedoras, el análisis técnico se realiza principalmente a nivel de equipo y tecnología ofrecida, dado que un mismo modelo de partidor suave puede ser suministrado por más de un proveedor comercial. En este contexto, la evaluación técnica se centra en las características del equipo propuesto, mientras que los aspectos económicos, contractuales y de alcance se analizan posteriormente desde el punto de vista de cada propuesta comercial.

5.1.2. Evaluación de equipos

5.1.2.a. Partidor suave SOLCON

La empresa Emotron presentó una propuesta correspondiente a tres partidores suaves de media tensión del fabricante SOLCON, modelo HRVS-DN, para un nivel de tensión de 6,6 kV, con distintos valores de corriente nominal, de acuerdo con los tres rangos de potencia requeridos. En la tabla **??** se demuestran las especificaciones técnicas y en la tabla 5.2 las ventajas y desventajas.

Tabla 5.1: Especificaciones técnicas partidor Solcon

Parámetro	**Valor ofertado**
Potencia nominal del motor	550 HP (400 kW) / 900 HP (670 kW) / 2600 HP (1900 kW)
Tensión nominal	6,6 kV
Corriente nominal	60 A / 80 A / 200 A
Grado de protección	IP54
Nivel de aislamiento	7,2 kV
Tipo de aplicación	Heavy duty
Dimensiones (Al × An × Pr)	2500 × 1100 × 1100 mm
Peso aproximado	950 kg

- Ventajas y desventajas

Tabla 5.2: Resumen de ventajas y desventajas técnicas del partidor suave SOLCON HRVS-DN

Ventajas técnicas	**Desventajas / Limitaciones**
• Reducción de picos de corriente y torque mecánico durante el arranque y paro. • La unidad de potencia HRVS-DN estándar está diseñada para longitudes de cable de hasta 200 m (entre motor y partidor suave). • Las funciones avanzadas incluyen curvas de arranque personalizables, mediciones únicas de tensión y corriente, así como capacidades de monitoreo. • Protección rápida mediante fusible electrónico tipo Shear Pin, además de varias protecciones de motor integradas. • Prueba de rutina: incluye descargas parciales de cada módulo de potencia según EN5017. • Diseño libre de efecto corona y apto para ambientes exigentes (hasta 50 °C). • Protocolo de comunicación: Modbus RTU embebido. • Control único de encendido de SCR´s que operan solamente al arrancar y al parar el motor. El tiempo de funcionamiento de los SCR´s es sólo durante el arranque o paro, estando los SCR´s apagados totalmente durante la operación pero manteniendo siempre activas todas y cada una de sus protecciones, dándole, con este sistema, una larga vida al arrancador. • Capacidad de arrancar varios motores con un solo arrancador (sistema multimotor), arranque suave múltiple y parada suave múltiple • Cuenta con curvas especiales de arranque y paro para sistemas de bombeo.	• Mayor complejidad electrónica en comparación con esquemas convencionales, requiriendo soporte técnico especializado. • Limitación estándar de altitud de instalación.

- Análisis de cumplimiento de criterios técnicos:

  En términos de adecuación técnica al sistema existente, la propuesta cumple con los niveles de tensión (6,6 kV), corrientes nominales y aplicación Heavy Duty requeridos, permitiendo su implementación sin modificaciones relevantes en la infraestructura existente.

  Desde la perspectiva de la confiabilidad operativa y mantenimiento, el diseño incorpora contactores de línea y *bypass* al vacío, compartimientos segregados y protecciones integradas de motor, lo que favorece una operación confiable y reduce el desgaste mecánico y térmico durante los arranques. La disponibilidad de soporte técnico lo-

cal constituye un aspecto favorable para la continuidad operacional, además cuentan con con repuestos y un área de mantenimiento preventivo y correctivo.

En cuanto a la compatibilidad con el entorno, el equipo presenta grado de protección IP54 y condiciones de operación adecuadas para instalaciones interiores industriales.

Respecto de la conformidad normativa, el equipo cumple con la norma IEC 62271-200 e incorpora ensayos de rutina, incluyendo pruebas de descargas parciales.

Finalmente, en relación con la integración funcional, el partidor suave dispone de comunicación Modbus RTU y capacidades de registro de eventos, permitiendo su integración con los sistemas de control y supervisión existentes.

5.1.2.b. Partidor suave AUCOM

Rhona presentó una propuesta correspondiente a tres partidores suaves de media tensión del fabricante AUCOM, modelo L-Series MVE E1, para un nivel de tensión de operación de 6,6 kV, destinados a motores aplicados a sistemas de bombeo, con distintos rangos de potencia nominal. En la tabla 5.3 se demuestran las especificaciones técnicas y en la tabla 5.4 las ventajas y desventajas.

Tabla 5.3: Especificaciones técnicas Partidor AUCOM L-Series MVE E1

Parámetro	**Valor ofertado**
Potencia nominal del motor	400 kW / 670 kW / 1900 kW
Tensión de operación	6,6 kV
Tensión nominal	7,2 kV
Frecuencia	50/60 Hz
Corriente nominal feeder	200 A
Corriente de cortocircuito (1s / peak)	20 kA / 50 kA
Soportabilidad dieléctrica (AC / impulso)	20 kV / 60 kV
Clase de partición	N/A
Continuidad de servicio	LSC 1
Grado de protección	IP4X
Temperatura ambiente	Hasta 50 °C
Altitud máxima de instalación	$<$ 1000 m s.n.m.
Tensión de control	230 VAC, 1Ph, 50/60 Hz
Tensión auxiliar	230 VAC, 1Ph, 50/60 Hz
Dimensiones (Al $\times$ An $\times$ Pr)	2200 $\times$ 1000 $\times$ 1200 mm
Peso aproximado	850 kg

- Ventajas y desventajas

Tabla 5.4: Resumen de ventajas y desventajas técnicas del partidor suave AUCOM L-Series MVE E1

Ventajas técnicas	**Desventajas / Limitaciones**
• Cumplimiento de norma IEC 62271-200, con equipo prefabricado y probado en fábrica. • Conjunto de motor: Admite dos conjuntos de parámetros de motor diferentes para doble arranque y parada. • Protege su motor incluso cuando este opera en modo *bypass*. • Alta capacidad de sobrecarga (400 % durante 30 s), adecuada para arranques exigentes. • Protección integral de motor basada en funciones ANSI. • Registro de eventos y diagnóstico de forma de onda incorporados. • Comunicación Modbus RTU integrada. • Diseño apto para ambientes industriales con temperatura hasta 50 °C. • Opciones de parada y arranque, arrancador suave MVE sea apropiado para todos los usos. • Soporte ante fallas, capacitaciones. Además, sucursal en la región de Valparaíso.	• Corriente nominal fija (200 A) para los distintos rangos de potencia. • Altitud máxima estándar limitada a 1000 m.s.n.m. No especifica explícitamente el número máximo de arranques por hora admisibles.

- Análisis de cumplimiento de criterios técnicos

  En términos de adecuación técnica al sistema existente, la propuesta cumple con los niveles de tensión requeridos (6,6 kV) y con las potencias de los motores analizados, siendo adecuada para aplicaciones de bombeo con condiciones de arranque exigentes.

  Respecto de la confiabilidad operativa y mantenimiento, el equipo incorpora protecciones integradas basadas en funciones ANSI, *bypass* en media tensión y registro de eventos, lo que favorece la operación confiable y el diagnóstico de fallas. Sin embargo, los servicios de puesta en marcha y mantenimiento no están incluidos.

  En cuanto a la compatibilidad con el entorno, el equipo está diseñado para operación en ambientes industriales interiores, con temperatura ambiente de hasta 50 °C y altitud menor a 1000 m.s.n.m., siendo necesario verificar condiciones especiales fuera de estos rangos.

  Desde el punto de vista de la conformidad normativa, el partidor suave cumple con la norma IEC 62271-200 y cuenta con ensayos de rutina de fábrica.

  Finalmente, en relación con la integración funcional, el equipo dispone de comunicación Modbus RTU, señales de estado y registro de eventos, permitiendo su integración con los sistemas de control y supervisión existentes.

5.1.2.c. Partidor suave WEG

INSAA Ingeniería SpA, Vignolia y Primser presentaron una propuesta correspondiente al suministro e instalación de tres partidores suaves de media tensión del fabricante WEG, modelo SSW7000, para un nivel de tensión de operación de 6,6 kV, asociados a motores de potencias de 400 kW, 670 kW y 1.900 kW. En la tabla 5.5 se demuestran las especificaciones técnicas y en la tabla 5.6 las ventajas y desventajas.

Tabla 5.5: Especificaciones técnicas partidor suave WEG SSW7000

Parámetro	**Valor ofertado**
Tensión de operación	6,6 kV
Tensión nominal	7,2 kV
Frecuencia	50/60 Hz
Aplicación	Motores de media tensión
Tecnología	Arrancador suave con SCR
Grado de protección	IP4X
Temperatura ambiente	Hasta 40 °C
Altitud máxima	$<$ 1000 m s.n.m.
Normativa aplicable	IEC 60947 / IEC 62271
Configuración	Montaje en celdas MT

- Ventajas y desventajas

Tabla 5.6: Resumen de ventajas y desventajas técnicas del partidor suave WEG SSW7000

Ventajas técnicas	**Desventajas / Limitaciones**
• Reducción de corrientes de arranque y esfuerzos mecánicos sobre el motor. • Simplificación de la coordinación entre suministro e instalación. • Numero máximo de arranques: 5 arranques en 2 horas (un arranque a cada 30 minutos). • La vida útil de diseño de la línea SSW7000 (MV SS) es de 30 años, cuando se siguen las recomendaciones de instalación y mantenimiento descritas en los manuales. • Permite el ajuste de la curva de arranque/parada conforme la necesidad de la curva de carga.	• Temperatura de operación estándar, menor que en soluciones Heavy Duty. • No especifica capacidades de arranque multi-motor ni salidas múltiples para alimentar más de un motor desde una sola unidad. En consecuencia, se supone que cada unidad está destinada a un motor individual, debiendo considerarse unidades adicionales para aplicaciones que requieran arrancar múltiples motores de forma independiente.

- Análisis de cumplimiento de criterios técnicos:

  En términos de adecuación técnica al sistema existente, la propuesta WEG cumple con el nivel de tensión requerido (6,6 kV) y se encuentra diseñada para el arranque controlado de motores de media tensión, permitiendo su integración en la infraestructura eléctrica existente.

  Respecto de la confiabilidad operativa y mantenimiento, la solución ofrece una arquitectura estándar de partidor suave, con reducción de corrientes de arranque y

esfuerzos mecánicos.

En cuanto a la compatibilidad con el entorno, el grado de protección IP4X y el rango de temperatura estándar resultan adecuados para instalaciones interiores industriales, aunque con menores márgenes frente a condiciones ambientales exigentes.

Desde el punto de vista de la conformidad normativa, el equipo declara cumplimiento con normas IEC aplicables a equipamiento de media tensión, siendo compatible con los requisitos regulatorios del sistema. Además, el equipo es sometido a ensayos en laboratorio, y las pruebas de los arrancadores suaves WEG MT se realizan de acuerdo con las siguientes normas: NBR IEC 62271-200, IEC 62271-1, IEC 60060-1, CISPR 11, IEC 61000-4-4, IEC 61000-4-18, NBR IEC 60529, UL 347 y UL 347B.

Finalmente, la capacidad de integración funcional se ve favorecida al incluir instalación eléctrica y pruebas de puesta en servicio dentro del mismo contrato.

5.1.2.d. Partidor suave MOTORTRONICS

La empresa Flopower nos presenta la propuesta de tres partidores suaves de la marca Motortronics. En la tabla 5.7 se demuestran las especificaciones técnicas y en la tabla 5.8 las ventajas y desventajas.

Tabla 5.7: Especificaciones técnicas Partidor suave Motortronics

Parámetro	**Valor ofertado / estándar**
Tensión de operación compatibles	2,300 – 15,000 V AC (incluye 6,6 kV)
Frecuencia	50/60 Hz
Rango de potencia/HP	Hasta 10.000 HP @ 7,2 kV (800 A)
Capacidad de sobrecarga	500 % durante 60 s / 600 % durante 30 s
Protecciones integradas	Modelado térmico real y protección avanzada de motor
Aislamiento / BIL	Hasta 110 kV (según versión)
Enclosure	NEMA 12 (NEMA 3R opcional)
Ambiente operación	0 – 50 °C, 5 – 95 % HR
Altitud estándar sin derating	Hasta 1000 m s.n.m.
Opciones de comunicación	Modbus RTU, Ethernet/IP, Profibus, etc.

- Ventajas y desventajas

Tabla 5.8: Resumen de ventajas y desventajas técnicas del partidor suave Motortronics MVC4

Ventajas técnicas	Desventajas / Limitaciones
• Control suave de arranque y paro con modelado térmico real y protección avanzada de motor. • Amplio rango de tensión (hasta 15 kV) y capacidad de potencia muy alta. • Opciones de comunicación y monitoreo integradas o disponibles. • Protección de sobrecarga muy robusta (500 % - 600 %). • El arrancador suave cuenta con un relé de protección del motor incorporado que puede programarse para la protección primaria del motor/sistema de carga.	• No incluye pruebas de aceptación ni información acerca de servicios para PEM.

- Análisis de cumplimiento de criterios técnicos

  El partidor suave Motortronics MVC4 cumple con los requerimientos de tensión y frecuencia para una red de 6,6 kV y 50/60 Hz, con un diseño robusto de control y protección avanzada para arranques suaves de motores de gran potencia.

  Además incorpora funciones de protección térmica avanzada y múltiples capacidades de diagnóstico y monitoreo, favoreciendo la operación continua y la protección del motor.

  El equipo opera en rangos típicos industriales (0–50 °C, hasta 1000 m), con un gabinete NEMA 12 estándar, por lo tanto cumple con la compatibilidad con el entorno.

  Finalmente, los equipos disponen de comunicación Modbus RTU.

5.2. Análisis económico del uso de partidores suaves

Para el análisis económico se consideran aquellos parámetros que permiten evaluar la factibilidad de la implementación de partidores suaves desde el punto de vista financiero. En particular, se analizan los costos de inversión inicial, asociados a la adquisición e implementación de los equipos, y los costos de operación y mantenimiento, vinculados a la operación del sistema a lo largo del tiempo.

El objetivo de este análisis es estimar el costo de implementación de la solución propuesta, así como identificar los beneficios económicos asociados, entendidos principalmente como los costos evitados producto de la reducción de fallas, reparaciones y reemplazos prematuros de motores de media tensión.

De las propuestas entregadas de diferentes empresas se realizó en detalle los costos asociados a cada cotización. Los resultados se encuentran en anexo, donde para cada cotización se crea una tabla resumen de los costos asociados.

Para asegurar la validez del modelo financiero, se definieron los siguientes parámetros:

- Tipo de cambio: Se consideran tres monedas de referencia: dólar estadounidense (USD), euro (EUR) y peso chileno (CLP). Para el dólar se adopta un valor de 860 CLP/USD. En el caso del euro, se utiliza un valor estimado para octubre de 2025 equivalente a 1,176 USD/EUR.

5.2.1. Costos asociados al escenario actual de operación

El escenario actual de operación con arranque directo implica costos económicos relevantes, asociados principalmente al desgaste acelerado de los motores producto del elevado número de arranques anuales. Tal como se mostró en los capítulos anteriores, la alta severidad térmica durante los arranques directos genera un consumo acelerado de la vida útil del aislamiento del estator, aumentando significativamente la probabilidad de fallas prematuras.

Un caso representativo de esta condición corresponde al motor de la bomba APH101, el cual presentó una falla eléctrica durante el mes de octubre, asociada a daños en el bobinado del estator. Como consecuencia, el motor debió ser retirado de servicio y enviado a reparación especializada. El costo total de la intervención ascendió a CLP 107.746.000, correspondiente a un motor de inducción de media tensión de 1.900 kW.

Este evento constituye un antecedente concreto que evidencia el impacto económico del régimen de arranque directo bajo condiciones de alta frecuencia de arranques. Además del costo directo de la reparación, deben considerarse costos indirectos relevantes, tales como la indisponibilidad del equipo durante el período de reparación, la reconfiguración forzada de la operación de la central y el aumento del riesgo operacional asociado a la pérdida de redundancia en sistemas críticos.

Asimismo, debe analizarse el escenario de una falla mayor en un motor de media tensión cuya reparación no resulte técnica o económicamente viable. En dicho caso, la única alternativa corresponde a la adquisición de un motor nuevo de características equivalentes, lo que implica una inversión de capital elevada y plazos de fabricación y entrega prolongados, que pueden afectar significativamente la disponibilidad y seguridad operativa del sistema.

El costo de adquisición de un motor nuevo fue investigado a raíz de la falla del motor de la bomba APH101. Se consultó a empresas especializadas por un equipo de características similares, estimándose en ese momento un valor aproximado de USD 270.500. Esta cifra se obtuvo a partir de una estimación del año 2019, reajustada según la variación del IPC de la Eurozona entre julio de 2017 y diciembre de 2025 (23,5 %), lo que arrojó un valor cercano a 230.000 EUR. Considerando una relación de cambio de 1 euro equivalente a 1,176 USD, durante el mes de octubre del 2025, el valor final estimado del motor se sitúa en torno a los 270.000 USD.

Un aspecto particularmente desfavorable del reemplazo total del motor corresponde al plazo de entrega, el cual, en el mejor de los casos, se estimaba entre tres y cuatro meses para fabricación en Europa. Debido a estas condiciones, se optó por la alternativa de reparación, la cual resultó más conveniente desde el punto de vista del tiempo de restitución del servicio y del costo inmediato.

Estos antecedentes deben considerarse en la planificación futura de la operación. En caso de requerirse el reemplazo definitivo del motor, los plazos de entrega podrían resultar

excesivos para la continuidad operacional. En este contexto, la implementación de partidores suaves permitiría reducir la severidad térmica en cada arranque, disminuyendo el deterioro del aislamiento y la probabilidad de fallas en los bobinados, lo que contribuiría a postergar o evitar una inversión de reemplazo de esta magnitud.

5.2.2. Costos de implementación de partidores suaves

La implementación de partidores suaves implica una inversión inicial (CAPEX) compuesta por el suministro de los equipos y por los servicios asociados a su correcta integración en la instalación existente. Dentro de estos costos algunas empresas consideran la ingeniería básica, las adecuaciones eléctricas necesarias, el comisionamiento y puesta en marcha, las pruebas de aceptación en sitio (SAT) y la capacitación del personal de operación.

Las cotizaciones disponibles permiten estimar el costo de los equipos principales, mientras que los servicios asociados se consideran de manera referencial, en base a prácticas habituales en proyectos industriales de características similares. Estos costos corresponden a una inversión única orientada a mejorar la confiabilidad y prolongar la vida útil de los motores analizados.

Los costos de operación y mantenimiento (OPEX) asociados a los partidores suaves se consideran reducidos en comparación con los costos derivados de fallas correctivas mayores. Estos costos incluyen principalmente actividades de mantenimiento preventivo, eventuales repuestos y asistencia técnica especializada. En este sentido, la implementación de partidores suaves permite desplazar la estrategia de mantenimiento desde un enfoque correctivo hacia uno preventivo, con beneficios económicos y operativos a largo plazo.

5.2.2.a. Evaluación de propuestas comerciales

Las propuestas técnico-comerciales recibidas por parte de distintas empresas proveedoras fueron utilizadas como fuente de información para la estimación de los costos de inversión y operación asociados a la implementación de partidores suaves. Sin embargo, el análisis económico global se realiza a nivel de solución técnica y escenario de operación, considerando valores de referencia representativos, de modo de permitir una comparación homogénea e independiente de las particularidades comerciales de cada proveedor.

En este contexto, la presente sección tiene por objetivo evaluar comparativamente los principales aspectos comerciales de cada propuesta, tales como el alcance del suministro, los costos de inversión inicial (CAPEX), los costos operacionales declarados (OPEX), los plazos de entrega y los servicios incluidos o excluidos. El detalle desagregado de costos correspondiente a cada cotización se presenta en el Anexo, donde se incluye una tabla resumen por propuesta comercial, utilizada como base para la evaluación desarrollada en este capítulo.

Empresa Emotron (SOLCON) Desde el punto de vista comercial, la propuesta presentada por Emotron establece un plazo de validez de la oferta de 30 días corridos. El plazo de fabricación y entrega del suministro se sitúa entre 20 y 22 semanas, contadas a partir de la aprobación de los planos y de la recepción completa de la información técnica y comercial requerida por el proveedor.

El alcance económico de la propuesta considera el suministro de partidores suaves de media tensión, incorporando los servicios de capacitación y puesta en marcha, con una duración total de dos días de trabajo en las instalaciones del cliente. Los equipos contemplan un período de garantía de tres años.

Dentro del suministro se incluyen los servicios de supervisión de montaje, los cuales consideran la participación de dos especialistas por un día, destinados a apoyar el proceso de instalación del partidor suave de media tensión SOLCON. Dicho servicio incorpora los costos asociados a movilización, alimentación, estadía y traslados, considerando jornadas de ocho horas diarias.

Adicionalmente, se contemplan los servicios de comisionamiento y puesta en servicio, los cuales consideran la asistencia de dos especialistas por un día bajo condiciones logísticas equivalentes, junto con actividades de capacitación dirigidas al personal de operación de planta.

La propuesta incorpora además un conjunto de repuestos críticos estimados para un horizonte de dos años de operación, con el objetivo de asegurar la continuidad operacional del sistema durante la etapa inicial de funcionamiento.

No forman parte del suministro base las adecuaciones eléctricas en celdas de media tensión ni las canalizaciones asociadas, las cuales deben ser consideradas como costos adicionales del proyecto.

El detalle desagregado de los costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX) asociados a esta propuesta se presenta en el Anexo, tabla A.2, lo que permite su comparación homogénea con las demás alternativas evaluadas.

Empresa Rhona (AUCOM) La propuesta comercial presentada por la empresa Rhona establece un plazo de vigencia de la oferta de 30 días corridos. El plazo estimado de fabricación y entrega del suministro es de aproximadamente 18 semanas, contadas a partir de la aprobación de los planos correspondientes.

Desde el punto de vista económico, la oferta considera exclusivamente el suministro de los partidores suaves de media tensión. Los servicios de montaje no se encuentran incluidos dentro del alcance base. De manera adicional y con costos asociados, la empresa contempla la prestación de servicios de asesoría técnica, capacitación del personal de operación y la ejecución de pruebas de aceptación en sitio (SAT), limitándose a un rol de acompañamiento técnico durante la implementación.

La empresa no proporciona con el desarrollo de estudios de ingeniería para el proyecto, ni entrega información cuantificada respecto de costos de mantenimiento o repuestos futuros, indicando que dichos valores deberán ser definidos una vez cursada la orden de compra.

El resumen de los costos asociados al suministro de los equipos y a los servicios adicionales se presenta en el Anexo, tabla A.3.

Las adecuaciones eléctricas en celdas de media tensión, las modificaciones de la infraestructura existente y las canalizaciones asociadas no se encuentran incluidas dentro del alcance del suministro y deben ser consideradas como costos complementarios del proyecto.

Empresa INSAA Ingeniería (WEG) La cotización entregada por la empresa INSAA Ingeniería define el período de plazo de fabricación cuatro semanas para envío de planos para aprobación, 20-22 semanas de entregas después de aprobados los planos por parte de cliente, y el plazo de instalación de los equipos se estima en aproximadamente cuatro a seis semanas, según distancias entre equipos. Esta propuesta, a diferencia de otras alternativas evaluadas, considera el suministro e instalación de los equipos en la central, incorporando además el suministro de cables de potencia necesarios para la interconexión entre la celda de media tensión, el partidor suave y el motor. Asimismo, se incluyen los elementos complementarios requeridos para la correcta implementación del sistema, tales como mufas interiores y exteriores para cables 4/0 AWG, 8 kV, destinadas a las uniones de entrada y salida del partidor suave.

Adicionalmente, la oferta contempla la instalación en terreno de los partidores suaves, junto con la ejecución de pruebas funcionales y el proceso de puesta en marcha eléctrica y mecánica (PEM) de cada equipo, lo que permite asegurar su correcta integración, verificación operativa y puesta en servicio dentro del sistema existente.

Quedan excluidos del alcance de la propuesta los costos asociados a obras civiles requeridas para el montaje de los partidores suaves, el suministro de *switchgear* de alimentación, los motores eléctricos, así como las canalizaciones eléctricas entre el *switchgear*, los partidores suaves y los motores. Asimismo, no se considera la ingeniería de detalle asociada al diseño del *switchgear*, canalizaciones, definición de cargas eléctricas ni los sistemas de control vinculados a la integración de los partidores suaves en la instalación existente, los cuales deberán ser evaluados y presupuestados de manera independiente en caso de ser requeridos.

El detalle económico de esta propuesta se presenta en el Anexo, tabla A.7 donde se resume la información utilizada para la comparación con las demás alternativas.

Empresa Flopower (MOTORTRONICS) La propuesta comercial presentada por la empresa Flopower establece un plazo de vigencia de la oferta de 30 días, así como un período estimado de fabricación y suministro del orden de 12-14 semanas, condicionado a la aprobación de la ingeniería y a la disponibilidad de la información técnica requerida.

El alcance económico incluye únicamente el suministro de los partidores suaves de media tensión. Dentro de la cotización no incluyen cargos y gastos para asesoramiento y asistencia técnica en relación con la instalación, la prueba y los ajustes necesarios para la puesta en marcha de los productos. De igual manera esta no incluye instalación de los equipos.

Las adecuaciones eléctricas, canalizaciones y modificaciones en infraestructura existente no se consideran dentro de la propuesta.

El análisis detallado de los costos asociados a esta alternativa se presenta en el Anexo tabla A.4.

Empresa Vignolia (WEG) La propuesta comercial presentada por la empresa Vignolia contempla el suministro de partidores suaves de media tensión WEG modelo SSW7000 para operación en 6,6 kV, incluyendo el servicio de puesta en marcha con un valor adicional, donde se requiere dos días por cada partidor suave. El plazo de entrega se estima cuatro semanas para envío de planos de fabricación y de 22 a 24 semanas de entrega después de

aprobados los planos.

No obstante, la propuesta no contempla dentro del alcance base las obras civiles adicionales que pudieran requerirse para el montaje, ni modificaciones estructurales mayores en infraestructura existente.

El detalle económico desagregado correspondiente al suministro, instalación y servicios asociados se presenta en el Anexo, tabla A.5,

Empresa Primser (WEG) La empresa Primser presentó una propuesta, cuya oferta tiene una duración de 30 días y plazos de entrega consisten en 4 semanas para envío de planos para aprobación y 20 - 22 semanas de entregas después de aprobados los planos por parte de cliente.

En términos de alcance, la propuesta incluye únicamente el suministro del equipamiento principal. No se especifican las actividades de instalación en terreno y ejecución de pruebas y puesta en servicio de los equipos. Se excluye obras civiles, modificaciones mayores en infraestructura existente y desarrollo de ingeniería de detalle asociada a canalizaciones. Estos aspectos deberán evaluarse como independientes.

El resumen de costos asociados al suministro y servicios incluidos se presenta en el Anexo, tabla A.6.

5.3. Síntesis comparativa

La tabla 5.9 presenta un resumen comparativo de las distintas propuestas comerciales recibidas para la implementación de partidores suaves de media tensión en los motores analizados. Se observa que existen diferencias relevantes tanto en la inversión inicial como en el alcance técnico de cada alternativa, particularmente en lo relativo a servicios asociados tales como ingeniería, supervisión de montaje, pruebas de aceptación en sitio (SAT), capacitación y mantenimiento.

Las propuestas con menor inversión inicial corresponden a aquellas que consideran únicamente el suministro de equipos, mientras que las alternativas con mayor CAPEX incorporan servicios adicionales orientados a reducir el riesgo de implementación y asegurar una correcta puesta en servicio. Estas diferencias resultan relevantes al momento de evaluar la conveniencia económica de cada alternativa, dado que un menor CAPEX no necesariamente implica un menor costo total del proyecto cuando se consideran los riesgos operacionales y los costos evitados por fallas futuras.

De las tres alternativas que cuentan con el mismo equipo de la marca WEG, se estima más conveniente considerar solo una para posteriormente comparar cuatro alternativas de equipos diferentes. De las tres presentadas se elige la alternativa D, de la empresa INSAA Ingenieria, dado que su valor incluye el suministro del equipo con la instalación. Por otro lado, incluye como servicio adicional el cable necesario para las conexiones entre la fuente y el partidor suave y desde el partidor suave a la carga/motor.

A continuación, en las Tablas 5.9 y 5.10 se presentan las características de las propuestas correspondientes a las seis alternativas consideradas inicialmente.

Tabla 5.9: Síntesis comparativa de alternativas

Ítem	Alternativa A (Emotron-Equipo Solcon)	Alternativa B (Rhona-Equipo Aucom)	Alternativa C (Flopower-Equipo Motronics)	Alternativa D (Insaa Ingeniería-Equipo WEG)	Alternativa E (Vignolia-Equipo WEG)	Alternativa F (Primser-Equipo WEG)
Partidor suave 1900kW	USD 69.800,00	USD 40.750,00	USD 67.397,00	$ 66.854.800	USD 70.150,60	USD 50.620,000
Partidor suave 670kW	USD 66.300,00	USD 39.295,00	USD 61.556,00	$ 60.467.700	USD 62.384,40	USD 50.620,000
Partidor suave 400kW	USD 65.860,00	USD 39.295,00	USD 57.967,00	$ 59.497.300	USD 61.204,00	USD 44.165,000
Subtotal Equipos	***USD 201.960,00***	***USD 119.340,00***	***USD 186.920,00***	***$ 186.819.800***	***USD 193.739,00***	***USD 145.405,00***
Servicios adicionales (PEM, SAT, etc)	USD 2.500,00	USD 25.800,00	N/A	$ 8.942.000	USD 23.400,00	N/A
Subtotal Capex	***USD 2.500,00***	***USD 25.800,00***	***USD 0,00***	***$ 8.942.000***	***USD 23.400,00***	***USD 0,00***
Operación y Mantenimiento	USD 16.485,00	USD 307,00	N/A	N/A	N/A	N/A
Subtotal Opex	***USD 16.485,00***	***USD 307,00***	***N/A***	***N/A***	***N/A***	***N/A***
Valor Total Bruto (CLP)	***$ 228.673.613***	***$ 149.324.294***	***$ 191.293.928***	***$ 232.956.542***	***$ 222.220.053***	***$ 148.807.477***

Tabla 5.10: Comparación de alternativas

Variable	*Alternativa A (Emotron)*	*Alternativa B (Rhona)*	*Alternativa C (Flopower)*	*Alternativa D (Insaa Ingeniería)*	*Alternativa E (Vignolia)*	*Alternativa F (Primser)*
Equipo	Solcon	Aucom	Motronics	WEG	WEG	WEG
Garantía	3 años	12 meses	18meses de la fecha de despacho o 12 meses de la fecha de PEM	12 mese	N/A	4 meses de Primser, Fabricante pendiente
Instalación y obras civiles	No incluida, se requiere instalación y obras civiles	No incluida, se requiere instalación y obras civiles	No incluida, se requiere instalación y obras civiles	Incluida	No incluida, se requiere instalación y obras civiles	No incluida, se requiere instalación y obras civiles
Componentes y servicios	Suministro de Partidores suaves con capacitación y PEM	Solo suministro de Partidores suaves	Solo suministro de Partidores suaves	Suministro de partidores suaves e instalación	Solo suministro de Partidores suaves	Solo suministro de Partidores suaves
Adicional	Supervision de montaje y Asistencia en la PEM y comisionamiento	Servicios de asistencia en PEM, Pruebas SAT, Asistencia de vendedor y capacitación, valor de HH adicionales.	N/A	Suministro y cableado de entrada y salida de los Partidores Suaves,	PEM	N/A
Plazo de Entrega	20-22 semanas	18 semanas	12-14 semanas	20-22 semanas	22-24 semanas	20-22 semanas
Origen equipo	Israel	Alemania	Estados Unidos	Brasil	Brasil	Brasil

5.4. Comparación final de la propuesta proyectada en el tiempo

Para realizar la comparación final de las ofertas disponibles en el mercado, se definieron tres alternativas en función de criterios previamente establecidos, tales como: información técnica entregada de los equipos, servicios adicionales incluidos, plazos de entrega, disposición comercial del proveedor, calidad y oportunidad en la comunicación, así como consideraciones asociadas a mantenimiento y disponibilidad de repuestos.

En base a estos criterios, se preseleccionaron las alternativas A, B y D, que corresponde a las empresas Emotron, equipo Solcon, la empresa Rhona con un equipo Aucom y de Insaa Ingeniería con un equipo marca Weg, dado que presentan mayores antecedentes técnicos, mejores condiciones comerciales y un soporte más adecuado para la etapa de implementación y operación del proyecto.

De las tres alternativas más tentadoras del mercado se realizara el análisis con perspectiva de mitigación. Así se logrará apreciar cual de las tres conviene más según los ratios en los escenarios evaluados.

5.5. Análisis económico desde la perspectiva de mitigación de riesgos

A partir de las propuestas técnicas y comerciales evaluadas, se realizó un análisis de conveniencia económica orientado a estimar el impacto relativo de la implementación de partidores suaves en la central. Dado el carácter preventivo de esta solución, el análisis no se basa en indicadores financieros tradicionales, sino en un indicador comparativo que

permite dimensionar la relación entre la inversión requerida y los costos asociados a fallas relevantes ya ocurridas.

En este contexto, se define un ratio económico indicativo, cuyo objetivo es evaluar la magnitud de la inversión en partidores suaves en relación con los costos derivados de eventos correctivos significativos en motores de media tensión. Este indicador permite apreciar de forma directa el nivel de conveniencia de la implementación desde una perspectiva de mitigación de riesgos y costos evitados.

Inicialmente, se analiza el caso de la implementación de un solo partidor suave, asociado al motor más crítico del sistema, correspondiente a la bomba APH101, el cual presentó la falla eléctrica más reciente. Para este escenario, el ratio se calcula como la relación entre el costo del partidor suave considerado y el costo de la reparación efectuada al motor de inducción de 1.900 kW.

El indicador se define mediante la siguiente expresión:

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Costo del Partidor Suave}}{\text{Costo de Reparación del Motor}} \tag{5.1}$$

Posteriormente, se incorpora un escenario de comparación, en el cual se relaciona el costo de implementación de un partidor suave con el costo estimado de adquisición de un motor nuevo de media tensión, correspondiente a un caso de falla mayor no reparable, estimando el valor conocido para el motor de 1.900 kW. Este análisis permite dimensionar la inversión desde una perspectiva de protección del activo y reducción del riesgo económico ante eventos de alto impacto.

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Costo del Partidor Suave}}{\text{Costo de Motor Nuevo}} \tag{5.2}$$

Los valores obtenidos para cada escenario de análisis se resumen en la tabla 5.11, la cual permite comparar de manera directa la conveniencia relativa de las distintas alternativas de implementación evaluadas.

Tabla 5.11: Indicador económico de conveniencia para la implementación de partidores suaves

Alternativa	Inversión Total Bruta [CLP]	Costo Neto Partidor de 1.900 kW	Implementacion de partidor en motor de 1.900 kW vs Reparación de motor 1.900 kW	Implementación de partidor en motor de .1900 kW vs Motor Nuevo de 1.900 kW
A (Emotron - Solcon)	$ 228.673.613	$ 60.028.000	56 %	26 %
B (Rhona - Aucom)	$ 149.324.294	$ 35.045.000	33 %	15 %
D (Insaa - WEG)	$ 232.956.542	$ 66.854.800	62 %	29 %

El análisis comparativo para la implementación de un partidor suave en el motor crítico de 1.900 kW evidencia diferencias relevantes entre las alternativas evaluadas.

La Alternativa B presenta el menor impacto económico relativo, representando que la instalación de un partidor suave equivale a un 33 % del costo de reparación del motor y un 15 % del costo de reemplazo por un equipo nuevo. Dado que el costo del partidor representa solo el 33 % del costo de una reparación mayor, la ocurrencia de una sola falla significativa ya permitiría recuperar completamente la inversión realizada. Desde esta perspectiva, la implementación del partidor puede interpretarse como una medida de mitigación de riesgo económicamente razonable.

Por su parte, la Alternativa A representa un 56 % del costo de reparación y un 26 % del costo de un motor nuevo, mientras que la Alternativa D alcanza un 62 % y un 29 %, respectivamente.

Desde una perspectiva estrictamente económica aplicada al motor de mayor criticidad, la Alternativa B presenta la mejor relación entre inversión preventiva y costo de falla evitado.

5.6. Recomendaciones finales

En base a los resultados técnicos y económicos obtenidos en el presente estudio, se recomienda la implementación de partidores suaves en los motores de media tensión considerados críticos desde el punto de vista operativo y de continuidad de servicio.

El análisis comparativo demostró que el arranque directo genera mayores solicitaciones térmicas y mecánicas, incrementando la severidad por evento de arranque y, en consecuencia, la tasa de degradación del aislamiento del estator y de los componentes mecánicos asociados. En motores con más de dos décadas de operación, este factor adquiere especial relevancia debido al envejecimiento acumulado del sistema de aislamiento.

La incorporación de partidores suaves permite configurar rampas de aceleración y desaceleración controladas, reduciendo significativamente los golpes mecánicos en el eje, el acoplamiento y la máquina accionada. Esta disminución de esfuerzos dinámicos se traduce directamente en menores requerimientos de mantenimiento correctivo y preventivo, así como en una reducción del riesgo de fallas mayores tales como daños en bobinados o reemplazo completo del motor.

Desde el punto de vista económico, el análisis realizado demuestra que la inversión en partidores suaves resulta considerablemente menor que el costo asociado a una reparación de bobinado o al reemplazo de un motor de media tensión. En consecuencia, la implementación de estos equipos puede entenderse como una medida de mitigación de riesgo, donde la reducción de la severidad térmica y mecánica disminuye la probabilidad de fallas catastróficas en el largo plazo.

Se recomienda mantener esquemas de partida directa únicamente en motores de respaldo o de menor criticidad operacional, permitiendo así equilibrar la inversión inicial con los beneficios técnicos y económicos obtenidos.

En cuanto a la selección de proveedor, se recomienda optar por la Propuesta B de la empresa Rhona, dentro de las alternativas evaluadas. Esta propuesta destaca por presentar una solución técnicamente completa, incluyendo servicios adicionales claramente especificados, soporte técnico ante eventuales fallas y disponibilidad de especialistas para atención en situaciones de emergencia.

Adicionalmente, se valoró positivamente la calidad de la comunicación técnica proporcionada durante el proceso de cotización, así como la presencia de la empresa en la Región de Valparaíso, lo cual representa una ventaja logística relevante para soporte y tiempos de respuesta.

En conjunto, la implementación de partidores suaves bajo la propuesta seleccionada contribuye a mejorar la confiabilidad operativa del sistema, reducir riesgos asociados a fallas mayores y favorecer una gestión de activos más sostenible en el largo plazo.

Capítulo 6

Propuesta de estrategia de operación

A partir de los resultados obtenidos en el análisis técnico, energético y económico desarrollado en este estudio, se propone una estrategia de implementación progresiva de partidores suaves en los motores de media tensión de la central.

El objetivo principal de esta estrategia es reducir la severidad térmica asociada a las pérdidas en cobre durante el arranque, mitigar los esfuerzos mecánicos transitorios sobre el sistema motor–bomba y mejorar la confiabilidad operacional en el mediano y largo plazo. La propuesta se enmarca dentro de un enfoque de gestión de activos, orientado a disminuir la tasa de degradación acumulativa en equipos con más de dos décadas de operación.

6.1. Implementación de plan piloto

La estrategia contempla iniciar con un plan piloto mediante la instalación de un partidor suave en el motor bomba APH101, equipo identificado como crítico debido a su historial de fallas y a la severidad observada en sus condiciones de arranque.

El motor APH201, de características similares, se mantendría operando con arranque directo en línea. Esta configuración permitirá:

- Contar con respaldo inmediato ante cualquier contingencia.
- Realizar una comparación directa entre ambos métodos bajo condiciones reales de operación.
- Evaluar diferencias en corriente de arranque, perfil térmico y comportamiento mecánico.

El plan piloto propuesto fue presentado y evaluado por el supervisor del área de la central termoeléctrica, quien validó la factibilidad técnica de la implementación, así como la pertinencia de ejecutar la estrategia bajo un esquema progresivo y controlado. Esta evaluación operacional refuerza la viabilidad práctica de la propuesta y su alineación con los criterios de confiabilidad y continuidad de servicio de la central.

Este enfoque controlado permitirá validar en terreno la reducción efectiva de la corriente de arranque y, por consiguiente, la disminución de las pérdidas en cobre, responsables del incremento térmico en los bobinados del estator y rotor.

Asimismo, permitirá cuantificar la reducción de esfuerzos mecánicos generados por los elevados torques transitorios característicos del arranque directo.

6.2. Indicadores de desempeño y criterios de evaluación

Durante la etapa piloto se propone monitorear los siguientes indicadores de desempeño. Considerando que en sistemas de arranque con tensión reducida, como los partidores suaves, el momento de carga influye en el incremento de pérdidas durante el proceso de aceleración, resulta particularmente relevante monitorear directamente la temperatura del motor, ya que la corriente constituye un indicador indirecto del esfuerzo térmico.

- Corriente RMS máxima durante el arranque.
- Tiempo total de aceleración.
- Integral térmica $\int I^2(t)\,dt$ por evento de arranque.
- Temperatura máxima del estator durante el transitorio.
- Número de arranques por período operativo.
- Eventos de mantenimiento correctivo asociados al sistema motor–bomba.

El análisis comparativo de estos indicadores permitirá determinar cuantitativamente la reducción de severidad térmica y mecánica obtenida con el partidor suave.

6.3. Recomendaciones técnicas para la operación

Con el fin de maximizar los beneficios proyectados, se recomienda que la configuración del partidor suave considere una rampa de tensión ajustada a la inercia real del sistema de bombeo.

El tiempo de aceleración deberá ser lo suficientemente progresivo para minimizar impactos mecánicos, pero evitando prolongar innecesariamente el tiempo de exposición a pérdidas térmicas.

Se recomienda implementar monitoreo térmico continuo del estator durante la etapa piloto, permitiendo comparar el comportamiento de temperatura respecto al arranque directo.

Dado que el deterioro del aislamiento depende tanto de la magnitud del incremento térmico como del número de ciclos de arranque, se sugiere llevar un registro sistemático de:

- Frecuencia de arranques.
- Duración del transitorio.
- Intervalo entre arranques sucesivos.

Complementariamente, la realización periódica de ensayos de resistencia de aislamiento e índice de polarización permitirá evaluar la evolución del estado dieléctrico bajo el nuevo régimen de operación.

6.4. Gestión del riesgo operacional

Desde una perspectiva de confiabilidad, la implementación progresiva reduce el riesgo técnico asociado a modificaciones abruptas en la configuración del sistema.

Mantener un motor en arranque directo durante la fase piloto permite garantizar continuidad operacional ante cualquier eventualidad y evita comprometer la disponibilidad de la unidad.

6.5. Proyección y escalabilidad

La instalación del partidor suave en la sala eléctrica de la unidad Nehuenco 2 es técnicamente factible, dado que se dispone de espacio físico suficiente, tal como se aprecia en las figuras A.3 y A.4. Las distancias de conexión son reducidas y las canalizaciones requeridas corresponden a soluciones estándar en este tipo de instalaciones.

Una vez validado el desempeño del plan piloto, se recomienda extender progresivamente la implementación a otros motores de 400 kW y 600 kW, priorizando aquellos con mayor criticidad operacional o historial de fallas asociadas a sobrecorrientes de arranque.

Una vez comprobados los beneficios técnicos y operativos del plan piloto, la central podrá adoptar el arranque suave como estándar técnico para motores de media tensión críticos, integrándolo como parte de una política de mitigación de desgaste térmico y mecánico en equipos envejecidos.

6.6. Visión de largo plazo

En términos generales, la propuesta no solo busca reducir la magnitud de la corriente de arranque, sino disminuir el desgaste térmico acumulativo, mitigar esfuerzos mecánicos severos y extender la vida útil efectiva de los motores de media tensión.

En equipos en operación desde el año 2002, la reducción de severidad por evento de arranque adquiere especial relevancia, dado que el sistema de aislamiento presenta envejecimiento acumulado producto de años de servicio y ciclos térmicos repetitivos. En este contexto, cada reducción en la energía térmica disipada durante el arranque contribuye a desacelerar la tasa de degradación remanente.

Desde una perspectiva de gestión de activos, la implementación progresiva de partidores suaves no solo mejora el comportamiento dinámico instantáneo del sistema, sino que constituye una medida concreta de mitigación del deterioro futuro. Esta estrategia permite preservar la condición operativa de los motores existentes, reducir la probabilidad de fallas mayores y optimizar el ciclo de vida de los activos críticos de la central.

De esta manera, la propuesta integra validación técnica en terreno, respaldo operacional interno y proyección escalable, contribuyendo a una operación más confiable, económicamente sustentable y técnicamente fundamentada en el largo plazo.

Capítulo 7

Conclusiones

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la conveniencia técnica y económica de implementar partidores suaves en los motores de media tensión, considerando el comportamiento eléctrico del arranque y su impacto sobre la operación de equipos críticos de larga vida en servicio.

El análisis desarrollado permitió abordar el problema desde una perspectiva integral, combinando modelación eléctrica, simulaciones dinámicas, estimación de pérdidas, comparación de variables transitorias y evaluación económica relativa. Este enfoque permitió complementar la comparación tradicional basada únicamente en la magnitud de la corriente de arranque, incorporando además el análisis de torque, potencia y energía durante el proceso de aceleración.

Desde el punto de vista eléctrico, los resultados obtenidos muestran que el arranque directo en línea genera corrientes iniciales significativamente superiores a las obtenidas mediante partidor suave. Las simulaciones permitieron verificar que la reducción de corriente lograda con una estrategia de arranque controlado es especialmente relevante durante los primeros instantes del transitorio. Dado que las pérdidas en el cobre del estator son proporcionales al cuadrado de la corriente, esta diferencia implica una mayor potencia de pérdidas instantánea bajo arranque directo en comparación con el arranque suave.

En este sentido, el estudio confirma que el método de arranque influye directamente en la severidad eléctrica del transitorio, modificando tanto la magnitud de las corrientes como la distribución temporal de las pérdidas durante la aceleración. No obstante, es importante señalar que, si bien este comportamiento permite comparar la exigencia instantánea entre alternativas, no constituye por sí solo una demostración directa del incremento de temperatura del motor ni de su efecto acumulado sobre el envejecimiento del aislamiento, ya que ello requiere incorporar explícitamente el modelo térmico del equipo, sus constantes de tiempo y los ciclos reales de operación.

Desde el punto de vista mecánico, el arranque directo produce elevaciones significativas de torque y aceleraciones más abruptas durante los primeros segundos del transitorio, mientras que el arranque suave permite una rampa controlada de tensión y corriente que modera dichas variaciones. Este comportamiento sugiere una reducción en la severidad electromecánica del arranque y un acoplamiento más gradual con la carga. Sin embargo, no se desarrolló en este trabajo un análisis estructural o electromecánico detallado de esfuerzos sobre devanados, eje o acoplamientos, por lo que cualquier inferencia respecto a

daño mecánico acumulado debe entenderse como una apreciación cualitativa y no como una cuantificación directa del fenómeno.

En términos temporales, si bien el arranque suave presenta un tiempo de aceleración superior al arranque directo, esta diferencia no compromete la operación del sistema de bombeo ni la disponibilidad del proceso dentro del alcance analizado. Por el contrario, el aumento del tiempo de aceleración forma parte del compromiso inherente al uso de rampas de arranque más suaves, cuyo objetivo es reducir la severidad instantánea del transitorio.

Desde la perspectiva energética, el estudio permitió complementar el análisis de corriente y torque mediante la evaluación de la energía asociada al proceso de arranque en configuraciones con y sin carga. Para ello, se comparó el comportamiento del arranque directo y del arranque con partidor suave bajo distintos tiempos de rampa. Los resultados muestran que, si bien el partidor suave reduce de forma importante los valores máximos de corriente y potencia instantánea, ello no implica necesariamente una disminución proporcional de la energía total del transitorio. En efecto, la energía asociada al arranque depende tanto de la condición de carga como de la duración de la rampa seleccionada, observándose que una rampa más extensa puede redistribuir las pérdidas en un intervalo temporal mayor e incluso aumentar la energía acumulada en ciertos escenarios. Por ello, la selección de la rampa debe entenderse como un compromiso entre la reducción de severidad instantánea y el aumento del tiempo de aceleración.

Asimismo, el análisis en condiciones con carga y sin carga permitió evidenciar que la condición operativa influye de manera significativa en la respuesta del motor durante el arranque. Bajo carga, la exigencia transitoria se vuelve más severa en términos de corriente, torque y energía acumulada, mientras que en vacío el comportamiento resulta menos exigente y los tiempos de aceleración tienden a reducirse. Esta comparación entrega una visión más representativa del fenómeno y permite interpretar de mejor forma el efecto de la estrategia de arranque sobre el desempeño dinámico del motor.

El análisis comparativo desarrollado permitió identificar que los motores de la familia APH presentan una mayor exigencia transitoria asociada a sus procesos de arranque, destacando particularmente el motor APH 201 por su frecuencia de operación y el motor APH 101 por su historial de falla. Estos antecedentes refuerzan la conveniencia de priorizar estudios o intervenciones en aquellos equipos cuya combinación de antigüedad, criticidad operacional y solicitación transitoria los vuelve más sensibles frente a las condiciones de arranque.

Desde la perspectiva económica, la implementación de partidores suaves puede entenderse como una medida de mejora operacional y de mitigación de riesgo, más que como una alternativa orientada al ahorro energético en régimen permanente, ya que el beneficio principal identificado en este trabajo se relaciona con el control de la severidad del arranque y no con una reducción significativa del consumo en estado estable. Bajo esta lógica, el costo de adquisición e instalación debe evaluarse frente al valor de una mayor flexibilidad operativa, una menor exigencia instantánea sobre la red y el motor, y la eventual reducción de riesgos asociados a arranques severos, especialmente en equipos críticos para la continuidad operacional de la central.

Asimismo, la evaluación de alternativas comerciales disponibles permitió comparar distintas soluciones tecnológicas considerando capacidad de arranque, compatibilidad eléctrica, servicios incluidos, tiempos de entrega y respaldo técnico. La alternativa seleccionada cumple adecuadamente con los requerimientos operativos del sistema y ofrece soporte

especializado, elemento clave en aplicaciones de generación donde la confiabilidad es prioritaria.

En términos generales, el estudio muestra que el método de arranque constituye una variable relevante en la operación de motores de media tensión, ya que modifica de manera significativa la respuesta transitoria del sistema. En particular, el uso de partidor suave permite reducir corrientes máximas, moderar el comportamiento del torque y controlar la severidad instantánea del arranque, aunque sus efectos sobre la energía total del transitorio dependen de la rampa seleccionada y de la condición de carga.

Como proyección futura, se recomienda complementar este análisis con un modelo térmico del motor que incorpore constantes de tiempo térmicas, límites admisibles del fabricante, ciclos de trabajo y frecuencia real de arranques, de modo de evaluar si la energía disipada durante uno o varios arranques dentro de un período determinado puede traducirse efectivamente en sobretemperaturas relevantes para el aislamiento. Asimismo, sería conveniente desarrollar mediciones en terreno y análisis más detallados de solicitaciones electromecánicas, con el fin de contrastar la respuesta observada en simulación y fortalecer la interpretación del impacto del método de arranque sobre la condición del activo.

En conclusión, la implementación progresiva de partidores suaves en motores de media tensión del sistema de bombeo se presenta como una alternativa técnicamente conveniente y económicamente razonable para reducir la severidad instantánea del arranque y mejorar el control del transitorio, particularmente en equipos críticos y de larga vida en servicio. No obstante, la cuantificación directa de su impacto sobre la temperatura del motor, el envejecimiento del aislamiento y el desgaste mecánico acumulado requiere estudios complementarios que exceden el alcance de este trabajo.

Apéndice A

Códigos de las Figuras y Tablas

A.1. Operación de Servicio Octubre 2023 y 2025

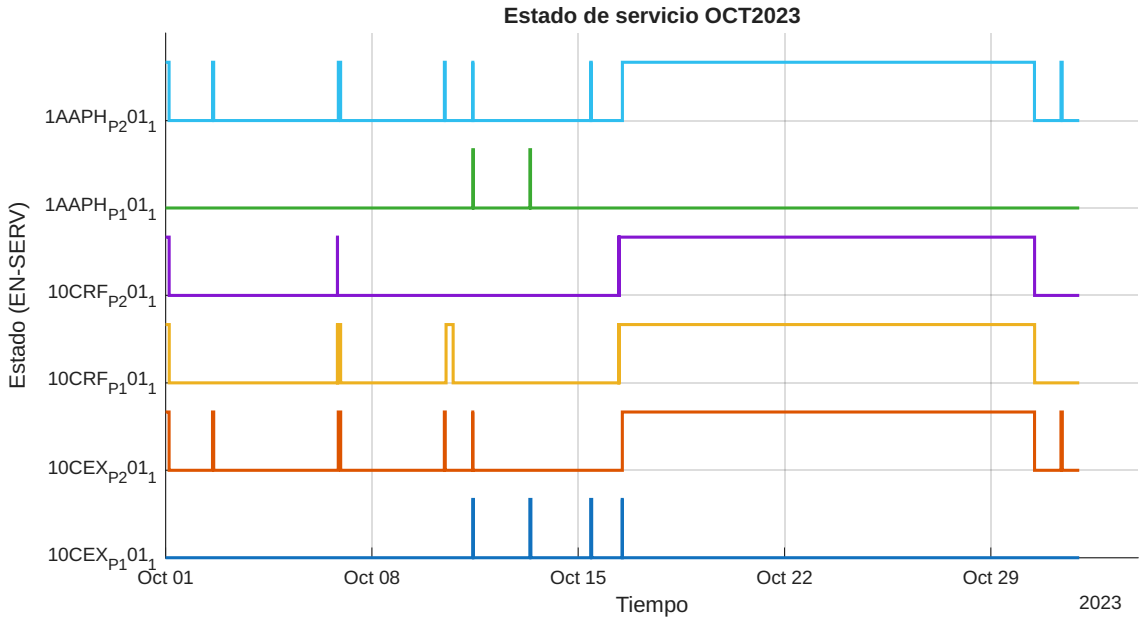


Figura A.1: Estado de servicio Octubre 2023

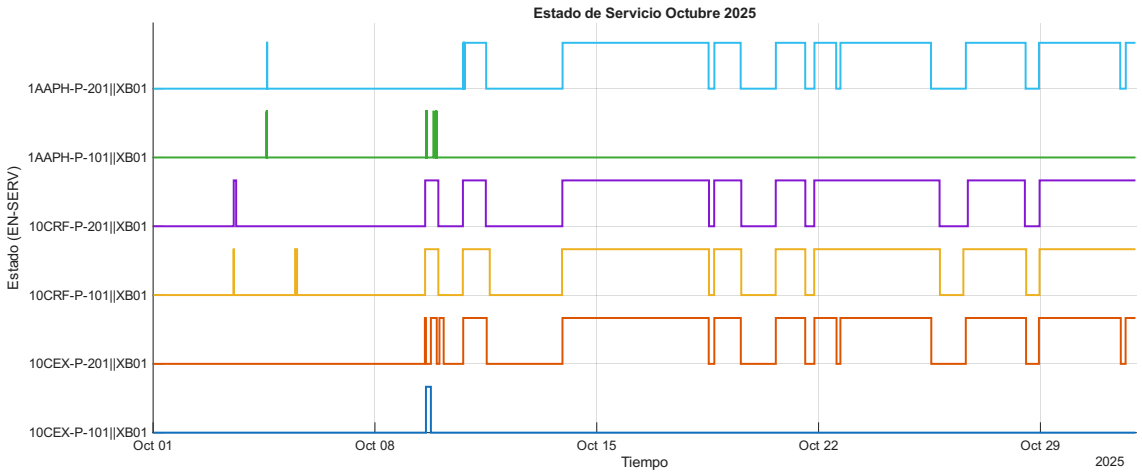


Figura A.2: Estado de servicio Octubre 2025

A.2. Costos de Operación actual

A.2.1. Reparación Motor APH101

Tabla A.1: Detalle de Costo de Reparación del Motor en Empresa Maisver

Descripción	Cant.	Unitario (CLP)	Total (CLP)
Reparación de Motor Eléctrico MT 1900kW 3000RPM 2Polos	1	107,746,00	107,746,00
		Subtotal	**107.746.00**
		Total Reparación en Maisver	**107.746.00**

A.3. Costos directos e indirectos para la implementación de partidores suaves

A.3.1. Empresa Emotron

Tabla A.2: Detalle de cotización comercial Emotron para partidores suaves de media tensión

Oferta de empresa Emotron	Cant.	Unitario (USD)	Total (USD)
Costos de Inversión Inicial			
Partidor Suave 550HP (60A)	1	USD 65.860,00	USD 65.860,00
Partidor Suave 900HP (80A)	1	USD 66.300,00	USD 66.300,00
Partidor Suave 2600HP (200A)	1	USD 69.800,00	USD 69.800,00
Supervisión de Montaje	1	USD 2.500,00	USD 2.500,00
Comisionamiento y Puesta en Marcha	1	USD 2.500,00	USD 2.500,00
		Subtotal CAPEX	***USD 206.960,00***
Costos de Operación y Mantenimiento			
Módulo de Control Soft Starter	1	USD 8.650,00	USD 8.650,00
Voltage Transformer EPT TX	1	USD 4.945,00	USD 4.945,00
Juego de Fusibles MT 7,2KV	1	USD 2.890,00	USD 2.890,00
		Subtotal OPEX	***USD 16.485,00***
Inversión Total Neta Emotron			**USD 223.445,00**
Impuestos (19 %)			**USD 42.454,550**
Inversión Total (USD)			**USD 265.899,55**
Inversión Total (CLP)			**$ 228.673.613**

A.3.2. Empresa Rhona

Tabla A.3: Detalle de cotización comercial Rhona para partidores suaves de media tensión

Oferta de empresa Rhona	**Cant.**	**Unitario (USD)**	**Total (USD)**
Costos de Inversión Inicial			
Partidor Suave 1900 kW (L-Series)	1	USD 40.750,000	USD 40.750,000
Partidor Suave 670 kW (L-Series)	1	USD 39.295,000	USD 39.295,000
Partidor Suave 400 kW (L-Series)	1	USD 39.295,000	USD 39.295,000
Movilización Especialista Exterior	1	USD 8.800,00	USD 8.800,000
Asistencia Puesta en Marcha (PEM)	1	USD 7.000,00	USD 7.000,000
Pruebas de Aceptación en Sitio (SAT)	1	USD 6.500,00	USD 6.500,000
Capacitación Técnica de Operación	1	USD 3.500,00	USD 3.500,00
		Subtotal CAPEX	***USD 145.140,00***
Costos de Operación y Mantenimiento			
Valor HH adicional a la jornada de trabajo vendedor especialista (Lu-Sab)	1	USD 307,00	USD 308,00
Valor HH adicional a la jornada de trabajo vendedor especialista (Dom o Festivos)	1	USD 461,00	USD 462,00
		Subtotal OPEX	***USD 770,00***
Inversión Total Neta Rhona			**USD 145.910,00**
Impuestos (19 %)			**USD 27.722,900**
Inversión Total (USD)			**USD 173.632,90**
Inversión Total (CLP)			**$ 149.324.294**

A.3.3. Empresa Flopower

Tabla A.4: Detalle de cotización comercial Flopower para partidores suaves de media tensión

Oferta de empresa Flopower	**Cant.**	**Unitario (USD)**	**Total (USD)**
Costos de Inversión Inicial			
MVC4-66400-E-SWG 1900kW 50Hz 6.6Kv 400A SWG Type Soft Starter	1	USD 67.397,00	USD 67.397,00
MVC4-66200-E-SWG 670kW 50Hz 6.6Kv 200A SWG Type Soft Starter	1	USD 61.556,00	USD 61.556,00
MVC4-66100-E-SWG 400kW 50Hz 6.6Kv 100A SWG Type Soft Starter	1	USD 57.967,00	USD 57.967,00
		Subtotal CAPEX	***USD 206.960,00***
Costos de Operación y Mantenimiento			
Mantenimiento y Repuestos	-	N/A	N/A
		Subtotal OPEX	***USD 0,00***
Inversión Total Neta Flopower			**USD 186.920,00**
Impuestos (19 %)			**USD 35.514,800**
Inversión Total (USD)			**USD 222.434,80**
Inversión Total (CLP)			**$ 191.293.928**

A.3.4. Empresa Vignolia

Tabla A.5: Detalle de cotización comercial Vignolia para partidores suaves de media tensión

Oferta de empresa Vignolia	**Cant.**	**Unitario (USD)**	**Total (USD)**
Costos de Inversión Inicial			
SSW7000G4A0070V069IP54STSI CE 400 KW/5.5 KV/40AMP	1	USD 61.204,00	USD 61.204,00
SSW7000G4A0250V069IP54STSI CE 1900 KW/6.6 KV/187AMP	1	USD 70.150,60	USD 70.150,60
SSW7000G4A0250V069IP54STSI CE 670 KW/6.6 KV/73.9 AMP.	1	USD 62.384,40	USD 62.384,40
Puesta en Marcha	6	USD 3.900,00	USD 23.400,00
		Subtotal CAPEX	***USD 217.139,00***
Costos de Operación y Mantenimiento			
Mantenimiento y Repuestos	-	N/A	N/A
		Subtotal OPEX	***USD 0,00***
Inversión Total Neta Vignolia			**USD 217.139,00**
Impuestos			**USD 41.256,410**
Inversión Total (USD)			**USD 258.395,41**
Inversión Total (CLP)			**$ 222.220.053**

A.3.5. Empresa Primser

Tabla A.6: Detalle de cotización comercial Primser para partidores suaves de media tensión

Oferta de empresa Primser	**Cant.**	**Unitario (USD)**	**Total (USD)**
Costos de Inversión Inicial			
Modelo SSW7000G4A0070 V069IP54STSICE ; 400 KW / 6.6 kV / 40 Amp	1	USD 44.165,000	USD 44.165,000
Modelo SSW7000G4A0250 V069IP54STSICE 1900 KW / 6.6 kV / 187 Amp	1	USD 50.620,000	USD 50.620,000
Modelo SSW7000G4A0250 V069IP54STSICE 670 KW / 6.6 kV / 73.9 AmP	1	USD 50.620,000	USD 50.620,000
		Subtotal CAPEX	***USD 145.405,000***
Costos de Operación y Mantenimiento			
Mantenimiento y Repuestos	-	N/A	N/A
		Subtotal OPEX	***USD 0,00***
Inversión Total Neta Primser			**USD 145.405,000**
Impuestos			**USD 27.626,950**
Inversión Total (USD)			**USD 173.031,95**
Inversión Total (CLP)			**$ 148.807.477**

A.3.6. Empresa INSAA Ingeniería

Tabla A.7: Detalle de cotización comercial INSAA Ingeniería para partidores suaves de media tensión

Oferta de empresa Insaa	**Cant.**	**Unitario (USD)**	**Total (USD)**
Costos de Inversión Inicial			
Suministro e Instalación PS 6,6 kV - Motor 400kW	1	$ 59.497.300	$ 59.497.300
Suministro e Instalación PS 6,6 kV - Motor 670kW	1	$ 60.467.700	$ 60.467.700
Suministro e Instalación PS 6,6 kV - Motor 1.900kW	1	$ 66.854.800	$ 66.854.800
Suministro e instalación cable 3x4/0 AWG, 8kV	10	$ 894.200	$ 8.942.000
		Subtotal CAPEX	***$195.761.800***
Costos de Operación y Mantenimiento			
Mantenimiento y Repuestos	-	N/A	N/A
		Subtotal OPEX	***USD 0,00***
Inversión Total Neta Insaa			***$195.761.800***
Impuestos			**$ 37.194.742**
Inversión Total (CLP)			**$ 232.956.542**

A.4. Espacio físico disponible para la instalación de nuevos equipos



Figura A.3: Espacio disponible para la ubicación de los nuevos equipos



Figura A.4: Espacio disponible para la ubicación de los nuevos equipos

A.5. Diagrama Unilineal Central Nehuenco

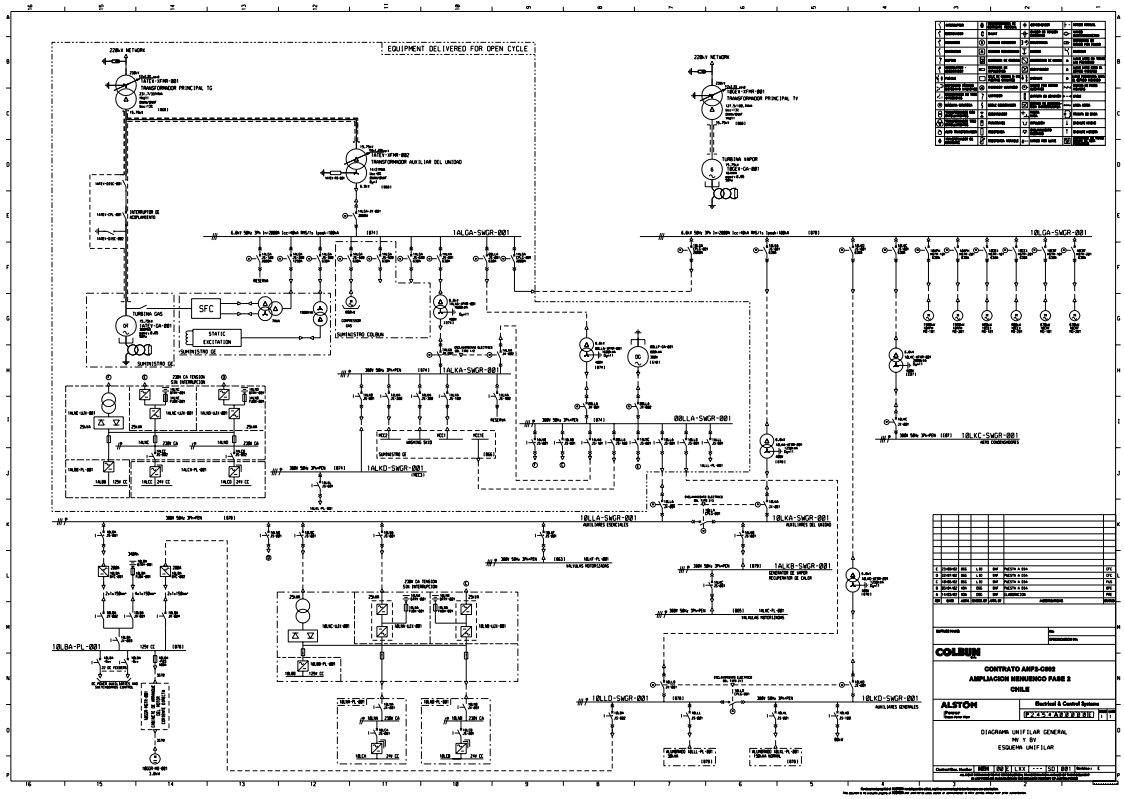


Figura A.5: Unilineal central Nehuenco

A.6. Diagrama Unilineal de Motores 6,6kV, Central Nehuenco

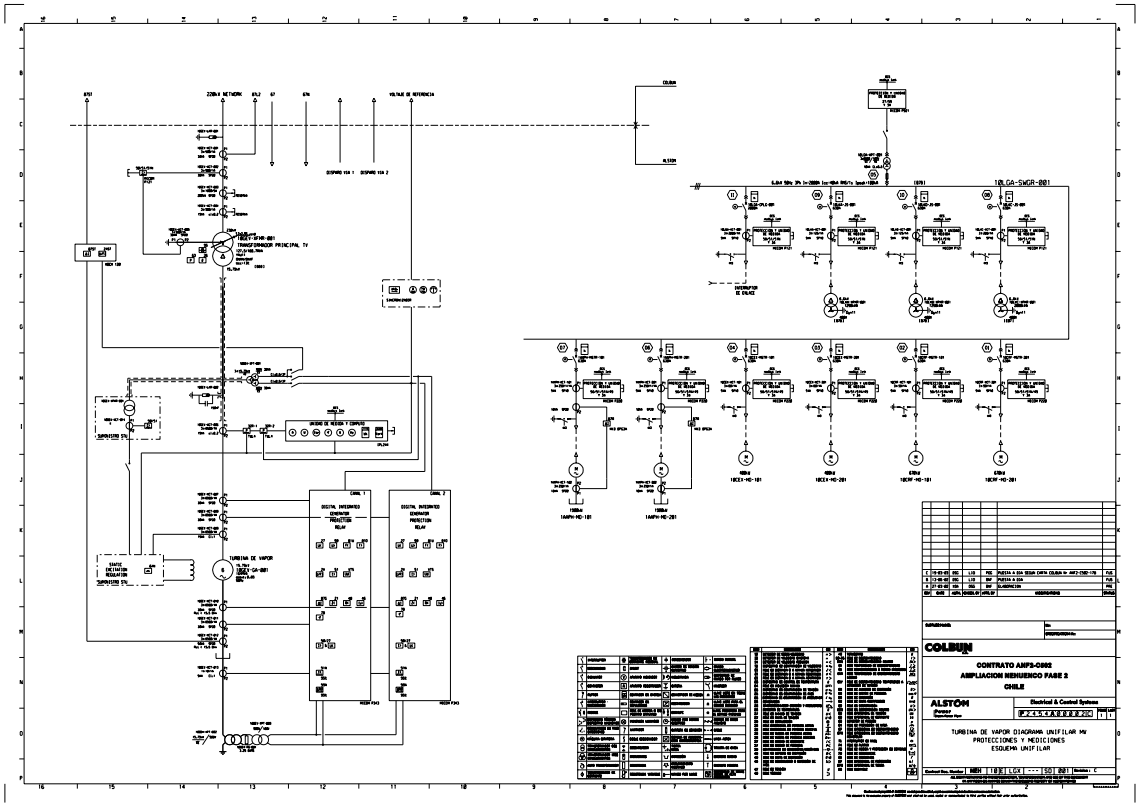


Figura A.6: Unilineal motores de 6,6kV, central Nehuenco

Bibliografía

[1] ABB, *Softstarter Handbook*. ABB Low Voltage Products, 2010, [En línea]. Disponible en: `https://library.e.abb.com/public/6b4e1a3530814df0c12579bb0030e58b/1SFC132060M0201.pdf`.

[2] F. Acosta, "Simulación y Ensayos del Partidor Suave Electrónico Digital V5 Accionando un Motor con Diferentes Cargas," Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2017.

[3] J. B. D. Asencio y G. A. J. Santiago, "Implementación de partidores suaves para el sistema de drenaje de Central Pehuenche," Universidad Técnica Federico Santa María, 2006.

[4] J. F. Mora, *Máquinas Eléctricas*, 5.ª ed. McGraw-Hill, 2003.

[5] J. Müller, *Conversión Electromecánica de la Energía*. Valparaíso, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María, 2001.

[6] S. J. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, 5.ª ed. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2012.

[7] J. Müller, *Apuntes de Conversión Electromecánica de Energía, Capítulo 2: La Máquina Asincrónica en Estado Estacionario*, 2010.

[8] K. Zhao, L. Cheng, C. Zhang, D. Nie y W. Cai, "Induction Motors Lifetime Expectancy Analysis Subject to Regular Voltage Fluctuations," en *2017 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*, Saskatoon, SK, Canada, oct. de 2017, págs. 1-6. DOI: `10.1109/EPEC.2017.8286230`.

[9] "Induction Motors Lifetime Expectancy Analysis Subject to Regular Voltage Fluctuations," 2017.

[10] A. A. Abdelaziz y A. M. Massoud, "Loss of Life in Induction Machines Operating with Unbalanced Supplies," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, n.º 2, págs. 312-322, jun. de 2006.

[11] H. E. A. Martínez, "Estudio de la Implementación de Arrancadores Suaves de Estado Sólido en Motores Asíncronos Rotor Jaula de Ardilla de Tres Fases, para la Industria Nicaragüense," Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua, 2019.