



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**PROPUESTA DE MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE CONTROL Y
FUERZA ORIENTADA A MEJORAR LA DISPONIBILIDAD EN HORNOS DE ÁNODOS –
FUNDICIÓN POTRERILLOS, DIVISIÓN SALVADOR**

Trabajo de Titulación para optar al Título de Ingeniero en
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.

Alumno:

Cristian David Álvarez Fernández

Profesor Guía:

Mg. Ing. Cristian Cuadra Urbina



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: PROPUESTA DE MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE CONTROL Y FUERZA ORIENTADA A MEJORAR LA DISPONIBILIDAD EN HORNOS DE ÁNODOS - FUNDICIÓN POTRERILLOS, DIVISIÓN SALVADOR

Nombre del candidato(a): Cristian David Álvarez Fernández

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento Industrial

Campus: Sede José Miguel Carrera Departamento: Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Cristian Cuadra Urbina, 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**):

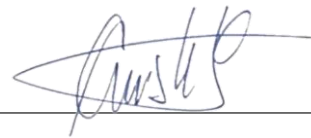
☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 08-06-2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 08-06-2026

Firma: 

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia, especialmente a mis padres, a mi señora y a mi hija, por su apoyo, paciencia y compañía durante este proceso.

A mi profesor guía, Mg. Ing. Cristian Cuadra Urbina, y a los profesores que aportaron a mi formación académica, por entregar herramientas que permitieron desarrollar este trabajo con una mirada técnica y aplicada.

A Juan Muñoz y Mauricio Romero, por su valioso apoyo técnico y económico respectivamente, fundamentales para la correcta fundamentación de esta propuesta.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra forma, aportaron a este proceso. Cada enseñanza, conversación y apoyo recibido fue parte importante para llegar al cierre de esta etapa.

DEDICATORIA

A mi esposa Tracy, compañera de vida y sostén incondicional, gracias por tu paciencia, por tu amor y por creer en mí incluso en los días de mayor agotamiento. Tu presencia ha sido fuerza y equilibrio en cada etapa de este camino.

A mi hija Fernanda, luz que da sentido a cada esfuerzo, inspiración constante y razón profunda de cada meta alcanzada.

A mis padres y hermanos, por el ejemplo, la formación y el apoyo silencioso que han acompañado cada uno de mis pasos.

Y a la Fuerza que guía y sostiene la vida, presente en cada decisión, en cada desafío y en cada aprendizaje, recordándome que todo proceso tiene un propósito mayor.

*“Nada es casual cuando se avanza con propósito; cada
esfuerzo es parte de una armonía más grande.”*

RESUMEN

La Fundición Potrerillos enfrenta diferentes desafíos, uno de ellos es la continuidad operacional asociado a la obsolescencia técnica del sistema de giro de los Hornos de Ánodos, basado en tecnología de corriente continua (DC) implementada desde las décadas de 1980 y 2000, que presenta limitaciones de diagnóstico, trazabilidad y disponibilidad de repuestos frente a las exigencias actuales del proceso Horno Refino Fuego (HRF). Este trabajo propone lineamientos técnicos para su modernización hacia una arquitectura de corriente alterna (AC) con variador de frecuencia (VDF) e integración mediante PLC/HMI (Controlador Lógico Programable/Interfaz Hombre-Máquina), orientada a mejorar la disponibilidad operacional y la mantenibilidad.

Más allá del recambio de hardware, la contribución principal es aumentar la información sobre variables del accionamiento, incorporando visualización en HMI de la corriente del motor y su tendencia, de modo que la operación y el mantenimiento dispongan de evidencia objetiva para anticipar incrementos de carga asociados a acreciones internas y acotar tiempos de diagnóstico.

El diagnóstico, estructurado con DMAIC y herramientas de análisis de causa raíz (Ishikawa y 5 Porqués), evidenció una afectación relevante en la disponibilidad, especialmente en el HA1, y cuantificó un costo anual por indisponibilidad atribuible a fallas eléctricas/control (CIF) del orden de 0,316 MUSD/año. La evaluación económica mediante ACCV/LCC mostró que la Alternativa 2 (modernización reforzada) es la más conveniente, al reducir la ocurrencia de fallas y, particularmente, disminuir el MTTR mediante mejor diagnóstico, registro de eventos y análisis basado en datos

ÍNDICE

RESUMEN	V
ÍNDICE	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XII
INDICE DE GRAFICOS	XIII
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA	XIV
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
CAPÍTULO 1: CONTEXTO Y METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ	3
1.1 ANTECEDENTES GENERALES	5
1.2 CONTEXTO TÉCNICO-OPERACIONAL DEL HORNO DE ÁNODOS.	6
1.2.1 Rol del Horno de Ánodos en el flujo metalúrgico.	6
1.2.2 Proceso Horno Refino Fuego y parámetros críticos del Horno de Ánodos.	8
1.2.3 Sistema motriz eléctrico y control actuales.	9
1.2.4 Limitaciones observadas en disponibilidad y confiabilidad	11
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.4 MARCO TEÓRICO APLICADO	13
1.4.1 Confiabilidad operacional	13
1.4.2 Confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad	14
1.4.3 Indicadores MTBF, MTTR y disponibilidad operacional	14
1.4.4 Análisis de causa raíz: Ishikawa y 5 Porqués	15
1.4.5 Análisis de Costos del Ciclo de Vida, ACCV/LCC	16
1.4.6 Obsolescencia técnica y modernización de activos industriales	17
1.5 METODOLOGÍA DE ESTUDIO	18
1.5.1 Enfoque metodológico general basado en DMAIC	18
1.5.2 Fuentes de información utilizadas	19
1.5.3 Tratamiento y clasificación de datos	20
1.5.4 Criterios de análisis y priorización	20
1.6 LÍNEA BASE INICIAL DEL PROBLEMA	21

1.7	ALCANCES, LIMITACIONES Y SUPUESTOS DEL ESTUDIO	22
1.8	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	23
CAPÍTULO 2: DIAGNÓSTICO TÉCNICO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE CONTROL Y FUERZA		25
2.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA ACTUAL	27
2.1.1	Configuración general del sistema motriz	27
2.1.2	Sistema de control y automatización	29
2.1.3	Transmisión mecánica y acoplamiento al horno	29
2.1.4	Sistema de alimentación eléctrica y protecciones	30
2.1.5	Sistema de respaldo de energía	31
2.1.6	Estado actual de operación	31
2.2	ANÁLISIS FUNCIONAL DEL SISTEMA ACTUAL	32
2.2.1	Modos de operación	32
2.2.2	Secuencia funcional de operación	33
2.2.3	Comportamiento operativo durante el proceso metalúrgico	34
2.2.4	Limitaciones funcionales	34
2.3	EVALUACIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA ACTUAL.	35
2.4	ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL	36
2.4.1	Base de datos, severidad y métricas utilizadas	37
2.4.2	Indicadores empíricos por equipo	38
2.4.3	Modelado probabilístico de confiabilidad y mantenibilidad	38
2.4.4	Interpretación técnica de resultados	41
2.4.5	Patrones y categorías de falla del horno y foco abordable del sistema motriz	42
2.5	INTEGRACIÓN DEL ACR Y DIAGNÓSTICO TÉCNICO	43
2.5.1	Enfoque metodológico del análisis de causa raíz.	43
2.5.2	Diagrama de Ishikawa aplicado a la indisponibilidad del horno	44
2.5.3	Método de los 5 Porqués aplicado a la rama foco.	46
2.5.4	Jerarquización de causas técnicas dominantes.	47
2.6	COSTO DE INDISPONIBILIDAD POR FALLOS (CIF) DE HORNOS Y SU SISTEMA MOTRIZ	48
2.6.1	Estimación del costo horario de no producción (CP) y simplificación adoptada.	49
2.6.2	CIF por totalidad de fallas y por fallas eléctricas/control (sistema de giro)	50
2.6.3	Sensibilidad disponibilidad–costo	51

2.7	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	53
-----	---------------------------	----

CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA MOTRIZ
55

3.1	PROPUESTA TÉCNICA DE MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA MOTRIZ	57
3.1.1	Propósito y alcance de la modernización	59
3.1.2	Requerimientos funcionales y criterios de selección.	59
3.1.3	Dimensionamiento preliminar y definición de componentes de la arquitectura propuesta.	61
3.2	COMPARACIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA ACTUAL Y DEL SISTEMA PROPUESTO	65
3.2.1	Sistema actual (DC + SIMOREG + LOGO!): limitaciones relevantes	65
3.2.2	Sistema propuesto (AC + VDF + PLC/HMI): capacidades incorporadas	66
3.2.3	Matriz comparativa y brechas principales	67
3.2.4	Síntesis e implicancias para confiabilidad, diagnóstico y ACCV	67
3.3	DISEÑO ELÉCTRICO Y DE CONTROL DE LA PROPUESTA	68
3.3.1	Diseño del circuito de potencia y protecciones	68
3.3.2	Circuito de control, permisos e interlocks	68
3.3.3	Filosofía de operación, HMI, alarmas y registro	69
3.3.4	Comunicaciones e integración con infraestructura existente	69
3.3.5	Consideraciones de instalación: EMC y protección dv/dt (40 m / 70 m)	70
3.4	INDICADORES DE CONFIABILIDAD DEL SUBSISTEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL: LÍNEA BASE Y ESCENARIO DE MODERNIZACIÓN	70
3.4.1	Línea base del desempeño del subsistema eléctrico y de control	71
3.4.2	Escenario de modernización: efecto esperado sobre MTBF, MTTR y disponibilidad	71
3.5	EVALUACIÓN ECONÓMICA MEDIANTE ANÁLISIS DE COSTOS DEL CICLO DE VIDA (ACCV)	73
3.5.1	Alcance del ACCV	73
3.5.2	Supuestos económicos de evaluación	74
3.5.3	Alternativas evaluadas	75
3.5.4	Modelo de costos (formulación)	76
3.5.5	Estimación de CAPEX, OPEX y CIF eléctrico/control	76
3.5.6	Resultados comparativos (VPN / ACCV)	79

3.5.7	Sensibilidad y escenarios	80
3.6	PLAN DE IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN MARCHA DE LA MODERNIZACIÓN	81
3.6.1	Estrategia de ejecución por etapas	81
3.6.2	Plan de pruebas de aceptación y criterios mínimos	82
3.6.3	Estandarización y preparación para implementación en HA2	82
3.6.4	Plan de control y sostenimiento de beneficios (fase “Control” de DMAIC)	83
3.7	GESTIÓN DE RIESGOS DE IMPLEMENTACIÓN Y CRITERIOS DE REPLICABILIDAD	84
3.7.1	Gestión de riesgos de implementación (síntesis)	85
3.7.2	Criterios para replicación a HA2	85
CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES		87
CONCLUSIÓN		87
RECOMENDACIONES		88
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.		90
ANEXOS.		92
ANEXO A — DIMENSIONAMIENTO PRELIMINAR DE PAR Y POTENCIA.		92
A.1	Propósito	92
A.2	Supuestos y datos de entrada	92
A.3	Desarrollo	92
A.4	Cálculo de par base en el rango de operación	93
A.5	Resultados por escenarios	94
A.6	Interpretación para selección preliminar (motor + VDF)	94
ANEXO B — INERCIA EQUIVALENTE Y DINÁMICA.		96
B.1	Propósito	96
B.2	Supuestos y datos de entrada	96
B.3	Desarrollo	97
B.4	Resultados (sensibilidad por velocidad)	97
B.5	Conclusión y recomendación de rampas (puesta en marcha)	98
B.6	Verificación en pruebas en terreno	98
ANEXO C — SELECCIÓN DE VDF.		99
C.1	Propósito	99
C.2	Datos de entrada (base de diseño)	99

C.3 Criterios de selección del VDF	99
C.4 Dimensionamiento preliminar	100
C.5 Parámetros iniciales recomendados (puesta en marcha)	101
C.6 Relación con el documento	102
ANEXO D — CABLEADO, dv/dt Y FILTRO DE SALIDA	103
D.1 Propósito	103
D.2 Datos de entrada y condiciones del proyecto	103
D.3 Fundamentación técnica	103
D.4 Criterios mínimos de instalación del cable VDF–motor (mínimos obligatorios)	104
D.5 Verificación en puesta en marcha	105
D.6 Conclusión	105
ANEXO E — SEÑALES, PERMISOS/INTERLOCKS Y MATRIZ DE ALARMAS/EVENTOS (VDF-PLC-HMI)	106
E.1 Propósito	106
E.2 Alcance y contenido	106
E.3 Convención de numeración	106
E.4 Tablas de referencia	106
E.5 Cómo se usa este anexo	110
ANEXO F — MATRIZ DE RIESGO Y CONTROLES DEL SUBSISTEMA VDF-PLC-HMI	111
F.1 Propósito	111
F.2 Alcance y contenido	111
F.3 Relación con el documento	111
F.4 Matriz de riesgos y controles	111
F.6 Criterios mínimos de control	113
ANEXO G — CÁLCULO DEL COSTO HORARIO DE NO PRODUCCIÓN (CP) Y DEL COSTO DE INDISPONIBILIDAD POR FALLOS (CIF)	114
G.1 Propósito	114
G.2 Alcance y relación con el documento	114
G.3 Supuestos y base operacional de normalización	114
G.4 Estimación de CP_h (costo horario de no producción normalización)	115
G.5 Verificación de marginalidad de costos directos de reparación	116
G.6 Formulación simplificada del CIF	117
G.7 Cálculo del CIF : global y eléctrico/control	118
ANEXO H — SISTEMA ACTUAL (AS-IS): PLANOS Y LÓGICA VIGENTE	119

H.1 Propósito	119
H.2 Alcance y contenido	119
H.3 Convención de numeración	119
H.4 Planos Eléctricos y Lógica de control actuales.	119
ANEXO I — LÍNEA BASE DE FALLAS 2024	126
I.1 Propósito	126
I.2 Alcance y contenido	126
I.3 Convención de numeración	126
I.4 Relación con el documento	126
I.5 Registro consolidado 2024	126
ANEXO J — ESCENARIOS DE CIF Y EVALUACIÓN ECONÓMICA PARA REPLICABILIDAD EN HA2	128
J.1 Propósito	128
J.2 Alcance y relación con el documento	128
J.3 Convención de numeración	128
J.4 Tablas resumen	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.	Vista Panorámica de Fundición Potrerillos.
Figura 1-2.	Diagrama de flujo general del proceso de Fundición Potrerillos.
Figura 1-3.	Traslado de cobre líquido en Puente grúa.
Figura 1-4.	Flujo simplificado del proceso desde CT5 hasta la rueda de moldeo en la Fundición Potrerillos.
Figura 1-5.	Proceso Horno Refino Fuego (HRF) de Hornos de Ánodos.
Figura 1-6.	Motor principal de corriente continua (40 HP) encargado del giro del HA
Figura 1-7.	Sistema de transmisión final compuesto por piñón de ataque y corona dentada del HA.
Figura 2-1.	Diagrama de potencia del sistema motriz DC del horno de ánodos.
Figura 2-2.	Autómata Siemens LOGO! 230RC instalado en gabinete de control de horno.
Figura 2-3	Fotografía de los dos reductores del sistema de giro del horno de ánodos.

Figura 2-4.	Variador de velocidad Siemens SIMOREG del sistema motriz del horno de ánodos.
Figura 2-5.	Secuencia funcional simplificada de operación del accionamiento DC basada en mando por pulsadores
Figura 2-6	Diagrama de Ishikawa aplicado al horno de ánodos.
Figura 3-1.	Arquitectura general propuesta del sistema motriz (VDF vectorial, PLC y HMI) e integración con transmisión existente.
Figura 3-2.	Tren de transmisión existente (motor-R1-R2-corona) y punto de intervención eléctrica.
Figura 3-3.	Esquema funcional del accionamiento actual en corriente continua para el giro del horno

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.	Línea base inicial del problema.
Tabla 2-1.	Evaluación técnica de componentes principales del sistema eléctrico de control y fuerza del HRF.
Tabla 2-2:	Resumen Severidad de Fallas de los Hornos de Ánodos (2024)
Tabla 2-3.	Indicadores de MTBF, MTTR y Disponibilidad (todas las fallas, 2024).
Tabla 2-4.	Indicadores restringidos a fallas eléctricas/control (2024).
Tabla 2-5.	Familias de falla del sistema de giro (2024).
Tabla 2-6.	Aplicación de los 5 Porqués al sistema motriz del horno de ánodos.
Tabla 2-7.	Estimación del costo anual de no producción por el total de fallas.
Tabla 2-8.	Estimación del costo anual de no producción por fallas eléctricas/control
Tabla 2-9.	Conversión de disponibilidad e indisponibilidad anual a horas y costo de no producción.
Tabla 3-1.	Requerimientos del sistema de giro y criterios asociados a diseño y verificación
Tabla 3-2.	Criterios mínimos de selección por componente para el sistema propuesto.
Tabla 3-3.	Datos de partida y supuestos para el dimensionamiento preliminar del accionamiento propuesto (HA1 como caso base).

Tabla 3-4.	Comparación técnica entre sistema actual y sistema propuesto (criterios relevantes para disponibilidad).
Tabla 3-5.	Alcance del ACCV: costos incluidos/excluidos y justificación.
Tabla 3-6.	Supuestos económicos del ACCV (USD 2026).
Tabla 3-7.	CAPEX por alternativa (USD 2026, por horno HA1).
Tabla 3-8.	OPEX anual por alternativa (USD/año, base 2026) – 1 horno (HA1).
Tabla 3-9.	CIF eléctrico/control (línea base y escenarios de reducción) – USD/año, base 2026 – 1 horno (HA1).
Tabla 3-10.	Resultados ACCV: costo total actualizado (VPN) por escenario de reducción (HA1).

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2-1.	Curva de confiabilidad $R(t)$ del horno de ánodos HA1 para el período de análisis 2024.
Gráfico 2-2	Curva de mantenibilidad $M(t)$ del sistema motriz del horno de ánodos HA1 para el período de análisis 2024.
Gráfico 2-3.	Sensibilidad del CIF anual frente a indisponibilidad operacional.

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

AC: Corriente alterna.

ACCV: Análisis de Costos del Ciclo de Vida.

As: Disponibilidad operacional.

CAPEX: Inversión inicial.

CIF: Costo de Indisponibilidad por Fallos.

CIF eléctrico/control: Porción del CIF atribuible a fallas del subsistema eléctrico y de control del accionamiento.

COM: Señales/variables por comunicación industrial.

CP: Costo de no producción.

CPS: Convertidor Peirce-Smith

CT / CT5: Convertidor Teniente N° 5

CSHA: Costos de seguridad, salud y ambiente dentro del alcance del modelo.

DC: Corriente continua.

DI / DO: Entradas digitales / salidas digitales (señales discretas).

dv/dt: Tasa de variación de tensión en salida PWM de VDF.

EMC: Compatibilidad electromagnética (mitigación de interferencias).

EtherNet/IP: Protocolo de comunicación industrial.

FF: Frecuencia anual de fallas (fallos/año).

FFe: Frecuencia anual de fallas eléctricas/control (fallos/año).

Fpp: Factor de paralelo parcial (fracción de pérdida neta de capacidad cuando un horno queda indisponible).

HA1 / HA2: Horno de Ánodos 1 / Horno de Ánodos 2.

HFS: Horas fuera de servicio (horas/año).

HMI: Interfaz Hombre-Máquina.

HRF: Ciclo/proceso operativo del horno utilizado como marco de operación.

LOGO!: PLC Siemens LOGO! (control actual).

MTBF: Tiempo medio entre fallas.

MTTR: Tiempo medio de reparación/recuperación.

OPEX: Costos recurrentes de operación y mantenimiento.
 PLC: Controlador Lógico Programable.
 PWM: Modulación por ancho de pulso (conmutación típica en VDF).
 QF: Interruptor/protección principal.
 RCA: Análisis de Causa Raíz.
 SAT: Pruebas de aceptación en sitio.
 SIMOREG: Convertidor Siemens SIMOREG.
 STO: función de seguridad en VDF.
 TPFS: Tiempo Promedio Fuera de Servicio por evento (h/fallo).
 USD: Dólar estadounidense (moneda).
 Vac: Volts de corriente alterna (tensión nominal de alimentación).
 VDF: Variador de Frecuencia.
 VPN: Valor Presente Neto.
 VR: Valor residual

B. SIMBOLOGÍA

As: Disponibilidad operacional del subsistema (%)
 1–As: Indisponibilidad operacional (%)
 H o H_{año}: Base anual de horas operacionales consideradas (h/año)
 HFS: Horas fuera de servicio en el período (h/año)
 FF: Frecuencia anual de fallas (fallos/año)
 TPFS: Tiempo promedio fuera de servicio por evento (h/fallo)
 MTBF: Tiempo medio entre fallas (h)
 MTTR: Tiempo medio de reparación/restauración (h)
 CP_d: Costo diario de no producción (USD/día)
 CP o CP_h: Costo horario de no producción (USD/h)
 CIF: Costo de indisponibilidad por fallos (USD/año o USD en el horizonte evaluado)
 Q_d: Producción diaria de cobre fino (ton/día)
 P_{ton}: Precio de referencia (USD/ton)
 C_{ton}: Costo de producción unitario (USD/ton)
 U_d: Utilidad diaria (USD/día)

F_{pp} : Factor de paralelo parcial (–)

CSHA: Costos atribuibles a seguridad, higiene y ambiente (USD)

C_{MO} : Costo de mano de obra (USD/h)

C_{rep} : Costo de repuestos (USD/evento o USD/año)

i : Tasa de descuento (–)

t : Año/índice temporal (1...N)

N : Horizonte de evaluación (años)

VPN: Valor presente neto (USD)

VR: Valor residual (USD)

k : Índice de alternativa/escenario (si comparas opciones en ACCV)

INTRODUCCIÓN

La Fundición Potrerillos, perteneciente a la División Salvador de Codelco, constituye un eslabón crítico en la cadena de valor del cobre en Chile. En sus instalaciones, los hornos de ánodos cumplen una función estratégica: refinar el cobre blíster con una ley aproximada de 95–96 % hasta alcanzar una pureza de 99,6 %, condición indispensable para su posterior proceso de refinación electrolítica.

El sistema motriz que asegura el giro de estos hornos, motor de corriente continua de 40 HP, variadores SIMOREG DC Master y controlador Siemens LOGO!, presenta hoy un avanzado estado de obsolescencia. La falta de repuestos, la limitada capacidad de diagnóstico y la ausencia de integración con sistemas modernos generan vulnerabilidad frente a fallas, especialmente en escenarios donde las acreciones internas incrementan la inercia y la demanda de torque. Estas deficiencias han derivado en fallas recurrentes, aumentando el tiempo medio de reparación (MTTR) y reduciendo la disponibilidad operacional.

Frente a este escenario, surge la necesidad de responder a una pregunta fundamental: ¿cómo modernizar el sistema eléctrico motriz de los hornos de ánodos para garantizar el giro bajo carga, mejorar la confiabilidad y elevar la disponibilidad operacional? La hipótesis de trabajo plantea que la sustitución del actual sistema DC por un motor AC robusto, controlado mediante un variador de frecuencia vectorial y gestionado por un PLC compacto moderno, permitiría incrementar el par de arranque, habilitar monitoreo en tiempo real y aplicar protecciones avanzadas, reduciendo tiempos de reparación y mejorando la continuidad productiva.

El desarrollo del presente proyecto se estructura bajo la metodología DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar). Esta metodología permite abordar de manera sistemática la identificación del problema, el análisis de causas, la propuesta de mejora y el establecimiento de un plan de control que asegure la sostenibilidad de los resultados. En el contexto industrial de la Fundición Potrerillos, el enfoque DMAIC facilita la integración de herramientas de confiabilidad y mantenimiento, tales como los indicadores MTTR, MTBF y disponibilidad operacional, junto con metodologías de análisis causal como Ishikawa y los 5 Porqués, aportando un marco estructurado para la mejora continua en sistemas críticos como el horno de ánodos.

OBJETIVO GENERAL

Proponer lineamientos técnicos para la modernización del sistema eléctrico de control y fuerza del horno de ánodos en la Fundición Potrerillos, con el fin de mejorar su disponibilidad operacional y mantenibilidad, en base a la caracterización de su desempeño y limitaciones actuales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el contexto técnico-operacional del horno de ánodos en la Fundición Potrerillos, describiendo el proceso HRF, el sistema motriz de giro actualmente instalado y las principales restricciones observadas en su desempeño.
- Cuantificar las causas que afectan la disponibilidad del sistema de giro del horno de ánodos, mediante indicadores de confiabilidad/disponibilidad y herramientas de análisis causal (Ishikawa y 5 Porqués), delimitando fallas globales versus fallas abordables y priorizando las restricciones del sistema eléctrico de control y fuerza.
- Proponer una modernización del sistema motriz basada en motor de corriente alterna, variador de frecuencia (control vectorial) y PLC compacto, evaluando su factibilidad técnica y económica mediante costos de implementación y beneficios esperados en confiabilidad y disponibilidad.

CAPÍTULO 1: CONTEXTO Y METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CAUSA
RAÍZ

1. CONTEXTO Y METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ (RCA)

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

La Fundición Potrerillos, perteneciente a la División Salvador de Codelco (Región de Atacama), integra un complejo minero-metalúrgico que considera mina, concentradora, fundición y refinería. En este tipo de operación, la continuidad de los equipos críticos influye directamente en el cumplimiento del plan productivo y en la estabilidad del proceso.

Dentro de la línea de producción de ánodos, el horno de ánodos conecta la etapa de conversión con el moldeo. En particular, la confiabilidad del sistema de giro condiciona la operación en fases sensibles del ciclo Horno Refino Fuego (HRF). Por eso, su disponibilidad es relevante para evitar detenciones no programadas y mantener el flujo del proceso.



Fuente: Presentación interna de la División Salvador – Codelco (material de difusión técnica, 2024)

Figura 1-1. Vista Panorámica de Fundición Potrerillos.

La Fundición Potrerillos, (vista panorámica en Figura 1-1) es una instalación histórica, que con el tiempo se ha modernizado en materia tecnológica y ambiental,

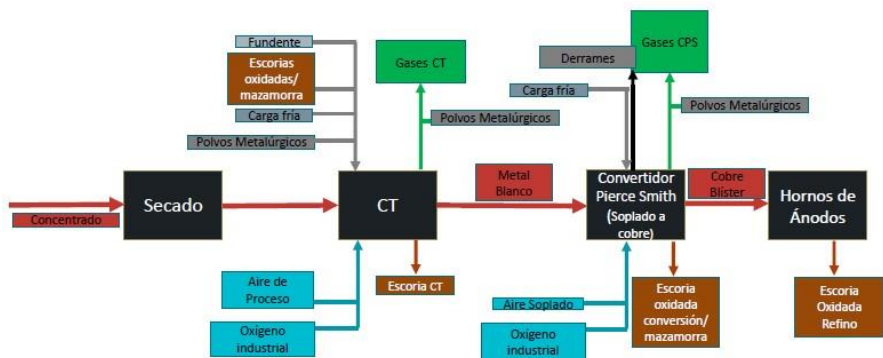
particularmente en la captura de gases y producción de ácido sulfúrico. Si bien una parte importante del concentrado proviene de la mina de la propia División, Potrerillos se caracteriza por recibir y procesar concentrados complejos, es decir, de baja ley, de otras divisiones de Codelco, como Chuquicamata, Gabriela Mistral o Radomiro Tomic, así asegurando continuidad al proceso metalúrgico.

1.2 CONTEXTO TÉCNICO-OPERACIONAL DEL HORNO DE ÁNODOS.

Este apartado describe el rol del horno de ánodos en el proceso metalúrgico HRF y el sistema motriz que permite su rotación. Con ello se busca explicar por qué la disponibilidad de los Hornos de ánodos y su sistema de giro son condiciones claves para la continuidad operacional en la Fundición Potrerillos.

1.2.1 Rol del Horno de Ánodos en el flujo metalúrgico.

La Fundición Potrerillos procesa concentrados de cobre mediante etapas de fusión, conversión, refinación y moldeo. En este esquema, los hornos de ánodos elevan la pureza del cobre blíster desde aproximadamente 95–96% hasta cerca de 99,6% antes del moldeo de ánodos y su posterior refinación electrolítica. La Figura 1-2 muestra el flujo general del proceso.



Fuente: Presentación interna de la División Salvador – Codelco (material de difusión técnica, 2024)

Figura 1-2. Diagrama de flujo general del proceso de Fundición Potrerillos.

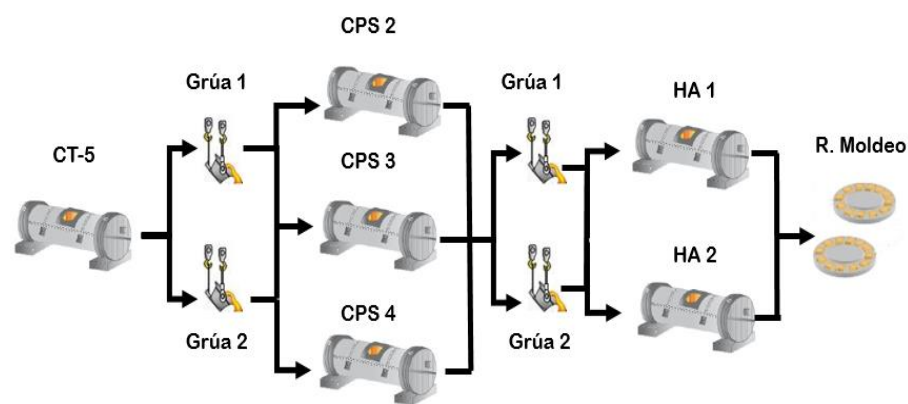
En operación, los hornos HA1 y HA2 trabajan en paralelo y con cargas independientes, lo que entrega una redundancia parcial del proceso. Sin embargo, ante la indisponibilidad de uno de los hornos no siempre se detiene toda la línea, pero sí se reduce la capacidad efectiva y aparecen restricciones que afecta todo el proceso de la Fundición, considerando que el traslado de cobre líquido entre equipos se realiza mediante grúas puente (Figura 1-3), una detención del horno de ánodos puede generar retenciones de metal y exigir ajustes operacionales en equipos aguas arriba. En términos de capacidad, un solo horno en operación no logra absorber la totalidad del requerimiento, quedando una pérdida neta de producción que, de forma referencial, puede aproximarse al orden de un tercio del total, impacto que se cuantifica en el capítulo de diagnóstico.



Fuente: Elaboración propia (registro fotográfico personal en Fundición Potrerillos, 2025).

Figura 1-3. Traslado de cobre líquido en Puente grúa

La Figura 1-4 presenta un esquema simplificado del flujo desde el Convertidor Teniente 5 (CT5) hasta la rueda de moldeo. En dicho esquema se destaca al horno de ánodos como un punto intermedio crítico entre conversión y moldeo, y se refuerza el rol del giro como condición de continuidad operacional.

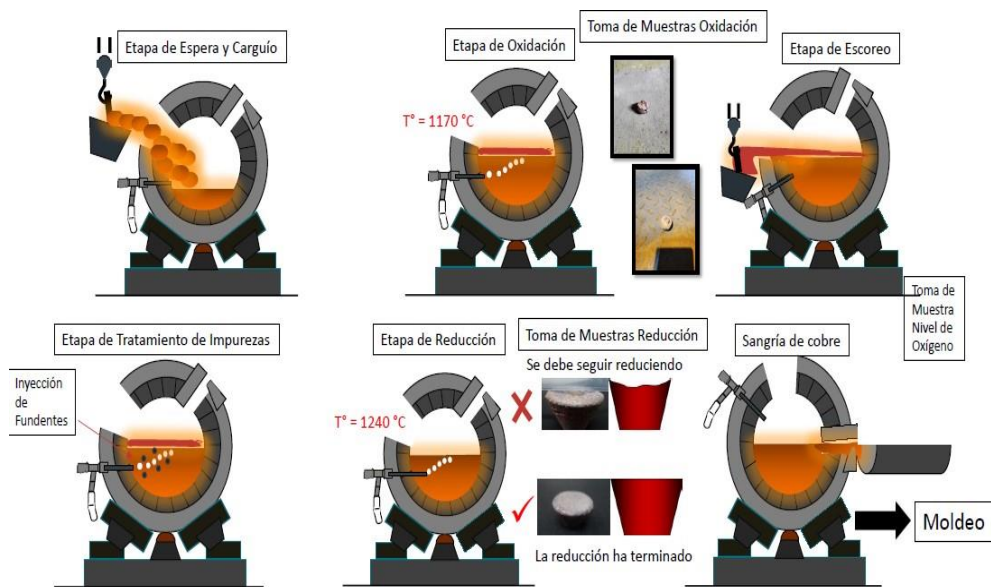


Fuente: Elaboración propia (diseño esquemático realizado por el autor, 2025).

Figura 1-4. Flujo simplificado del proceso desde CT5 hasta la rueda de moldeo en la Fundición Potrerillos.

1.2.2 Proceso Horno Refino Fuego y parámetros críticos del Horno de Ánodos.

Los hornos de ánodos operan mediante un ciclo HRF compuesto, de manera general, por cuatro etapas: (i) carguío y espera, (ii) oxidación, (iii) reducción y (iv) moldeo. Estas etapas son interdependientes y condicionan tanto la continuidad del proceso como la calidad metalúrgica del producto. La Figura 1-5 resume el ciclo HRF.



Fuente: Presentación interna de la División Salvador – Codelco (material de difusión técnica, 2024)

Figura 1-5. Proceso Horno Refino Fuego (HRF) de Hornos de Ánodos.

Aunque el proceso HRF opera de forma continua a nivel de planta, el subsistema de giro del horno no trabaja de manera permanente, sino que se utiliza en ventanas operacionales específicas a lo largo del ciclo (principalmente en maniobras de giro, posicionamiento y, de forma crítica, durante el moldeo). En la operación normal, el tiempo efectivo de uso del giro se concentra aproximadamente en 9 h/día (valor referencial levantado desde operación), en donde una falla del accionamiento tiende a impactar en momentos de alta criticidad, afectando la continuidad del flujo hacia moldeo y forzando decisiones operacionales.

Durante el moldeo, el giro controlado permite la descarga del metal hacia canaletas y ruedas de moldeo. En esta etapa, variables como disponibilidad de par a baja velocidad, respuesta ante sobrecargas y estabilidad del accionamiento son especialmente relevantes para evitar detenciones y pérdidas de continuidad operacional.

1.2.3 Sistema motriz eléctrico y control actuales.

Para realizar el giro durante la operación y el moldeo, cada horno cuenta con un sistema eléctrico de fuerza y control implementado a comienzos de la década del 2000.

Este sistema considera: dos variadores SIMOREG DC Master para regular velocidad y potencia; un controlador Siemens LOGO! para funciones de mando y lógica básica; además de un motor de corriente continua (DC) de 40 HP, doble bobinado en paralelo (Figura 1-6) vigente de los años 80; y un sistema de transmisión mecánica por piñón–corona que transfiere el movimiento al casco del horno (Figura 1-7). El detalle de esta arquitectura se desarrolla en el apartado 2.1.



Fuente: Elaboración propia (registro fotográfico personal en Fundición Potrerillos, 2025).

Figura 1-6. Motor principal de corriente continua (40 HP) encargado del giro del HA.



Fuente: Elaboración propia (registro fotográfico personal en Fundición Potrerillos, 2025).

Figura 1-7. Sistema de transmisión final compuesto por piñón de ataque y corona dentada del HA.

1.2.4 Limitaciones observadas en disponibilidad y confiabilidad

Durante la operación se han observado dificultades asociadas al giro del casco, especialmente en etapas críticas como el moldeo. Entre las principales limitaciones se encuentran: (i) formación de acreciones metálicas y escorias que incrementan peso, inercia y demanda de par; (ii) restricciones del accionamiento actual frente a sobrecargas; y (iii) fallas recurrentes en control y fuerza asociadas al envejecimiento de componentes electrónicos y a la incertidumbre en repuestos compatibles.

Estas condiciones sustentan la necesidad de desarrollar un diagnóstico técnico basado en RCA e indicadores de confiabilidad y disponibilidad, como base para una propuesta de modernización del sistema motriz.

1.3 **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El sistema eléctrico de control y fuerza del horno de ánodos cumple una función esencial dentro del proceso de Horno Refino Fuego (HRF), ya que permite realizar el giro controlado del casco durante maniobras operacionales, especialmente en etapas de posicionamiento y moldeo. En este contexto, la continuidad del proceso no depende únicamente de que el motor entregue la potencia necesaria, sino también de que el sistema de control responda de forma confiable, que las protecciones actúen correctamente y que el personal de mantenimiento pueda diagnosticar una falla en el menor tiempo posible.

En la actualidad, el sistema de giro se encuentra basado en una arquitectura compuesta por un motor de corriente continua, convertidores Siemens SIMOREG DC Master y un controlador Siemens LOGO!. Esta configuración ha permitido operar el equipo durante años; sin embargo, frente a las exigencias actuales del proceso y las condiciones propias del envejecimiento del horno, presenta limitaciones que afectan su desempeño y dificultan su mantenimiento. Entre los principales aspectos observados se encuentran la obsolescencia tecnológica de algunos componentes, baja disponibilidad de repuestos compatibles, la ausencia de una interfaz HMI dedicada y la limitada trazabilidad de eventos operacionales y fallas.

Estas condiciones hacen que, ante una detención no programada, el diagnóstico dependa en gran medida de la inspección local, de la experiencia del personal y de la

revisión manual de señales o componentes. Como consecuencia, los tiempos de detección, análisis y reparación pueden aumentar, afectando directamente la mantenibilidad del sistema. En un equipo crítico como el horno de ánodos, este aspecto adquiere especial importancia, ya que una falla en el sistema de giro puede generar restricciones operacionales, afectar la continuidad del flujo metalúrgico y aumentar los costos asociados a la indisponibilidad.

A lo anterior se suma que el horno opera bajo condiciones variables de carga. Durante el proceso, la formación de acreciones internas, escoria o acumulaciones metálicas puede incrementar la resistencia al giro, elevando la demanda de torque sobre el sistema motriz. No obstante, el sistema actual no permite visualizar de manera clara la evolución de variables relevantes, como la corriente del motor, ni registrar tendencias que permitan relacionar el comportamiento del accionamiento con el estado operacional del horno. Esta falta de información limita la capacidad de anticiparse a condiciones anormales y reduce las posibilidades de tomar decisiones basadas en datos objetivos.

Por lo tanto, el problema central de este trabajo se relaciona con la existencia de un sistema eléctrico de control y fuerza que, si bien continúa operativo, presenta limitaciones tecnológicas, baja capacidad de diagnóstico y restricciones de mantenibilidad. Estas condiciones afectan la disponibilidad operacional del horno de ánodos y aumentan la incertidumbre frente a eventos de falla, especialmente en un contexto donde la continuidad del proceso es fundamental para la operación de la Fundición Potrerillos.

En este contexto, surge la necesidad de caracterizar el desempeño actual del sistema, identificar las causas que inciden en su indisponibilidad y evaluar una alternativa de modernización que permita mejorar la confiabilidad, la mantenibilidad y la capacidad de control del accionamiento. La propuesta no se orienta únicamente al reemplazo de componentes, sino también a incorporar mayores capacidades de diagnóstico, monitoreo y registro de información operacional, de modo que el sistema pueda ser gestionado con mayor claridad técnica durante la operación y el mantenimiento.

A partir de lo anterior, la pregunta que guía este estudio es la siguiente: ¿de qué manera la modernización del sistema eléctrico de control y fuerza del horno de ánodos, mediante una arquitectura basada en motor de corriente alterna, variador de frecuencia, PLC y HMI, puede contribuir a mejorar la disponibilidad operacional y la mantenibilidad del equipo?

Para responder esta pregunta, el trabajo considera el levantamiento del contexto operacional, el análisis del sistema actual, la revisión de registros de falla, el cálculo de indicadores de confiabilidad y disponibilidad, la aplicación de herramientas de análisis de causa raíz y la evaluación técnico-económica de alternativas de modernización. El desarrollo cuantitativo del diagnóstico se presenta en el Capítulo 2, mientras que la propuesta de solución y su evaluación económica se abordan en el Capítulo 3.

1.4 MARCO TEÓRICO APLICADO

El desarrollo de este trabajo requiere sustentar técnicamente el análisis del sistema de giro del horno de ánodos, considerando que la problemática no se limita a una falla aislada de un componente, sino que involucra aspectos de confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, obsolescencia tecnológica y costo de indisponibilidad. Por esta razón, el marco teórico se orienta a conceptos aplicados de mantenimiento industrial y gestión de activos, los cuales permiten relacionar el desempeño técnico del sistema actual con la necesidad de una propuesta de modernización.

1.4.1 Confiabilidad operacional

La confiabilidad operacional puede entenderse como la capacidad de un sistema productivo para cumplir la función requerida bajo condiciones de operación determinadas, manteniendo niveles aceptables de continuidad, seguridad y control del riesgo. En el contexto de mantenimiento industrial, este concepto no depende únicamente de la confiabilidad de los equipos, sino también de la interacción entre tecnología, procesos, personas y estrategias de mantenimiento (Parra, 2025).

En sistemas críticos, como el horno de ánodos, la confiabilidad operacional adquiere especial relevancia debido a que una falla no solo afecta al equipo en sí mismo, sino que también puede generar restricciones en la continuidad del proceso metalúrgico. Por lo tanto, analizar el sistema de giro desde la confiabilidad y la mantenibilidad permite comprender, por una parte, la recurrencia de sus fallas y, por otra, la capacidad del sistema para ser diagnosticado y recuperado en tiempos adecuados. Ambos aspectos inciden

directamente en la disponibilidad del horno y en la estabilidad operacional de la Fundición Potrerillos.

Desde esta perspectiva, el sistema motriz del horno debe ser evaluado no solo por su capacidad de generar movimiento, sino también por su capacidad de responder ante condiciones variables de carga, facilitar el diagnóstico de fallas y permitir acciones de mantenimiento oportunas. En este sentido, la modernización tecnológica no se plantea únicamente como un reemplazo de componentes, sino como una mejora orientada a fortalecer la confiabilidad operacional del activo.

1.4.2 Confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad

Dentro del análisis de desempeño de activos físicos, la confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad constituyen indicadores fundamentales para evaluar el comportamiento de un sistema en operación. La confiabilidad se relaciona con la probabilidad de que un equipo cumpla su función durante un período determinado y bajo condiciones de operación establecidas. En términos prácticos, permite estimar la tendencia de un sistema a fallar o mantenerse operativo (Parra & Crespo, 2020).

La mantenibilidad, por su parte, se asocia con la capacidad de un equipo para ser reparado luego de ocurrida una falla. Este concepto depende de factores como la facilidad de diagnóstico, la accesibilidad a componentes, la disponibilidad de repuestos, la claridad de los procedimientos de intervención y la experiencia del personal de mantenimiento. En el caso del sistema de giro del horno de ánodos, la mantenibilidad se ve directamente afectada cuando el sistema no entrega información suficiente para identificar rápidamente la causa de una detención.

La disponibilidad operacional integra ambos conceptos, ya que expresa la proporción de tiempo en que el equipo se encuentra disponible para cumplir su función respecto del tiempo total requerido. De esta manera, un equipo puede tener una frecuencia de fallas relativamente baja, pero si cada evento requiere muchas horas de diagnóstico o reparación, su disponibilidad puede verse igualmente afectada. Por ello, en este trabajo la disponibilidad se analiza considerando tanto la ocurrencia de fallas como los tiempos fuera de servicio asociados.

1.4.3 Indicadores MTBF, MTTR y disponibilidad operacional

Para cuantificar el desempeño del sistema se utilizan indicadores básicos de mantenimiento, entre ellos el MTBF, el MTTR y la disponibilidad operacional, los cuales permiten transformar registros de operación, falla y reparación en información útil para la toma de decisiones (Parra & Crespo, 2020).

El MTBF, o tiempo medio entre fallas, permite estimar el tiempo promedio de operación entre eventos de falla. Un MTBF bajo indica una mayor recurrencia de fallas, mientras que un MTBF alto refleja una mayor continuidad de funcionamiento.

El MTTR, o tiempo medio de reparación, representa el tiempo promedio requerido para recuperar el equipo luego de una falla. Este indicador resulta especialmente importante en sistemas donde el diagnóstico es complejo o donde la falta de información técnica retrasa la intervención. En el caso del sistema actual del horno de ánodos, la ausencia de una HMI dedicada, la baja trazabilidad de eventos y la limitada información disponible desde el accionamiento pueden incidir directamente en el aumento del MTTR.

La disponibilidad operacional puede expresarse de forma general mediante la relación entre el tiempo medio de operación y la suma del tiempo medio de operación más el tiempo medio de reparación. En términos conceptuales (Ecuación 1-1):

$$As = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Esta relación muestra que la disponibilidad puede mejorarse por dos vías principales: aumentando el tiempo entre fallas o reduciendo el tiempo requerido para recuperar el equipo. En el presente estudio, la propuesta de modernización se orienta a ambas dimensiones, ya que busca reducir la recurrencia de fallas asociadas a obsolescencia tecnológica y, al mismo tiempo, disminuir los tiempos de diagnóstico y reparación mediante mayor capacidad de monitoreo, alarmas y registro de eventos.

1.4.4 Análisis de causa raíz: Ishikawa y 5 Porqués

El análisis de causa raíz es una herramienta utilizada para identificar las condiciones que originan una falla o problema recurrente, evitando que el diagnóstico se limite únicamente al síntoma visible. En mantenimiento industrial, este enfoque es especialmente útil cuando existen fallas repetitivas, eventos de alto impacto o problemas donde interactúan factores técnicos, operacionales y humanos.

En este trabajo se consideran dos herramientas principales de análisis causal: el diagrama de Ishikawa y el método de los 5 Porqués. El diagrama de Ishikawa permite ordenar posibles causas del problema en categorías, tales como máquina, método, materiales, mano de obra, medio ambiente y medición. Su utilidad está en entregar una visión estructurada del problema, permitiendo observar que una falla operacional puede ser consecuencia de la interacción de varios factores y no solo de un componente específico.

El método de los 5 Porqués, en cambio, permite profundizar en una causa seleccionada mediante preguntas sucesivas orientadas a identificar el origen del problema. En el caso del sistema de giro del horno de ánodos, esta herramienta resulta útil para relacionar fallas visibles, como detenciones o dificultad de giro, con causas más profundas, tales como obsolescencia de componentes, falta de información de diagnóstico, limitaciones del sistema de control o aumento de carga mecánica por condiciones propias del horno.

La combinación de ambas herramientas permite desarrollar un diagnóstico más ordenado y coherente, ya que primero se identifican las posibles familias de causas y luego se profundiza en aquellas que tienen mayor relación con la disponibilidad y mantenibilidad del sistema.

1.4.5 Análisis de Costos del Ciclo de Vida, ACCV/LCC

El Análisis de Costos del Ciclo de Vida, conocido como ACCV o LCC por sus siglas en inglés, permite evaluar alternativas considerando no solo el costo inicial de inversión, sino también los costos de operación, mantenimiento, indisponibilidad y otros costos relevantes durante un horizonte de análisis. En decisiones de reemplazo o modernización de activos industriales, esta herramienta permite comparar alternativas desde una perspectiva de costo total y no únicamente desde el menor CAPEX inicial (Parra et al., 2022).

En sistemas productivos críticos, los costos asociados a fallas pueden ser relevantes, especialmente cuando una detención afecta la continuidad operacional. Por esta razón, el ACCV permite incorporar el costo de indisponibilidad por fallos como parte de la evaluación económica. De esta forma, una alternativa con mayor inversión inicial puede resultar más conveniente si reduce fallas, disminuye tiempos fuera de servicio, mejora la mantenibilidad o permite extender la vida útil del sistema.

En el presente trabajo, el ACCV se utiliza para comparar alternativas de modernización del sistema motriz del horno de ánodos, considerando inversión inicial, costos de operación y mantenimiento, y costos asociados a indisponibilidad. Este enfoque es coherente con la naturaleza del problema, ya que la decisión no debe basarse solo en cambiar un equipo antiguo por uno nuevo, sino en determinar qué alternativa entrega mejores condiciones de confiabilidad, mantenibilidad y continuidad operacional en el tiempo.

1.4.6 Obsolescencia técnica y modernización de activos industriales

La obsolescencia técnica corresponde a la pérdida progresiva de vigencia o conveniencia de una tecnología debido a factores como discontinuidad de repuestos, menor soporte técnico, dificultad de integración con sistemas modernos, limitaciones de diagnóstico o aumento de costos de mantenimiento. En activos industriales, la obsolescencia no siempre significa que el equipo haya dejado de funcionar, sino que su operación se vuelve cada vez más incierta, menos trazable y más difícil de sostener.

En el caso del sistema de giro del horno de ánodos, la arquitectura actual basada en motor de corriente continua, convertidores SIMOREG y controlador LOGO! continúa cumpliendo su función básica, pero presenta limitaciones frente a las necesidades actuales de monitoreo, diagnóstico y control. Esto genera una brecha entre la capacidad del sistema instalado y las exigencias reales del proceso, especialmente considerando las condiciones variables de carga y la necesidad de reducir tiempos de intervención.

La modernización de activos industriales busca cerrar esa brecha mediante la incorporación de tecnologías más compatibles con los estándares actuales de operación y mantenimiento. En este trabajo, la propuesta considera una arquitectura basada en motor de corriente alterna, variador de frecuencia, PLC y HMI. Esta configuración permitiría mejorar el control del accionamiento, incorporar visualización de variables relevantes, registrar eventos, facilitar el diagnóstico y apoyar una gestión de mantenimiento más basada en datos.

Por lo tanto, la modernización propuesta no debe entenderse únicamente como un cambio tecnológico, sino como una intervención orientada a mejorar la confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad del sistema de giro, contribuyendo a una operación más segura, trazable y sostenible para los hornos de ánodos.

1.5 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

La metodología utilizada en este trabajo se orienta a analizar el sistema eléctrico de control y fuerza del horno de ánodos desde una perspectiva técnica, operacional y económica. Para ello, el estudio combina levantamiento de información en terreno, revisión de antecedentes técnicos, análisis de registros de falla, cálculo de indicadores de mantenimiento, aplicación de herramientas de análisis causal y evaluación técnico-económica de alternativas de modernización.

El enfoque metodológico busca asegurar que la propuesta de mejora no se base únicamente en la percepción de obsolescencia del sistema actual, sino en antecedentes verificables que permitan relacionar las limitaciones técnicas del accionamiento con su impacto en la disponibilidad, la mantenibilidad y los costos asociados a indisponibilidad. De esta manera, la metodología permite avanzar desde la caracterización del problema hasta la formulación de una alternativa de modernización técnicamente fundamentada.

1.5.1 Enfoque metodológico general basado en DMAIC

El desarrollo del estudio se estructura tomando como referencia la lógica DMAIC, compuesta por las etapas Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. Esta metodología permite ordenar el trabajo de forma progresiva, evitando abordar la solución antes de comprender adecuadamente el problema y sus causas principales.

En la etapa Definir, se delimita el problema asociado al sistema de giro del horno de ánodos, considerando su función dentro del proceso HRF, su criticidad operacional y las limitaciones observadas en la arquitectura actual de control y fuerza. En esta etapa también se establece el alcance del estudio, centrado principalmente en el sistema eléctrico de accionamiento, control y diagnóstico del horno.

En la etapa Medir, se recopila y organiza la información disponible relacionada con el desempeño del sistema. Esto considera registros de fallas, tiempos fuera de servicio, antecedentes técnicos del sistema actual, observaciones en terreno y documentación asociada al accionamiento eléctrico. A partir de esta información se calculan indicadores como MTBF, MTTR y disponibilidad operacional, los cuales permiten cuantificar el comportamiento del sistema antes de proponer una mejora.

En la etapa Analizar, se estudian las causas que inciden en la indisponibilidad del sistema de giro. Para ello, se aplican herramientas de análisis de causa raíz, principalmente el diagrama de Ishikawa y el método de los 5 Porqués. Además, se diferencian las fallas globales del horno de aquellas asociadas específicamente al subsistema eléctrico y de control, con el fin de delimitar cuáles pueden ser abordadas por la propuesta de modernización.

En la etapa Mejorar, se desarrolla la propuesta técnica de modernización, considerando una arquitectura basada en motor de corriente alterna, variador de frecuencia, PLC y HMI. Esta alternativa se analiza en función de su capacidad para mejorar el diagnóstico, reducir la dependencia de tecnología obsoleta, facilitar la mantenibilidad y entregar mayor información operacional al personal de operación y mantenimiento.

Finalmente, en la etapa Controlar, se proponen criterios para sostener los beneficios esperados de la modernización en el tiempo. Esto incluye la incorporación de alarmas, registro de eventos, visualización de variables relevantes, seguimiento de indicadores y criterios básicos de verificación posterior a la implementación. Con ello, se busca que la mejora no quede limitada al reemplazo de equipos, sino que permita generar una base de información útil para la gestión futura del mantenimiento.

1.5.2 Fuentes de información utilizadas

Para el desarrollo del estudio se utilizaron distintas fuentes de información, con el objetivo de construir una visión lo más completa posible del sistema actual y de sus principales limitaciones. Entre las fuentes consideradas se encuentran registros de fallas del año 2024, antecedentes de operación del horno de ánodos, documentación técnica de componentes eléctricos, planos del sistema actual, observaciones realizadas en terreno y registros fotográficos del equipo.

También se consideró información obtenida a partir de la experiencia operacional y de mantenimiento disponible en la planta, especialmente para interpretar las condiciones reales de trabajo del sistema de giro. Este punto resulta relevante, ya que en equipos industriales antiguos no siempre existe una trazabilidad completa de todas las variables necesarias para el análisis, por lo que la revisión documental debe complementarse con conocimiento práctico del contexto operacional.

Junto con lo anterior, se incorporó bibliografía técnica relacionada con confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, análisis de causa raíz, análisis de costos del ciclo de vida y modernización de activos industriales. Esta base conceptual permite respaldar los criterios utilizados en el diagnóstico y en la evaluación de la propuesta de mejora.

1.5.3 Tratamiento y clasificación de datos

El tratamiento de datos se realizó a partir de los registros disponibles de fallas y tiempos fuera de servicio. En primer lugar, se organizaron los eventos asociados a los hornos de ánodos, identificando fecha, equipo afectado, duración del evento, severidad y tipo de falla, según la información disponible. Posteriormente, estos eventos fueron clasificados para diferenciar las fallas globales del horno respecto de aquellas vinculadas al sistema eléctrico de control y fuerza.

Esta separación resulta necesaria debido a que no todas las fallas del horno pueden ser resueltas mediante una modernización eléctrica. Algunas detenciones pueden estar asociadas a condiciones mecánicas, operacionales, metalúrgicas o externas al sistema de accionamiento. Por ello, el análisis distingue entre la indisponibilidad total del equipo y la fracción de fallas que puede ser abordada directamente por una mejora en el sistema motriz, de control, diagnóstico y monitoreo.

Con la información procesada se calcularon indicadores de mantenimiento, tales como MTBF, MTTR y disponibilidad operacional. Estos indicadores permiten caracterizar el comportamiento del sistema desde dos dimensiones complementarias: la recurrencia de las fallas y la capacidad de recuperación posterior a cada evento. Además, se estimó el costo de indisponibilidad por fallos, con el fin de traducir el impacto técnico de las detenciones a una magnitud económica comparable.

Cuando la información disponible lo permitió, se incorporó también un análisis probabilístico de confiabilidad y mantenibilidad, orientado a interpretar el comportamiento de los tiempos entre fallas y los tiempos de reparación. Este análisis permite complementar los indicadores promedio con una visión más amplia del comportamiento del sistema en el tiempo.

1.5.4 Criterios de análisis y priorización

Para priorizar las causas y definir el alcance de la propuesta, se consideraron criterios directamente relacionados con la operación real del horno. Entre ellos se encuentran la criticidad de la función de giro, el impacto que una falla puede generar sobre la disponibilidad, la repetición de eventos, los tiempos necesarios para recuperar el equipo, la obsolescencia de los componentes, la dificultad para diagnosticar fallas y la posibilidad concreta de intervenir el sistema mediante una modernización eléctrica y de control.

Desde este punto de vista, se dio mayor importancia a aquellas causas que afectan directamente la capacidad del horno para girar cuando el proceso lo requiere. También se consideraron relevantes aquellas condiciones que aumentan el tiempo de diagnóstico o reparación, que dependen de componentes antiguos o de difícil reposición, o que limitan la capacidad del personal para contar con información clara durante una falla. En este sentido, no solo se analizó si el sistema podía seguir funcionando, sino también qué tan difícil resultaba mantenerlo, diagnosticarlo y recuperarlo ante una detención.

Por lo mismo, la propuesta de modernización no se evalúa únicamente por la potencia del nuevo accionamiento o por el reemplazo del sistema actual. También se considera su capacidad para entregar información útil durante la operación y el mantenimiento, mediante el monitoreo de variables relevantes, registro de eventos, alarmas y visualización en HMI. Estos elementos son importantes porque permiten reducir la incertidumbre frente a una falla y facilitan una respuesta más rápida y ordenada del personal de mantenimiento.

Finalmente, los resultados del diagnóstico técnico se utilizan como base para la evaluación económica mediante Análisis de Costos del Ciclo de Vida. De esta manera, la selección de la alternativa no se realiza solo por el costo inicial de inversión, sino también por el efecto esperado sobre la disponibilidad del horno, los costos de mantenimiento, la reducción de indisponibilidad y la sostenibilidad de la solución en el tiempo.

1.6 LÍNEA BASE INICIAL DEL PROBLEMA

Con el fin de dimensionar de manera preliminar la magnitud del problema, se construyó una línea base a partir de los registros de fallas disponibles para el año 2024. Esta línea base permite presentar una visión resumida del comportamiento operacional de los hornos de ánodos antes de desarrollar el diagnóstico técnico detallado del Capítulo 2.

El propósito de esta sección no es profundizar en los cálculos, sino establecer una referencia inicial que permita comprender el alcance del problema y delimitar la fracción de indisponibilidad que puede ser abordada por la propuesta de modernización. Para ello, se diferencia entre la indisponibilidad global del horno y aquella asociada específicamente al subsistema eléctrico y de control del sistema de giro.

Tabla 1-1. Línea base inicial del problema.

Indicador	Resultado inicial	Relación con el estudio
Base anual considerada por horno	7.140 h/año	Normalización del período de análisis
Indisponibilidad global registrada	94,58 h/año	Refleja el impacto total de fallas del horno
Indisponibilidad eléctrica/control	5,77 h/año	Fracción directamente alineada con el alcance del proyecto
Participación eléctrica/control	6,1%	Permite delimitar el impacto abordable por la modernización
CIF global estimado	5,19 MUSD/año	Magnitud económica total de la indisponibilidad
CIF eléctrico/control estimado	0,316 MUSD/año	Base económica para el ACCV de la propuesta

Fuente: Elaboración propia a partir de registros de fallas 2024 y estimaciones de costo de producción de Fundición Potrerillos.

Como se observa en la tabla, la propuesta no busca resolver la totalidad de las detenciones del horno, sino intervenir sobre la fracción asociada al sistema eléctrico de control y fuerza. Esta delimitación es relevante porque permite evaluar la modernización desde un alcance realista, evitando atribuirle beneficios sobre fallas que pertenecen a otros ámbitos del proceso. El detalle de los cálculos, la clasificación de eventos, los indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, y la estimación del costo de indisponibilidad se desarrollan en el Capítulo 2.

1.7 **ALCANCES, LIMITACIONES Y SUPUESTOS DEL ESTUDIO**

El presente estudio se delimita al análisis del sistema eléctrico de control y fuerza asociado al giro del horno de ánodos, con énfasis en su disponibilidad operacional, mantenibilidad, capacidad de diagnóstico y obsolescencia tecnológica. La propuesta de modernización se desarrolla a nivel técnico-conceptual y considera una arquitectura basada en motor de corriente alterna, variador de frecuencia, PLC y HMI.

El trabajo no contempla el rediseño completo del horno, del proceso metalúrgico HRF ni del sistema mecánico integral de transmisión. Sin embargo, se reconoce que las condiciones mecánicas y estructurales del horno influyen sobre la carga exigida al accionamiento, por lo que son consideradas como parte del contexto operacional del análisis.

La evaluación económica se realiza a nivel preliminar, utilizando supuestos de inversión, operación, mantenimiento, costo de indisponibilidad y horizonte de análisis. Por ello, sus resultados permiten comparar alternativas y orientar la toma de decisiones, pero no reemplazan una ingeniería de detalle, una licitación formal ni una evaluación final de implementación en terreno.

Una limitación relevante corresponde a la calidad y nivel de detalle de los registros históricos de falla. La información disponible permite analizar eventos, duración y categorías generales de detención; sin embargo, no siempre permite identificar con precisión todos los modos de falla específicos. Por esta razón, el análisis se complementa con revisión documental, observación en terreno y conocimiento operacional del equipo.

Finalmente, se asume el año 2024 como período base de análisis y se diferencia entre la indisponibilidad global del horno y la fracción asociada al sistema eléctrico y de control. Esta separación permite evaluar la propuesta dentro de un alcance realista, evitando atribuir a la modernización beneficios sobre fallas que pertenecen a otros sistemas o condiciones del proceso.

1.8 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se presentó el contexto técnico-operacional del horno de ánodos, el planteamiento del problema, el marco teórico aplicado y la metodología utilizada para desarrollar el estudio. A partir de ello, se estableció que la problemática del sistema de

giro no se limita al reemplazo de componentes, sino que involucra aspectos de confiabilidad, mantenibilidad, diagnóstico, trazabilidad y obsolescencia tecnológica.

También se definió una línea base inicial que permite dimensionar preliminarmente el problema y delimitar la fracción de indisponibilidad abordable por la propuesta de modernización. Esta delimitación es relevante para mantener una evaluación realista y coherente con el alcance del trabajo.

Con esta base, el Capítulo 2 desarrolla el diagnóstico técnico y cuantitativo del sistema actual, profundizando en los registros de falla, indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, análisis causal y costo de indisponibilidad.

CAPÍTULO 2: DIAGNÓSTICO TÉCNICO DEL SISTEMA ELÉCTRICO
DE CONTROL Y FUERZA

2. DIAGNÓSTICO TÉCNICO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE CONTROL Y FUERZA

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA ACTUAL

El sistema eléctrico de control y fuerza de los hornos de ánodos (HA1 y HA2), tiene como propósito asegurar el giro controlado del casco durante las distintas etapas del proceso HRF (carguío/espera, oxidación, reducción y moldeo). En términos operacionales, el sistema debe entregar par a baja velocidad, gestionar cambios de sentido de giro, ejecutar detenciones controladas y permitir maniobras seguras durante etapas críticas del ciclo.

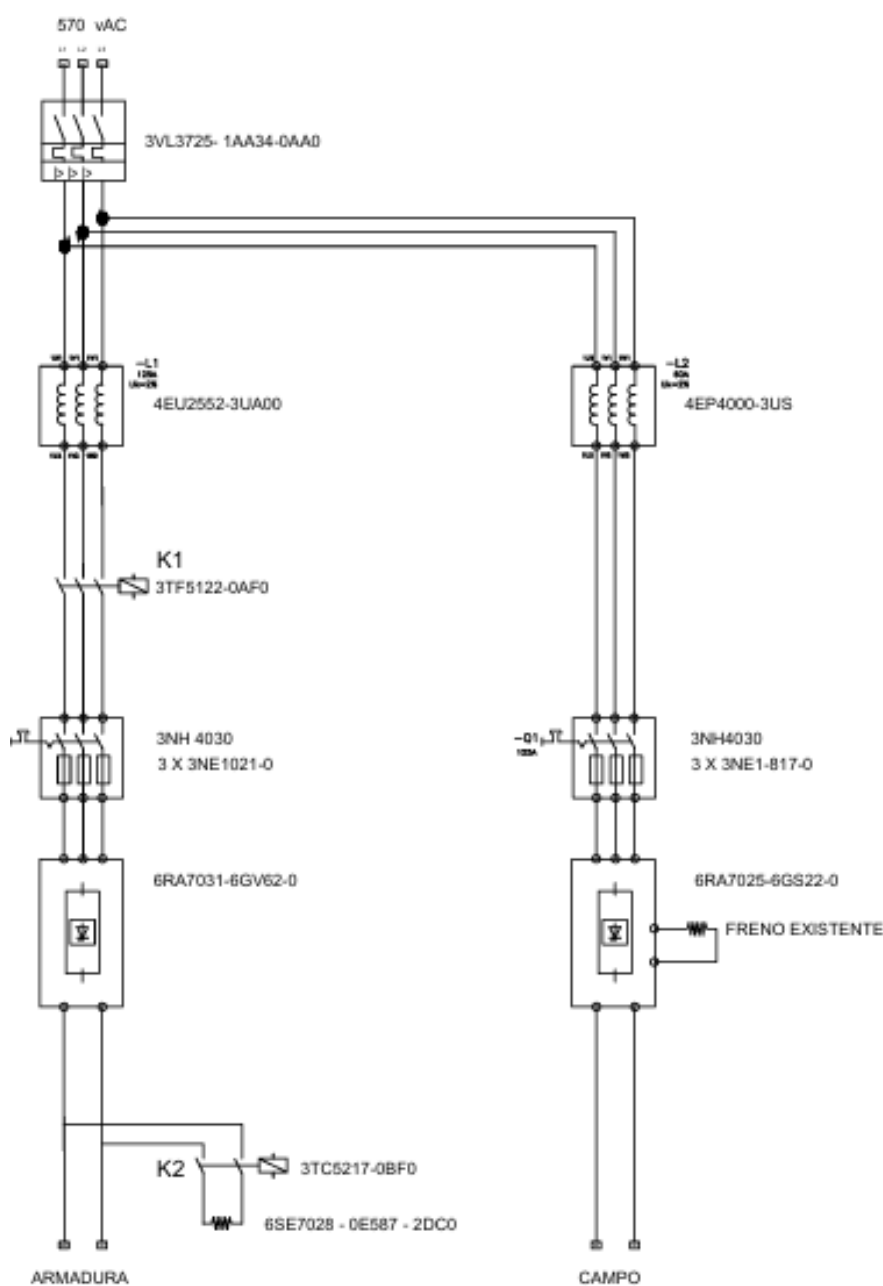
Si bien el diseño del conjunto motriz proviene de décadas anteriores, a comienzos de los años 2000 se implementó una modificación parcial del circuito eléctrico: se mantuvo el motor de corriente continua existente, pero se incorporaron convertidores Siemens SIMOREG DC Master y un sistema de control lógico Siemens LOGO!. En la práctica, esto significó una modernización parcial del accionamiento (regulación y mando), sin renovación del motor ni del tren mecánico.

2.1.1 Configuración general del sistema motriz

El accionamiento está basado en un motor de corriente continua (DC) de 40 HP, cuya operación considera los circuitos de armadura y campo (excitación). La alimentación y regulación se realiza mediante dos convertidores Siemens SIMOREG DC Master, con funciones diferenciadas:

- Convertidor de armadura: Siemens SIMOREG 6RA7031-6GV62-0Z, capacidad nominal 125 A, responsable del suministro de potencia a armadura y del control principal de velocidad/par.
- Convertidor de campo: Siemens SIMOREG 6RA7025-6GS22-0Z, capacidad nominal 60 A, destinado a la excitación del campo magnético, contribuyendo al control de par y estabilidad del accionamiento.

Ambos convertidores trabajan coordinados mediante señales de mando y enclavamientos desde el sistema lógico. El diagrama de potencia muestra que la salida de los SIMOREG alimenta directamente los circuitos de armadura y campo (Figura 2-1), y que el cambio de sentido de giro es gestionado por el propio convertidor, según su configuración y lógica de control.



Fuente: planos eléctricos Fundición Potrerillos, Siemens 6RA7031 / 6RA7025 – Codelco Salvador.)

Figura 2-1. Diagrama de potencia del sistema motriz DC del horno de ánodos.

2.1.2 Sistema de control y automatización

El control está a cargo de un autómata Siemens LOGO! 230RC, encargado de ejecutar maniobras básicas: marcha, paro, selección de sentido de giro, transferencia de mando (según etapa del proceso), bypass, alarmas y enclavamientos de seguridad. El LOGO! utiliza módulos de expansión DM8 para ampliar entradas y salidas.

Una limitación relevante del sistema es su baja capacidad de integración y trazabilidad: no existe HMI dedicada y el diagnóstico se realiza de manera local, el display frontal del LOGO! solo entrega señalización RUN/FAULT/BYPASS. Además, el sistema no incorpora comunicación industrial (Ethernet/Profibus/Modbus) para monitoreo remoto o registro de variables/eventos.



Fuente: registro fotográfico propio, Sala Eléctrica CPS y Hornos de Ánodos.

Figura 2-2. Autómata Siemens LOGO! 230RC instalado en gabinete de control de horno.

2.1.3 Transmisión mecánica y acoplamiento al horno

El motor DC se encuentra acoplado a un primer reductor de velocidad, transmitiendo movimiento a un segundo reductor dispuesto en serie. Desde el segundo reductor, un eje de transmisión conecta con el piñón de ataque que engrana con la corona principal del horno de ánodos. Esta disposición multiplica el torque disponible a costa de

reducir la velocidad angular, lo que resulta coherente con la necesidad de girar un conjunto de gran inercia bajo carga.

La relación exacta total de reducción; no fue posible obtener, sin embargo, las observaciones en terreno y el comportamiento operacional confirman que se trata de una relación elevada, consistente con el tipo de servicio del horno.



Fuente: Fotografía propia tomada en Fundición Potrerillos, 2025.

Figura 2-3 Fotografía de los dos reductores del sistema de giro del horno de ánodos.

2.1.4 Sistema de alimentación eléctrica y protecciones

El conjunto se alimenta desde una barra trifásica de 380 VAC, con interruptores termomagnéticos, fusibles y transformadores auxiliares para circuitos de control y señalización. La protección principal aguas arriba de los convertidores es un termomagnético con capacidad de 200 Amperes, además la etapa de DC considera fusibles de 100 (A), además de elementos de maniobra y protección asociados al tablero.

Estos componentes se encuentran alojados en gabinetes por horno, dentro de la Sala Eléctrica CPS y Hornos de Ánodos, con su correspondiente señalización de las exigencias de seguridad industrial.



Fuente: Fotografía propia en sala eléctrica CPS y Hornos de Ánodos, Fundición Potrerillos (2025).

Figura 2-4. Variador de velocidad Siemens SIMOREG del sistema motriz del horno de ánodos.

2.1.5 Sistema de respaldo de energía

Cada horno dispone de una UPS de respaldo para mantener operativos el control y los circuitos de mando ante perturbaciones o cortes de alimentación, permitiendo ejecutar maniobras de seguridad definidas para el proceso. Este respaldo reduce el riesgo operacional evitando que se tapen los tubos, permitiendo realizar movimientos y posicionar estos fuera de baño de cobre líquido.

2.1.6 Estado actual de operación

A pesar de la modernización parcial implementada en los años 2000, el sistema presenta una alta dependencia de equipos que hoy son difíciles de sostener en el tiempo: los SIMOREG 6RA7031 y 6RA7025 se encuentran fuera de producción, con restricciones de soporte y disponibilidad de repuestos. Sumado a esto, la ausencia de instrumentación y registro limita el diagnóstico oportuno, manteniendo una lógica operacional principalmente reactiva.

En terreno se observan diferencias de comportamiento entre HA1 y HA2 (torque disponible, respuesta en condiciones exigentes y recurrencia de detenciones), situación que se cuantifica en los apartados de confiabilidad y costos de este capítulo y que motiva la evaluación de una modernización integral en el Capítulo 3.

2.2 **ANÁLISIS FUNCIONAL DEL SISTEMA ACTUAL**

El sistema de control y fuerza está diseñado para permitir el giro del horno HRF durante el ciclo metalúrgico, contribuyendo a la homogeneización del baño y a la descarga controlada hacia moldeo. Aunque el proceso global opera de manera continua, el giro se concentra en ventanas operativas específicas según etapa, especialmente en momentos críticos como el moldeo.

2.2.1 Modos de operación

- Modo manual (habitual): El operador controla el sentido de giro (horario/antihorario) mediante pulsadores, en la caseta de hornos. No existen secuencias automáticas preprogramadas; la ejecución (duración, frecuencia y sentido) depende del criterio del operador.
- b) Modo remoto (caseta de rueda de moldeo): Durante moldeo, el control puede transferirse a la caseta de rueda de moldeo, mediante a un selector ubicado en esta misma sala. Esta modalidad mejora la coordinación horno–moldeo y reduce el riesgo de desbordes o solidificación prematura. La transferencia se realiza con enclavamientos eléctricos para impedir mando simultáneo desde ambas posiciones.
- c) Modo de emergencia: Ante un corte de alimentación, el sistema dispone de un respaldo mencionado en 2.1.5 que permite, por un tiempo limitado, la posibilidad de mover el horno, con el fin de dejar al equipo en una condición segura, dejando los toberas/tubos fuera de baño y evitando que estos se tapen con cobre líquido. Al realizar esta maniobra al momento de que retorne la energía, se puede continuar el proceso con normalidad

2.2.2 Secuencia funcional de operación



Fuente: elaboración propia.

Figura 2-5. Secuencia funcional simplificada de operación del accionamiento DC basada en mando por pulsadores.

La operación del accionamiento DC se estructura como una secuencia de habilitación y mando por pulsadores, donde la excitación (campo) se establece previo al movimiento de armadura. La Figura 2-5 resume la lógica operacional y, a nivel funcional, la secuencia puede describirse a continuación:

- I. Condición de permisos (“Listo para habilitar”): para iniciar operación, la cadena de paro debe encontrarse restablecida, es decir, el pulsador Parar y la Parada de Emergencia (P.E.) deben estar en condición normal (contactos normal cerrados). En este estado, el sistema queda disponible para aceptar la orden de habilitación.

- II. Habilitación del accionamiento: al accionar Partir, el LOGO! habilita el SIMOREG de campo, energizando la excitación. En esta etapa el sistema queda “listo” pero aún no genera movimiento.
- III. Movimiento: el movimiento se ejecuta únicamente cuando el operador ordena Subir o Bajar, dada esta señal, el SIMOREG de armadura entra en servicio y regula el arranque de forma progresiva, ajustando corriente/tensión de armadura y excitación de campo para mantener el par requerido; al mismo instante, se libera el freno del motor.
- IV. Detención normal: la detención habitual se realiza mediante el pulsador Parar, ejecutando una parada controlada para evitar esfuerzos mecánicos bruscos en el tren de engranajes y reductores. Tras la detención, se inhibe el movimiento y se aplica el freno.
- V. Parada de emergencia (P.E.): al accionar la P.E., se abre la cadena de seguridad y se deshabilita el accionamiento (campo y armadura), aplicándose el freno. Para retomar operación se requiere restablecer la condición de seguridad (reset físico del pulsador) y reiniciar la secuencia desde Partir.
- VI. Cambio de sentido: el cambio de sentido de giro se realiza mediante los pulsadores Subir/Bajar, con enclavamientos para evitar órdenes simultáneas, el cambio se genera tras el restablecimiento de la habilitación.

2.2.3 Comportamiento operativo durante el proceso metalúrgico

En carguío/oxidación/reducción, el horno se opera desde la caseta de hornos, en la etapa de moldeo, el control se transfiere a la caseta de rueda de moldeo, donde el giro se coordina con cuchara intermedia y ruedas.

En esta etapa se concentran condiciones exigentes: el horno contiene el máximo volumen de metal y escoria, la inercia es mayor y la demanda de par aumenta. Bajo estas condiciones se han observado detenciones asociadas a eventos de sobrecarga (por ejemplo, disparos por sobrecorriente), con mayor recurrencia en el HA1. Esta observación se conecta directamente con el diagnóstico de confiabilidad y con el análisis de causa raíz desarrollado en este capítulo.

2.2.4 Limitaciones funcionales

En la práctica, el sistema actual cumple con proporcionar el giro del horno; sin embargo, lo hace con un nivel de monitoreo y apoyo a la operación limitado para las exigencias actuales del proceso. Estas restricciones se manifiestan en los siguientes aspectos:

- Visibilidad reducida de variables críticas: el sistema no incorpora instrumentación orientada a supervisión en línea (por ejemplo, medición integrada de torque, temperatura o señales equivalentes), lo que limita la posibilidad de evaluar el estado del accionamiento y su carga real durante la operación.
- Sin referencia de corriente (amperaje): al no disponer de una señal visible de la corriente del motor, el operador no cuenta con una “señal guía” que le permita anticipar cuándo el horno comienza a contrapesarse producto de las acreciones internas. Esto es especialmente relevante porque una de las fallas más recurrentes se presenta cuando la acreción aumenta hasta un punto en que el sistema motriz ya no logra mover el horno, generando detención e indisponibilidad del equipo.
- Trazabilidad limitada: el registro de eventos y condiciones de operación es limitado, dificultando reconstruir qué ocurrió antes de una parada, y reduciendo la efectividad de los análisis causa-raíz.
- Dificultad para reconocer tendencias y patrones: sin datos históricos consistentes, se vuelve complejo identificar comportamientos repetitivos lo que restringe la toma de decisiones basada en evidencia.

En síntesis, el sistema satisface la función básica de giro, pero lo hace con baja visibilidad del estado operacional y con trazabilidad mínima. Esta brecha entre lo que el proceso demanda y lo que el accionamiento puede “informar” al operador, sirve como una base técnica relevante para la modernización planteada en el Capítulo 3.

2.3 EVALUACIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA ACTUAL.

La evaluación técnica se realiza sobre los principales componentes del sistema eléctrico de control y fuerza, considerando condición técnica, obsolescencia, mantenibilidad y riesgos asociados.

Tabla 2-1. Evaluación técnica de componentes principales del sistema eléctrico de control y fuerza del HRF.

Componente	Estado Actual	Condición Técnica	Riesgo Asociado
Motor DC 40 HP doble bobinado	40+ años de operación	Desgaste en escobillas, pérdida de aislamiento y calentamiento por fatiga térmica	Alta probabilidad de falla eléctrica y pérdida de torque
Variador SIMOREG DC Master – Armadura (6RA7031-6GV62-0Z)	Descontinuado por Siemens (PM490)	Sin repuestos oficiales; dificultad para comunicación y diagnóstico	Alto riesgo de detención prolongada ante falla
Variador SIMOREG DC Master – Campo (6RA7025-6GS22-0Z)	Descontinuado por Siemens (PM490)	Sin repuestos oficiales; dificultad para comunicación y diagnóstico	Alto riesgo de detención prolongada ante falla
Autómata Siemens LOGO! (230RC)	Versión inicial sin comunicación Ethernet	Obsoleto, sin soporte técnico; sin capacidad de registro o monitoreo remoto	Baja capacidad de integración con sistemas modernos
Tableros eléctricos de fuerza	Componentes envejecidos, falta de ordenamiento y documentación parcial	Riesgo de sobrecalentamiento, falsos contactos y disparos intempestivos	Disminución de confiabilidad y seguridad eléctrica
Protecciones eléctricas (fusibles, disyuntores y contactores)	Parcialmente operativas; algunas sin calibración reciente	Sin actualización ni respaldo en caso de falla; carencia de protecciones diferenciales modernas	Falsas alarmas o ausencia de protección efectiva ante cortocircuitos
Sensores de monitoreo	No existen sensores eléctricos de corriente, torque o temperatura	N/A	Ausencia total de monitoreo predictivo o analítico del sistema

Fuente: Elaboración propia a partir de planos eléctricos de la Fundación Potrerillos, manuales técnicos de los equipos y documentación disponible en el sitio web del proveedor (2025).

En términos generales, el sistema ha sobrepasado su horizonte típico de vida útil para electrónica de potencia en ambientes exigentes, y su diagnóstico se apoya principalmente en operación y corrección reactiva. Esta condición incrementa el riesgo de detenciones prolongadas ante fallas de convertidores o del motor y refuerza la necesidad de un diagnóstico cuantitativo (confiabilidad y costos) y cualitativo (RCA y contrastación en terreno).

2.4 ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL

En este apartado se aplican herramientas de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad al comportamiento operacional de HA1 y HA2 durante 2024. El objetivo es cuantificar frecuencia de fallas, tiempos medios de reparación, disponibilidad

operacional y, posteriormente, conectar estos resultados con patrones de falla y causas dominantes.

2.4.1 Base de datos, severidad y métricas utilizadas

Los cálculos se realizan a partir de los registros disponibles del año 2024 (inicio, fin, equipo, severidad y duración). En este marco, se presenta primero la severidad de eventos como una lectura directa de “cómo se compone” el tiempo detenido.

Tabla 2-2: Resumen Severidad de Fallas de los Hornos de Ánodos (2024)

Severidad	N° de fallas	% sobre el total	Tiempo Total detenido (h)	% del tiempo total
Leve	7	29,17%	7,9	8,37%
Moderada	9	37,50%	20,17	21,32%
Grave	8	33,33%	66,5	70,31%
Total	24	100%	94,58	100%

Fuente: Elaboración propia a partir de registros de fallas de hornos de ánodos (Fundición Potrerillos, 2024).

Para el cálculo de la disponibilidad operacional se utiliza la fórmula presentada en la Ecuación 1-1, descrita en el apartado 1.4. Con el fin de normalizar el período de análisis, se adopta una base anual por horno de $H = 7.140$ h/año.

Esta base se obtiene considerando 340 días de referencia operacional, luego de descontar 25 días asociados a parada general de planta. A su vez, se considera una ventana operacional de 21 h/día, de acuerdo con el régimen del proceso HRF. Este criterio se justifica porque una carrera completa del horno tiene una duración aproximada de 10 a 11 horas y, en condiciones normales, se realizan como máximo dos carreras por día.

El tiempo restante entre carreras se destina a intervenciones programadas que requieren el horno sin carga, tales como reparación y parche de boca, repaso de toberas y reparación o recambio de canaletas hacia moldeo. Por esta razón, los indicadores MTBF,

MTTR y disponibilidad operacional (As) se calculan sobre el tiempo anual efectivamente disponible para operación.

$$H = (365 - 25) \left[\frac{\text{días}}{\text{año}} \right] * 21 \left[\frac{h}{\text{día}} \right] = 7140 \left[\frac{h}{\text{año}} \right]$$

2.4.2 Indicadores empíricos por equipo

A partir de la base 2024 se obtienen los indicadores que se presentan en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3. Indicadores de MTBF, MTTR y Disponibilidad (total de fallas, 2024).

Equipo	Fallas	Tiempo de Reparación	MTTR h	Tiempo de buen Funcionamiento	MTBF h	As
HA 1	19	77,22	4,064	7062,8	371,725	98,92%
HA 2	5	17,37	3,473	7122,6	1424,527	99,76%

Fuente: Elaboración propia a partir de registros de fallas de Fundación Potrerillos (2024)

Como complemento, y para mantener trazabilidad con el alcance del proyecto, se presenta la misma métrica restringida al subconjunto de fallas eléctricas/control.

Tabla 2-4. Indicadores restringidos a fallas eléctricas/control (2024).

Equipo	Fallas	TFS	MTTR h	TBF	MTBF h	As
HA 1	4	3,683	0,921	7136,3	1784,079	99,95%
HA 2	3	2,083	0,694	7137,9	2379,306	99,97%

Fuente: Elaboración propia a partir de registros de fallas de Fundación Potrerillos (2024)

2.4.3 Modelado probabilístico de confiabilidad y mantenibilidad

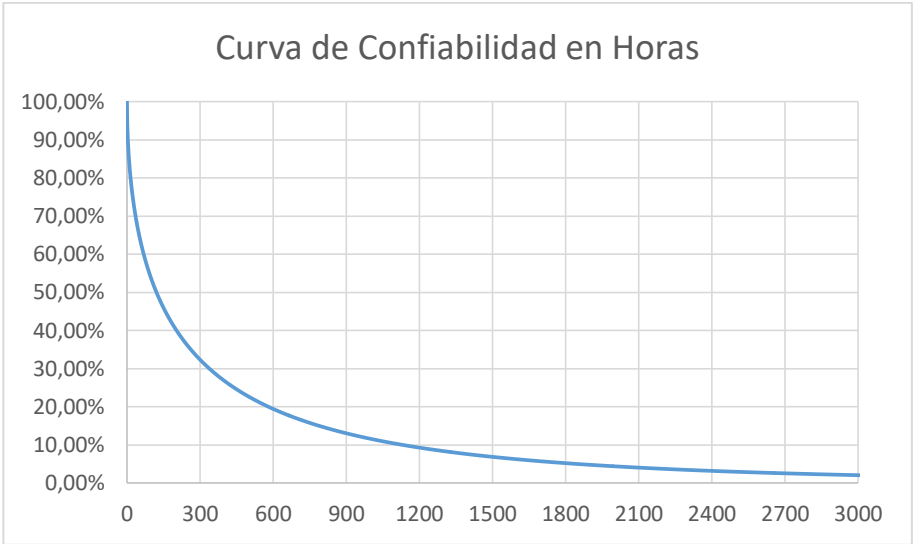
Además de los indicadores empíricos, se realizó un modelado probabilístico con el fin de describir: (i) la evolución de la probabilidad de operar sin fallas (confiabilidad $R(t)$) y (ii) la probabilidad de realizar la reparación dentro de un tiempo dado (mantenibilidad $M(t)$).

El ajuste se realizó sobre los datos de HA1, dado que este horno concentra la mayor frecuencia de fallas (mayor criticidad y tamaño muestral). En HA2, el número de eventos en el período analizado es reducido, lo que limita la robustez de un ajuste de distribución en el mismo horizonte anual.

Para el análisis se evaluó el ajuste mediante distribución de Weibull y se aplicó la prueba de Kolmogorov–Smirnov con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$. Bajo este criterio, la hipótesis de ajuste no fue rechazada, por lo que el modelo se considera aceptable como aproximación para interpretar el comportamiento de los datos disponibles. No obstante, este resultado debe entenderse como una herramienta de apoyo al diagnóstico y no como una representación definitiva del comportamiento futuro del activo, debido a las limitaciones propias del tamaño muestral y de la calidad del registro histórico.

El Gráfico 2-1 muestra la curva de confiabilidad $R(t)$ estimada para el HA1. Esta curva representa la probabilidad de que el equipo continúe operando sin presentar una nueva falla durante un intervalo de tiempo determinado. Los valores referenciales obtenidos son los siguientes:

- $t = 50 \text{ h:}$ $R(t) \approx 69,72\%$
- $t = 100 \text{ h:}$ $R(t) \approx 57,99\%$
- $t = 200 \text{ h:}$ $R(t) \approx 43,90\%$
- $t = 500 \text{ h:}$ $R(t) \approx 24,15\%$



Fuente: Elaboración propia a partir de registros de fallas 2024 (Fundición Potrerillos) y aplicación de metodología de confiabilidad vista en la asignatura Ingeniería de Confiabilidad I (Carlos Baldi, 2025).

Grafico 2-1. Curva de confiabilidad $R(t)$ del horno de ánodos HA1 para el período de análisis 2024.

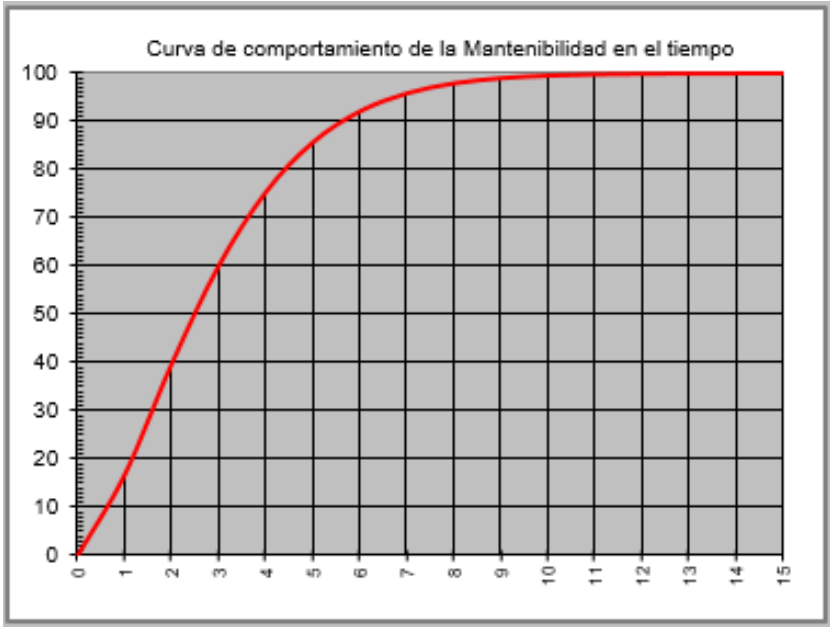
Estos resultados muestran una disminución progresiva de la probabilidad de operación sin falla a medida que aumenta el horizonte temporal, lo que es coherente con un equipo expuesto a condiciones variables de carga, envejecimiento de componentes y exigencias operacionales asociadas al ciclo HRF.

El Gráfico 2-2 presenta la curva de mantenibilidad $M(t)$ estimada para el HA1. Esta curva representa la probabilidad de recuperar el equipo dentro de un tiempo determinado una vez ocurrida la falla. Los valores característicos obtenidos son los siguientes:

- $t = 2 \text{ h: } M(t) \approx 39,7\%$
- $t = 3 \text{ h: } M(t) \approx 60,0\%$
- $t = 5 \text{ h: } M(t) \approx 85,6\%$
- $t = 8 \text{ h: } M(t) \approx 97,9\%$

El tiempo medio estimado por el modelo es 2,88 h, consistente con el orden de magnitud del MTTR empírico. Esto indica que, una vez iniciada la intervención, gran parte de los eventos puede ser recuperada en tiempos relativamente acotados. Sin

embargo, la disponibilidad anual del sistema no depende solo del tiempo de reparación, sino también de la frecuencia con que ocurren las detenciones.



Fuente: Elaboración propia a partir de registros de fallas 2024 y análisis con hoja de cálculo de confiabilidad del curso Ingeniería de Confiabilidad II (Carlos Parra, 2025).

Grafico 2-2. Curva de mantenibilidad $M(t)$ del sistema motriz del horno de ánodos HA1 para el período de análisis 2024.

2.4.4 Interpretación técnica de resultados

Los indicadores obtenidos muestran una diferencia operacional relevante entre HA1 y HA2. El HA1 presenta un menor MTBF respecto del HA2, lo que evidencia una mayor recurrencia de eventos de falla durante el período analizado. Asimismo, su disponibilidad operacional es menor, lo que confirma que este horno concentra una condición más desfavorable desde el punto de vista de continuidad operacional.

Esta diferencia se asocia, entre otros factores, al distinto estado estructural y operacional de los equipos. Mientras el HA2 fue renovado en 2022, el cambio estructural del HA1 se encuentra programado para mediados de 2026. En este sentido, el HA1

representa el caso más crítico y, al mismo tiempo, el equipo más adecuado para establecer la línea base de análisis y justificar la necesidad de modernización del sistema de giro.

Desde el punto de vista probabilístico, la curva de confiabilidad del HA1 refuerza esta interpretación, ya que muestra una disminución progresiva de la probabilidad de operación sin falla a medida que aumenta el horizonte temporal. Esto sugiere que el equipo está expuesto a una mayor recurrencia de eventos, lo que puede relacionarse con campañas prolongadas, variabilidad en la carga resistente, envejecimiento de componentes y limitaciones propias de la arquitectura actual.

Por otro lado, la curva de mantenibilidad indica que, una vez iniciada la intervención, la recuperación del sistema suele lograrse en tiempos acotados para la mayoría de los eventos. Sin embargo, el principal efecto sobre la disponibilidad anual no proviene únicamente de la duración individual de cada reparación, sino de la combinación entre frecuencia de fallas y tiempos fuera de servicio acumulados.

En un proceso donde el giro del horno se utiliza en ventanas operacionales críticas, especialmente durante el moldeo, esta condición adquiere mayor relevancia. Una detención del sistema de giro puede afectar la continuidad del ciclo HRF, la coordinación del traslado de cobre líquido mediante grúas puente y la estabilidad operacional de la línea de producción. Por ello, el análisis de confiabilidad y mantenibilidad permite justificar la necesidad de una intervención orientada no solo a reducir fallas, sino también a mejorar el diagnóstico, la trazabilidad y la capacidad de recuperación del sistema.

2.4.5 Patrones y categorías de falla del horno y foco abordable del sistema motriz

La revisión de registros 2024 permite agrupar los eventos en tres familias: mecánicas, proceso/operación y eléctricas/control. La Tabla 2-5 resume frecuencia anual, tiempo promedio fuera de servicio y su contribución al total de horas detenidas.

2.4.5.1 Alcance del análisis: indisponibilidad global vs. foco abordable del proyecto

En este capítulo, la indisponibilidad cuantificada representa una línea base global del HA. Sin embargo, dado que el alcance del proyecto se concentra en la modernización del subsistema eléctrico/control, se adopta una distinción: (i) indisponibilidad global, para dimensionar criticidad e impacto total; y (ii) indisponibilidad abordable (eléctrica/

control), para estimar el beneficio atribuible a la propuesta del Capítulo 3. Bajo esta lógica, la clasificación por familias permite separar el total anual (94,58 h/año) de la fracción eléctrica/control (5,77 h/año; 6,1%), manteniendo trazabilidad entre diagnóstico y propuesta.

Tabla 2-5. Familias de falla del sistema de giro (2024).

Resumen de Fallas por Especialidad				
Familia de fallas	FF [fallos/año]	TPFS [h/falla]	HFS [h/año]	% del total de HFS
Mecánicas	12	3,428	41,13	43,49%
Proceso / Operación	7	6,812	47,68	50,41%
Eléctricas / Control	5	1,153	5,77	6,10%
Total	24	3,94	94,58	100%

Fuente: Elaboración propia a partir de registros de fallas y antecedentes de mantenimiento, 2024.

La tabla muestra que proceso/operación y mecánicas contienen la mayor parte de horas detenidas (≈94%), mientras que eléctricas/control representan una fracción menor (≈6%). Aun así, esta fracción es clave para el proyecto porque está directamente vinculada al conjunto obsoleto (motor DC + SIMOREG + LOGO!) y a las limitaciones de diagnóstico y trazabilidad.

2.5 INTEGRACIÓN DEL ACR Y DIAGNÓSTICO TÉCNICO.

El diagnóstico se construye integrando: (i) resultados cuantitativos (MTBF, MTTR, As, curvas R(t) y M(t)), (ii) revisión de registros y documentación técnica, y (iii) contrastación en terreno mediante entrevistas a operadores y personal de mantenimiento y observación directa. Esta combinación permite evitar conclusiones basadas solo en percepción o, al revés, solo en indicadores sin contexto operacional.

2.5.1 Enfoque metodológico del análisis de causa raíz.

El RCA se desarrolla mediante diagrama de Ishikawa y técnica de los 5 Porqués, tal como se estableció en el Capítulo 1. Dado que la base histórica disponible registra eventos por inicio/fin, equipo, severidad y duración, el análisis causal se construye a nivel de familias/categorías, apoyado en entrevistas y documentación, evitando asumir modos de falla específicos cuando no están respaldados por el registro.

2.5.2 Diagrama de Ishikawa aplicado a la indisponibilidad del horno

El presente análisis se orienta a explicar la indisponibilidad operacional del horno de ánodos durante el ciclo HRF, entendida como detenciones no programadas y pérdidas de continuidad del proceso. En la práctica, estas detenciones pueden originarse por distintas especialidades y, dependiendo del evento, se manifiestan como restricciones para sostener el ciclo completo, incluyendo condiciones en que el horno no logra operar dentro de su capacidad esperada o se requiere detener para asegurar estabilidad del proceso y seguridad operacional.

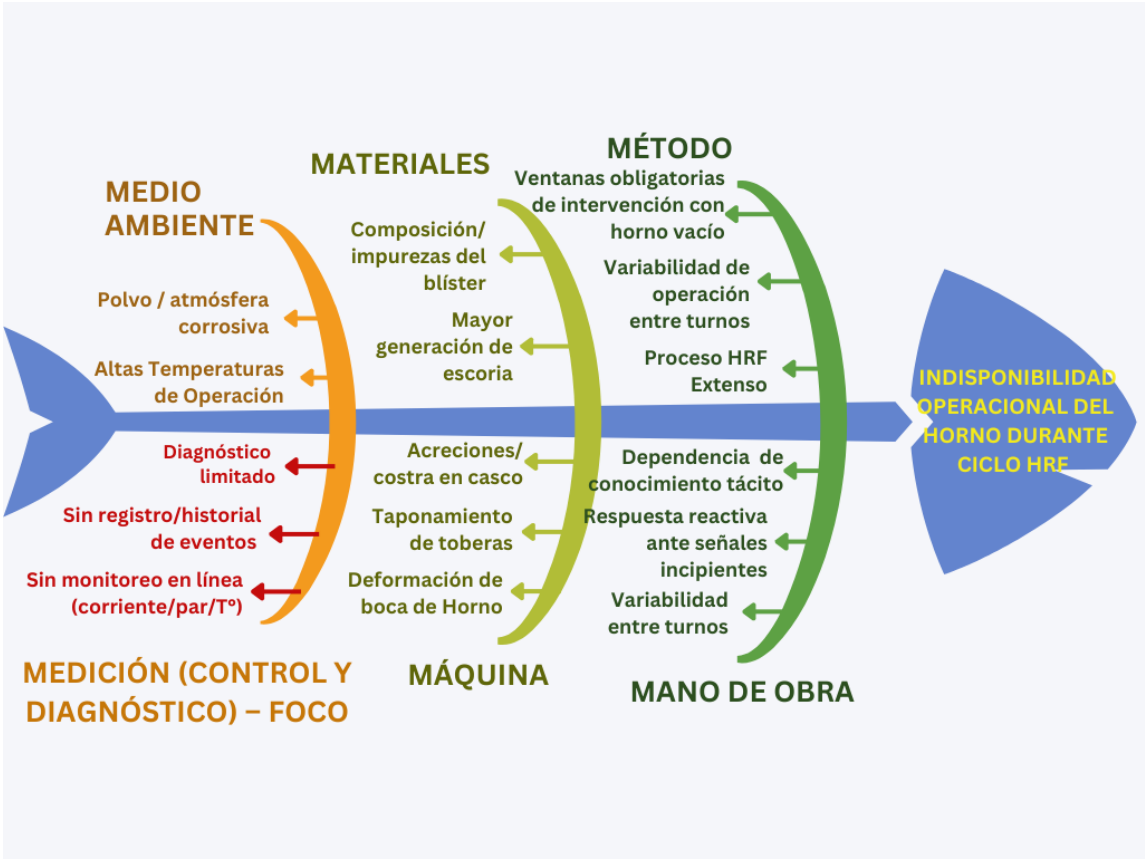
Para abordar el problema desde una perspectiva de análisis de causa raíz, se realizó un levantamiento de información que incluyó entrevistas a operadores y personal de mantenimiento, revisión de documentación eléctrica y mecánica, y análisis de registros históricos de fallas 2024. Con base en estos antecedentes, se construyó un diagrama de Ishikawa como mapa causal global, agrupando causas potenciales en seis categorías según la estructura clásica (6M). Este enfoque permite representar en una sola mirada tanto fenómenos propios del proceso HRF (por ejemplo, formación de escoria/costra, taponamientos de tubos/toberas, entre otras), como causas asociadas al accionamiento y su control.

Dado el alcance de esta memoria, la propuesta técnica del Capítulo 3 se concentra en la modernización del subsistema eléctrico y de control del accionamiento de giro. Por lo tanto, dentro del Ishikawa se prioriza la categoría “Medición (Control y Diagnóstico) – FOCO” para profundizar mediante el método de los 5 Porqués, asegurando trazabilidad entre diagnóstico y solución, sin que ello implique que las demás categorías sean menos críticas para la continuidad operacional del horno.

Con base en lo anterior, las causas se agrupan como sigue:

- **Máquina:** desgaste y holguras en la transmisión corona–piñón/reductores; aumento de inercia por acreciones/costra; condiciones del horno que elevan el par requerido; degradación de componentes mecánicos asociados al ciclo HRF.
- **Método:** ciclos HRF extensos; variabilidad en secuencias de operación; criterios operacionales no completamente estandarizados (ajustes de setpoints, duración de etapas, maniobras); ventanas de intervención obligatoria con horno vacío entre carreras.
- **Materiales:** composición/impurezas del cobre blíster (Fe, As, S) que favorecen formación de escorias/costras; variabilidad metalúrgica que impacta estabilidad del proceso y demanda de intervención.
- **Mano de obra:** dependencia del conocimiento tácito (experiencia práctica y criterios de la operación adquiridos en terreno, no formalizados en procedimientos, y por tanto dependientes de las personas y del turno.), ante señales tempranas de inestabilidad o sobrecarga.
- **Medición (Control y Diagnóstico) – FOCO:** arquitectura actual (LOGO! + SIMOREG) con capacidades limitadas de diagnóstico; ausencia de monitoreo en línea y registro de variables/eventos (picos de corriente, disparos repetitivos, tendencia de carga); baja trazabilidad para análisis post-falla y gestión de sobrecargas.
- **Medio ambiente:** altas temperaturas, polvo y atmósferas corrosivas propias de fundición que aceleran deterioro eléctrico/mecánico y elevan la probabilidad de fallas.

La representación gráfica de estas categorías y su relación con el efecto central se presenta en la Figura 2-6. En el apartado siguiente, se profundiza la rama priorizada mediante 5 Porqués, para identificar la causa raíz abordable desde el alcance de la modernización propuesta.



Fuente: Elaboración propia (diseño esquemático realizado por el autor, 2025).

Figura 2-6. Diagrama de Ishikawa del efecto - Rama FOCO: Medición (Control y Diagnóstico).

2.5.3 Método de los 5 Porqués aplicado a la rama foco.

En coherencia con el alcance del proyecto, la profundización mediante 5 Porqués se centra en la categoría Medición (Control y Diagnóstico), dado que el accionamiento y su control presentan limitaciones para anticipar sobrecargas, registrar eventos y apoyar diagnóstico oportuno.

Tabla 2-6. Aplicación de los 5 Porqués al sistema motriz del horno de ánodos.

Nivel de análisis	Pregunta “¿por qué...?”	Respuesta obtenida
Por qué 1	¿Por qué el horno no logra girar en forma adecuada bajo carga?	Porque el sistema de giro no logra sostener el par requerido y el movimiento se vuelve inestable o se detiene ante cargas elevadas.
Por qué 2	¿Por qué el sistema de giro no logra sostener el par requerido bajo cargas elevadas?	Porque la demanda de par/corriente supera el margen operativo del accionamiento del sistema motriz actual (motor DC + SIMOREG + control asociado), presentando disparos o pérdida de estabilidad.
Por qué 3	¿Por qué la demanda de par/corriente supera el margen operativo del sistema?	Porque el par requerido para el giro aumenta por incremento de resistencia/inercia del conjunto durante la operación.
Por qué 4	¿Por qué aumenta la resistencia/inercia del conjunto durante la operación?	Por la formación y acumulación de acreciones (costra/escoria) en el casco, lo que incrementa el peso/inercia y eleva el par necesario para girar.
Por qué 5	¿Por qué esta condición (mayor par requerido) termina generando detenciones recurrentes en vez de una operación controlada?	Porque el accionamiento y su arquitectura de control/protecciones presentan obsolescencia y limitaciones de instrumentación y trazabilidad (sin medición/registro en línea de variables críticas ni diagnóstico avanzado), lo que reduce el margen de control ante sobrecargas y favorece respuestas reactivas (disparos/reinicios) en lugar de una gestión controlada y repetible del aumento progresivo del par requerido

Fuente: Elaboración propia a partir de entrevistas, revisión de planos y análisis de operación (2025).

En términos prácticos, las causas apuntan a que el horno requiere par creciente (por inercia y acreciones), y el sistema actual presenta limitaciones de desempeño y trazabilidad para enfrentar ese escenario de manera estable. Dentro del alcance de esta memoria, la causa raíz abordable se asocia a la obsolescencia del accionamiento y a las limitaciones de control/diagnóstico, lo que fundamenta la modernización propuesta.

2.5.4 Jerarquización de causas técnicas dominantes.

Integrando datos y evidencia en terreno, el diagnóstico se resume en:

- El patrón HA1 vs HA2 muestra una asimetría operacional consistente con el distinto estado estructural de los equipos: HA2 fue renovado en 2022, mientras que el cambio estructural de HA1 está programado para mediados de 2026.
- El problema no se comporta como una falla puntual aislada, sino como una brecha creciente entre la arquitectura del accionamiento y las exigencias actuales del proceso, particularmente bajo condiciones de mayor demanda de par.
- El foco eléctrico/control, aunque menor en horas de indisponibilidad, concentra riesgos relevantes por obsolescencia y por limitaciones de diagnóstico/registro, lo que incrementa la vulnerabilidad ante eventos de sobrecarga y dificulta la trazabilidad de fallas.

2.6 COSTO DE INDISPONIBILIDAD POR FALLOS (CIF) DE HORNOS Y SU SISTEMA MOTRIZ

Los indicadores de confiabilidad (frecuencia de fallas y tiempos de reparación) describen el comportamiento del activo, pero para priorizar decisiones de inversión y gestión de mantenimiento se requiere traducir la indisponibilidad a impacto económico. Para ello se utiliza el Costo de Indisponibilidad por Fallos (CIF), que estima el costo anual asociado a detenciones por fallas.

En este trabajo, la formulación se aplica en dos niveles:

- CIF global (todas las fallas del horno): incluye fallas mecánicas, de proceso/operación y eléctricas/control.
- CIF eléctrico/control (sistema de giro): subconjunto asociado al alcance del proyecto (accionamiento y control), utilizado como línea base para el análisis económico del Capítulo 3 (ACCV/LCC).

Nota: el desarrollo completo de ecuaciones, supuestos y cálculos intermedios se presenta en el Anexo G (Cálculo de CP y CIF).

2.6.1 Estimación del costo horario de no producción (CP) y simplificación adoptada.

Para el concepto *CSHA* (seguridad, higiene o ambiente), tanto el período analizado (registros 2024), como en el horizonte histórico de los últimos 10 años, no se identificaron detenciones del horno de ánodos y de su sistema de giro asociadas a *CSHA*, ni se registraron costos atribuibles a este concepto. Por lo anterior, y exclusivamente para efectos de cuantificación económica de la indisponibilidad en el modelo CIF, se adopta:

$$CSHA = 0$$

- **Estimación de CP a partir de margen operacional (utilidad)**

Los valores agregados utilizados (precio de referencia y costo unitario) fueron consolidados a partir de reportes y bases internas provistas por jefaturas de operación y por el equipo de análisis de proceso. Por políticas de confidencialidad, no se publica el desglose por ítem; sin embargo, los valores agregados son suficientes para sustentar el modelo CIF y la comparación económica de alternativas. Como validación externa del orden de magnitud, el precio de referencia se contrastó con fuentes públicas, y los valores son del mismo orden de las proyecciones del precio difundidas (COCHILCO, s. f.).

- Producción diaria referencial: $Q_d = 500$ [Ton/día].
- Precio de referencia: $P_{ton} = 12.502,35$ [USD/Ton] (COCHILCO, s. f.)
- Costo de producción unitario: $C_{ton} = 5.512,50$ [USD/Ton] (COCHILCO, s. f.)
- Factor de paralelo parcial: $F_{pp} = 0,33$

La utilidad diaria se expresa como:

$$U_d = Q_d * (P_{ton} - C_{ton})$$

y el costo diario de no producción por horno:

$$CP_d = U_d * F_{pp}$$

Finalmente, el costo horario de no producción queda como:

$$CP_h = \frac{CP_d}{21} = 54.920,25 \left[\frac{USD}{h}\right]$$

Costos de mano de obra y repuestos (CC). Para mantener el modelo enfocado en el impacto dominante, se adopta una simplificación: los costos directos típicos de mano de obra y repuestos son marginales frente a CP_h , por lo que su contribución al CIF resulta despreciable en comparación con el costo de no producción. El respaldo numérico de esta decisión se deja en el Anexo G.

En consecuencia, se adopta la aproximación operativa:

$$CIF \approx FF \times TPFS \times CP$$

donde FF es la frecuencia anual de fallas [fallas/año], TPFS el tiempo promedio fuera de servicio [h/falla] y CP_h el costo horario de no producción [USD/h].

2.6.2 CIF por totalidad de fallas y por fallas eléctricas/control (sistema de giro)

Se estima el costo anual de no producción en dos niveles:

- a) CIF global (todas las fallas del horno). Los resultados consolidados se presentan en la Tabla 2-7, observándose una mayor concentración del costo en HA1, coherente con su mayor frecuencia de fallas y/o mayor tiempo fuera de servicio.

Tabla 2-7. Estimación del costo anual de no producción por el total de fallas.

Total de Fallas					
Horno	FF [f/año]	TPFS [h/f]	HFS [h/año]	CP [hora]	CIF aproximado [año]
HA1	19	4,064	77,217	USD 54.920,25	USD 4.240.758,64
HA2	5	3,473	17,367	USD 54.920,25	USD 953.781,68
Global	24	3,94	94,583	USD 54.920,25	USD 5.194.540,31

Fuente: Elaboración propia (registros 2024 y estimaciones de costo de producción).

b) CIF eléctrico/control (sistema de giro). Los resultados consolidados se presentan en la Tabla 2-8. Este valor corresponde al subconjunto directamente alineado con el alcance del proyecto (electricidad/control del accionamiento), y por tanto constituye el insumo económico base para el ACCV del Capítulo 3.

Tabla 2-8. Estimación del costo anual de no producción por fallas eléctricas/control.

Fallas Eléctricas						
Horno	FFe [f/año]	TPFSe [h/f]	HFSe [h/año]	CP [USD/hora]	CIF eléctrico aproximado [año]	F Electricas / F Totales (%)
HA1	3	1,228	3,683	USD 54.920,25	USD 202.271,28	4,77%
HA2	2	1,042	2,083	USD 54.920,25	USD 114.398,88	11,99%
Global	5	1,153	5,766	USD 54.920,25	USD 316.670,16	6,10%

Fuente: Elaboración propia (registros 2024 y estimaciones de costo de producción).

En términos relativos, el CIF eléctrico/control representa una fracción menor del total anual; sin embargo, su relevancia está en que se asocia a un subsistema con condición de obsolescencia y con limitaciones de diagnóstico/trazabilidad, lo que eleva el riesgo de detenciones prolongadas y de recurrencia.

2.6.3 Sensibilidad disponibilidad–costo

Como complemento para interpretar magnitudes, se muestra la relación directa entre indisponibilidad y costo anual, usando la base por horno:

- Horas indisponibles:

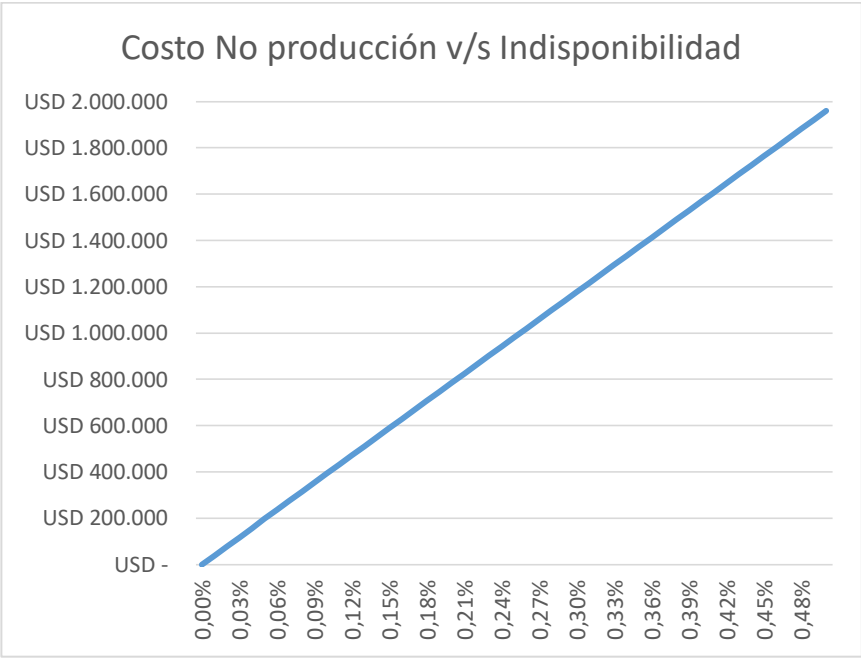
$$HFS = (1 - A_{SH}) * H_{año}$$

- Costo anual por indisponibilidad:

$$CIF = (1 - A_{SH}) * H_{año} * CP$$

Con H = 7.140 h/año y CP = 54.920,25 USD/h, una variación de 0,1% en disponibilidad equivale aproximadamente a 392.000 USD/año

El Grafico 2-3 y la Tabla 2-9 presentan ejemplos de conversión de indisponibilidad a horas y costo anual, con el objetivo de visualizar el orden de magnitud del impacto económico.



Fuente: Elaboración propia, en base a datos recopilados

Grafico 2-3. Sensibilidad del CIF anual frente a indisponibilidad operacional.

Tabla 2-9. Conversión de disponibilidad e indisponibilidad anual a horas y costo de no producción.

Disponibilidad Anual	Indisponibilidad Anual (1-As)	Horas Indisponibles	Costo No producción
99,99%	0,01%	0,71	USD 39.213
99,986%	0,014%	1	USD 54.920
99,95%	0,05%	3,57	USD 196.065
99,745%	0,255%	18,21	USD 1.000.000
99,706%	0,294%	21	USD 1.153.325

Fuente: Elaboración propia (H = 7.140 h/año; CP = 54.920,25 USD/h).

Los resultados anteriores establecen la base económica del Capítulo 2 y conectan directamente con el Capítulo 3, donde se evalúan alternativas de modernización mediante ACCV/LCC, contrastando inversión con ahorros esperados en el CIF eléctrico/control.

2.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.

En este capítulo se diagnosticó el sistema de control y fuerza del giro de hornos de ánodos desde tres ángulos que, juntos, se complementan bien: descripción técnica del sistema actual, cuantificación de desempeño (confiabilidad-mantenibilidad-disponibilidad) y análisis causal (RCA) con contrastación en terreno.

Los indicadores muestran una asimetría operacional relevante: HA1 concentra la mayor frecuencia de fallas, presenta menor MTBF y, por consecuencia, menor disponibilidad operacional que HA2. El modelado probabilístico realizado sobre HA1 (por criticidad y tamaño muestral) refuerza la lectura de un sistema sensible a campañas prolongadas, con restauración usualmente acotada en tiempo, pero con impacto acumulado significativo por recurrencia de detenciones.

La clasificación por familias permite separar la indisponibilidad global (94,58 h/año) de la fracción eléctrica/control (5,77 h/año; 6,1%), manteniendo coherencia con el alcance del proyecto. Aunque la fracción eléctrica/control es menor en horas, su

importancia radica en la obsolescencia del accionamiento (DC + SIMOREG + LOGO!) y en las limitaciones de diagnóstico y trazabilidad.

Finalmente, al traducir indisponibilidad a costo, el CIF global se estima del orden de 5,19 MUSD/año, y el CIF eléctrico/control del orden de 0,316 MUSD/año. Esta cuantificación, sumada a la sensibilidad disponibilidad–costo (donde cambios pequeños en As pueden representar decenas o cientos de miles de USD/año), deja una base sólida para justificar técnica y económicamente la modernización propuesta en el Capítulo 3, que será evaluada mediante Análisis de Costos de Ciclo de Vida (ACCV/LCC).

CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA
MOTRIZ

3. **PROPUESTA DE MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA MOTRIZ**

El Capítulo 2 permitió cuantificar el impacto técnico y económico de las fallas del sistema motriz de los hornos de ánodos HA1 y HA2, identificando que las detenciones asociadas al subsistema eléctrico y de control representan un costo anual de no producción del orden de 0,316 millones de USD. Estas fallas, aunque minoritarias en términos de horas de indisponibilidad, se concentran en un sistema de accionamiento en corriente continua obsoleto, sin soporte de fabricante y con capacidades limitadas de diagnóstico, lo que las convierte en un punto crítico para la continuidad del proceso HRF.

En este capítulo se desarrolla una propuesta de modernización del sistema motriz eléctrico, basada en la sustitución del motor de corriente continua y su convertidor asociado por un accionamiento en corriente alterna comandado por variador de frecuencia (VDF) y controlado mediante un PLC con interfaz HMI. La propuesta se analiza desde dos dimensiones complementarias: por una parte, su viabilidad técnica y su contribución esperada a la confiabilidad del sistema; por otra, su desempeño económico a lo largo del ciclo de vida, evaluado mediante la metodología de Análisis de Costos de Ciclo de Vida (ACCV).

A continuación se describe la arquitectura técnica de la solución propuesta (sección 3.1), se compara su desempeño con el sistema actual (sección 3.2) y se presenta el diseño eléctrico y de control asociado (sección 3.3). Posteriormente se estima la mejora esperada en los indicadores de confiabilidad del sistema motriz (sección 3.4) y se evalúa económicamente la inversión requerida mediante ACCV (sección 3.5). Finalmente, se integran los resultados técnicos y económicos para seleccionar la alternativa más conveniente y formular recomendaciones para su implementación (secciones 3.6 y 3.7).

3.1 **PROPUESTA TÉCNICA DE MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA MOTRIZ.**

La propuesta busca reemplazar el accionamiento de corriente continua actualmente instalado en el giro de los Hornos de Ánodos (motor DC 40 HP + convertidores SIMOREG + control LOGO!) por un sistema de corriente alterna, motor AC + VDF +

condición del conjunto corona-piñón debe ser considerada en una etapa posterior de ingeniería de detalle y puesta en marcha.

3.1.1 Propósito y alcance de la modernización

El propósito principal de la modernización es mejorar la disponibilidad operacional y la mantenibilidad del sistema de giro del horno de ánodos, actuando sobre las limitaciones asociadas al subsistema eléctrico y de control. Para ello, se propone migrar desde una arquitectura de corriente continua con capacidades limitadas de diagnóstico hacia una arquitectura de corriente alterna con variador de frecuencia, PLC e interfaz HMI.

Desde el punto de vista técnico, la propuesta busca incorporar un accionamiento con mejor capacidad de control de torque y velocidad, mayor disponibilidad de repuestos, mejor integración con señales de operación y mayores posibilidades de diagnóstico. Desde el punto de vista del mantenimiento, se espera que la modernización permita reducir la dependencia de inspecciones locales y facilitar la identificación de fallas mediante alarmas, registro de eventos y visualización de variables relevantes del sistema.

El alcance de la propuesta se concentra en el sistema eléctrico de control y fuerza del accionamiento de giro. Por lo tanto, no considera el rediseño integral del horno, del proceso HRF ni del tren mecánico completo. Sin embargo, se reconoce que las condiciones mecánicas y estructurales del horno influyen directamente en la carga exigida al sistema motriz, por lo que la solución propuesta debe ser validada considerando las condiciones reales de operación, especialmente durante maniobras de posicionamiento y moldeo.

En términos funcionales, la modernización busca aportar en cuatro ámbitos principales: mejorar la capacidad de control del giro, aumentar la trazabilidad de eventos, facilitar el diagnóstico de fallas y reducir la incertidumbre durante intervenciones de mantenimiento. Estos elementos permiten conectar la propuesta con los hallazgos del diagnóstico, especialmente con las limitaciones identificadas en medición, control y diagnóstico del sistema actual.

3.1.2 Requerimientos funcionales y criterios de selección.

La arquitectura propuesta se define a partir de los requerimientos reales del sistema de giro, las condiciones del ambiente de fundición y el objetivo central del proyecto:

reducir la indisponibilidad atribuible al subsistema eléctrico/control mediante eliminación de obsolescencia y mejora del diagnóstico.

Para ordenar estos requerimientos, se agrupan en cuatro dimensiones:

- 1. funcionalidad del movimiento (torque/velocidad/maniobras),
- 2. condiciones de operación y ambiente industrial,
- 3. seguridad y continuidad operativa, e
- 4. integración, diagnóstico y mantenibilidad.

La Tabla 3-1 traduce estos requerimientos en criterios de diseño, componente impactado y forma de verificación. Complementariamente, la Tabla 3-2 define los criterios mínimos por componente, asegurando robustez industrial y trazabilidad.

Tabla 3-1. Requerimientos del sistema de giro y criterios asociados a diseño y verificación

Requerimiento	Criterio de diseño (cómo se garantiza)	Componente impactado	Verificación / evidencia
Entrega de par a baja velocidad	VDF con control vectorial + motor dimensionado por par requerido	Motor / VDF	Ficha técnica + parametrización VDF
Control estable de velocidad	Regulación vectorial, rampas ajustadas, límites de par/velocidad	VDF / PLC	Pruebas de puesta en marcha
Arranques/detenciones/inversión controladas	Rampas + enclavamientos PLC (no invertir si no está a velocidad cero)	PLC / VDF	Lógica PLC + pruebas funcionales
Tolerancia a sobrecargas transitorias	Capacidad de sobrecarga del VDF y protecciones coordinadas	VDF	Curva de sobrecarga del fabricante
Estandarización de maniobras	Modos predefinidos en HMI (normal/carga alta)	PLC / HMI	Pantallas HMI + listas de parámetros
Ambiente agresivo (polvo/temperatura)	IP adecuado + gabinete industrial + ventilación si aplica	Motor / Gabinete	Ficha IP + diseño de gabinete
Interferencias (EMC)	Puesta a tierra + apantallamiento + segregación de cables + filtros si aplica	Integración	Especificación de cableado y montaje
Cable largo VDF–motor	Evaluación de reactor de salida o filtro dv/dt (HA1≈40 m; HA2≈70 m)	Integración / VDF	Recomendación fabricante + diseño
Seguridad operativa	Parada de emergencia integrada y procedimiento de bloqueo/aislamiento de energías	Integración / PLC	Revisión de circuito P.E. + procedimiento
Diagnóstico y trazabilidad	Registro de eventos, alarmas, variables críticas y causa de trip	PLC / HMI / VDF	Históricos, alarmas
Mantenibilidad	Respaldo de parámetros, documentación, modularidad y repuestos	VDF / PLC	Checklist de documentación

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-2. Criterios mínimos de selección por componente para el sistema propuesto.

Componente	Criterios mínimos de selección	Justificación
Motor AC	Motor apto para operación con VDF (aislación/diseño adecuados), sensores térmicos, IP industrial, compatibilidad mecánica con transmisión	Evitar fallas por aislamiento y asegurar operación en ambiente exigente
VDF vectorial	Control vectorial (sin realimentación o con encoder según estabilidad requerida), sobrecarga adecuada, diagnóstico y registro de fallas, accesorios (reactancia/filtros) según instalación	Robustez a baja velocidad, par requerido y trazabilidad de fallas
PLC + HMI	Lógica de enclavamientos, alarmas y secuencias; HMI con pantallas de estado/alarma; comunicaciones industriales con VDF; estructura replicable a HA2	Estandarización operativa y reducción de MTTR eléctrico
Integración eléctrica	Segregación potencia/control, apantallamiento y tierra, coordinación con protecciones, parada de emergencia, procedimiento de bloqueo/aislamiento, documentación completa	Seguridad y confiabilidad global del sistema modernizado

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3 Dimensionamiento preliminar y definición de componentes de la arquitectura propuesta.

El dimensionamiento de la propuesta se desarrolla a nivel preliminar, para mantener trazabilidad entre los requerimientos definidos en la sección 3.1.2 y la selección de componentes (motor AC, VDF, PLC/HMI e integración). Dado que la documentación disponible no incluye parámetros críticos del tren mecánico, esta etapa se apoya en antecedentes verificables del sistema actual y deja definido el método de levantamiento en terreno para cerrar los datos faltantes, evitando introducir supuestos no comprobables. Los cálculos de respaldo y registros complementarios se incorporan en Anexo A.

3.1.3.1 Datos de entrada y restricciones del sistema

Para el dimensionamiento preliminar se consideran las condiciones eléctricas reales de planta, la potencia instalada del sistema actual y las restricciones físicas asociadas a montaje y canalizaciones. La Tabla 3-3 resume los datos base utilizados y los parámetros pendientes de verificación para la ingeniería de detalle.

Tabla 3-3. Datos de partida y supuestos para el dimensionamiento preliminar del accionamiento propuesto (HA1 como caso base).

Parámetro	Valor / condición	Fuente	Uso en el diseño / observación
Alimentación disponible para VDF	400 V, 50 Hz	Operación / sala eléctrica	Base para selección de VDF clase 400 V
Potencia motor actual (DC)	40 HP ≈ 30 kW	Placa motor repuesto	Referencia de equivalencia para motor AC
Ubicación del motor	Mismo emplazamiento (costado del horno)	Inspección / operación	Mantiene condiciones ambientales y mecánicas de montaje
VDF en sala eléctrica	Sí (tableros actuales)	Definición de proyecto	Define recorridos de cable y medidas EMC/dv/dt
Distancia cable VDF–motor (HA1)	40 m (recorrido real de canalización)	Confirmación en terreno	Define requisitos de cable apantallado/puesta a tierra
Distancia cable VDF–motor (HA2)	70 m (recorrido real de canalización)	Confirmación en terreno	Mayor exigencia: evaluar reactor/filtro dv/dt
Velocidad nominal motor actual DC	1750 rpm (motor)	Placa/estándar	Es velocidad del motor, no del horno (hay reducción)
Rampa 0–100%	4 s	Práctica actual / control	Parámetro de referencia para aceleración
Transmisión mecánica	Motor → reductor 1 → reductor 2 → corona horno	Observación / conocimiento de equipo	Relación total no documentada en el período
Relación total de reducción (i_total)	No disponible (por ahora)	—	Se verificará en ingeniería de detalle / medición en terreno
Velocidad real de giro del horno	No disponible (por ahora)	—	Se verificará con medición de rpm o tiempo por vuelta

Fuente: Elaboración propia.

Nota técnica: La velocidad del motor DC se utiliza aquí como referencia funcional, y se verificará en ingeniería de detalle para fijar velocidad base, rango de operación y márgenes de control con VDF.

3.1.3.2 Transmisión existente y velocidad efectiva del giro

El sistema de giro utiliza un tren de transmisión existente con dos etapas de reducción previas a la corona del horno (motor → reductor 1 → reductor 2 → corona). Durante el período de estudio no se dispone, en la documentación revisada, de la relación total de reducción ni de sus relaciones parciales.



Fuente: Elaboración propia (registro en terreno).

Figura 3-2. Tren de transmisión existente (motor–R1–R2–corona) y punto de intervención eléctrica.

En consecuencia, el dimensionamiento se trabaja en dos niveles:

- Nivel preliminar (este capítulo): se define la selección eléctrica del motor/VDF bajo criterios de robustez industrial y capacidad de sobrecarga, usando como referencia la potencia instalada ($40 \text{ HP} \approx 30 \text{ kW}$) y la condición de alto par a baja velocidad propia del giro.
- Ingeniería de detalle (verificación en terreno): se levantan relación de transmisión y velocidad real del horno mediante, (i) medición de velocidad (tacómetro en eje/corona) y (ii) verificación operativa por tiempo por vuelta o parámetros de operación.

Con este enfoque, la selección final del motor AC (par nominal) y la parametrización del VDF (límites de par/corriente, rampas) queda alineada con el comportamiento real del giro, sin depender de supuestos no validados.

3.1.3.3 Selección preliminar de motor AC

Se considera un motor de inducción trifásico apto para operación con VDF, con sensores térmicos y grado de protección industrial acorde al ambiente. Como base

preliminar se adopta potencia equivalente a la instalada (≈ 30 kW), dejando la verificación de par requerido para la ingeniería de detalle una vez determinada la relación total de transmisión y el perfil de carga del giro.

La selección preliminar se orienta a:

- asegurar capacidad de operación a baja velocidad con alto par (apoyada por control vectorial),
- tolerar sobrecargas transitorias sin disparos intempestivos, y
- mantener compatibilidad mecánica con el montaje existente, minimizando ajustes.

Los cálculos de par equivalente, márgenes de sobrecarga y verificación de régimen de servicio se presentan en el Anexo A.

3.1.3.4 Selección preliminar de VDF y criterios de instalación (40 m / 70 m)

Se selecciona un VDF vectorial de clase industrial, con capacidad de sobrecarga coherente con el giro, diagnóstico y registro de fallas, y facilidades de puesta en marcha (respaldo de parámetros y trazabilidad de alarmas).

Dado que el tendido VDF–motor es de aproximadamente 40 m en HA1 y 70 m en HA2, se incorporan criterios de mitigación por conmutación PWM:

- EMC: cable apantallado, puesta a tierra correcta, segregación potencia/control y filtros si aplica por estándar de planta.
- dv/dt : evaluación de reactor/filtro de salida según longitud, aislación del motor y recomendaciones del fabricante. Para HA2 (≈ 70 m) se define como requisito preliminar la evaluación obligatoria de protección dv/dt en ingeniería de detalle.

El detalle de instalación y criterios por longitud de cable se documenta en el Anexo D.

3.1.3.5 PLC/HMI e integración básica

El control se implementa con PLC y HMI (o equivalente) para estandarizar maniobras, registrar eventos y reducir tiempos de diagnóstico e intervención. A nivel preliminar se define: filosofía de control, estructura mínima de alarmas y registro, comunicación industrial PLC–VDF–HMI y coordinación con parada de emergencia y procedimiento de bloqueo/aislamiento de energías de planta.

El detalle de criterios de dimensionamiento y consideraciones de instalación se presenta en el Anexo D.

Con lo anterior se establece una base técnica preliminar para la arquitectura propuesta, dejando explícitos los parámetros a verificar y la metodología para cerrarlos en ingeniería de detalle. En la sección 3.2 se compara la propuesta con el sistema actual en términos de capacidades, diagnóstico y efecto esperado sobre disponibilidad.

3.2 COMPARACIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA ACTUAL Y DEL SISTEMA PROPUESTO.

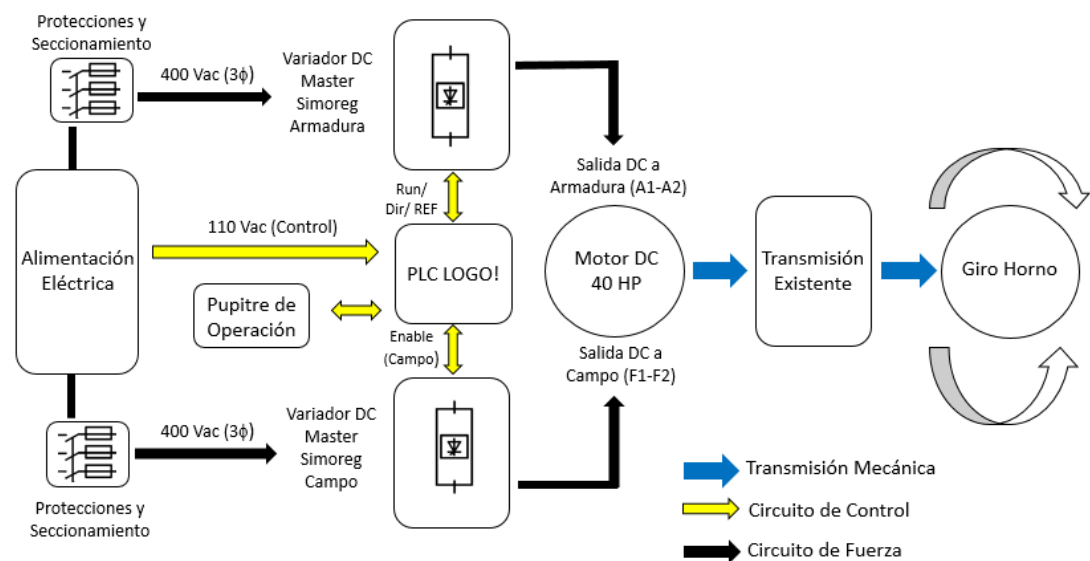
El objetivo de esta sección es comparar el accionamiento actual del giro, con la arquitectura propuesta, identificando brechas que afectan la disponibilidad del subsistema eléctrico y de control. El enfoque se limita a confiabilidad, diagnóstico y mantenibilidad, en coherencia con el diagnóstico del Capítulo 2 y con los requerimientos definidos en 3.1.

3.2.1 Sistema actual (DC + SIMOREG + LOGO!): limitaciones relevantes

El sistema actual corresponde a un accionamiento DC comandado por convertidores SIMOREG (armadura y campo) y controlado por un LOGO!. Como se describió en la sección 2.2.4, sus principales debilidades se reflejan en baja visibilidad operativa y trazabilidad limitada, lo que termina alargando diagnóstico e intervención.

Principales limitaciones con impacto en disponibilidad:

- Obsolescencia y soporte: restricciones de repuestos, soporte técnico.
- Trazabilidad diagnóstica limitada: menor visibilidad de causas previas a una detención (eventos/condiciones), lo que alarga el diagnóstico.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-3. Esquema funcional del accionamiento actual en corriente continua para el giro del horno.

3.2.2 Sistema propuesto (AC + VDF + PLC/HMI): capacidades incorporadas

La arquitectura propuesta reemplaza el accionamiento DC por un motor AC alimentado por VDF e integrado a PLC/HMI. El foco es eliminar la obsolescencia del subsistema eléctrico/control y mejorar diagnóstico y estandarización, con efecto esperado en la reducción de duración y repetitividad de detenciones de origen eléctrico/control.

Capacidades incorporadas con impacto directo:

- Control de torque/velocidad: mejor estabilidad a baja velocidad mediante control vectorial y protecciones configurables.
- Diagnóstico y registro: alarmas/eventos/trips con trazabilidad, apoyando análisis repetitivo y reducción de MTTR eléctrico.
- Estandarización e integración: modos, permisos y enclavamientos definidos en PLC/HMI; comunicación industrial PLC–VDF–HMI y arquitectura preparada para aplicarse posteriormente en HA2.

3.2.3 Matriz comparativa y brechas principales

La Tabla 3-4 resume la comparación entre el sistema actual y el propuesto, destacando diferencias que afectan la disponibilidad por confiabilidad, diagnóstico y mantenibilidad del subsistema eléctrico/control.

Tabla 3-4. Comparación técnica entre sistema actual y sistema propuesto (criterios relevantes para disponibilidad).

Criterio	Sistema actual (DC + SIMOREG + LOGO!)	Sistema propuesto (AC + VDF + PLC/HMI)	Impacto esperado
Estado tecnológico/soporte	Plataforma obsoleta, limitaciones de soporte/repuestos	Plataforma vigente, mayor disponibilidad de repuestos/servicio	Reduce riesgo por obsolescencia
Control a baja velocidad	Dependiente de arquitectura DC y estado de componentes	VDF vectorial con control de par/velocidad	Mayor estabilidad operacional
Diagnóstico de fallas	Trazabilidad limitada	Registro de fallas/eventos + variables	Reduce MTTR eléctrico
Registro histórico	Bajo o no estandarizado	Histórico de alarmas/estados/variables	Mejora análisis repetitivo
Estandarización de maniobras	Mayor variabilidad por criterio operador	Modos, consignas, límites y enclavamientos	Disminuye variabilidad operacional
Protecciones configurables	Limitadas o difíciles de optimizar	Protecciones del VDF + lógica PLC	Menos disparos intempestivos / mejor selectividad
Respaldo de parámetros	Dependiente de prácticas locales	Backups de VDF/PLC, documentación estándar	Recuperación más rápida
Integración y comunicaciones	Restringida	Protocolos industriales PLC-VDF-HMI	Mejor integración y escalabilidad
Instalación EMC/dv/dt	No diseñado para PWM (según implementación)	Considera cableado apantallado/tierras/filtros según longitud	Reduce interferencias/riesgos eléctricos
Replicabilidad a HA2	Baja estandarización	Librerías, tags y estructura replicable	Acelera futuras modernizaciones

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4 Síntesis e implicancias para confiabilidad, diagnóstico y ACCV

En síntesis, la modernización no se limita al reemplazo del motor: introduce una arquitectura con mejores capacidades de protección, diagnóstico y estandarización operativa, reduciendo el riesgo asociado a obsolescencia y mejorando la recuperación ante fallas. Estas brechas son consistentes con el diagnóstico del Capítulo 2 y sustentan el efecto esperado en MTTR eléctrico y en el CIF eléctrico/control, que se utiliza como entrada para la evaluación económica del ACCV (sección 3.5).

3.3 DISEÑO ELÉCTRICO Y DE CONTROL DE LA PROPUESTA

La modernización no se trata solo de “cambiar el motor”, sino de dejar el accionamiento con una lógica de operación más clara, protecciones coordinadas y capacidad real de diagnóstico. En términos prácticos, la propuesta separa lo esencial en dos capas:

- i. Potencia y protecciones (cómo se alimenta y protege el motor/VDF), y
- ii. Control y supervisión (cómo se habilita la marcha, qué enclavamientos se exigen y qué información queda registrada para mantenimiento).

El diseño presentado en esta sección es conceptual/preliminar y busca definir la arquitectura y su funcionamiento. La emisión de planos constructivos, bornes, rutas de cable y especificaciones finales queda para la ingeniería de detalle.

3.3.1 Diseño del circuito de potencia y protecciones

La alimentación del VDF se considera desde la red trifásica existente 400 Vac, 50 Hz, incorporando seccionamiento y protecciones coordinadas considerando requisitos de seguridad eléctrica y control seguro del accionamiento para asegurar operación y mantenimiento seguro (Comisión Electrotécnica Internacional [IEC], 2016; IEC, 2022)

A nivel funcional, el circuito incluye:

- Protección principal (QF1/MCCB) para entrada del VDF,
- Contactor de habilitación (KM1) como elemento de corte/permiso,
- VDF vectorial como equipo de control de par/velocidad, y
- Motor AC instalado en el emplazamiento del motor actual.

3.3.2 Circuito de control, permisos e interlocks

El control se organiza en una arquitectura HMI–PLC–VDF, donde el PLC actúa como “supervisor”: no permite partir si no se cumplen permisos de seguridad y disponibilidad. Esto apunta a dos cosas muy concretas:

- que el arranque sea seguro y repetible, y
- que cuando ocurra una detención exista trazabilidad (qué permiso faltó o qué falla disparó).

A modo de criterio, los permisos mínimos incluyen cadena de seguridad (Paradas de Emergencia), protecciones principales disponibles, habilitación del contactor y condición “Ready/OK” del VDF. El detalle de las señales, comandos y estados se presenta en el Anexo E (Tablas E-1 a E-4).

3.3.3 Filosofía de operación, HMI, alarmas y registro

Tal como se expuso en 2.2.4, hoy el operador no dispone de una referencia visible de corriente del motor, por lo que pierde una señal objetiva para anticipar cuándo el horno comienza a contrapesarse por acreciones internas. En la arquitectura propuesta, la HMI muestra en línea la corriente del motor (A) y su tendencia. En la práctica, esto ayuda a evitar que el operador siga forzando el giro cuando el sistema ya está cerca de su límite, ya que la HMI genera una alarma preventiva y entrega una recomendación operacional, quedando registro de fecha/hora, corriente máxima y estado de permisos. Con esto, la corriente deja de ser solo un dato eléctrico y pasa a ser una herramienta de decisión operativa permite anticipar condición de sobrecarga asociada a acreciones internas, reduce la probabilidad de forzar el giro fuera de su zona segura y, si el evento ocurre, deja trazabilidad objetiva para acortar diagnóstico (fecha/hora, tendencia de corriente, máximo registrado y estado de permisos). La lógica de alarmas/eventos, umbrales y acción recomendada se formaliza en el Anexo E (Tabla E-4), de modo que la respuesta del operador quede estandarizada y verificable.”

3.3.4 Comunicaciones e integración con infraestructura existente

La comunicación PLC–VDF–HMI se resuelve mediante un protocolo industrial estándar (por ejemplo Ethernet/IP o equivalente), permitiendo intercambio de mandos (marcha/parada, referencia) y diagnóstico (ready, fault, códigos de trip y variables de operación). Esta integración deja abierta la posibilidad de ampliar monitoreo en etapas futuras.

3.3.5 Consideraciones de instalación: EMC y protección dv/dt (40 m / 70 m)

Por las longitudes de cable mencionadas, se consideran como prácticas mínimas de instalación: cable de motor apantallado, correcta terminación de pantallas, puesta a tierra, y segregación potencia/control. Para el caso HA2 (≈ 70 m), se define como requisito de ingeniería de detalle la evaluación de medidas dv/dt (reactor/filtro de salida), en función del cableado real y del motor seleccionado.

Con lo anterior se establece un diseño conceptual que prioriza seguridad, trazabilidad y mantenibilidad. En la sección 3.4 se conecta esta arquitectura con el efecto esperado sobre MTTR y CIF del subsistema eléctrico/control.

3.4 INDICADORES DE CONFIABILIDAD DEL SUBSISTEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL: LÍNEA BASE Y ESCENARIO DE MODERNIZACIÓN

Esta sección relaciona el diagnóstico técnico del Capítulo 2 con el efecto esperado de la propuesta de modernización sobre los indicadores del subsistema eléctrico y de control del sistema de giro. Para ello, se utilizan como referencia los indicadores MTBF, MTTR y disponibilidad operacional, calculados previamente para las fallas clasificadas como eléctrico/control.

El propósito de este apartado no es recalcular los indicadores ya desarrollados en el diagnóstico, sino establecer una línea base que permita interpretar cómo la modernización puede influir sobre la confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad del subsistema. De esta manera, se mantiene la trazabilidad entre los registros de falla analizados, las limitaciones técnicas identificadas y los supuestos utilizados posteriormente en la evaluación económica mediante ACCV.

Los indicadores considerados corresponden exclusivamente a las fallas clasificadas como eléctricas y de control, según la depuración realizada en el Capítulo 2. Esta delimitación es relevante, ya que la propuesta no busca resolver la totalidad de las detenciones del horno, sino intervenir sobre el ámbito directamente relacionado con el sistema de accionamiento, control, diagnóstico y trazabilidad operacional.

3.4.1 Línea base del desempeño del subsistema eléctrico y de control

La línea base del subsistema eléctrico/control se obtiene a partir de los valores de MTBF, MTTR y disponibilidad operacional presentados en el Capítulo 2. Estos indicadores permiten representar dos dimensiones complementarias del desempeño: por una parte, la frecuencia con que ocurren las fallas; y por otra, el tiempo requerido para recuperar el sistema una vez producido el evento.

Bajo la arquitectura actual, compuesta por motor de corriente continua, convertidores SIMOREG DC Master y controlador LOGO!, el desempeño del subsistema eléctrico/control se ve condicionado por la obsolescencia de componentes, la baja disponibilidad de información de diagnóstico y la limitada trazabilidad de eventos. Estas condiciones no solo pueden incidir en la ocurrencia de fallas, sino también en el tiempo necesario para identificar su causa y restituir el equipo a condición operativa.

Desde el punto de vista de la mantenibilidad, una de las principales restricciones del sistema actual es que gran parte del diagnóstico depende de inspecciones locales, revisión manual de señales y experiencia del personal de operación o mantenimiento. Al no existir una HMI dedicada, registro sistemático de eventos ni visualización clara de variables relevantes del accionamiento, la recuperación del sistema puede volverse menos trazable y más dependiente del criterio del personal disponible en el momento de la falla.

En consecuencia, la línea base no debe interpretarse únicamente como un conjunto de valores numéricos, sino como una representación del comportamiento actual del subsistema bajo sus condiciones reales de operación. Esta línea base permite comparar el escenario actual con el escenario de modernización propuesto, especialmente en lo referido a reducción de incertidumbre durante fallas, mejora del diagnóstico y disminución esperada del tiempo de recuperación.

3.4.2 Escenario de modernización: efecto esperado sobre MTBF, MTTR y disponibilidad

La modernización propuesta, desarrollada en las secciones 3.1 a 3.3, se orienta principalmente a mejorar la mantenibilidad del subsistema eléctrico/control y, en forma secundaria, a reducir la recurrencia de fallas asociadas a obsolescencia tecnológica. En este sentido, el impacto esperado sobre los indicadores debe interpretarse de manera prudente, considerando que el trabajo se desarrolla a nivel de ingeniería preliminar y no corresponde a una garantía de desempeño posterior a la implementación.

El principal efecto esperado se relaciona con la reducción del MTTR eléctrico/control. La incorporación de un variador de frecuencia moderno, PLC e interfaz HMI permitiría disponer de alarmas, códigos de falla, estados del accionamiento, tendencias de corriente y registro de eventos. Esta información puede disminuir el tiempo destinado a identificar qué ocurrió, en qué condición ocurrió y qué variable del sistema estuvo involucrada. Por lo tanto, el beneficio más directo de la modernización se asocia a una recuperación más rápida, ordenada y trazable ante fallas del subsistema eléctrico/control.

En segundo término, la modernización puede contribuir a mejorar el MTBF eléctrico/control, aunque este efecto debe entenderse como secundario y dependiente de la calidad de la implementación. Al reemplazar componentes tecnológicamente obsoletos por equipos vigentes, con mejor soporte técnico, protecciones integradas, autodiagnóstico y mayor disponibilidad de repuestos, se espera reducir la probabilidad de fallas asociadas al envejecimiento del sistema actual. No obstante, este efecto debe ser validado posteriormente mediante seguimiento de indicadores en operación.

La disponibilidad operacional del subsistema se vería favorecida por la combinación de ambos efectos: menor recurrencia de fallas y menor tiempo de recuperación. Sin embargo, dado que la disponibilidad depende tanto del MTBF como del MTTR, el impacto real de la modernización debe evaluarse a partir de datos posteriores a la puesta en marcha. Por esta razón, en la evaluación económica del apartado 3.5 el efecto cuantitativo se aborda mediante escenarios de reducción del CIF eléctrico/control, evitando asumir beneficios no verificados.

En síntesis, la modernización propuesta se vincula con los indicadores de confiabilidad y mantenibilidad a través de tres mecanismos principales: eliminación de componentes obsoletos, incorporación de diagnóstico y trazabilidad, y estandarización de la respuesta ante eventos de falla. Estos mecanismos permiten conectar la propuesta técnica con la evaluación económica, manteniendo coherencia con la línea base calculada en el Capítulo 2 y con el alcance real del proyecto.

3.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA MEDIANTE ANÁLISIS DE COSTOS DEL CICLO DE VIDA (ACCV)

El propósito de esta sección es evaluar la conveniencia económica de la modernización del sistema motriz mediante la metodología de Análisis de Costos del Ciclo de Vida (ACCV). La comparación se realiza en valor presente y considera los costos directamente atribuibles al subsistema modernizado: inversión inicial, costos anuales de operación/mantenimiento, el costo de indisponibilidad asociado a fallas del subsistema eléctrico y de control, cuantificado en el Capítulo 2, y además utilizando una tasa de descuento y un horizonte de análisis común para todas las alternativas (Comisión Electrotécnica Internacional [IEC], 2017; Massachusetts Institute of Technology, s. f.).

3.5.1 Alcance del ACCV

El ACCV se acota a los costos que la modernización realmente modifica. En otras palabras, se consideran los ítems directamente asociados al accionamiento propuesto, así como los costos de operación/mantenimiento atribuibles al subsistema eléctrico/control y su impacto en indisponibilidad.

La Tabla 3-5 detalla los costos incluidos y excluidos. En particular, se excluyen costos que no dependen de la alternativa tecnológica evaluada (por ejemplo, rediseños mayores del tren mecánico), con el fin de mantener una comparación limpia y trazable.

Tabla 3-5. Alcance del ACCV: costos incluidos/excluidos y justificación.

Categoría	Ítem	Justificación / Comentario
Inversión (CAPEX)	Motor AC	Parte del alcance de modernización del accionamiento.
Inversión (CAPEX)	VDF vectorial	Reemplaza convertidores DC; aporta control, protecciones y diagnóstico.
Inversión (CAPEX)	PLC + HMI	Estandariza maniobras, registra eventos y reduce MTTR eléctrico/control.
Inversión (CAPEX)	Tablero/adecuaciones eléctricas	Modificaciones necesarias para integración segura y normativa interna.
Inversión (CAPEX)	Protecciones de potencia (ITM/MCCB, fusibles, etc.)	Coordinación de protecciones y seguridad operacional del nuevo sistema.
Inversión (CAPEX)	Elementos de maniobra (KM/contactador principal)	Permite corte por seguridad/permisos; coherente con filosofía de planta.
Inversión (CAPEX)	Cableado potencia/control + canalizaciones asociadas	Requerido por instalación; considera distancias reales de tendido.
Inversión (CAPEX)	Accesorios por EMC y dv/dt (según alternativa)	Mitiga efectos PWM por longitudes VDF–motor (40 m / 70 m).
Inversión (CAPEX)	Ingeniería, montaje, pruebas y puesta en marcha	Costos inevitables para implementar y validar la solución.
Inversión (CAPEX)	Documentación y capacitación	Mejora mantenibilidad y estandariza operación.
Operación y mantención (OPEX)	Repuestos críticos / stock mínimo	Mantener continuidad operativa y reducir tiempos de reparación.
Operación y mantención (OPEX)	Mantenimiento preventiva/correctiva eléctrica-control	Costos recurrentes atribuibles al subsistema modernizado.
Operación y mantención (OPEX)	Soporte técnico / contratos (si aplica)	Relevante por plataforma tecnológica y disponibilidad de fabricante.
Indisponibilidad (CIF)	CIF eléctrico/control	Beneficio principal del proyecto: reducción de fallas eléctricas/control.
Fuera de alcance	Cambios mayores mecánicos (reductores, corona, ejes, frenos)	No forma parte del alcance; solo ajustes menores de compatibilidad si aplica.
Fuera de alcance	Cambios de proceso HRF / variables metalúrgicas	No atribuible al proyecto eléctrico/control.
Fuera de alcance	Predictivo avanzado como proyecto independiente	Puede habilitarse, pero no se valora como costo/beneficio principal aquí.
Fuera de alcance	Costos corporativos no atribuibles (overhead general)	Evita “ensuciar” la comparación con costos no influenciados por la alternativa.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2 Supuestos económicos de evaluación

Para asegurar consistencia entre alternativas, la evaluación se normaliza en una moneda y año base común, y se define un horizonte y una tasa de descuento únicos. Los principales supuestos económicos utilizados se resumen en la Tabla 3-6, incluyendo:

- Horizonte de evaluación: $N = 10$.
- Tasa de descuento: $i = 10\%$ (con análisis de sensibilidad).

CIF eléctrico/control: corresponde al valor anual base obtenido en Capítulo 2 para el subsistema eléctrico/control, sobre el cual se definen escenarios de reducción según alternativa.

Tabla 3-6. Supuestos económicos del ACCV (USD 2026).

Parámetro	Valor base	Sensibilidad / Escenario	Observación
Horizonte de evaluación, N	10 años	—	Horizonte definido para comparar alternativas tecnológicas del accionamiento.
Tasa de descuento, i	10%	8% y 12%	Evaluación en términos reales (moneda constante).
Moneda	USD	—	Todos los costos se expresan en USD.
Año base	2026	—	Normalización de costos a USD 2026.
Inflación	No explícita (moneda constante)	—	Consistente con uso de tasa real (i real).
Valor residual (VR)	0 (conservador)	—	VR=0 evita sobreestimar beneficios si no hay dato formal de rescate.
CIF eléctrico/control	Línea base del Cap. 2 (USD/año)	Escenarios reducción (Tabla 3-15)	CIF considerado solo por fallas del subsistema eléctrico/control.
CAPEX	Según Tabla 3-13	—	Inversión inicial por alternativa en USD 2026.
OPEX anual	Según Tabla 3-14	OPEX Alt 2 > Alt 1	Alt 2 considera OPEX levemente mayor por repuestos/elementos adicionales.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3 Alternativas evaluadas

El ACCV compara tres alternativas tecnológicas:

- Alternativa 0 (Base): mantener el accionamiento DC actual (convertidores SIMOREG de armadura y campo, PLC LOGO! y pupitre), junto con el esquema de mantenimiento vigente y el CIF eléctrico/control asociado.
- Alternativa 1 (Modernización estándar): migración a motor AC + VDF vectorial + PLC/HMI, incorporando integración eléctrica y funciones básicas de diagnóstico y registro, según la arquitectura propuesta en 3.1 y el diseño conceptual de 3.3.
- Alternativa 2 (Modernización reforzada): corresponde a la alternativa 1, añadiendo elementos de seguridad y mitigación eléctrica relevantes para la instalación (por ejemplo STO y filtro dv/dt), especialmente por las longitudes VDF–motor (40 m en HA1 y 70 m en HA2).

3.5.4 Modelo de costos (formulación)

El costo del ciclo de vida de cada alternativa se evalúa en valor presente, de modo de comparar en una misma base la inversión inicial y los costos anuales durante el horizonte de análisis. Para una alternativa k , el costo total actualizado se expresa como:

$$VPN_k = CAPEX_k + \sum_{t=1}^N \frac{(OPEX_{k,t} + CIF_{k,t})}{(1+i)^t} - \frac{VR_k}{(1+i)^N}$$

donde $CAPEX_k$ corresponde a la inversión inicial; $OPEX_{k,t}$ a los costos anuales de operación y mantenimiento; $CIF_{k,t}$ al costo anual por indisponibilidad atribuible al subsistema eléctrico/control; VR_k al valor residual; i a la tasa de descuento; y N al horizonte de evaluación.

Nota: Esta formulación se basa en la definición teórica presentada en 1.4 y aquí se aplica al caso del sistema motriz.

3.5.5 Estimación de CAPEX, OPEX y CIF eléctrico/control

Para efectos del ACCV, los costos se agrupan en tres bloques directamente influenciados por la modernización:

- CAPEX: adquisición e integración de la solución (motor AC, VDF, PLC/HMI, tableros/adecuaciones, cableado y accesorios según condiciones de instalación, ingeniería, montaje, pruebas, puesta en marcha, documentación y capacitación).
- OPEX: costos recurrentes atribuibles al subsistema eléctrico/control modernizado (repuestos críticos/stock mínimo, mantenimiento preventivo/correctivo menor y soporte técnico).
- CIF eléctrico/control: costo anual de detenciones atribuibles a fallas del subsistema eléctrico/control, empleando como línea base el valor cuantificado en el Capítulo 2, y evaluando escenarios de reducción coherentes con la mejora esperada en diagnóstico, estandarización y mantenibilidad.

- CAPEX por alternativa

Tabla 3-7. CAPEX por alternativa (USD 2026, por horno HA1).

Ítem CAPEX (HA1)	Alt 0 Base (DC actual)	Alt 1 Estándar	Alt 2 Reforzada	Fuente / referencia (precio público)
Motor AC 30 kW (≈40 HP) "inverter duty" industrial	USD -	USD 7.700	USD 7.700	Referencias públicas 2025 (motores industriales 30 kW)
VDF 30 kW clase industrial (Heavy Duty)	USD -	USD 8.400	USD 8.400	Referencias públicas 2025 (VDF 30 kW marca reconocida)
PLC (CPU) (CompactLogix / S7-1500 equivalente)	USD -	USD 2.520	USD 2.520	Referencias públicas 2025 (CPU gama media-alta)
HMI 7"-10" (PanelView / Comfort Panel equivalente)	USD -	USD 4.900	USD 4.900	Referencias públicas 2025 (HMI industrial)
Módulos E/S + fuente 24 VDC (estimación básica)	USD -	USD 2.100	USD 2.100	Referencias públicas 2025 (I/O + PSU)
Protecciones potencia (MCCB/ITM, fusibles, relés, etc.)	USD -	USD 1.680	USD 1.680	Referencias públicas 2025 (protecciones + relés)
KM1 – Contactor de habilitación (trifásico +	USD -	USD 350	USD 350	Referencias públicas 2025 (contactor industrial)
Tablero/adequaciones eléctricas + materiales menores (bornes, canaletas,	USD -	USD 3.500	USD 3.780	Estimación de ingeniería (ajuste por Alt 2)
Cable VDF–motor apantallado + terminaciones (50 m)	USD -	USD 4.200	USD 4.200	Referencias públicas 2025 (cable VFD shielded)
Reactancia de línea / filtro EMC (entrada VDF)	USD -	USD 1.120	USD 1.120	Referencias públicas 2025 (mitigación EMC / calidad energía)
Filtro dv/dt (salida VDF)	USD -	USD -	USD 840	Referencias públicas 2025 (filtro dv/dt 30 kW)
Módulo STO (o función STO equivalente)	USD -	USD -	USD 420	Referencias públicas 2025 (STO módulo/seguridad)
Ingeniería, montaje, pruebas y puesta en marcha	USD -	USD 21.000	USD 23.100	Estimación referencial (más horas por extras Alt 2)
Sub-TOTAL CAPEX (USD 2026)	USD -	USD 59.220	USD 62.930	—
Factor por Imprevistos	1,5	1,5	1,5	Referencial
TOTAL CAPEX (USD 2026)	USD -	USD 88.830	USD 94.395	—

Fuente: Elaboración propia.

Los costos de componentes principales se estimaron a partir de precios públicos de referencia y entrevistas con personal planificación. Los costos de integración (ingeniería, montaje, pruebas y puesta en marcha) se consideran estimaciones preliminares, sujetas a validación mediante cotización formal en una eventual etapa de ingeniería de detalle.

- OPEX anual por alternativa

Tabla 3-8. OPEX anual por alternativa (USD/año, base 2026) – 1 horno (HA1).

Categoría OPEX (eléctrico/ control)	Ítem	Alt 0 Base (DC)	Alt 1 Estándar (AC+VDF+PLC/HMI)	Alt 2 Reforzada	Justificación / criterio
Repuestos crítico / stock mínimo	Electrónica y consumibles críticos (tarjetas, ventiladores, fusibles, borneras, etc.)	USD 5.200	USD 2.600	USD 2.990	Alt 0 sube por obsolescencia/escasez. Alt 2 levemente mayor por componentes adicionales (dv/dt / STO).
Mantenión preventiva/ correctiva eléctrica-control	Intervenciones programadas + correctivas menores (reapriete, limpieza, revisión señales, respaldos, ajustes)	USD 4.550	USD 3.250	USD 3.510	Alt 1 baja por modularidad/ diagnóstico; Alt 2 sube marginal por verificaciones extra (filtro/dvdt, STO).
Soporte técnico / servicios	Soporte puntual (configuración, troubleshooting, parametrización, visita técnica si aplica)	USD 3.250	USD 1.950	USD 2.080	En DC se vuelve más dependiente de “know-how” específico/escaso. En modernizado baja por estándar industrial.
TOTAL OPEX anual		13.000	7.800	8.580	—

Fuente: Elaboración propia.

• **CIF eléctrico/control por alternativa (escenarios)**

Para estimar el costo de indisponibilidad bajo cada alternativa se utiliza el CIF base anual del Capítulo 2 para el subsistema eléctrico/control. La modernización no se asume como “cero fallas”, sino como una reducción probable del impacto anual atribuible a: eliminación de obsolescencia, mayor trazabilidad (eventos/diagnóstico) y mejor mantenibilidad. El CIF por alternativa se obtiene mediante:

$$CIF_k = CIF_{base} * (1 - Reducción_k)$$

En este trabajo se evalúan cuatro escenarios de reducción del CIF eléctrico/control por alternativa (pesimista, conservador, base y optimista) para capturar la incertidumbre propia de una modernización de este tipo.

El escenario pesimista representa un caso de beneficios acotados, donde la reducción del impacto anual sería de 15% para la Alternativa 1 y 20% para la Alternativa 2. Los escenarios restantes consideran mejoras graduales y coherentes con el mecanismo esperado de la solución (mejor diagnóstico, trazabilidad y recuperación).

Tabla 3-9. CIF eléctrico/control (línea base y escenarios de reducción) – USD/año, base 2026 – 1 horno (HA1).

Escenario	CIF base	Reducción Alt 0 (DC)	CIF Alt 0	Reducción Alt 1 (Estándar)	CIF Alt 1	Reducción Alt 2 (Reforzada)	CIF Alt 2
Pesimista	USD 202.290	0%	USD 202.290	15%	USD 171.946	20%	USD 161.832
Conservador	USD 202.290	0%	USD 202.290	30%	USD 141.603	40%	USD 121.374
Base	USD 202.290	0%	USD 202.290	50%	USD 101.145	60%	USD 80.916
Optimista	USD 202.290	0%	USD 202.290	70%	USD 60.687	75%	USD 50.572

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Las reducciones se utilizan como escenarios de evaluación (no compromisos de desempeño) y se plantean como rangos consistentes con el propósito de la modernización y con el análisis técnico del Capítulo 3 (Secciones 3.3–3.4).

3.5.6 Resultados comparativos (VPN / ACCV)

Con los supuestos económicos definidos en la Tabla 3-6 y las estimaciones de CAPEX (Tabla 3-7), OPEX (Tabla 3-8) y los escenarios de reducción del CIF (Tabla 3-9), se calcula el costo total actualizado por alternativa.

Dado que OPEX y CIF se consideran constantes en USD 2026 para cada alternativa, el valor presente de los costos anuales se obtiene mediante el factor de anualidad:

$$\left(\frac{P}{A}, i, N\right) = \frac{1 - (1 + i)^{-N}}{i}$$

Reemplazando, el costo total actualizado puede expresarse como:

$$VPN_k = CAPEX_k + (OPEX_k + CIF_k) * (P/A, i, N) - \frac{VR_k}{(1 + i)^N}$$

En este estudio se adopta $VR_k = 0$ como supuesto conservador.

Tabla 3-10. Resultados ACCV: costo total actualizado (VPN) por escenario de reducción (HA1).

VPN TOTAL								
Escenario	CIF Alt 0 (USD/año)	CIF Alt 1 (USD/año)	CIF Alt 2 (USD/año)	VPN Alt 0 (USD)	VPN Alt 1 (USD)	VPN Alt 2 (USD)	Ahorro Alt 1 vs Alt 0 (USD)	Ahorro Alt 2 vs Alt 0 (USD)
Pesimista	202.290	171.946	161.832	1.322.861	1.193.292	1.141.501	129.569	181.360
Conservador	202.290	141.603	121.374	1.322.861	1.006.845	892.905	316.016	429.957
Base	202.290	101.145	80.916	1.322.861	758.249	644.308	564.613	678.553
Optimista	202.290	60.687	50.572	1.322.861	509.652	457.861	813.209	865.000

Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: La Tabla 3-10 permite comparar de manera homogénea las alternativas y cuantificar el “ahorro” respecto de la condición base (Alt. 0). En los escenarios evaluados, la modernización reduce el costo total actualizado principalmente por dos mecanismos: (i) disminución del CIF eléctrico/control y (ii) menor impacto de las detenciones por mejoras en diagnóstico, trazabilidad y tiempos de intervención, en coherencia con las secciones 3.3 y 3.4.

Para verificar la replicabilidad, se aplicó el mismo procedimiento de ACCV a HA2, ajustando únicamente el CIF base correspondiente. El desarrollo y resultados completos se presentan en el Anexo J.

Bajo los supuestos del ACCV y los escenarios de reducción del CIF eléctrico/control, la modernización presenta menor costo total actualizado que la condición base (Alt. 0). En los tres escenarios evaluados, la Alternativa 2 (reforzada) registra el menor VPN, por lo que se identifica como la opción económicamente preferente dentro del alcance analizado. La Alternativa 1 también reduce el VPN respecto de la base, pero no domina a la Alternativa 2. En la sección siguiente se revisa la robustez del resultado mediante análisis de sensibilidad.

3.5.7 Sensibilidad y escenarios

Dado que el resultado económico depende principalmente de dos variables, (i) la reducción efectiva del CIF eléctrico/control y (ii) la tasa de descuento *i*, se evalúa la robustez de la decisión mediante análisis por escenarios y sensibilidad.

En primer lugar, se consideran escenarios de reducción del CIF por alternativa (Tabla 3-9), desde un caso pesimista (beneficios acotados) hasta escenarios conservador, base y optimista. Esto permite verificar que la conveniencia de la modernización no queda “amarrada” a supuestos favorables. En particular, aun bajo reducciones moderadas, las alternativas modernizadas mantienen un costo total actualizado inferior a la condición base, lo que refuerza la decisión desde una perspectiva de ciclo de vida.

En segundo lugar, se analiza la sensibilidad a la tasa i dentro del rango definido (por ejemplo, 8% a 12%). Este contraste permite comprobar que la alternativa económicamente preferente no cambia por variaciones razonables en el costo de capital utilizado, y que el orden relativo entre alternativas se mantiene.

3.6 PLAN DE IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN MARCHA DE LA MODERNIZACIÓN

La implementación de la propuesta debe ejecutarse de forma planificada y controlada para no comprometer la seguridad de las personas, de los equipo y de las instalaciones. En esta tesis se plantea una ingeniería preliminar; por lo tanto, la emisión de planos constructivos, diagramas de bornes y definición final de montaje/canalizaciones se resuelve en ingeniería de detalle, incorporando ahí los levantamientos mecánicos pendientes del tren de transmisión.

3.6.1 Estrategia de ejecución por etapas

Para reducir el tiempo de intervención en planta, se recomienda concentrar la mayor parte del trabajo fuera de línea (ingeniería, parametrización, lógica, documentación y pruebas funcionales) y dejar para planta lo estrictamente necesario. La ejecución se estructura en cuatro etapas:

- a) Levantamiento en terreno + ingeniería de detalle: Confirmación de longitudes reales de cable, condiciones EMC/tierra, puntos de conexión, estado de protecciones y levantamiento de parámetros mecánicos faltantes (cuando aplique).

- b) Compra de equipos y preparación previa: adquisición de componentes, armado del gabinete, etiquetado, checklist de cableado, carga/backup de parámetros base del VDF y estructura inicial de PLC/HMI.
- c) Montaje y conexión en terreno: Retiro del sistema anterior, montaje del nuevo accionamiento, conexión de fuerza y control, verificación de tierras, alambrado en terreno de circuitos de potencia/control y revisión de protecciones.
- d) Pruebas de funcionamiento/operacional: Secuencia de pruebas en sitio, ajuste de rampas/límites, validación de permisos/interlocks, registro de eventos y cierre con documentación “as-built” (IEC 62381:2024).

3.6.2 Plan de pruebas de aceptación y criterios mínimos

El objetivo de estas pruebas es confirmar que el sistema sea seguro, cumpla con la funcionalidad del giro y tenga capacidad básica de diagnóstico/registro, antes de su entrega a operación. El plan se construye a partir del diagrama unilineal conceptual y el diagrama funcional de control (secciones 3.3.1–3.3.2), junto con la lista de señales e interlocks y la matriz de alarmas/eventos (sección 3.3).

En el cuerpo del informe se considera como mínimo verificar:

- Seguridad / permisos: cadena de Paradas de Emergencias OK e inhibición de marcha; condiciones de “energía disponible” y habilitación.
- Estados del sistema: READY/RUN/FAULT y coherencia en HMI con lo observado en terreno.
- Mando principal: RUN/STOP, sentido de giro (FWD/REV) y referencia de velocidad con rampa.
- Rearme controlado: reset sólo con permisos OK y condición segura.
- Comunicación: pérdida/recuperación PLC–VDF (si aplica) y comportamiento en estado seguro.
- Diagnóstico mínimo: lectura y registro de corriente, frecuencia/velocidad estimada, torque estimado y código de falla.
- EMC/dv/dt (verificación práctica): ausencia de disparos espurios y estabilidad básica durante operación.

3.6.3 Estandarización y preparación para implementación en HA2

Para facilitar la implementación posterior en HA2, la puesta en marcha debe cerrar con un paquete mínimo de estandarización:

- Respaldo de parámetros del VDF (archivo y versión).
- Programa PLC y pantallas HMI con control de versión.
- Lista final de señales/etiquetado y lógica de permisos/interlocks validada.
- Matriz de alarmas/eventos validada (con criterio de registro).
- Checklist de mantenimiento inicial y repuestos críticos recomendados.

Con este plan de control se deja amarrado la sostenibilidad de los beneficios post puesta en marcha y la base documental para replicar la solución en HA2.

3.6.4 Plan de control y sostenimiento de beneficios (fase “Control” de DMAIC)

Para asegurar que los beneficios de la modernización se mantengan en el tiempo (disminución de detenciones eléctricas/control y, especialmente, reducción de MTTR por mejor diagnóstico), se establece un plan de control basado en: (i) monitoreo mínimo de variables y eventos desde VDF/PLC/HMI, (ii) indicadores simples de desempeño, y (iii) disciplina de respaldo y gestión del cambio (International Organization for Standardization [ISO], 2011; International Electrotechnical Commission, s. f.).

- a) Variables y evidencia mínima (fuente: VDF/PLC/HMI): Se utiliza como evidencia operativa el registro automático de: estado del accionamiento (Ready/Run/Fault), códigos de trip, corriente del motor (A) y su tendencia, frecuencia/velocidad estimada y torque estimado (si está disponible). Estas señales se visualizan en HMI y quedan registradas para análisis posterior (ver 3.3.3 y matriz de alarmas/eventos en Anexo E).
- b) Indicadores de control (KPI): y revisión: Se controlan, al menos, los siguientes KPI del subsistema eléctrico/control: FFe (fallas/año o fallas/mes), MTTR eléctrico/control, MTBF eléctrico/control y As eléctrico/control (según definiciones del Capítulo 2 y línea base de 3.4) (IEC, s.f.). En régimen de estabilización, se revisan semanalmente durante el primer mes post puesta en marcha y luego mensualmente como control rutinario.

- c) Umbrales de acción: Se define acción correctiva cuando ocurra cualquiera de estos eventos:
- i. repetición de trips del mismo tipo en una ventana corta de operación,
 - ii. aumento sostenido de corriente/torque estimado respecto de la operación normal (señal de sobrecarga asociable a acreciones u otra condición),
 - iii. desviación del MTTR respecto de la línea base o aumento de detenciones eléctricas/control.
- La acción incluye: revisión de causa (logs), verificación de condiciones de instalación (tierras, apantallamiento, segregación), ajuste de parámetros (rampa/límites) y cierre con registro de cambios.
- d) Respaldo, versiones y gestión del cambio: Para evitar “pérdida de trazabilidad”, toda modificación posterior a la puesta en marcha debe quedar controlada con: respaldo de parámetros del VDF, versión del programa PLC/HMI, bitácora de cambios (qué se cambió y por qué) y evidencias mínimas (capturas/log). Esto permite replicar en HA2 con base probada y evita depender de conocimiento informal de turno (ISO, s.f.).
- e) Capacitación y uso operativo de la HMI (control preventivo) Se realiza una capacitación corta orientada a operación/mantenimiento, enfocada en: lectura de corriente (A) y tendencia, interpretación de alarmas/trips, y criterio de detención preventiva cuando la carga se aproxima al límite operativo. Con esto, la corriente pasa a ser una señal de decisión operativa y no solo un dato eléctrico, reduciendo el riesgo de forzar el equipo ante aumento de acreciones y mejorando el diagnóstico cuando el evento ocurre.

Este plan de control cierra la implementación bajo la lógica DMAIC, asegurando la sostenibilidad de beneficios y trazabilidad para replicación a HA2 (ISO, 2011).

3.7 GESTIÓN DE RIESGOS DE IMPLEMENTACIÓN Y CRITERIOS DE REPLICABILIDAD

La modernización propuesta busca reducir fallas y, sobre todo, acortar los tiempos de diagnóstico e intervención. Sin embargo, ejecutar un cambio de tecnología en un

entorno como la fundición, con polvo, temperatura, restricciones de montaje y detenciones acotadas, implica riesgos técnicos y operacionales que conviene anticipar. Además, el sistema considera longitudes considerables entre VDF y motor, lo que obliga a tratar con cuidado los temas de EMC y dv/dt para evitar disparos o daño prematuro del motor.

En esta etapa, el análisis se presenta como una síntesis de riesgos principales y sus controles mínimos, con foco práctico: qué podría salir mal, por qué, y cómo se comprueba en terreno que quedó bien. La matriz completa de riesgos, mitigaciones y evidencias de verificación se incluye en el Anexo F.

3.7.1 Gestión de riesgos de implementación (síntesis)

De manera resumida, los riesgos más relevantes se concentran en: (i) un dimensionamiento insuficiente para el par a baja velocidad si la relación de transmisión o la carga real no se verifican en terreno; (ii) problemas asociados a longitudes VDF–motor que deriven en trips repetitivos o estrés eléctrico sobre la aislación; (iii) interferencias por EMC que afecten señales de control o comunicaciones; y (iv) problemas de coordinación de protecciones y permisos, que pueden terminar en disparos intempestivos o maniobras inseguras.

Para controlar estos riesgos, el enfoque recomendado es simple: verificar primero lo que falta (parámetros mecánicos y condiciones reales de instalación), estandarizar la lógica de permisos y el registro, y realizar puesta en marcha con evidencias (respaldos, checklist, pruebas, documentación varia). Con esto se evita que la modernización “funcione”, pero quede frágil o dependa de conocimiento informal de turno.

3.7.2 Criterios para replicación a HA2

La aplicación posterior de la arquitectura en HA2 se sostiene en la estandarización de un paquete mínimo, compuesto por: (i) la arquitectura de potencia y control definida en las secciones previas, (ii) la lista final de señales e interlocks, (iii) la matriz mínima de alarmas y eventos, y (iv) respaldos controlados de parámetros del VDF y del programa PLC/HMI. En la práctica, esto significa que HA2 no parte “desde cero”: se reutiliza una base probada, con tags, pantallas y criterios de operación ya validados.

No obstante, en HA2 aumenta la exigencia en instalación por la longitud de tendido (≈ 70 m). Por lo mismo, la replicación debe considerar como obligatorio el cierre técnico

de mitigaciones asociadas a dv/dt y EMC, definidos en función de: recorrido real del cable, tipo de cable, puesta a tierra, diseño del motor y recomendaciones del fabricante del VDF. En otras palabras: la lógica y la filosofía pueden replicarse casi completas, pero la solución de “capa física” (cableado y mitigaciones) debe verificarse con el estándar de HA2.

Con estos criterios, la replicación mantiene coherencia técnica con la propuesta, reduce tiempos de intervención y mejora la consistencia operativa entre hornos, sin omitir los puntos críticos que cambian por condiciones reales de instalación.

Anexo F: Matriz preliminar de riesgos de implementación, mitigaciones y evidencias de verificación (Tabla F-1).

En síntesis, el Capítulo 3 deja definida una propuesta de modernización completa a nivel de ingeniería preliminar: arquitectura del sistema (motor AC + VDF + PLC/HMI), criterios de selección, filosofía de operación y elementos mínimos de integración y pruebas para asegurar una puesta en marcha controlada. En paralelo, se cuantifica su conveniencia mediante ACCV, utilizando el CIF eléctrico/control como variable de impacto para comparar alternativas bajo escenarios.

El resultado central es que la modernización no solo resuelve obsolescencia; también apunta a las principales limitaciones observadas en la operación: menos detenciones por fallas eléctricas/control y, sobre todo, detenciones más cortas por mejor diagnóstico, trazabilidad y recuperación. Esa mejora técnica se traduce en una reducción del costo total actualizado frente a la condición base en los escenarios evaluados.

Con esto, el Capítulo 3 entrega una base técnica y económica para la toma de decisión: define la solución a nivel preliminar (arquitectura, criterios, integración y pruebas) y cuantifica su conveniencia mediante ACCV usando el CIF eléctrico/control como variable de impacto. Estos resultados se retoman en el capítulo de Conclusiones y Recomendaciones para formular la propuesta final, sus condiciones de implementación y los pasos siguientes de ingeniería de detalle.

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIÓN

El presente trabajo permitió abordar una problemática industrial real desde un enfoque académico aplicado, integrando herramientas de mantenimiento, confiabilidad, análisis causal y evaluación económica para fundamentar una propuesta de modernización del sistema de giro de los hornos de ánodos de la Fundición Potrerillos. Más allá de describir una condición técnica existente, el estudio buscó transformar antecedentes operacionales, registros de falla y observaciones de terreno en información útil para la toma de decisiones. En este sentido, la aplicación de metodologías como DMAIC, análisis de causa raíz, indicadores de confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y Análisis de Costos del Ciclo de Vida permitió estructurar el problema de manera ordenada, medible y técnicamente justificable.

A partir del diagnóstico desarrollado, se logró establecer una línea base del comportamiento operacional de los hornos, diferenciando la indisponibilidad global del proceso respecto de la fracción atribuible al subsistema eléctrico y de control. Esta separación resulta relevante desde el punto de vista académico y metodológico, ya que evita atribuir a la propuesta beneficios que no corresponden a su alcance real. Los resultados muestran que, si bien las fallas eléctricas/control representan una parte menor de la indisponibilidad total, constituyen un ámbito técnicamente abordable mediante modernización, especialmente por su relación con obsolescencia, limitada capacidad de diagnóstico y baja trazabilidad operacional.

El análisis realizado también permitió demostrar que una propuesta de mejora no debe sustentarse únicamente en la percepción de que un sistema es antiguo o presenta fallas, sino en evidencia cuantitativa y criterios de evaluación consistentes. La comparación entre HA1 y HA2, el cálculo de indicadores MTBF, MTTR y disponibilidad, el análisis probabilístico de confiabilidad y mantenibilidad, la clasificación de fallas, la aplicación de Ishikawa y 5 Porqués, y la estimación del costo de indisponibilidad permitieron vincular la experiencia práctica de operación con herramientas propias de la ingeniería de mantenimiento. De esta forma, el trabajo entrega una base objetiva para priorizar una intervención y justificar por qué la modernización propuesta responde a una causa abordable del problema.

La evaluación económica mediante ACCV permitió complementar el diagnóstico técnico con una mirada de ciclo de vida, considerando no solo la inversión inicial, sino también los costos futuros de operación, mantenimiento e indisponibilidad. Bajo este enfoque, la alternativa de modernización reforzada se presenta como la opción más conveniente, ya que no solo permite enfrentar la obsolescencia del sistema actual, sino también mejorar la capacidad de diagnóstico, registro y control del accionamiento. Esto demuestra que la decisión de modernizar no corresponde únicamente a un reemplazo tecnológico, sino a una medida orientada a mejorar la gestión del activo, reducir incertidumbre operacional y apoyar decisiones de mantenimiento basadas en datos.

En síntesis, el trabajo cumple con el objetivo general propuesto al desarrollar lineamientos técnicos para modernizar el sistema eléctrico de control y fuerza del horno de ánodos, sustentados en diagnóstico, análisis causal, indicadores de desempeño y evaluación económica. Su principal aporte está en conectar una problemática práctica de planta con herramientas académicas de ingeniería en mantenimiento industrial, permitiendo justificar una decisión técnica desde criterios de confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y costo de ciclo de vida. Finalmente, se reconoce que la implementación definitiva requiere una etapa posterior de ingeniería de detalle, validación en terreno, pruebas de puesta en marcha y seguimiento de indicadores, con el fin de confirmar los beneficios esperados y evaluar su replicabilidad hacia otros equipos similares.

RECOMENDACIONES

Se recomienda desarrollar una etapa posterior de ingeniería de detalle que permita validar los antecedentes técnicos levantados en este estudio y cerrar las variables que quedaron a nivel preliminar. En particular, resulta necesario confirmar en terreno la relación de transmisión, las condiciones reales del tren mecánico, los requerimientos de par y las restricciones físicas de instalación. Esta validación permitirá ajustar correctamente la selección final de componentes, parametrizar el accionamiento y reducir la incertidumbre antes de una eventual implementación.

También se recomienda implementar un sistema de seguimiento de indicadores posterior a la modernización, considerando como mínimo MTBF, MTTR, disponibilidad

operacional, frecuencia de fallas eléctricas/control y tiempo fuera de servicio. Este seguimiento permitiría contrastar los beneficios esperados con el comportamiento real del equipo en operación, transformando la propuesta en un proceso verificable de mejora continua y no solo en una intervención tecnológica puntual.

Desde el punto de vista de la gestión del mantenimiento, se recomienda formalizar procedimientos de operación, diagnóstico y respuesta ante fallas, incorporando el uso de la información disponible en HMI, alarmas y registros de eventos. Esto permitiría reducir la dependencia del conocimiento tácito de operadores y mantenedores, estandarizar criterios entre turnos y fortalecer la toma de decisiones basada en datos.

Asimismo, se recomienda incorporar capacitación específica para personal de operación y mantenimiento, orientada no solo al uso del nuevo sistema, sino también a la interpretación de variables relevantes, como corriente, tendencia de carga, alarmas y condiciones de sobrecarga. De esta manera, la modernización podría aportar no solo a la reducción de fallas, sino también al desarrollo de una cultura de diagnóstico más preventiva y menos reactiva.

Finalmente, se recomienda evaluar la replicabilidad de la solución hacia el HA2 una vez validado el comportamiento del sistema modernizado en HA1. Para ello, será necesario comparar los indicadores antes y después de la intervención, revisar los costos reales de implementación y verificar la efectividad del plan de control. Esta evaluación permitiría proyectar la modernización como una alternativa aplicable a equipos similares, manteniendo criterios técnicos, económicos y metodológicos consistentes.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.

Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). (s. f.). Rueda diaria / Estadísticas del cobre: precio del cobre refinado. COCHILCO.

International Electrotechnical Commission. (2016). Safety of machinery — Electrical equipment of machines — Part 1: General requirements (IEC 60204-1:2016). IEC.

International Electrotechnical Commission. (2017). Dependability management — Part 3-3: Application guide — Life cycle costing (IEC 60300-3-3:2017). IEC.

International Electrotechnical Commission. (2022). Adjustable speed electrical power drive systems — Part 3: EMC requirements and specific test methods (IEC 61800-3:2022). IEC.

International Electrotechnical Commission. (2022). Adjustable speed electrical power drive systems — Part 5-1: Safety requirements (IEC 61800-5-1:2022). IEC.

International Electrotechnical Commission. (2022). Management of alarm systems for the process industries (IEC 62682:2022). IEC.

International Electrotechnical Commission. (2024). Automation systems in the process industry — FAT, SAT and SIT (IEC 62381:2024). IEC.

International Electrotechnical Commission. (s. f.). Electropedia: International Electrotechnical Vocabulary (IEV) — IEC 60050-192: Mean time to restoration (MTTR). Electropedia.

International Organization for Standardization. (2011). Quantitative methods in process improvement — Six Sigma — Part 1: DMAIC methodology (ISO 13053-1:2011). ISO.

International Organization for Standardization. (s. f.). ISO 9001:2015 — Guidance on documented information (ISO/TC 176). ISO.

International Society of Automation. (2016). Management of alarm systems for the process industries (ANSI/ISA-18.2-2016). ISA.

London Metal Exchange. (s. f.). LME Copper — Official/benchmark pricing information. LME.

Massachusetts Institute of Technology, OpenCourseWare. (s. f.). Net present value (NPV) — primer/notes. MIT OpenCourseWare.

Parra, C. (2025). Ingeniería de mantenimiento / Parte II: Planificación y programación de actividades basadas en RCM [Material de curso]. Universidad Técnica Federico Santa María, Sede Viña del Mar.

Parra, C., & Crespo, A. (2020). Métodos de análisis de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y riesgo [Nota técnica]. IngeCon / INGEMAN.

Parra, C., Aránguiz, A., Pizarro, F., Baldi, C., Duque, P., & Köhnenkamp, E. (2022). Técnica de análisis de costos de ciclo de vida (ACCV): Caso básico de estudio bus eléctrico vs. bus diésel [Presentación]. Universidad Técnica Federico Santa María.

ANEXOS.

ANEXO A — DIMENSIONAMIENTO PRELIMINAR DE PAR Y POTENCIA.

A.1 Propósito

Estimar, a nivel de orden de magnitud, el par requerido en el eje final del sistema de giro para respaldar la selección preliminar del accionamiento (motor + VDF), incorporando escenarios de sobrecarga asociados a condiciones operacionales (p. ej., acreciones/rozamiento), y se entiende como estimación inicial que debe ser verificado en ingeniería de detalle.

A.2 Supuestos y datos de entrada

- Potencia nominal del accionamiento actual:

$$P_{nom} = 40 * 0,746 = 29,84 \text{ kW}$$

- Eficiencia global referencial (motor + transmisión):

$$\eta = 0,85 \text{ (supuesto conservador, a validar en ingeniería de detalle)}$$

- Velocidad eje final en operación:

$$n = 1 \text{ a } 1,5 \text{ rpm}$$

- Escenarios de carga (factor multiplicativo sobre el par base):

$$\text{Normal: } K = 1,0$$

$$\text{Alto par: } K = 1,5$$

$$\text{Peor caso: } K = 2,0$$

Nota: el peso del horno/carga se considera como contexto de operación; el par se estima por equivalencia energética del accionamiento existente y velocidad de giro.

A.3 Desarrollo

Potencia útil estimada en el eje final:

$$P_{util} = P_{nom} * \eta = 29,84 * 0,85 = 25,36 \text{ kW}$$

Relación potencia–par:

- Se parte de la relación fundamental:

$$P = T * \omega$$

donde P está en W, T en N·m y ω en rad/s.

- Como la velocidad se expresa en rpm, se utiliza:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

- Sustituyendo en $P = T\omega$ y despejando T :

$$T = \frac{P * 60}{2\pi n}$$

- Si P se expresa en kW, entonces $P(W) = 1000 \cdot P(kW)$. Por tanto:

$$T = \frac{(1000P_{kW}) * 60}{2\pi n} = \frac{60.000}{2\pi} * \frac{P_{kW}}{n} = 9550 * \frac{P_{kW}}{n}$$

- Por lo tanto, para P en kW y n en rpm, se usa:

$$T(Nm) = \frac{9550 * P_{util}(kW)}{n(rpm)}$$

A.4 Cálculo de par base en el rango de operación

- Para $n = 1$ rpm:

$$T_{base,10} = \frac{9550 * 25,36}{1} = 242,15 \text{ (kNm)}$$

- Para $n = 1,5$ rpm:

$$T_{base,8} = \frac{9950 * 25,36}{1,5} = 161,43 \text{ kNm}$$

A.5 Resultados por escenarios

Tabla A-1. Resultados por escenarios.

Escenario	Factor K	T a 1,5 rpm (kN·m)	T a 1 rpm (kN·m)
Normal	1	161,4	242,1
Alto par	1,5	242,1	363,2
Peor caso	2	322,9	484,3

Fuente: Elaboración propia.

A.6 Interpretación para selección preliminar (motor + VDF)

En el rango operacional del eje final ($n = 1,0$ a $1,5$ rpm), el par de referencia estimado se ubica entre 161 y 242 kN·m en condición normal, pudiendo alcanzar aproximadamente 243–363 kN·m en un escenario de alto par ($K=1,5$) y hasta 323–484 kN·m en un peor caso ($K=2,0$).

Estos valores constituyen una estimación de orden de magnitud, obtenida por equivalencia de potencia del accionamiento existente y eficiencia global supuesta. En consecuencia, deben verificarse en ingeniería de detalle mediante: (i) confirmación de la relación de transmisión real y eficiencias efectivas, (ii) revisión del estado mecánico y

rozamientos, y (iii) cuando sea factible, medición o estimación de torque en terreno para ajustar límites de par/corriente y protecciones del VDF.

ANEXO B — INERCIA EQUIVALENTE Y DINÁMICA.

B.1 Propósito

Verificar la compatibilidad dinámica del sistema de giro con el accionamiento propuesto, respaldando la definición de rampas de aceleración/deceleración y el criterio de ajustes en puesta en marcha, en función de la exigencia adicional de par/corriente durante transitorios.

B.2 Supuestos y datos de entrada

- Velocidad de operación eje final: $nf \approx 1-1,5$ rpm.
- Tiempo de rampa configurado en el accionamiento actual (SIMOREG):
 $t_{rampa} \approx 4$ s (parametrización observada).

Nota técnica (importante para interpretación): el tiempo de rampa configurado corresponde a la referencia de aceleración del accionamiento; el seguimiento real puede quedar limitado por disponibilidad de par/corriente y condiciones de carga. Esta condición se valida en pruebas en sitio mediante registro de corriente, torque estimado (si está disponible) y tiempo efectivo de estabilización.

Para esta verificación se adopta un criterio práctico: destinar una fracción del par disponible a la aceleración, evitando operar al límite durante transitorios. Se muestran dos valores representativos:

- $T_{acc,disp} = 10 \text{ kNm} \cdot \text{rpm} (= 10000 \text{ N} \cdot \text{rpm})$
- $T_{acc,disp} = 15 \text{ kNm} \cdot \text{rpm} (= 15000 \text{ N} \cdot \text{rpm})$

donde $T_{acc,disp}$ representa el margen de par que se reserva para la dinámica del transitorio, una vez cubierto el par requerido por carga/rozamientos.

- Nota de notación: en este anexo, T_{acc} representa par (torque), mientras que t_{acc} representa tiempo de rampa.

B.3 Desarrollo

Velocidad angular:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

Aceleración media:

$$\alpha = \frac{\omega}{t_{rampa}}$$

Par adicional asociado a la aceleración:

$$T_{acc} = J * \alpha$$

donde J es la inercia equivalente referida al movimiento de giro del horno.

Para verificación se reordena:

$$J_{max} = \frac{T_{acc,disp}}{\alpha}$$

Interpretación: si J es menor o comparable a J_{max} , el sistema puede seguir la rampa sin quedar limitado por torque/corriente. Si J supera ese orden de magnitud, el accionamiento tenderá a limitar (por par/corriente), aumentando el tiempo efectivo de aceleración o elevando la corriente durante el transitorio.

B.4 Resultados (sensibilidad por velocidad)

Para el rango de giro del horno:

- Para 1 rpm: $\omega = 0,1047$ rad/s
- Para 1,5 rpm: $\omega = 0,1571$ rad/s

Se evalúan dos tiempos de rampa representativos: $t_{rampa} = 4\text{ s}$ (valor observado en SIMOREG) y $t_{rampa} = 10\text{ s}$ (valor conservador de inicio para puesta en marcha).

Tabla B-1. J_{max} para distintas rampas ($n = 1\text{--}1,5\text{ rpm}$)

<i>t_{rampa}</i> (s)	<i>n</i> (rpm)	ω (rad/s)	$\alpha = \omega/t$ (rad/s ²)	<i>J_{max}</i> (kg·m ²)	
				con 10 (kN·m)	con 15 (kN·m)
4	1	0,10472	0,02618	381.972	572.958
4	1,5	0,15708	0,03927	254.648	381.972
10	1	0,10472	0,01047	954.930	1.432.395
10	1,5	0,15708	0,01571	636.620	954.930

Fuente: Elaboración propia.

B.5 Conclusión y recomendación de rampas (puesta en marcha)

Dado que el giro del horno ocurre a muy baja velocidad (1–1,5 rpm), el ajuste de rampas se valida principalmente en terreno observando corriente, estabilidad del giro y ausencia de trips. Como referencia, en el SIMOREG se ha observado una rampa del orden de 4 s; sin embargo, para la puesta en marcha del accionamiento propuesto se recomienda iniciar con valores conservadores (por ejemplo, $t_{acc} = 10\text{s}$ y $t_{dec} = 10\text{s}$) y reducir progresivamente hacia 4 s solo si la evidencia lo respalda. En desaceleración, si se observan eventos de sobretensión o comportamiento inestable, se recomienda aumentar t_{dec} y registrar el cambio.

B.6 Verificación en pruebas en terreno

La verificación final se realiza durante la puesta en marcha, registrando desde VDF/HMI/PLC: corriente del motor y su tendencia, torque estimado (si está disponible), tiempo efectivo de estabilización y ocurrencia de alarmas/trips. Con esta evidencia se ajustan rampas y límites para lograr una operación estable, repetible y segura.

ANEXO C — SELECCIÓN DE VDF.

C.1 Propósito

Justificar la selección preliminar del variador de frecuencia (VDF) para el sistema de giro, en términos de corriente nominal, capacidad de sobrecarga y modo de control, asegurando estabilidad a muy baja velocidad (giro del horno ~1–1,5 rpm) y márgenes adecuados para condiciones de operación exigentes (acrecciones/rozamientos variables).

C.2 Datos de entrada (base de diseño)

- Red disponible: 400 Vac, 50 Hz (trifásica).
- Accionamiento actual como referencia de orden de magnitud: 40 HP ($\approx 29,8$ kW).
- Requerimiento operativo: control de par/velocidad estable a muy baja velocidad (giro horno ~1–1,5 rpm).
- Rampas observadas en SIMOREG: 4 s (ver Anexo B).
- Longitud de cable VDF–motor (referencia): HA1 ~40 m; HA2 ~70 m (mitigación dv/dt y EMC se aborda en Anexos D y E).
- Filosofía de control: integración con PLC/HMI para permisos, enclavamientos y registro de eventos.

C.3 Criterios de selección del VDF

C.3.1 Dimensionamiento por corriente

El VDF se selecciona en función de la corriente nominal del motor (I_{nom}) y no solo por potencia (kW), ya que la exigencia real depende del par requerido, sobrecargas y condiciones térmicas. Como criterio mínimo de margen para selección preliminar se adopta:

Ecuación C-1:

$$I_{VDF,nom} \geq 1,10 * I_{motor,nom}$$

donde $I_{VDF,nom}$ (HD) es la corriente nominal del variador en perfil Heavy Duty y $I_{motor,nom}$ corresponde a la corriente nominal del motor seleccionado. El cierre definitivo se realiza en ingeniería de detalle con la placa del motor AC finalmente definido.

C.3.2 Capacidad de sobrecarga

Debido a operación con rozamientos variables y posibles eventos de sobrecarga (acrecciones), se recomienda VDF con perfil Heavy Duty (HD) o equivalente, con al menos:

- 150% de corriente/par por 60 s (mínimo recomendado).
- Deseable: sobrecarga de corta duración adicional (según fabricante), manteniendo protección térmica.

C.3.3 Modo de control (sensorless vs encoder)

Dado que el giro del horno opera a baja velocidad, se requiere un control con buena estabilidad de par. Se recomienda un VDF con control vectorial sensorless como configuración base. Adicionalmente, se deja prevista la opción de encoder como mejora de robustez si en puesta en marcha se observan oscilaciones, pérdida de estabilidad o necesidad de mayor comportamiento más consistente a baja velocidad bajo carga real.

C.4 Dimensionamiento preliminar

C.4.1 Potencia de referencia

- La potencia histórica instalada es 40 HP (≈ 30 kW).
- Para selección preliminar, se consideran dos alternativas típicas (estándar industrial):
 - Alternativa 1: motor ~ 30 kW con VDF dimensionado en HD por corriente.

- Alternativa 2 (margen): motor ~30–37 kW (según disponibilidad) con VDF dimensionado en HD para asegurar sobrecarga sin operar “al límite”.

C.4.2 Cierre por corriente.

Una vez seleccionado el motor AC, se verifica la selección del VDF aplicando el criterio de la Ecuación C-1 con el valor de $I_{\text{motor,nom}}$ indicado en la placa del motor, confirmando además que el VDF cumpla el perfil de sobrecarga mínimo.

C.5 Parámetros iniciales recomendados (puesta en marcha)

Para la puesta en marcha se recomienda iniciar con rampas conservadoras (por ejemplo, $t_{acc}=10$ s y $t_{dec}=10$ s) y ajustar progresivamente hacia el valor observado en el sistema actual (≈ 4 s) solo si la evidencia de operación lo respalda. La justificación del criterio de rampas y su verificación dinámica se desarrolla en el Anexo B. Los parámetros iniciales y criterios de revisión se resumen en la Tabla C-2.

Tabla C-2 — Parámetros iniciales

Ítem	Parámetro	Valor inicial recomendado	Ajuste / criterio de revisión	Evidencia de verificación
1	Rampa de aceleración	10 s	Reducir gradualmente hacia 4 s solo si la corriente y el comportamiento mecánico se mantienen estables, sin alarmas ni	Tendencia de corriente, tiempo efectivo de estabilización, registro de alarmas/trips.
2	Rampa de desaceleración	10 s	Aumentar si se observa sobretensión/ regeneración o inestabilidad durante frenado; reducir solo con evidencia favorable.	Alarmas de sobretensión, comportamiento en frenado, registro de eventos.
3	Límite de corriente	Habilitado (según motor/VDF)	Ajustar de acuerdo con la placa del motor y criterios del fabricante, evitando operar cerca del límite de forma sostenida.	Corriente RMS, sobrecargas registradas, parámetros del VDF.
4	Límite de par	Habilitado	Ajustar para evitar esfuerzos bruscos y sobrecargas repetitivas; coordinar con protección mecánica/proceso.	Torque estimado (si disponible), patrón de sobrecorriente, eventos asociados a sobrecarga.
5	Protección térmica del motor	Habilitada	Usar modelo térmico del VDF y/o sensores (PTC) si aplica; validar en función del servicio y ventilación real.	Estado térmico/alarma, temperatura (si existe medición), historial de eventos.
6	Protecciones eléctricas VDF	Sobrecorriente, sobretensión, subtensión:	Mantener habilitadas; parametrizar umbrales según fabricante y condiciones de red.	Historial de trips, registros de tensión/corriente, reporte de eventos.
7	Anti-bloqueo (si aplica)	Habilitado	Ajustar si el fabricante lo recomienda para cargas de alto par a baja velocidad; evitar configuraciones que “fuerzan” el sistema.	Registro de activación, estabilidad de giro, corriente durante eventos de carga alta.
8	Registro y diagnóstico	Historial de fallas/trips y eventos: habilitado	Mantener activo para análisis y reducción de MTTR; estandarizar respaldos de parámetros.	Reporte de fallas, bitácora de eventos, respaldos de parámetros/versión.
9	Variables mínimas a PLC/HMI	Ready/Run/Fault; código de trip; corriente; frecuencia/velocidad estimada; torque	Asegurar visualización y registro; definir umbrales operativos para apoyo de decisión.	Pantallas HMI, tendencias, registros exportables, bitácora de operación.

Fuente: Elaboración propia.

C.6 Relación con el documento

Este anexo respalda los criterios descritos en 3.3 (diseño propuesto) y la parametrización/validación descrita en 3.6 (pruebas y puesta en marcha).

ANEXO D — CABLEADO, dv/dt Y FILTRO DE SALIDA

D.1 Propósito

Establecer criterios técnicos preliminares para el tramo VDF–motor considerando las longitudes de cable existentes, con el objetivo de proteger la aislación del motor, reducir esfuerzos por dv/dt y definir la necesidad de reactancia/filtro de salida, dejando la selección final de componentes para ingeniería de detalle en función del VDF y recomendaciones del fabricante.

D.2 Datos de entrada y condiciones del proyecto

- Tramo VDF–motor estimado:
 - HA1: $L \approx 40$ m
 - HA2: $L \approx 70$ m
- Motor AC instalado en reemplazo del motor DC actual (giro horno 1–1,5 rpm).
- Ambiente industrial con canalizaciones compartidas (relevancia EMC en Anexo E).
- Objetivo: minimizar riesgo de fallas por esfuerzo eléctrico en aislamiento y reducir disparos por perturbaciones.

D.3 Fundamentación técnica

Los VDF con PWM generan frentes de tensión rápidos que, combinados con longitudes relevantes de cable, pueden producir sobrevoltajes transitorios en bornes del motor y aumentar el estrés dieléctrico del aislamiento. Por esta razón, se establecen criterios preliminares de mitigación para el tramo VDF–motor, diferenciando los hornos por longitud de cable, y dejando la selección final para la ingeniería de detalle y la recomendación del fabricante.

Para facilitar la aplicación práctica, la Tabla D-1 sintetiza el criterio por horno según longitud de cable y nivel de exigencia del tramo VDF–motor. La selección final

de reactor/filtro se valida en ingeniería de detalle y en puesta en marcha, conforme a la recomendación del fabricante.

Tabla D-1 — Criterios preliminares para tramo VDF–motor y mitigación de dv/dt (por horno)

Ítem	HA1	HA2	Fundamento / criterio	Verificación en puesta en marcha
Longitud estimada VDF–motor	~40 m	~70 m	A mayor longitud, mayor probabilidad de sobrevoltajes por reflexión y mayor estrés dieléctrico.	Confirmar longitud real y trazado (bandejas/canalizaciones).
Riesgo técnico principal	Moderado	Alto	PWM + cables largos → picos de tensión en bornes del motor, aumento de dv/dt y esfuerzos de aislación.	Ausencia de trips asociados a ruido/transitorios; estabilidad de corriente.
Mitigación recomendada (preliminar)	Reactor de salida o filtro dv/dt (según fabricante)	Filtro dv/dt como opción base; evaluar filtro seno si el motor no es “inverter duty” o si hay sensibilidad	HA2 se considera “tramo largo”; filtro dv/dt reduce picos; filtro seno entrega la mayor protección (mayor costo/tamaño).	Validar: configuración de switching del VDF, comportamiento a baja velocidad, registros de eventos y alarmas.
Dependencias para selección final	Tipo de motor (aislación), switching del VDF, disposición de cable	Tipo de motor (aislación), switching del VDF, disposición de cable	La decisión reactor vs dv/dt vs seno depende del VDF específico, frecuencia de conmutación y tipo de aislación del motor.	Recomendación y/o validación del fabricante; si es posible, medición de picos en bornes motor.
Requisitos mínimos de cableado (obligatorios)	Cable para VDF apantallado 360°, PE continuo, segregación potencia/control, pantalla a tierra en ambos extremos	Igual	Buenas prácticas EMC y reducción de corrientes de modo común/ruido.	Inspección de montaje (pantalla 360°, tierras de baja impedancia, segregación).
Parámetro relevante del VDF	Frecuencia de conmutación: evitar valores excesivos (según fabricante)	Igual	Menor switching reduce esfuerzos dv/dt y pérdidas, manteniendo desempeño.	Confirmar parámetro configurado y registrar versión/backup.

Fuente: Elaboración propia.

D.4 Criterios mínimos de instalación del cable VDF–motor (mínimos obligatorios)

1. Cable recomendado: cable apantallado para VDF (pantalla 360°) o equivalente industrial apto para PWM.
2. Terminación de pantalla: conexión 360° a tierra en ambos extremos (gabinete VDF y caja motor), según práctica del fabricante.
3. Segregación: canalizaciones separadas de potencia/control; evitar paralelismo prolongado con señales de instrumentación/PLC.

4. Puesta a tierra: conductor PE continuo, uniones firmes y de baja impedancia; evitar “colas” largas.
5. Prensaestopas/conectores: adecuados para mantener continuidad de pantalla y compatibilidad EMC.
6. Frecuencia de conmutación: parametrizar a valores recomendados por el fabricante (evitar excesos).

D.5 Verificación en puesta en marcha

La validación se realiza mediante: (i) observación de estabilidad de corriente y ausencia de disparos asociados a transitorios/ruido; (ii) confirmación de parámetros relevantes del VDF (frecuencia de switching, límites); (iii) verificación de comportamiento a baja velocidad; y (iv) cuando exista soporte técnico o instrumentación, evaluación/diagnóstico por fabricante o medición de picos en bornes del motor.

D.6 Conclusión

Con longitudes VDF–motor de ~40 m (HA1) y ~70 m (HA2), se recomienda incorporar desde el diseño la mitigación de dv/dt y buenas prácticas de cableado. La solución preliminar propone reactor/filtro dv/dt en HA1 y filtro dv/dt (con posible filtro seno según validación) en HA2, dejando la selección final a ingeniería de detalle en función del VDF, tipo de motor y recomendaciones del fabricante, con verificación en puesta en marcha.

ANEXO E — SEÑALES, PERMISOS/INTERLOCKS Y MATRIZ DE ALARMAS/EVENTOS (VDF-PLC-HMI)

E.1 Propósito

Consolidar la lista mínima de señales, permisos/enclavamientos y la matriz de alarmas/eventos que sustentan la operación segura y el diagnóstico del nuevo accionamiento (VDF) integrado con PLC/HMI. Este anexo respalda la filosofía de control y registro descrita en 3.3.2–3.3.3 y el plan de control en 3.6.4, orientado a reducir el MTTR mediante mejor trazabilidad y evidencia operativa.

E.2 Alcance y contenido

Este anexo incluye, como mínimo:

- Permisos y enclavamientos de seguridad (señales discretas críticas).
- Señales de mando/estado principales del accionamiento (operación y diagnóstico).
- Variables de monitoreo y diagnóstico vía comunicación (tendencias y análisis).
- Matriz mínima de alarmas/eventos a registrar (condición, severidad, acción recomendada y registro mínimo).

Nota: El objetivo es establecer un mínimo estándar replicable en HA1 y HA2, manteniendo consistencia operativa y facilidad de diagnóstico.

E.3 Convención de numeración

- DI/DO/AI/AO: entradas/salidas discretas o analógicas.
- COM: variable o señal vía comunicación (bus/campo).
- Origen→Destino: equipo que emite la señal y equipo que la utiliza/registra.

E.4 Tablas de referencia

Para aplicar el criterio de forma directa, las Tablas E-1 a E-3 resumen las señales mínimas por categoría (seguridad, mando/estado y monitoreo). La Tabla E-4 define el set mínimo de eventos/alarma a registrar para soportar diagnóstico y reducción de MTTR.

Tabla E-1. Permisos y enclavamientos de seguridad

A) Permisos e interlocks de seguridad (8 señales)					
ID	Señal (nombre funcional)	Tipo	Origen→Destino	Finalidad	Observación / verificación
A1	Cadena de seguridad OK (Paradas de emergencia)	DI	Relé seguridad → PLC	Permitir habilitación/marcha	Basado en paradas de emergencia
A2	Trip genérico de protecciones (protecciones)	DI	Protecciones/relé → PLC	Bloquear marcha y registrar evento	Registro genérico
A3	Alimentación tablero OK (ITM/MCCB cerrado – contacto auxiliar)	DI	ITM/MCCB→PLC	Diagnóstico: equipo energizado	A implementar si el interruptor lo permite
A4	Contactador principal energizado (KM feedback)	DI	KM aux→PLC	Confirmar habilitación general	KM existe en equipos similares
A5	VDF permiso habilitación (Enable/STO OK)	DI	VDF→PLC	Confirmar que VDF está habilitable	Recomendado si usa Enable cableado
A6	Sobretensión motor (PTC/termistor)	DI	Motor→PLC/VDF	Protección térmica y alarma	Si motor lo trae
A7	Falla a tierra / diferencial disparado	DI	Protección→PLC	Seguridad + diagnóstico	Verificar estado de puesta a
A8	Opcional: Puerta tablero cerrada / enclavamiento de puerta	DI	Switch→PLC	Evitar marcha con puerta abierta	Mejora opcional, no existe en tablero actual

Fuente: Elaboración propia.

Tabla E-2. Mando y estados principales del accionamiento

B) Mando y estados principales del accionamiento (12 señales)					
ID	Señal (nombre funcional)	Tipo	Origen→Destino	Finalidad	Observación / verificación
B1	Comando Marcha (RUN)	DO/COM	PLC→VDF	Orden de marcha	Preferible vía comunicación
B2	Comando Paro (STOP)	DO/COM	PLC→VDF	Orden de parada	Vía comunicación
B3	Sentido giro (FWD/REV)	DO/COM	PLC→VDF	Selección de dirección	Si el proceso requiere
B4	Referencia velocidad (%)	AO/COM	PLC→VDF	Consigna de velocidad	Vía comunicación
B5	Límite de par/corriente (torque limit)	COM	PLC→VDF	Proteger transmisión / control robusto	Opcional, pero muy útil
B6	Reset/Rearme de fallas VDF	DO/COM	PLC→VDF	Rearme controlado	Con lógica de permisos
B7	VDF listo/Disponible (READY)	DI/COM	VDF→PLC	Permiso para ejecutar marcha	Estado típico del VDF
B8	VDF en marcha (RUN status)	DI/COM	VDF→PLC	Confirmación de operación	Para HMI y registro
B9	VDF en falla / Trip (FAULT)	DI/COM	VDF→PLC	Diagnóstico rápido	Base para histórico de
B10	Selección modo LOCAL/REMOTO	DI	Selector→PLC/VDF	Evitar mandos cruzados	Si lo usas en filosofía de
B11	Selección modo MANUAL/AUTO (HMI)	Interno/HMI	HMI→PLC	Estandarizar maniobras	No siempre requiere I/O
B12	Baliza/sirena o “permiso de operación”	DO	PLC→Señalización	Señalización estado/marcha	Recomendado en planta

Fuente: Elaboración propia.

Tabla E-3 — Variables de monitoreo y diagnóstico vía comunicación

C) Variables de monitoreo y diagnóstico (5 señales, vía comunicación)					
ID	Variable (monitoreo)	Tipo	Origen→Destino	Finalidad	Observación / verificación
C1	Corriente motor (A)	COM	VDF→PLC/HMI	Diagnóstico carga/sobrecarga	Para comparar eventos
C2	Frecuencia/velocidad estimada	COM	VDF→PLC/HMI	Supervisión del giro	Tendencia y operación
C3	Par/torque estimado (%)	COM	VDF→PLC/HMI	Ver “alto par a baja velocidad”	Muy útil para justificar desempeño
C4	Código de falla / último trip	COM	VDF→PLC/HMI	Causa raíz rápida	Base para reducir MTTR
C5	Horas operación / contador arranques	COM	PLC/VDF→HMI	Gestión mantenimiento	KPI simple y potente

Fuente: Elaboración propia.

Tabla E-4 — Matriz mínima de alarmas/eventos a registrar (condición, severidad, acción, registro mínimo)

	Evento / alarma (nombre funcional)	Fuente	Condición de activación (criterio)	Severidad	Acción recomendada (operación/mantenimiento)	Registro mínimo
E01	Cadena de seguridad abierta (E-Stop / Seguridad NO OK)	Relé seguridad / PLC	A1 = 0 (cadena abierta)	Crítica	Detener. Verificar paradas de emergencia (terreno/caseta), relé de seguridad, rearme según procedimiento.	Fecha/hora + estado cadena
E02	Protección principal abierta (QF1/MCCB abierto)	Aux QF1 → PLC	A3 = 0	Crítica	Verificar disparo MCCB, causa (sobrecorriente/corto), inspección de tablero/cableado antes de rearmar.	Fecha/hora + estado QF1
E03	Contactador de habilitación desenergizado (KM1 caído)	Aux KM1 → PLC	A4 = 0 durante operación o al intentar	Alta	Revisar permisivos, circuito de mando KM1, E-Stop, enclavamientos. Reintentar marcha solo con permisos OK.	Fecha/hora + estado KM1 + estado permisos
E04	VDF no listo (Drive NOT READY)	VDF → PLC (COM)	B7 = 0 (no ready)	Alta	Revisar motivo "not ready" (enable, fallas latentes, parametrización, comunicación). Ver diagnósticos VDF.	Fecha/hora + estado Ready + código asociado si existe
E05	Falla/Viaje VDF (TRIP / FAULT)	VDF → PLC (COM)	B9 = 1 (fault)	Crítica	Detener. Registrar código de falla. Aplicar procedimiento: identificar causa, corregir, reset controlado.	Fecha/hora + código falla + snapshot (l, f, torque)
E06	Pérdida de comunicación PLC-VDF	PLC	Time-out EtherNet/IP / pérdida tags críticos	Alta	Pasar a condición segura (bloquear marcha). Revisar red industrial, switch, IP, cable, configuración.	Fecha/hora + "comms lost" + duración
E07	Sobretensión motor	Motor PTC → PLC/VDF	A6 = 1 (PTC/termistor)	Crítica	Detener y dejar enfriar. Verificar ventilación, carga excesiva, bloqueo mecánico, sensores.	Fecha/hora + temp alarm + corriente/torque al evento
E08	Sobretensión VDF	VDF → PLC (COM)	Alarma térmica drive	Alta	Revisar ventilación gabinete, filtros, temperatura ambiente, limpieza, carga.	Fecha/hora + código + estado ventilación (si aplica)
E09	Sobrecorriente / sobrecarga (I > límite / overload)	VDF → PLC (COM)	Overcurrent/Overload	Alta	Revisar rampa, torque requerido, atascos mecánicos, ajuste de límites. Evaluar modo "heavy duty".	Fecha/hora + I + torque + f
E10	Falla a tierra / diferencial disparado	Protección → PLC	A7 = 1 (tierra/diferencial)	Crítica	Detener. Inspección de aislamiento motor/cable, humedad, conexiones PE. No rearmar sin revisión.	Fecha/hora + estado falla tierra
E11	Subtensión red / pérdida de fase	VDF / medición tablero	Under-voltage / phase loss	Alta	Revisar alimentación 400 V, aprietes, barras, caída de tensión, eventuales perturbaciones.	Fecha/hora + tipo evento
E12	Sobretensión / DC bus high	VDF → PLC (COM)	Over-voltage / bus high	Alta	Revisar desaceleración (rampa), energía regenerativa, necesidad de resistencia/freno (si aplica), calidad red.	Fecha/hora + tipo evento
E13	Interlock operativo activo (marcha inhibida por permiso)	PLC	Permiso no cumplido (cadena OK, QF1, KM1, modo, etc.)	Media	Mostrar en HMI "qué permiso falta". No es falla: guía al operador.	Fecha/hora + permiso faltante
E14	Intento de marcha en condición no permitida	PLC/HMI	Start solicitado con permisos NO OK	Media	Registrar evento y retroalimentar en HMI. Útil para disciplina operacional.	Fecha/hora + estado permisos + usuario
E15	Reset de falla ejecutado	PLC/HMI	Reset solicitado y aceptado	Baja	Registrar para trazabilidad (quién, cuándo) y análisis posterior.	Fecha/hora + usuario + código previo
E16	Cambio de modo Manual/Auto	HMI	Cambio de modo	Baja	Registrar para trazabilidad.	Fecha/hora + modo + usuario

Fuente: Elaboración prop

E.5 Cómo se usa este anexo

Los identificadores A*, B* y C* se emplean como nomenclatura estándar para el mapeo y documentación de señales entre PLC–VDF–HMI, facilitando la trazabilidad y la réplica del diseño entre HA1 y HA2.

Por su parte, la matriz E01–E16 establece el mínimo de alarmas/eventos a registrar, definiendo para cada caso: la condición de activación, el nivel de severidad, la acción esperada de operación y mantenimiento, y la evidencia mínima que debe quedar registrada (fecha/hora, estado y variables asociadas).

En conjunto, este esquema busca acortar los tiempos de diagnóstico y reducir el MTTR, al estandarizar la respuesta ante fallas y asegurar que cada evento quede respaldado con información objetiva.

ANEXO F — MATRIZ DE RIESGO Y CONTROLES DEL SUBSISTEMA VDF-PLC-HMI

F.1 Propósito

Documentar, en formato matriz, los principales riesgos operacionales y técnicos asociados a la modernización del subsistema eléctrico/control, incluyendo causas probables, consecuencias, medidas de control/mitigación y evidencia de verificación, con el fin de asegurar una implementación segura, trazable y replicable (HA1 → HA2).

F.2 Alcance y contenido

La matriz considera eventos de riesgo relevantes en:

- Selección y parametrización del VDF (baja velocidad / alto par).
- Integridad de instalación eléctrica (EMC, puesta a tierra, cableado).
- Coordinación de protecciones y permisos/interlocks.
- Ejecución de pruebas (FAT/SAT/SIT) y disciplina de control de cambios.
- Continuidad operacional y reducción de MTTR mediante registro y diagnóstico.

F.3 Relación con el documento

- Referenciado en 3.3 (criterios técnicos, interlocks, registro).
- Referenciado en 3.6 (estrategia de ejecución, pruebas y control).
- Complementa el Anexo E (señales y matriz de alarmas/eventos) al estructurar riesgos, controles y evidencia.

F.4 Matriz de riesgos y controles

Tabla F-1. Matriz de riesgos, mitigaciones y evidencia (implementación y operación)

ID	Riesgo (evento)	Causa probable	Consecuencia	Prob.	Impacto	Nivel	Medidas de mitigación (control)	Verificación / evidencia
R1	Selección insuficiente de par a baja velocidad	Relación total de reducción no verificada / carga real mayor a la esperada	Trip por sobrecorriente, inestabilidad de giro, daño mecánico potencial	3	5	Alto	Verificar reducción/velocidad real (tacómetro/tiempo por vuelta/placas); dimensionar VDF HD; definir torque limit y rampas conservadoras	Informe de levantamiento; parámetros VDF; SAT-07/SAT-10
R2	Trips por dv/dt / estrés en aislación del motor	Longitudes VDF-motor (especialmente HA2 70 m)	Fallas repetitivas, daño prematuro aislación, indisponibilidad	3	4	Alto	Cable apantallado, terminación 360°; puesta a tierra; evaluación obligatoria dv/dt; instalación de reactor/filtro según recomendación fabricante	Checklist instalación; medición continuidad PE; evidencia de filtro/ reactor; SAT-12
R3	Interferencias EMC a control/PLC	Segregación deficiente potencia/control; tierras inadecuadas	Mandos erráticos, falsas alarmas, pérdida de comunicación	3	4	Alto	Segregar canalizaciones; apantallamiento; filtros EMC/line reactor si aplica; diseño de tierras; pruebas de operación en condición real	Inspección canalizaciones; registro de eventos; SAT-12
R4	Ventana de detención insuficiente para	Subestimación de trabajos mecánicos/cableado	Extensión parada, impacto productivo	3	4	Alto	Prearmado tablero; FAT básico; kit de montaje; planificación por etapas; recursos y repuestos listos	Cronograma firmado; actas de avance; checklist E3/E4
R5	Incompatibilidad de protecciones / coordinación	Ajustes QF/MCCB no coordinados con VDF y cable	Disparos intempestivos o falta de selectividad	2	4	Medio	Definir curva/ajustes; coordinación con fabricante VDF; revisar capacidad de cortocircuito	Hoja de ajustes; verificación documental; SAT-02
R6	Lógica de permisos incompleta	Interlocks no levantados o mal cableados	Arranque no deseado / bloqueo excesivo / fallas de seguridad	2	5	Alto	Lista I/O final + pruebas de interlocks; relés de interfaz si aplica; filosofía clara de estados S0-S4	Tabla I/O final; SAT-01/SAT-11; registro HMI
R7	Pérdida de trazabilidad por falta de respaldos	No se respalda VDF/PLC/HMI y versiones	Mayor MTTR futuro, dificultad de diagnóstico	3	3	Medio	Procedimiento de backup; control de versiones; carpeta técnica; etiquetado y numeración	Backup firmado; lista de versiones; documentación final
R8	Falta de capacitación operación/ mantenimiento	Cambio tecnológico (DC→AC+VDF+PLC/HMI)	Operación incorrecta; intervenciones inseguras; tiempos altos	3	3	Medio	Capacitación mínima + instructivos; checklist de fallas comunes; matriz alarmas/eventos	Acta capacitación; instructivo; uso de HMI/históricos
R9	Replicación a HA2 no estandarizada	“As-built” no replicable; cambios ad-hoc	Se pierde ventaja de estandarización	2	3	Medio	Plantilla estándar (parámetros VDF/PLC/HMI); BOM base; checklist SAT replicable	Paquete replicable + lecciones aprendidas; control documental
R10	Riesgo de seguridad en trabajo eléctrico	Procedimiento de bloqueo incompleto / energías residuales	Incidente grave	2	5	Alto	Procedimiento de bloqueo formal; verificación ausencia tensión; enclavamientos y permisos; procedimiento planta	Acta de procedimiento de bloqueo; registros; inspección de seguridad

Fuente: Elaboración propia.

Nota de lectura:

- Prob. e Impacto se califican en escala 1–5 (bajo → alto).
- Nivel corresponde a la priorización resultante (p. ej., Alto/Medio), utilizada para enfocar controles y verificación.

F.6 Criterios mínimos de control

Para asegurar que la matriz se traduzca en acciones verificables, se adoptan los siguientes criterios mínimos:

- 1) Permisos/enclavamientos y señales estándar: estandarizar permisos, estados y mandos según Anexo E, evitando mandos cruzados y facilitando el diagnóstico.
- 2) Verificación de instalación (tierra/segregación/EMC): aplicar criterios mínimos de cableado e instalación y dejar evidencia (checklist, continuidad de PE, inspección de canalizaciones).
- 3) Pruebas y aceptación con evidencia: ejecutar FAT/SAT/SIT (según aplique) y respaldar: actas, checklist, parámetros del VDF y registro de eventos.
- 4) Respaldos y control de cambios (as-built): mantener respaldos de VDF y versiones de PLC/HMI, bitácora de cambios y evidencias (capturas/logs) para asegurar replicabilidad hacia HA2.

ANEXO G — CÁLCULO DEL COSTO HORARIO DE NO PRODUCCIÓN (CP) Y DEL COSTO DE INDISPONIBILIDAD POR FALLOS (CIF)

G.1 Propósito

Presentar el desarrollo completo de ecuaciones, supuestos y cálculos intermedios utilizados para estimar: (i) el costo horario de no producción CP_h (ii) el Costo de Indisponibilidad por Fallos CIF (global y eléctrico/control), a partir de registros 2024 y parámetros económicos consolidados.

G.2 Alcance y relación con el documento

Este anexo respalda el Capítulo 2, Sección 2.6, y sustenta el insumo económico base utilizado en la evaluación ACCV/LCC del Capítulo 3.

Nota: Algunas definiciones y supuestos ya fueron introducidos en la Sección 2.6. En este anexo se incluyen nuevamente solo con fines de trazabilidad, de modo que el lector pueda replicar los resultados sin depender del cuerpo principal.

G.3 Supuestos y base operacional de normalización

G.3.1 Supuesto de costos CSHA (alcance)

En el período analizado (registros 2024), las detenciones del horno de ánodos y de su sistema de giro no se asociaron a incidentes con costos atribuibles de seguridad, salud ocupacional o ambiente dentro del alcance del estudio. En consecuencia, para efectos de cuantificación del costo por indisponibilidad se adopta:

$$CSHA = 0$$

(Esta simplificación aplica únicamente al modelo económico del CIF y no implica ausencia de riesgos operacionales.)

G.3.2 Ventana operativa efectiva anual por horno

El proceso metalúrgico se desarrolla en régimen continuo; sin embargo, una detención del horno retrasa la continuidad del ciclo HRF completo y su coordinación aguas arriba/abajo. Por ello, el análisis se normaliza usando una ventana operativa efectiva de 21 h/día por horno (ciclo HRF de ~10–11 h, hasta dos carreras por día), dejando el tiempo restante para mantenimiento programado con horno vacío. Adicionalmente, se excluyen 25 días/año por mantenimiento general planificado.

La base anual por horno queda definida como:

$$H = (365 - 25) \left[\frac{\text{días}}{\text{año}} \right] * 21 \left[\frac{\text{h}}{\text{día}} \right] = 7140 \left[\frac{\text{h}}{\text{año}} \right]$$

Ecuación G-1. Base operativa anual por horno.

G.4 Estimación de CP_h (costo horario de no producción normalización)

G.4.1 Definiciones

Sea:

- Q_d : producción diaria de cobre fino [ton/día]
- P_{ton} : precio de referencia [USD/ton]
- C_{ton} : costo de producción [USD/ton]
- U_d : utilidad diaria [USD/día]
- CP_d : costo por día de no producción por horno [USD/día]
- CP_h : costo por hora de no producción por horno [USD/h]
- F_{pp} : factor de paralelo parcial (pérdida neta de capacidad cuando un horno queda indisponible) [-]

La utilidad diaria se expresa como:

$$U_d = Q_d * (P_{ton} - C_{ton})$$

Ecuación (G-2). Utilidad diaria por margen operacional.

Dado que los hornos operan en paralelo sin redundancia total, se adopta un factor de paralelo parcial:

$$CP_d = U_d * F_{pp}$$

Ecuación (G-3). Costo diario de no producción por horno.

Finalmente, el costo horario de no producción se obtiene normalizando por la ventana operativa efectiva:

$$CP_h = \frac{CP_d}{21}$$

Ecuación (G-4). Costo horario de no producción.

G.4.2 Valores adoptados

- Q_d : 500 [ton/día]
- P_{ton} : 12.502,35 [USD/ton]
- C_{ton} : 5.512,50 [USD/ton]
- F_{pp} : 0,33

G.4.3 Cálculo numérico

$$U_d = 500 * (12.502,35 - 5.512,50) = 3.494.925,00 \left[\frac{USD}{día} \right]$$

$$CP_d = 3.494.925 * 0,33 = 1.153.325,25 \left[\frac{USD}{día} \right]$$

$$CP_h = \frac{1.153.325,25}{21} = 54.920,25 \left[\frac{USD}{h} \right]$$

Resultado:

$$CP_h = 54.920,25 \left[\frac{USD}{h} \right]$$

G.5 Verificación de marginalidad de costos directos de reparación

Para evaluar si los costos directos típicos de reparación (mano de obra y repuestos) afectan significativamente el *CIF*, se realiza una verificación de orden de magnitud.

G.5.1 Mano de obra (referencia)

Se adopta un costo mensual por trabajador de mantenimiento de USD 6.000/mes, con base de 180 h/mes:

$$C_{MO, persona} = \frac{6.000}{180} \approx 33,33 \left[\frac{USD}{h} \right]$$

Para dos personas:

$$C_{MO,2} \approx 66,67 \left[\frac{USD}{h} \right]$$

Comparación con CP_h :

$$\frac{C_{MO,2}}{CP_h} = \frac{66,67}{54.920,25} \approx 0,12\%$$

Lo anterior confirma que, a nivel de hora de detención, la mano de obra representa una fracción marginal frente al costo de no producción.

G.5.2 Repuestos (referencia)

Se adopta un costo medio de repuestos de USD 300 por evento. Aun con varios eventos por año, su contribución es marginal frente al componente dominante de no producción.

Conclusión operativa: para mantener el modelo enfocado en el impacto dominante, se desprecia el aporte de mano de obra y repuestos en el *CIF*, sin alterar conclusiones económicas.

G.6 Formulación simplificada del *CIF*

Bajo la simplificación adoptada, el costo anual de indisponibilidad por fallos se estima como:

$$CIF \approx FF \times TPFS \times CP_h$$

Ecuación (G-5). Aproximación operativa del CIF. donde:

FF : frecuencia anual de fallas [fallos/año]

$TPFS$: tiempo promedio fuera de servicio por evento [h/fallo]

CP_h : costo de no producción por hora [USD/h]

G.7 Cálculo del CIF: global y eléctrico/control

El CIF se estima en dos niveles:

1. CIF global: totalidad de fallas del horno (mecánicas, proceso/operación y eléctricas/control).
2. CIF eléctrico/control: subconjunto asociado al sistema motriz/ accionamiento y su control.

G. 7.1 Cálculo genérico

Para cada horno i

$$CIF_i \approx FF_i \times TPFS_i \times CP_h$$

y análogamente para el subconjunto eléctrico/control ($FF_{e,i}$; $TPFS_{e,i}$).

G. 7.2 Consistencia con resultados del cuerpo

Los resultados consolidados se presentan en el cuerpo del documento en las **Tablas 2-7 y 2-8**. Este anexo documenta el método y los cálculos intermedios que conducen a dichos valores.

ANEXO H — SISTEMA ACTUAL (AS-IS): PLANOS Y LÓGICA VIGENTE

H.1 Propósito

Dejar trazabilidad del sistema actual (AS-IS) mediante planos y evidencia de la lógica de control vigente, para sustentar las brechas funcionales identificadas (diagnóstico, registro y trazabilidad) y asegurar comparabilidad con la propuesta.

H.2 Alcance y contenido

- 1) Planos eléctricos relevantes del sistema actual (según disponibilidad): fuerza y/o control del accionamiento del giro.
- 2) Lógica actual de control (LOGO!): capturas legibles de redes principales asociadas a habilitación, permisos, protecciones y condiciones de operación.

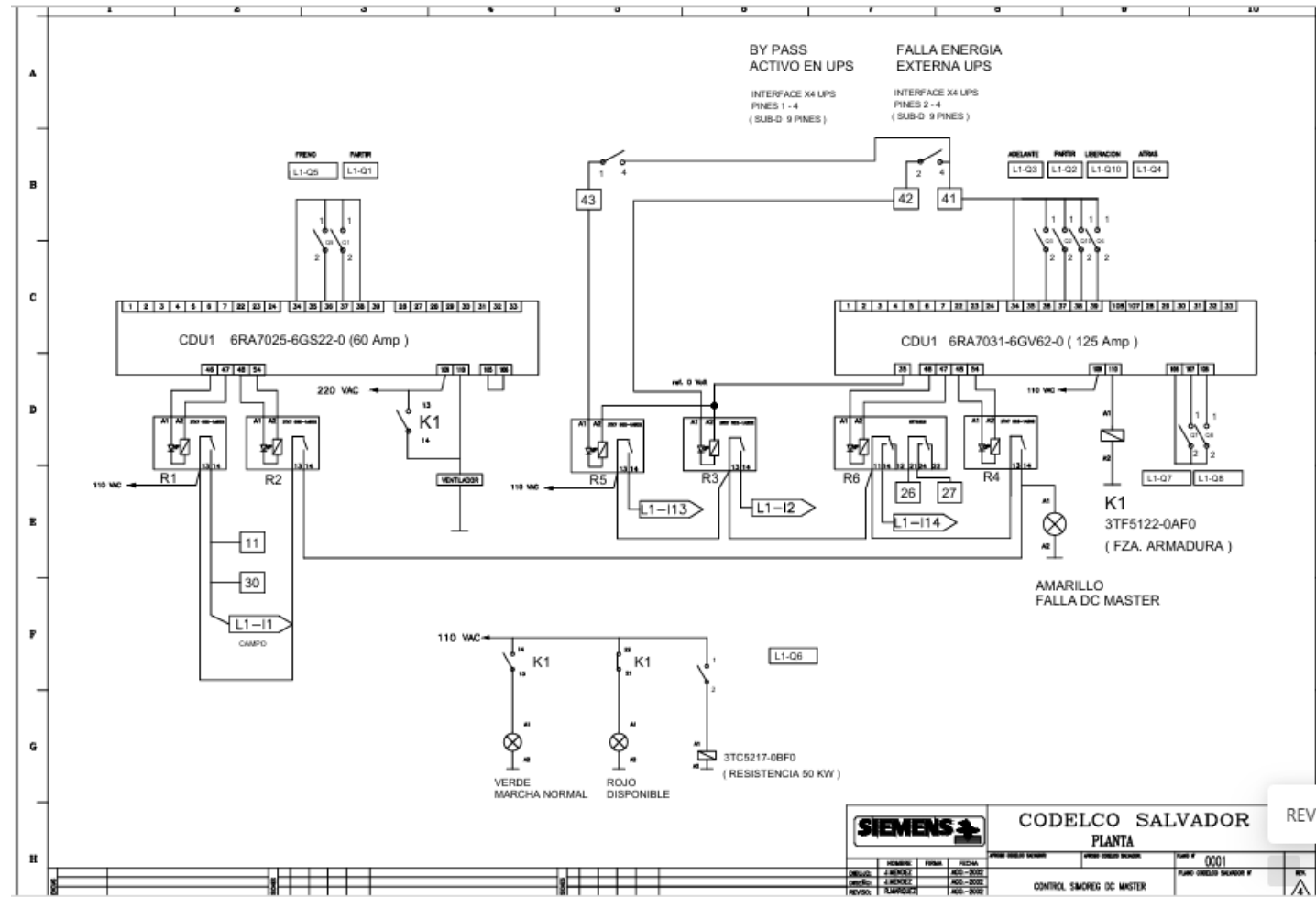
H.3 Convención de numeración

- Figura H-1. Control Simoreg DC Master
- Figura H-2. Diagrama Control Plataforma - Sala Simoreg
- Figura H-3. Energía Electrónica y Control Simoreg DC Master
- Figura H-4. Lógica de control LOGO! – Captura 1
- Figura H-5. Lógica de control LOGO! – Captura 2
- Figura H-6. Lógica de control LOGO! – Captura 3

H.4 Planos Eléctricos y Lógica de control actuales.

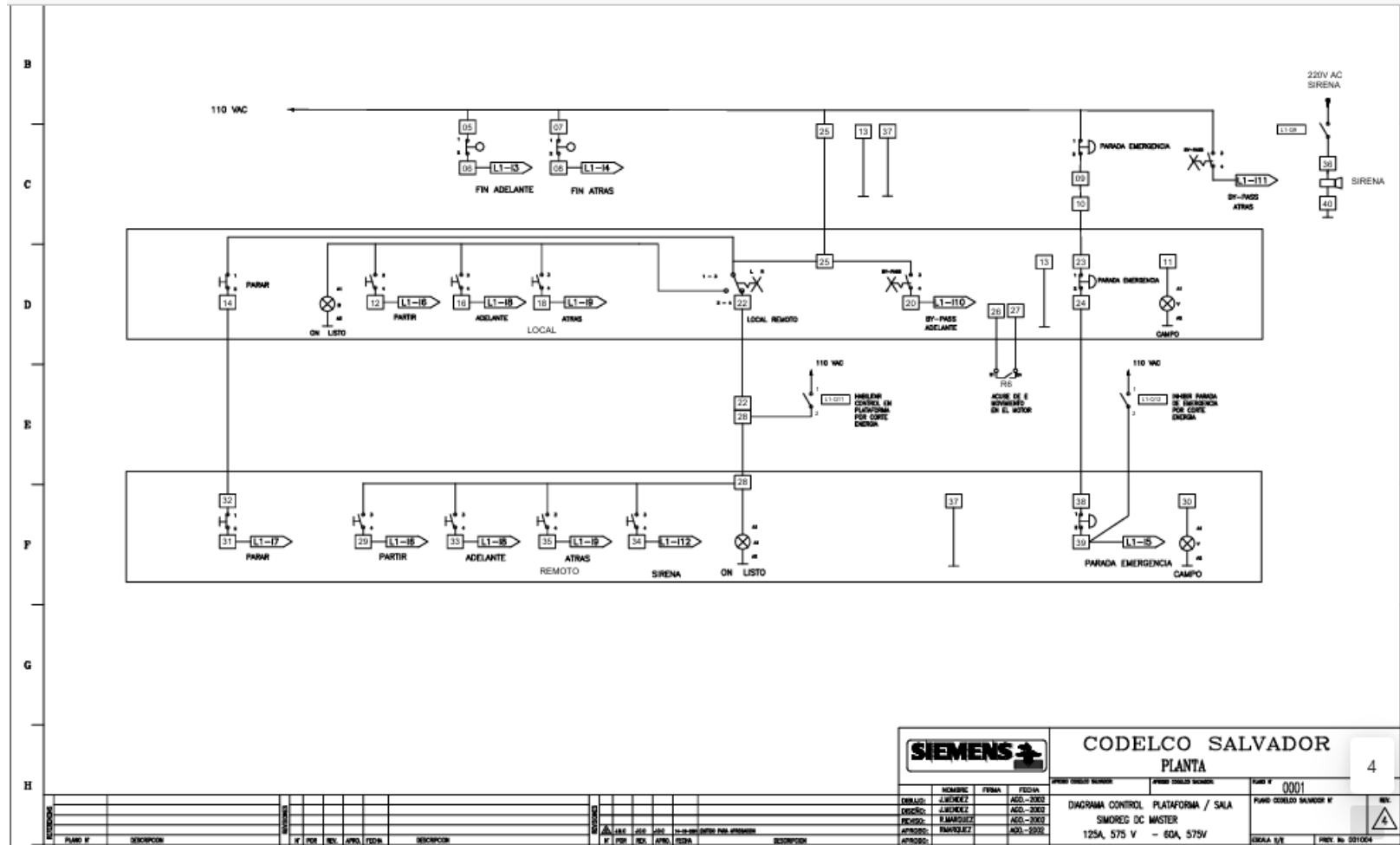
Nota: Los planos y la lógica de control corresponden a documentación interna de Codelco–División Salvador. Se incluyen con fines académicos y de trazabilidad técnica; no se reproduce información adicional fuera del alcance de esta memoria.

Figura H-1. Control Simoreg DC Master



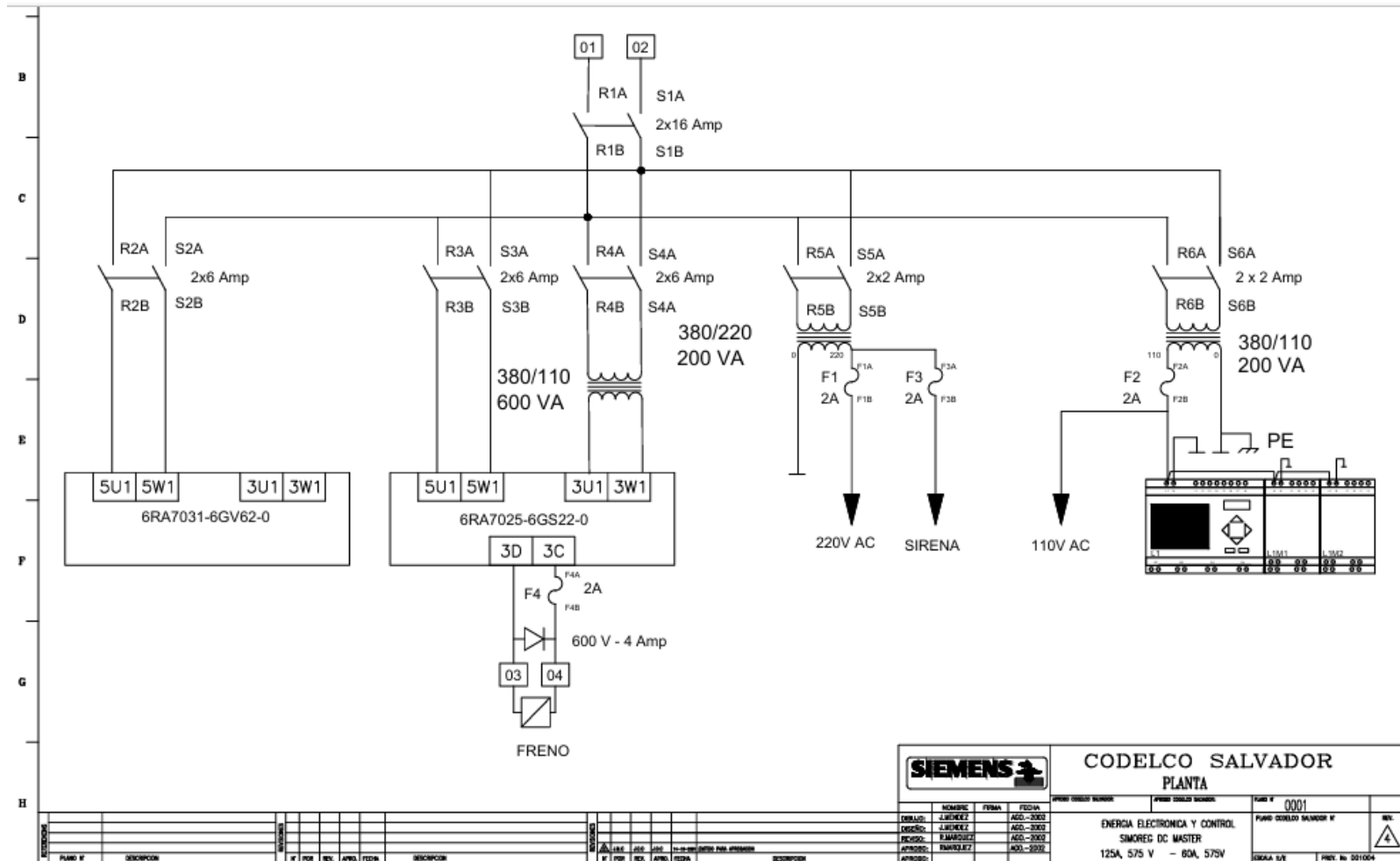
Fuente: Codelco – División Salvador, Fundición Potrerillos. Unidad Eléctrica. Plano eléctrico, código 0001, fecha Ago-2002.

Figura H-2. Diagrama Control Plataforma - Sala Simoreg



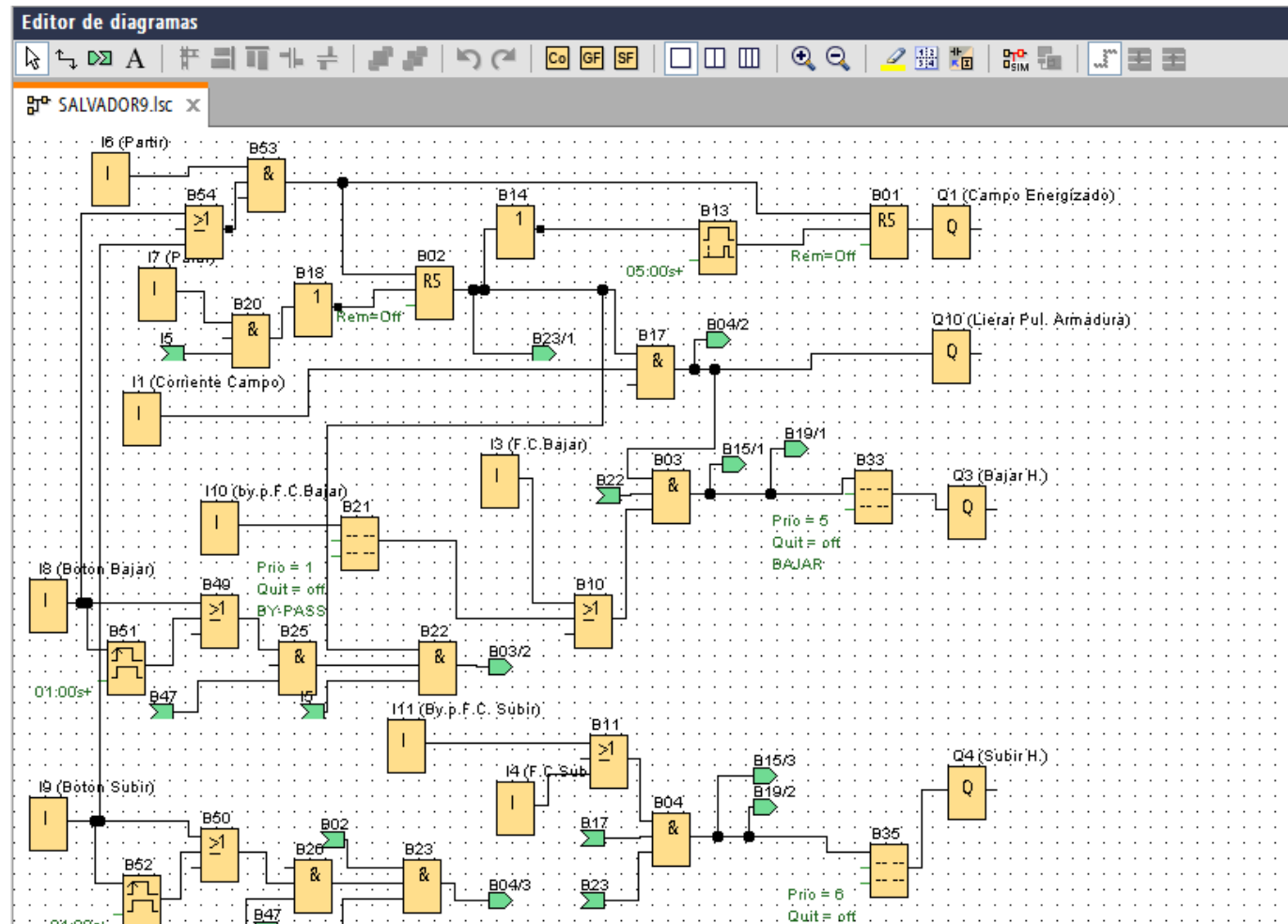
Fuente: Codelco – División Salvador, Fundición Potrerillos. Unidad Eléctrica. Plano eléctrico, código 0001, fecha Ago-2002.

Figura H-3. Energía Electrónica y Control Simoreg DC Master



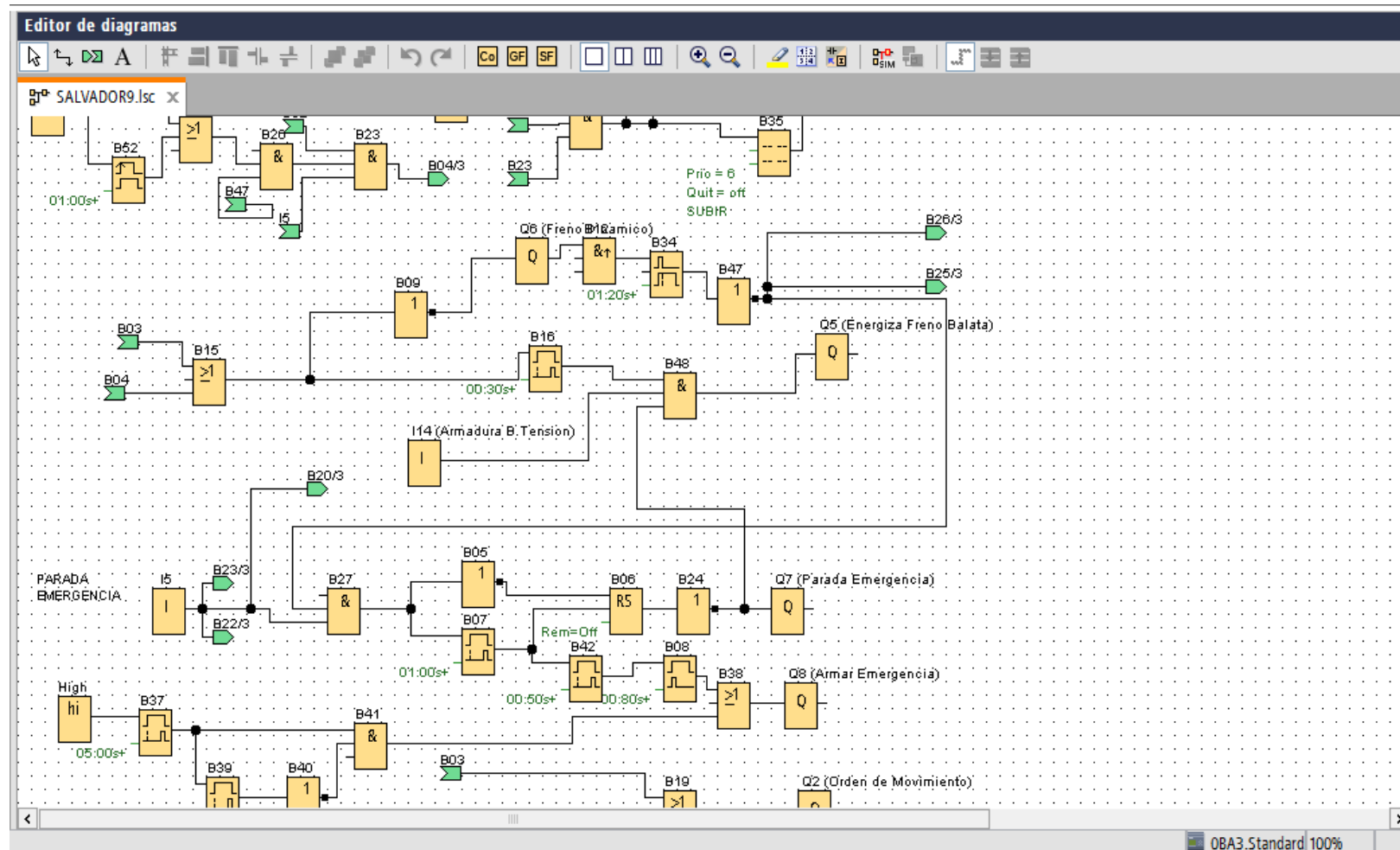
Fuente: Codelco – División Salvador, Fundición Potrerillos. Unidad Eléctrica. Plano eléctrico, código 0001, fecha Ago-2002.

Figura H-4. Lógica de control LOGO! – Captura 1



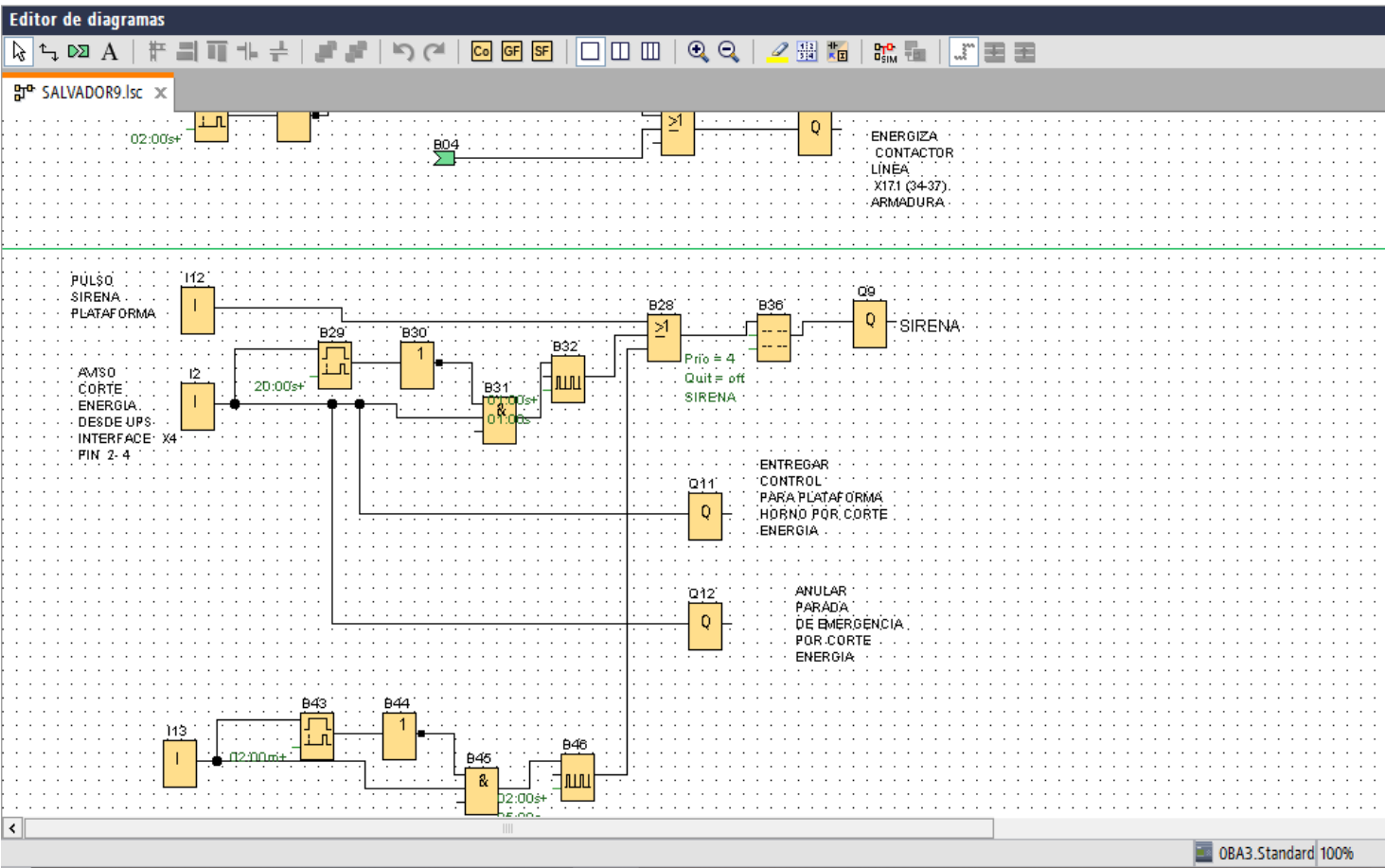
Fuente: Elaboración propia a partir de captura de pantalla de Siemens LOGO! Soft Comfort

Figura H-5. Lógica de control LOGO! – Captura 2



Fuente: Elaboración propia a partir de captura de pantalla de Siemens LOGO! Soft Comfort

Figura H-6. Lógica de control LOGO! – Captura 3



Fuente: Elaboración propia a partir de captura de pantalla de Siemens LOGO! Soft Comfort

ANEXO I — LÍNEA BASE DE FALLAS 2024

I.1 Propósito

Respalda documentalmente la línea base de fallas y detenciones del año 2024, utilizada como evidencia del problema y base para el desarrollo del análisis de confiabilidad y del CIF en el cuerpo del documento.

I.2 Alcance y contenido

Incluye el registro consolidado 2024 con los campos: inicio, fin, equipo, gravedad, duración y especialidad, tal como fue utilizado en el desarrollo de la tesis.

I.3 Convención de numeración

- Tabla I-1: Registro consolidado de fallas y detenciones (2024).

I.4 Relación con el documento

Referenciado en 2.6 (impacto económico) y 3.4 (línea base / indicadores)

I.5 Registro consolidado 2024

Tabla I-1. Registro consolidado de fallas y detenciones (2024).

	Inicio	Fin	Equipo	Gravedad de la falla	Duración	Especialidad
1	15-03-2024 15:56	15-03-2024 17:03	HA 1	Moderada	1:07:00	Proceso
2	25-03-2024 14:07	25-03-2024 16:30	HA 1	Moderada	2:23:00	Proceso
3	25-03-2024 16:30	25-03-2024 18:58	HA 1	Moderada	2:28:00	Mecánica
4	12-04-2024 18:01	12-04-2024 18:46	HA 1	Leve	0:45:00	Mecánica
5	13-04-2024 21:21	13-04-2024 22:41	HA 1	Leve	1:20:00	Eléctrica
6	21-04-2024 16:52	21-04-2024 18:36	HA 1	Leve	1:44:00	Eléctrica
7	21-04-2024 22:40	22-04-2024 0:12	HA 1	Leve	1:32:00	Mecánica
8	23-04-2024 14:14	23-04-2024 23:55	HA 1	Grave	9:41:00	Proceso
9	30-05-2024 1:21	30-05-2024 1:58	HA 1	Leve	0:37:00	Eléctrica
10	31-05-2024 1:56	31-05-2024 4:55	HA 1	Moderada	2:59:00	Mecánica
11	09-08-2024 18:25	09-08-2024 19:20	HA 1	Leve	0:55:00	Mecánica
12	31-08-2024 9:50	31-08-2024 11:50	HA 1	Moderada	2:00:00	Mecánica
13	14-09-2024 9:14	14-09-2024 17:47	HA 1	Grave	8:33:00	Mecánica
14	15-09-2024 0:55	15-09-2024 17:06	HA 1	Grave	16:11:00	Proceso
15	16-09-2024 21:44	17-09-2024 5:35	HA 1	Grave	7:51:00	Proceso
16	22-09-2024 2:46	22-09-2024 8:45	HA 1	Grave	5:59:00	Mecánica
17	23-09-2024 3:08	23-09-2024 8:49	HA 1	Grave	5:41:00	Proceso
18	02-12-2024 18:56	02-12-2024 21:33	HA 1	Moderada	2:37:00	Mecánica
19	08-12-2024 3:32	08-12-2024 6:22	HA 1	Moderada	2:50:00	Mecánica
1	19-02-2024 5:52	19-02-2024 10:39	HA 2	Grave	4:47:00	Proceso
2	19-03-2024 10:39	19-03-2024 13:22	HA 2	Moderada	2:43:00	Mecánica
3	23-03-2024 9:48	23-03-2024 17:35	HA 2	Grave	7:47:00	Mecánica
4	31-05-2024 17:11	31-05-2024 18:13	HA 2	Leve	1:02:00	Eléctrica
5	14-11-2024 17:03	14-11-2024 18:06	HA 2	Moderada	1:03:00	Eléctrica

Fuente: Registro base interno de detenciones 2024 (documentación otorgada personal de planificación).

ANEXO J — ESCENARIOS DE CIF Y EVALUACIÓN ECONÓMICA PARA REPLICABILIDAD EN HA2

J.1 Propósito

Presentar, de forma resumida, los escenarios de Costo de Indisponibilidad por Fallos (CIF) del HA2 bajo distintas alternativas de modernización y su efecto en el resultado económico (VPN), con el fin de respaldar la replicabilidad de la solución implementada en HA1 hacia HA2.

J.2 Alcance y relación con el documento

Este anexo complementa el Capítulo 3 (evaluación económica ACCV/LCC) y sustenta la discusión de replicación del proyecto en HA2, utilizando el CIF eléctrico/control como variable de impacto económico.

J.3 Convención de numeración

- Tabla J-1. CIF actual HA2 y escenarios de reducción por alternativa.
- Tabla J-2. Impacto económico por escenario: CIF vs VPN total y ahorro incremental

J.4 Tablas resumen

Tabla J-1. CIF actual HA2 y escenarios de reducción por alternativa.

CIF Actual HA2 y Escenarios de Alternativas							
Escenario	CIF base	Reducción Alt 0 (DC)	CIF Alt 0	Reducción Alt 1 (Estándar)	CIF Alt 1	Reducción Alt 2 (Reforzada)	CIF Alt 2
Pesimista	USD 114.417	0%	USD 114.417	15%	USD 97.255	20%	USD 91.534
Conservador	USD 114.417	0%	USD 114.417	30%	USD 80.092	40%	USD 68.650
Base	USD 114.417	0%	USD 114.417	50%	USD 57.209	60%	USD 45.767
Optimista	USD 114.417	0%	USD 114.417	70%	USD 34.325	75%	USD 28.604

Fuente: Elaboración propia.

Relevancia: Esta tabla muestra cómo, manteniendo el CIF base del HA2, se evalúan reducciones plausibles por alternativa bajo escenarios (pesimista–optimista). Su objetivo es demostrar consistencia: si el enfoque reduce CIF en HA1, puede proyectarse un efecto comparable en HA2 con supuestos conservadores.

Tabla J-2. Impacto económico por escenario: CIF vs VPN total y ahorro incremental.

Escenario	CIF Alt 0 (USD/año)	CIF Alt 1 (USD/año)	CIF Alt 2 (USD/año)	VPN total Alt 0 (USD)	VPN Total Alt 1 (USD)	VPN Total Alt 2 (USD)	Ahorro VPN Alt 1 vs Alt 0 (USD)	Ahorro VPN Alt 2 vs Alt 0 (USD)
Pesimista	114.417	97.255	91.534	782.923	734.345	709.551	48.578	73.373
Conservador	114.417	80.092	68.650	782.923	628.888	568.942	154.035	213.982
Base	114.417	57.209	45.767	782.923	488.280	428.333	294.644	354.590
Optimista	114.417	34.325	28.604	782.923	347.671	322.876	435.253	460.047

Fuente: Elaboración propia.

Relevancia: Esta tabla traduce la reducción de CIF en resultado económico (VPN) y cuantifica el ahorro incremental al pasar desde el estado actual (Alt 0) a alternativas modernizadas. Se utiliza como evidencia de que la replicación en HA2 no es solo técnica, sino también económicamente justificable bajo múltiples escenarios.