



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

FACULTAD TECNOLÓGICA  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**UPGRADE DE ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO Y CONTROL DE PUENTES  
GRÚAS P&H 3 Y 4 UBICADA EN NAVE CONVERSION DE FUNDICION  
HERNAN VIDELA LIRA**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de  
Ingeniero Ejecución en Electricidad

Luis Guillermo Vega Vicencio

Héctor Andrés Fajardo González

Copiapó, Chile 2024



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

FACULTAD TECNOLÓGICA  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**UPGRADE DE ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO Y CONTROL DE PUENTES  
GRÚAS P&H 3 Y 4 UBICADA EN NAVE CONVERSION DE FUNDICION  
HERNAN VIDELA LIRA**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de  
Ingeniero Ejecución en Electricidad

Profesor Guía: José Raphael Gómez Vega

Luis Guillermo Vega Vicencio

Héctor Andrés Fajardo González

Copiapó, Chile 2024

## INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	vi
ABSTRACT .....	vii
CAPITULO I.....	1
<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
1.1 Síntesis del Proyecto .....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivo general .....	3
1.4 Objetivos específicos .....	3
1.5 Planteamiento del problema.....	4
1.6 Metodología y diseño del análisis .....	5
CAPITULO II .....	6
<b>FUNDAMENTOS TÉCNICOS Y TEORICOS DEL PROYECTO.....</b>	<b>6</b>
2.1 Antecedentes generales .....	6
2.2 Proceso minero en Fundición Hernán Videla Lira .....	7
2.3 Antecedentes Teóricos.....	10
2.3.1 Motor Asíncrono Trifásico .....	10
2.3.1.1 Motor de Anillo Rozante .....	11
2.3.1.2 Motor Jaula de Ardilla .....	12
2.3.2 Variador de Frecuencia .....	13
2.3.3 Accionamiento eléctrico .....	14
2.3.4 Control de velocidad en motores de anillos rozantes .....	15
2.4 Antecedentes técnicos puentes grúas PH 3 y 4 .....	15
CAPITULO III .....	17
<b>IMPLEMENTACION DE UPGRADE ACCIONAMIENTO PUENTES GRUAS PH 3 Y 4.....</b>	<b>17</b>
3.1 Propuesta de cambio .....	17
3.1.1 Sistema de traslación del puente .....	18
3.1.2 Sistema de traslación del carro .....	18

3.1.3 Gancho principal .....	18
3.1.4 Ganchos auxiliares #1 y #2 .....	18
3.2 Tipo de accionamiento .....	19
3.2.1 Variador de frecuencia ABB ACS 800 .....	19
3.2.2 Control de movimientos .....	20
3.2 Motores .....	21
3.3 Diagrama de control de velocidad.....	22
3.4 Diagrama de fuerza .....	23
3.5 Costos del proyecto .....	24
<b>CAPITULO IV .....</b>	<b>26</b>
<b>PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN DEL PROYECTO MODERNIZACIÓN .....</b>	<b>26</b>
4.1 Inicio de trabajos .....	26
4.2 Cronograma de actividades .....	27
4.3 Recursos humanos involucrados .....	29
4.4 Construcción tableros fuerza y control .....	29
4.5 Cambios en el hardware y equipos.....	31
4.6 Instalación de equipos .....	32
4.6.1 Ejecución upgrade puente grúa PH 3 .....	32
4.6.2 Ejecución upgrade puente grúa PH 4 .....	34
4.7 Puesta en marcha del sistema.....	36
4.7.1 Pruebas iniciales.....	37
4.7.2 Prueba de funcionamiento sin carga.....	37
4.7.3 Prueba de funcionamiento con olla sin metal.....	37
4.7.4 Prueba de funcionamiento con olla y carga completa .....	38
4.7.5 Prueba de movimiento combinados (gancho y puente) .....	38
4.7.7 Problemas durante la puesta en marcha .....	39
4.8 Tiempos de implementación .....	39
4.8.1 Duración de la instalación .....	40
4.9 Capacitaciones.....	41

CAPÍTULO V .....	42
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>42</b>
5.1 Mantenimiento .....	42
5.1.1 Calendario de mantención .....	43
5.2 Indicadores de mantenimiento (KPI) .....	45
5.2.1 Mean time between failure o tiempo medio entre fallas (MTBF).....	46
5.2.1.1 Comparación del MTBF antes y después de la modernización .....	47
5.2.2 Mean time to repair o tiempo medio de reparación (MTTR).....	48
5.2.2.1 Comparación del MTTR antes y después de la modernización ...	49
5.3 Disponibilidad y Confiabilidad de los activos .....	50
5.3.1 Disponibilidad de los puentes grúas P&H.....	51
5.3.2 Confiabilidad de los puentes grúas P&H .....	52
CAPITULO VI.....	56
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>56</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>58</b>
<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO 2 .....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO 3 .....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXO 4 .....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO 5 .....</b>	<b>64</b>
<b>ANEXO 6 .....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXO 7 .....</b>	<b>66</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1 Localización divisiones de ENAMI en Chile.....	6
Figura N° 2.2 Fundición Hernán Videla Lira.....	7
Figura N° 2.3 Convertidor Teniente Enami Paipote .....	8
Figura N° 2.4 Fundición Hernán Videla Lira.....	9
Figura N° 2.5 Esquema del proceso productivo FHVL .....	10
Figura N° 2.6 Esquema de un motor de anillos rozantes .....	12
Figura N° 2.7 Motor tipo jaula de ardilla.....	12
Figura N° 2.8 Esquema funcional de un variador de frecuencia .....	14
Figura N° 3.1 Joystick control de movimientos.....	21
Figura N° 3.2 Diagrama de control de velocidad.....	22
Figura N° 3.2 Unilineal conexionado de fuerza.....	23
Figura N° 4.1 Gabinetes de variadores .....	30
Figura N° 4.2 Gabinete de aire acondicionado .....	31
Figura N° 4.3 Esquema maniobras desmontaje grúa n°3.....	33
Figura N° 4.4 Esquema maniobras desmontaje grúa n°4.....	36

## INDICE DE TABLAS

Tabla N° 3.1 Listado nuevos motores puentes grúas .....	22
Tabla N° 3.2 Costos de nuevos equipos .....	24
Tabla N° 3.3 Costos servicios del proyecto .....	25
Tabla N° 4.1 Carta Gantt proyecto de modernización .....	28
Tabla N° 4.2 Carta Gantt trabajos grúa P&H n°3 .....	33
Tabla N° 4.3 Carta Gantt trabajos grúa P&H n°4 .....	35
Tabla N° 5.1 Desglose horas mantenimiento semanal antes del proyecto .....	44
Tabla N° 5.2 Desglose horas mantenimiento semanal despues del proyecto .....	44
Tabla N° 5.3 Comparativa indicador confiabilidad.....	55

## **RESUMEN**

El proyecto realizado correspondió a un análisis de beneficios derivados de la modernización del sistema de control y accionamiento de los puentes grúas P&H 3 y 4 ubicados en nave de conversión de Fundición Hernán Videla Lira (FHVL), Atacama. El proyecto fue ejecutado en el año 2018. Los trabajos incluyeron la sustitución de motores de anillos rozantes por motores de tipo jaula de ardilla, estos mismos fueron comandados por variadores de frecuencia, logrando mejoras significativas en eficiencia operativa, seguridad y en el mantenimiento.

Además del análisis de beneficios, se describió la metodología que se utilizó para realizar el cambio sin afectar el proceso productivo. También se analizaron y describieron las cualidades de los equipos que fueron instalados. Tanto en sus características de construcción como en sus principales ventajas de operación y mantenimiento.

El análisis de costos del proyecto incluyó los valores reales pagados por los equipos y el servicio de actualización. Se revisó y concluyó el tipo de inversión al cual correspondió este proyecto. Se analizó el retorno de inversión y las proyecciones operativas de la empresa.

El análisis de mantenimiento se enfocó en la degradación de los equipos a través de los años en servicio. Se realizaron análisis de algunos indicadores de mantenimiento, herramientas por las cuales podemos medir y cuantificar el éxito del proyecto.

El proyecto no solo mejoró la eficiencia y seguridad de la operación, sino también preparó a la empresa para nuevos desafíos productivos, llevando la sostenibilidad a largo plazo.

## **MODERNIZACIÓN - ACCIONAMIENTO - PUENTES GRÚAS**

## **ABSTRACT**

The project carried out corresponded to an analysis of benefits derived from the modernization of the control and drive system of the P&H 3 and 4 overhead cranes located in the conversion warehouse of the Hernán Videla Lira Foundry (FHVL), Atacama. The project was executed in 2018. The work included the replacement of slip ring motors with squirrel cage type motors, controlled by frequency converters, achieving significant improvements in operational efficiency, safety and maintenance.

In addition to the benefits analysis, the methodology used to make the change without affecting the production process was described. The qualities of the equipment that was installed were also analyzed and described. Both in its construction characteristics and in its main operation and maintenance advantages.

The project cost analysis included the actual values paid for the equipment and the upgrade service. The type of investment to which this project corresponded was reviewed and concluded. The return on investment and the company's operational projections were analyzed.

The maintenance analysis focused on the degradation of the equipment over the years in service. Analysis of some maintenance indicators were carried out, tools by which we can measure and quantify the success of the project.

The project not only improved the efficiency and safety of the operation, but also prepared the company for new productive challenges, leading to long-term sustainability.

**MODERNIZATION - DRIVE - BRIDGE CRANES**

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

### 1.1 Síntesis del Proyecto

En la búsqueda constante de optimizar los procesos industriales y mejorar la seguridad en las operaciones, el presente trabajo de tesis se enfoca en la modernización del sistema de control de los puentes grúas PH 3 y 4 de la fundición Hernán Videla Lira (FHVL) ubicada en Atacama, Copiapó.

Los puentes grúas están situados en la nave de conversión, la cual tiene una dimensión de 150 metros de largo por 11 metros de ancho, y está equipada con dos puentes grúas marca P&H con características idénticas. Cada grúa está equipada con dos motores para ganchos auxiliares, un motor de gancho principal, un motor para el carro y dos motores de traslación puente. El gancho principal tiene una capacidad de 40 toneladas, mientras que cada gancho auxiliar tiene capacidad para 15 toneladas.

Los movimientos de los puentes grúas son operados con motores de anillos rozantes y están comandados por un sistema de control que data del año 1991. Este sistema no solo es obsoleto e ineficiente en términos energéticos, sino que también presenta riesgos operacionales significativos debido al desgaste y la dificultad de encontrar repuestos disponibles dentro del mercado.

El deterioro de los motores y su sistema de control ha incrementado los tiempos fuera de servicio por motivos de mantención, y ha impactado negativamente la confiabilidad de estos equipos.

El principal objetivo del proyecto es el cambio del accionamiento de movimientos de ambos puentes grúas, mediante la implementación de variadores de frecuencia (VDF),

y además el cambio de los motores de anillos rozantes por motores tipo “jaula de ardilla”. se producen derrames de material fundido a altas temperaturas (Cu a 1200° C) debido al poco control de los arranques de la velocidad de las grúas, lo que pone en riesgo la integridad del personal y los equipos.

Con esta modernización del sistema de control, se busca mejorar la eficiencia energética, reducir los tiempos de mantenimiento, las fallas eléctricas y garantizar una confiabilidad positiva de los equipos.

Para desarrollar el proyecto se empleó una gestión del cambio programada y llevada a cabo por un equipo de profesionales de diferentes disciplinas.

Se presentarán antecedentes técnicos de los equipos instalados y se desarrollará el diseño de la solución propuesta. Luego se analizarán los resultados del cambio de accionamiento y equipos asociados.

## **1.2 Justificación**

Además de los riesgos operacionales y los riesgos de seguridad, el sistema actual es altamente ineficiente en términos energéticos. La variación de velocidad mediante el cortocircuito de resistencias resulta en un gasto considerable de energía, lo que aumenta los costos de operación. A diferencia, los variadores de frecuencia permiten ajustar la velocidad de los motores de manera precisa y eficiente, sin perder su torque máximo, reduciendo el consumo eléctrico y contribuyendo a la sostenibilidad del proceso industrial.

La justificación técnica de este proyecto reside en la necesidad de modernizar el accionamiento de las grúas para garantizar la continuidad operacional del proceso en que se desenvuelven estos equipos.

La justificación económica se basa la reducción de los costos de mantenimiento y la mejora en la disponibilidad operativa de las grúas.

Por lo tanto, la modernización del sistema de control no solo responde a la necesidad de contar con un sistema más eficiente y seguro, sino que también asegura la prolongación de la vida útil de los equipos, permitiendo que estos sigan operando de manera confiable en el futuro.

### **1.3 Objetivo general**

Analizar la modernización del sistema de control y accionamiento de los puentes grúas P&H 3 y 4, ubicados en la nave de conversión en la fundición Hernán Videla Lira (ENAMI), con el propósito de evaluar su impacto en la eficiencia operativa, seguridad y el mantenimiento.

### **1.4 Objetivos específicos**

- Describir el nuevo sistema de control de velocidad de los movimientos de las grúas, destacando los nuevos equipos implementados como los variadores y motores de jaula de ardilla.
- Analizar gestión de mantenimiento eléctrico grúas, evaluando los indicadores clave como tiempo medio entre falla (MTBF) y tiempo medio de reparación (MTTR).
- Comparar la confiabilidad de los equipos pre y post ejecución del proyecto, identificando como el nuevo tipo de accionamiento impacto positivamente en la disponibilidad, operatividad y en la reducción de fallas.
- Evaluar los resultados obtenidos en términos del upgrade del tipo de accionamiento eléctrico y control de los puentes grúas.

## 1.5 Planteamiento del problema

En la industria, uno de los objetivos principales es mantener y aumentar la productividad, lo cual requiere tener la mayor disponibilidad de los equipos que forman parte de la operación. En este contexto, los puentes grúas de la fundición Hernán Videla Lira (FHVL) desempeñan un papel crítico en el traslado de materiales fundidos, como el cobre, a temperaturas extremadamente altas (1200°C). Sin embargo, los equipos hasta antes del upgrade, datan del año 1991. Con un sistema de control deficiente, con motores de alto costo de mantenimiento y con unidades de control discontinuadas, el proyecto de cambio del accionamiento de los puentes grúas se torna una necesidad importante.

En primer lugar, los motores de anillo rozante y su sistema de control están fuera de fabricación, lo que dificulta la compra de repuestos, debilitando la mantención preventiva de los equipos. Esta situación aumenta los tiempos de inactividad de los equipos debido a las frecuentes fallas y la falta de repuestos o piezas originales del sistema de control.

La problemática de la tecnología de control de velocidad previa al upgrade, que utiliza resistencias conectadas a los anillos para variar la velocidad, es ineficiente y contribuye al desgaste acelerado de los motores.

La obsolescencia del equipo no solo implica un incremento en los costos de mantenimiento, sino que también presenta riesgos significativos para la seguridad del personal. Durante las operaciones de manejo de materiales fundidos, es común que ocurran derrames debido a la falta de control fino del movimiento de las grúas. Las maniobras bruscas de cambios de velocidad o movimiento eran un riesgo continuo en la nave de conversión. Estos incidentes no solo representan un riesgo para los operadores, sino que también comprometen la seguridad de todo el personal en la planta.

Además de los riesgos operativos, el mantenimiento del equipo actual requiere un uso excesivo de recursos. Las mantenciones programadas semanalmente consumen una cantidad significativa de horas-hombre, lo que afecta la productividad y aumenta los costos del mantenimiento. El hecho de que el equipo necesite reparaciones frecuentes y reemplazos de componentes debido a su antigüedad y desgaste inevitable resulta en una reducción significativa de la eficiencia operativa.

Por lo tanto, se tornó una necesidad importante implementar una solución que permita mejorar el rendimiento de los puentes grúas, garantizar la seguridad operativa y reducir los costos asociados al mantenimiento y la operación.

Los variadores de frecuencia permitirán un control más preciso y eficiente de la velocidad de los motores, minimizando los riesgos de derrames de material fundido, facilitando el trabajo del operador, y reduciendo significativamente las fallas y los tiempos de mantenimiento.

Este proyecto busca, y logra, proporcionar una solución tecnológica que no solo mejore la eficiencia y seguridad de las operaciones, sino que también reduzca los costos operativos y optimice el uso de recursos, contribuyendo así al logro de una producción más sostenible y segura en la fundición.

## **1.6 Metodología y diseño del análisis**

Para el análisis de la solución de variadores de frecuencia en los puentes grúa P&H 3 y 4 de la Fundición Hernán Videla Lira (FHVL), se desarrollará una metodología basada en un enfoque analítico y explicativo, que describa detalladamente las etapas de la modernización, desde la evaluación inicial del sistema hasta la implementación de la solución propuesta.

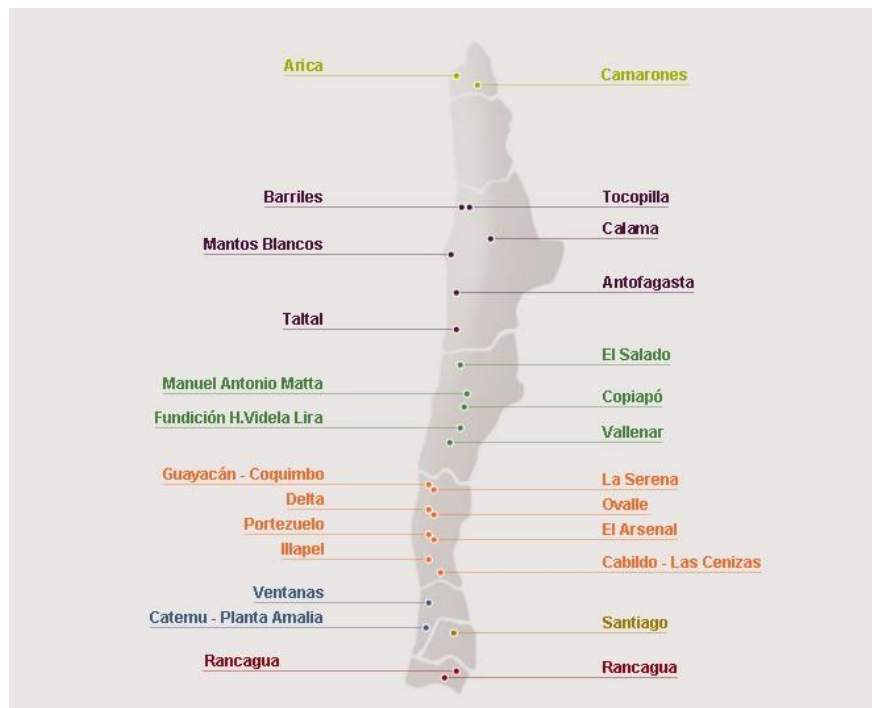
## CAPITULO II

### FUNDAMENTOS TÉCNICOS Y TEORICOS DEL PROYECTO

#### 2.1 Antecedentes generales

ENAMI, es una empresa del estado de Chile, cuya misión es fomentar y potenciar el crecimiento de la pequeña y mediana minería. Dentro de sus servicios están el reconocer los recursos mineros, asistir técnica y crediticiamente, compra, procesamiento y comercialización requeridos por productores mineros en el territorio nacional.

Figura N° 2.1 Localización divisiones de ENAMI en Chile



Fuente: ENAMI ([www.enami.cl](http://www.enami.cl))

El proyecto se lleva a cabo en la división llamada “Fundación Hernán Videla Lira”. La empresa se ubica a 8 kilómetros de la ciudad de Copiapó, región de Atacama.

La empresa se dedica principalmente al procesamiento de concentrado de cobre proveniente de pequeñas y medianas empresas mineras de la región.

El producto final son ánodos de cobre, obtenidos a través de un proceso de pirorefinación. La producción anual alcanza las 85.000 toneladas.

La empresa también comercializa ácido sulfúrico, en una planta dedicada para el proceso de transformación de los gases provenientes del proceso de refinación del cobre en convertidores y hornos de calor.

Figura N° 2.2 Fundición Hernán Videla Lira



Fuente: ENAMI ([www.enami.cl](http://www.enami.cl))

## **2.2 Proceso minero en Fundición Hernán Videla Lira**

Fundición Hernán Videla Lira se compone básicamente de dos plantas de procesamiento que generan dos productos finales, ánodos de cobre y ácido sulfúrico.

En la primera etapa del proceso del mineral se lleva a cabo su recepción y muestreo de ley de cobre y humedad. Además, se debe analizar que minerales aparte del cobre, contiene la muestra. Según las condiciones de hallazgo en las muestras, los minerales son

clasificados en silos de almacenaje. En estos silos son mezclados, formando capas de mineral de distintas características, ley y humedad.

El Convertidor Teniente “CT” recibe el mineral concentrado de forma seca y húmedo. Además de una adición de oxígeno industrial, proveniente de una planta de oxígeno ubicada en las mismas instalaciones de la empresa.

Figura N° 2.3 Convertidor Teniente Enami Paipote



Durante el proceso, el convertidor recibe y entrega una serie de flujos de mineral o material.

- Eje, un sulfuro de cobre y fierro que se adiciona al horno cada cierto periodo de tiempo.
- Concentrado, que consiste en una mezcla de concentrados húmedos y fundente.
- Aire enriquecido al 28% de oxígeno en volumen. El aire se inyecta a una temperatura de 110°C mediante toberas.
- Circulante, son materiales tratados previamente que ya han sido fundidos. Pueden ser cargas de escoria fría, material solidificado en ollas, cargas de eje frío de 25 a 50% de Cu.
- Escoria, es una solución líquida que se encuentra a 1200-1300°C.

- Metal Blanco, es un eje de 75% de cobre. Se extrae en ollas, cada cierto periodo de tiempo más o menos constante.
- Gases, corresponde a gases producidos por reacciones de conversión. Son expulsados por la boca del convertidor a altas temperaturas.

En la etapa de fusión se cambia el estado del sólido a líquido del concentrado. Existen en cada momento del proceso, dos fases líquidas, el Eje y la Escoria. La ley del eje debe variar entre 75-77% de cobre.

Los productos obtenidos de la fusión son destinados para obtener cobre de alta pureza. En la etapa de conversión se utilizan convertidores convencionales llamados Peirce-Smith o CPS. Este tipo de convertidor tiene como objetivo el “oxidar” la carga obtenida por el convertidor teniente, para obtener el cobre blíster (96-98% pureza).

Figura N° 2.4 Fundición Hernán Videla Lira



En este tipo de convertidor se debe soplar aire en todo momento del proceso. Además, tiene una temperatura mínima de trabajo que son 1250°C. La escoria que se genera en el proceso es retirada cuando tiene un espesor de 0,5-0,75 m sobre el metal blanco.

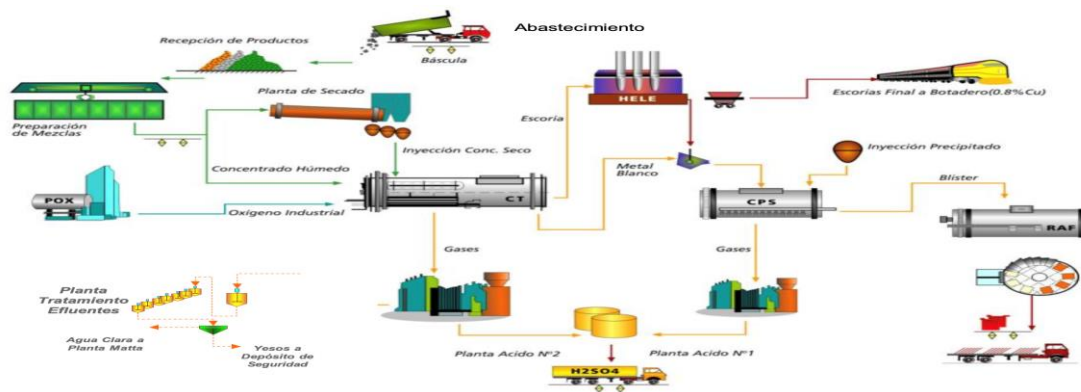
El blíster final es llevado a la etapa de RAF o Refino a Fuego. En esta etapa se lleva el cobre líquido de alta pureza al horno de ánodos. En este horno comienza el proceso

de oxidación de la carga de cobre blíster. La oxidación tendrá una duración determinada por una inspección y contrastación de una muestra tomada por el operador. En este mismo horno, también se genera una escoria que debe ser retirada.

Una vez retirada la escoria se procede a comenzar la etapa de reducción. Para ello se sella la tapa y fogón del horno. Nuevamente la etapa finaliza cuando se realiza una contrastación de una muestra con criterio de patrón de muestras.

Finalizada la reducción se comienza con el moldeo de ánodos mediante una rueda de moldeo compuesta por un pozo de contención, canala de vaciado, cuchara intermedia y cuchara de colado. Moldeados los ánodos son retirados y preparados para su despacho.

Figura N° 2.5 Esquema del proceso productivo FHVL



Fuente: Documento Sonami, Fundación Hernán Videla Lira (2015)

## 2.3 Antecedentes Teóricos

### 2.3.1 Motor Asíncrono Trifásico

El motor asíncrono se conoce también como un motor de inducción, ya que es el principio de inducción la base de su funcionamiento.

El rotor de este tipo de motor funciona más lento que el campo magnético giratorio del estator. Esta diferencia de velocidades giratorias del rotor y el campo magnético del estator se conoce como deslizamiento, y es la base de la capacidad de este equipo de transformar energía eléctrica en energía mecánica.

Existen dos tipos de motores asíncronos, los de jaula de ardilla y los de anillo colector.

### **2.3.1.1 Motor de Anillo Rozante**

Un motor de inducción de anillos rozantes es una variación del motor de inducción trifásico común. Las variaciones principalmente se observan en el cambio de diseño en el lado del rotor. El cambio consiste en la introducción de un devanado trifásico en el estator.

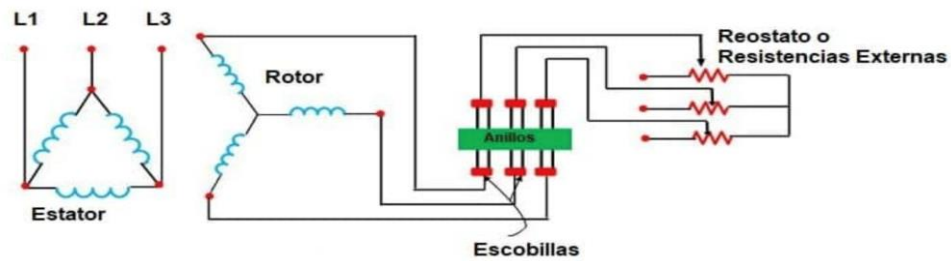
Este tipo de solución busca reducir las corrientes de arranques que un motor convencional son de hasta diez veces la corriente nominal.

Habitualmente en este tipo de motores, además de contener bobinas en el rotor, se instalan unas resistencias en el exterior del rotor. Estas resistencias suelen ser del tipo variable, lo que entrega la característica de que se puede ir variando su valor, por ende, se puede generar un tipo de control de velocidad del motor.

Una de sus ventajas es que su par de arranque suele ser elevado y capaz de romper la inercia de grandes cargas sin aumentar en demasiado la corriente del motor.

La desventaja de este tipo de motores es que suelen ser mucho más caros y necesitan un mayor tiempo de mantenimiento en comparación con el motor asíncrono convencional. Este tipo de motor suele ser utilizado en accionamiento de grandes ventiladores, bombas, grúas de gran capacidad, molinos, etc.

Figura N° 2.6 Esquema de un motor de anillos rozantes



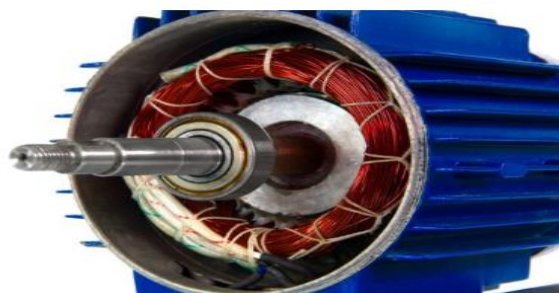
### 2.3.1.2 Motor Jaula de Ardilla

A diferencia de la construcción de un motor de anillos rozantes, el rotor de un motor de este tipo está formado por una jaula de barras de aluminio o cobre. Estas barras están cortocircuitadas en los extremos. El rotor de este tipo es el más utilizado por tener una vida útil más larga.

Dentro de las ventajas de este tipo de motor está la posibilidad de soportar grandes sobrecargas de corriente, la sencillez de su construcción, su rendimiento superior y menor valor económico, en comparación con un motor de rotor bobinado.

Ahora bien, sus desventajas parten desde la nula posibilidad de regular sus revoluciones, su gran corriente de arranque y la gran sensibilidad a cambios u oscilaciones en la tensión.

Figura N° 2.7 Motor tipo jaula de ardilla



### 2.3.2 Variador de Frecuencia

Los variadores son equipos eléctricos utilizados en gran parte de las operaciones industriales. Proporcionan una gran cantidad de ventajas que reducen tiempos y recursos operacionales. También proporcionan la posibilidad de aumentar la seguridad de los equipos y personas, reducir costos eléctricos y prolongar la vida útil de los motores.

El variador o VDF, es un equipo electrónico de alta complejidad, diseñado para controlar la velocidad de un motor sin afectar sus características nominales de par, torque, impedancias, potencias, etc.

El control de la velocidad se reduce a la manipulación de la frecuencia y tensión que recibe el motor, mediante un controlador diseñado especialmente para ello.

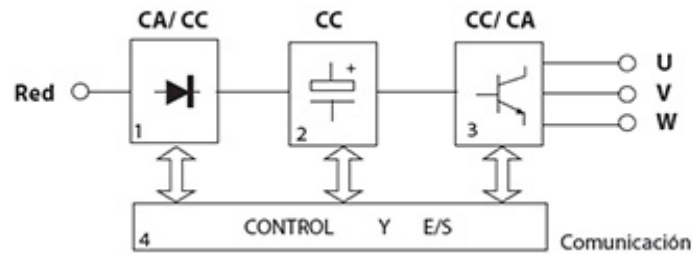
Las partes de un variador se reducen a tres etapas principales:

- Etapa rectificadora: consiste en diodos dispuestos en forma de un puente rectificador. La corriente alterna se aplica al puente, rectificando su señal sinusoidal y convirtiéndola en una señal continua o CC.
- Bus de CC: la corriente continua previamente rectificada, pasa por una serie de inductores y condensadores que buscan filtrar los armónicos y residuos de CA.
- Etapa de Inversión: esta etapa consiste en una salida controlada por IGBTs (transistores bipolares de puerta aislada), los cuales conmutan la tensión de salida del bus de CC. En esta etapa se convierte la CC en CA, mediante el control proporcionado por circuitos integrados con la tecnología PWM (modulación por ancho de pulso).

Dentro de las características principales de un variador de frecuencia se pueden mencionar las siguientes:

- Protección contra sobrecargas
- Protección contra perturbaciones exteriores de voltaje, armónicos, ondulaciones en la señal, sobretensiones, etc
- Eficiencia energética y reducción de costos de energía mediante el control de velocidad del motor
- Permite obtener una operación precisa y adaptativa a las necesidades del proceso.
- Prolongación de vida útil de los equipos, tiempos acortados de mantenimiento, disminución del estrés mecánico de las maquinas
- Capacidades de diagnóstico de los equipos controlados

Figura N° 2.8 Esquema funcional de un variador de frecuencia



### 2.3.3 Accionamiento eléctrico

Un accionamiento eléctrico se define como un grupo de elementos y/o dispositivos que permiten la transformación de energía eléctrica en energía mecánica. Su propósito y fin principal es poner en funcionamiento el mecanismo de trabajo de un equipo y/o proceso.

Dentro de los accionamientos eléctricos podemos distinguir dos grandes grupos. Los accionamientos regulados y los no regulados.

Los regulados tienen que ver con todos aquellos accionamientos en donde el motor y/o equipo se alimenta a un dispositivo intermedio que nos permite regular su acción.

Como ejemplos en términos generales tenemos los arrancadores suaves y los variadores de velocidad.

En los no regulados el accionamiento se da de forma directa. No existe un mecanismo o dispositivo intermedio que nos permita controlar la acción. Como por ejemplo la partida directa de un motor.

#### **2.3.4 Control de velocidad en motores de anillos rozantes**

Es un tipo de accionamiento eléctrico, del tipo de los regulados. La regulación de velocidad es llevada a cabo por deslizamiento. Consiste en la conexión de una resistencia a los bornes del motor, de manera de ir regulando el valor de esta misma. A través de esta regulación se puede ir regulando la velocidad de giro del motor.

Estas resistencias logran obtener una aceleración progresiva de la velocidad del motor mediante el cortocircuito en diferentes posiciones de las propias resistencias.

La principal ventaja de este tipo de regulación es que realizando un buen cálculo de la resistencia a regular, se puede conseguir el par de arranque máximo sin un gran consumo de corriente. Permitiendo mover grandes cargas desde la partida del motor.

#### **2.4 Antecedentes técnicos puentes grúas PH 3 y 4**

Los puentes grúas están alojados en la nave de conversión, cuyas dimensiones son 150 metros de largo, 11 metros de ancho y aproximadamente 14 metros de alto. En su interior se realizan maniobras y trabajos de traslado y trasvasije de cobre líquido en ollas de 4 metros cúbicos y de hasta 40 toneladas de peso.

Sus jornadas de trabajo son las 24 horas del día, trabajando a plena capacidad el 70% del tiempo.

Las características de las grúas PH 3 y 4 son las siguientes:

- Marca : P&H
- N° serie grúa PH 3 : CIX-30278
- N° serie grúa PH 4 : CIX-30279
- Año puesto en servicio : 1993
- Capacidad : 15/40/15
- Sistema de Control : Static stepless, motores de rotor bobinado
- Motor gancho principal : 75 HP, 400 V, 960 RPM
- Motor gancho auxiliar 1 : 40 HP, 400 V, 960 RPM
- Motor gancho auxiliar 2 : 40 HP, 400 V, 960 RPM
- Motor traslación 1 : 25 HP, 400 V, 940 RPM
- Motor traslación 2 : 25 HP, 400 V, 940 RPM
- Motor carro : 10 HP, 400 V, 940 RPM
- Sistema eléctrico : Rieles tomacorriente, 3F+T, 400 V, 50 HZ

Los motores instalados en ambos puentes son del tipo de anillos rozantes. Con un control de velocidad mediante cortocircuito de resistencias. La velocidad es alcanzada mediante escalones progresivos, los cuales son accionados mediante un control mediante contactores.

**CAPITULO III**  
**IMPLEMENTACION DE UPGRADE ACCIONAMIENTO PUENTES GRUAS**  
**PH 3 y 4**

**3.1 Propuesta de cambio**

El proyecto contempla la modernización del accionamiento de todos los movimientos de los puentes grúas P&H 3 y 4.

Para acotar los costos del proyecto, solo se cambiarán los componentes estrictamente necesarios para la correcta ejecución del proyecto. El dimensionamiento de motores se debe ajustar a los frame y reductores ya instalados. Además, se debe considerar mantener las velocidades máximas de los movimientos.

Para el proyecto de upgrade se consideró, en su diseño, el reemplazo de los siguientes componentes:

- Motores de inducción de anillos rozantes por motores tipo “jaula de ardilla”
- Circuitos de control y mando
- Tableros de accionamiento eléctrico, incluido componentes como contactores y dispositivos de protección.
- Cambio del sistema de control de velocidad por resistencias a uno controlado por variadores de frecuencia.
- Cambio del cableado eléctrico y de control en su totalidad

Considerando lo anterior, el desglose de cambios por tipo de movimiento queda de la siguiente forma;

### **3.1.1 Sistema de traslación del puente**

- Reemplazo de los dos motores de traslación
- Reemplazo del sistema de accionamiento del movimiento de traslación puente
- Reemplazo del sistema de freno de los motores de traslación puente
- Cambio de canalizado y cableado del sistema de accionamiento del movimiento de traslación puente

### **3.1.2 Sistema de traslación del carro**

- Reemplazo del motor para la traslación del carro
- Reemplazo del sistema de accionamiento del movimiento de traslación carro
- Reemplazo del sistema de freno del motor de traslación puente
- Cambio de canalizado y cableado del sistema de accionamiento del movimiento de traslación carro

### **3.1.3 Gancho principal**

- Reemplazo del motor del gancho principal del sistema de izaje
- Reemplazo del sistema de accionamiento del movimiento de izaje
- Reemplazo del sistema de freno del motor del gancho principal
- Cambio de canalizado y cableado del sistema de accionamiento del movimiento del gancho principal

### **3.1.4 Ganchos auxiliares #1 y #2**

- Reemplazo de los motores de ganchos auxiliares
- Reemplazo del sistema de accionamiento del movimiento de izaje de los ganchos auxiliares
- Reemplazo del sistema de freno de los motores de los ganchos auxiliares

- Cambio de canalizado y cableado del sistema de accionamiento de los movimientos de los ganchos auxiliares

### **3.2 Tipo de accionamiento**

El accionamiento elegido para el proyecto es del tipo regulado a través de variadores de frecuencia. La inclusión de estos equipos nos asegura un control fino de los movimientos sin perder el par de torque del motor. Estos equipos pueden mantener torque al máximo en el arranque con protecciones que nos aseguran evitar las sobrecargas de partida.

Es uno de los equipos más utilizados en la industria moderna por su versatilidad, por sus bajos costos y tiempos de mantenimiento. Además, de una fácil integración a los sistemas de control y monitoreo en tiempo real (DCS).

Para el proyecto de upgrade del accionamiento de puentes grúas se consideró la instalación de un variador de frecuencia por cada movimiento de los puentes.

#### **3.2.1 Variador de frecuencia ABB ACS 800**

Para el proyecto se utilizaron variadores de frecuencia de la marca ABB. Específicamente el modelo ACS800-11. Este modelo de variador es del tipo regenerativo. Entre sus principales ventajas están las siguientes características.

- Todo el sistema integrado en un solo equipo
- Control directo de par (DTC) de serie
- Posibilidad de ampliar sus E/S análoga y digitales, además de opción de agregar un encoder
- Filtros EMC y filtro de línea LCL

- Compatible con varios protocolos de bus de campo

Al momento de considerar un variador para instalar en los movimientos de una grúa, se debe considerar que las cargas suspendidas no pueden tener una desaceleración brusca. Por lo tanto, los tiempos de desaceleración y las dimensiones del banco de frenado suelen ser un ítem importante en este tipo de proyectos. Si no se dimensionan adecuadamente los bancos de resistencias de frenado, posiblemente el variador tenga bastantes fallas de sobretensión en sus registros de eventos.

Esto se debe al efecto que causan ciertas situaciones en el motor de inducción. Para el caso de cargas suspendidas se puede resumir en un efecto que causa la fuerza gravitatoria en el rotor del motor, lo que produce que este componente comience a girar más rápido que la frecuencia de enrollamiento, manteniendo un campo magnético que genera una potencia de vuelta a la línea. Esta potencia de vuelta a la línea puede traer problemas cuando no se cuenta con el equipo adecuado para soportar esta carga regenerativa. Para el proyecto se contemplaron equipos regenerativos para todos los movimientos, evitando tener que instalar bancos de resistencias extras en la plataforma de las grúas.

### **3.2.2 Control de movimientos**

Los movimientos de los puentes grúas son comandados por un operador en cabina mediante un joystick de múltiples movimientos, modelo VNS0-01512,

Sus principales características son:

- Contactos configurables
- Módulos de contactos fácilmente sustituibles
- Vida útil de 20 millones de ciclos mecánicos
- Resistente a la radiación, aceite y corrosión

Figura N° 3.1 Joystick control de movimientos



Fuente: Kinextec, manual técnico VNS0-01512 (2023)

El joystick tiene una alimentación propia en 24 volts, además cuenta con un encoder como fuente de corriente como señal de salida. Esto permite controlar los movimientos mediante una señal de corriente 4-20 mA que entra al variador como señal de referencia para la velocidad del motor.

### **3.2 Motores**

Para el proyecto de upgrade de accionamiento de movimientos de los puentes grúas P&H 3 y 4, se consideró el cambio de todos los motores de los movimientos. Teniendo como consideración que se debía mantener el frame del motor de iguales características de los motores salientes. Esto evita generar costos en cambio de componentes mecánicos.

Todos los motores fueron llevados a motores del tipo “jaula de ardilla”, dejando atrás los motores de anillos rozantes. En todos los motores se consideraron motores de mayor potencia. Lo que nos da una mejor capacidad de carga para el futuro de estas grúas. Las características de los motores se resumen en la siguiente tabla:

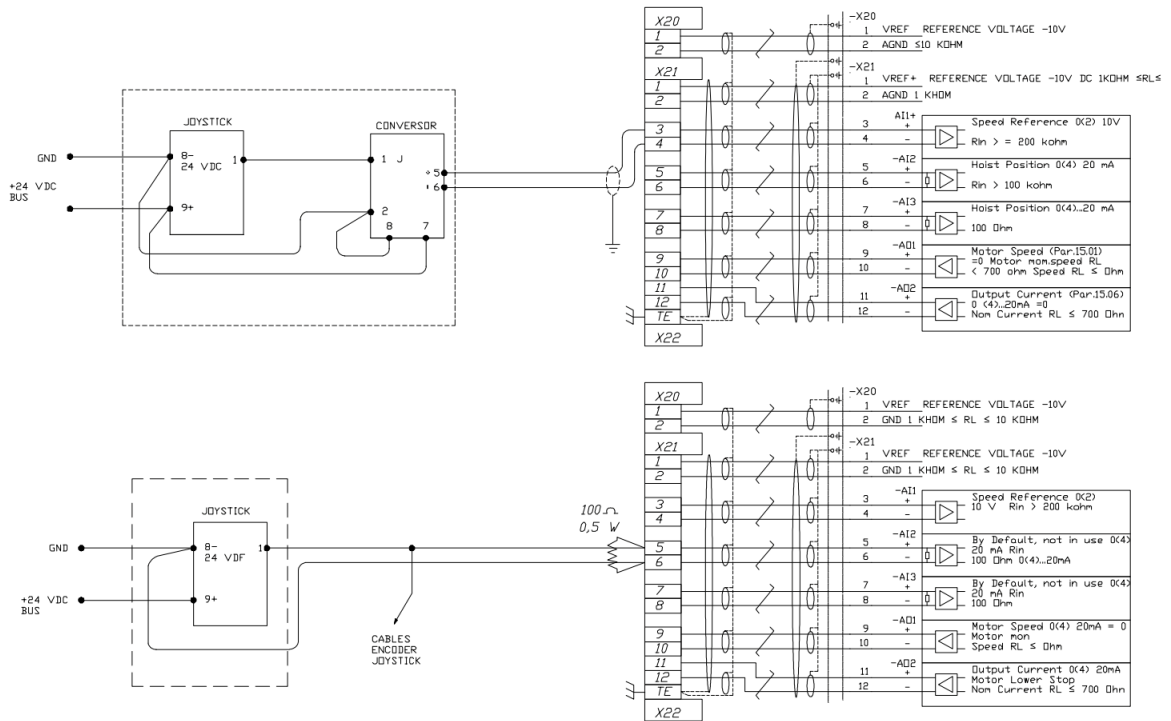
Tabla N° 3.1 Listado nuevos motores puentes grúas

Movimiento	Marca	Potencia	Volt	Corriente	Velocidad	Frame
Carro	Baldor	30 HP	380 V	47 A	980 RPM	326T
Traslación	Baldor	45 HP	380 V	66 A	985 RPM	365T
Ganchos Auxiliar #1 y #2	Baldor	68 HP	380 V	101 A	990 RPM	405T
Gancho Principal	Baldor	105 HP	380 V	152 A	990 RPM	445T

### 3.3 Diagrama de control de velocidad

Para el control de velocidad se realizaron los lazos de control mediante señales de 4-20 mA y en algunos casos se utilizó un convertor de señal de corriente a señal de 0-10 V. Esta señal de corriente o voltaje llega a la tarjeta de control del variador de frecuencia. En particular a la entrada de referencia de velocidad del motor. A través de esta señal podemos manipular la velocidad de los movimientos de los puentes grúas.

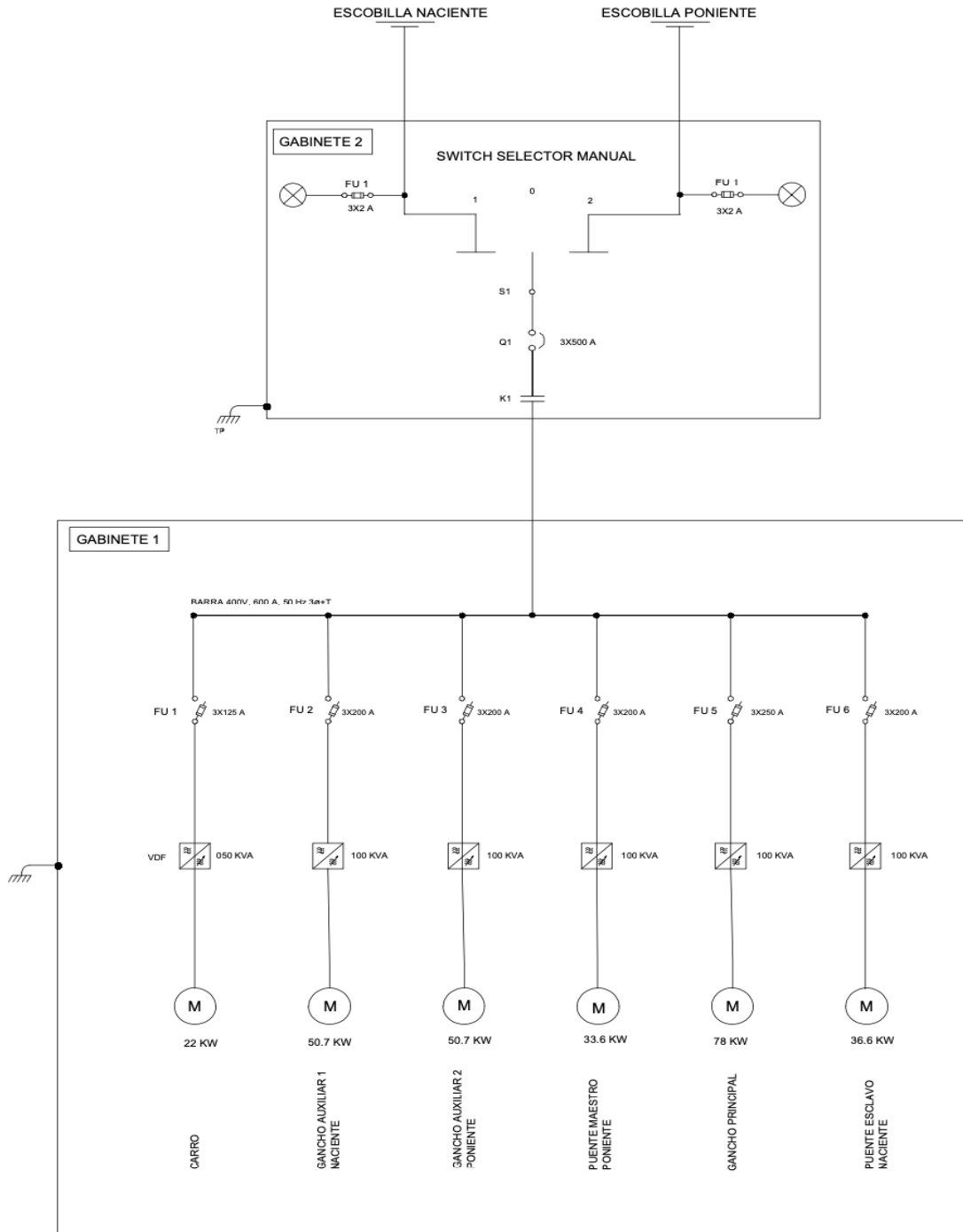
Figura N° 3.2 Diagrama de control de velocidad



Fuente: Documentos del proyecto

### 3.4 Diagrama de fuerza

Figura N° 3.2 Unilineal conexionado de fuerza



### 3.5 Costos del proyecto

Para el cálculo de los gastos asociados al proyecto se consideraron los costos de los equipos nuevos y gastos por servicios asociados a contrato de upgrade de accionamiento puentes grúas. Estos costos son calculados a valores de equipos y servicios a fecha marzo 2018.

Tabla N° 3.2 Costos de nuevos equipos

ITEM	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO USD\$	PRECIO TOTAL USD\$
Gabinete 1400x2100x600 Nema 4X	1	58785	58785
ACS 800-11-100	3	16203	48609
ACS 800-11-50	2	11862	23724
A/A Nema 4 2500W	2	17712	35424
Motor 105 HP	1	43341	43341
Motor 68 HP	2	31380	62760
Motor 45 HP	2	23478	46956
Motor 30 HP	1	20641	20641
Joystick Operador	3	8365	25095
Regulador Tensión PCS 100 AVC-40	1	104648	104648
Encoder motor ganchos	3	5649	16947
Freno Motores Ganchos/Puente	3	17114	51342
Freno Carro	1	13121	13121
Gabinetes Eléctricos Fusibles	3	1649	4947
<b>TOTAL</b>			<b>556340</b>

El precio total indicado considera los equipos necesarios para el cambio de equipos en una de las dos grúas. Los precios correspondientes a gastos de cables e insumos eléctricos generales están considerados dentro del servicio de desmontaje y montaje de los equipos.

Tabla N° 3.3 Costos servicios del proyecto

SERVICIO	DIAS	PRECIO USD\$
Acreditaciones	30	7409
Site manager	30	75749
Prevencionistas	30	55590
Instalaciones faena	45	6371
Desmontaje y montaje	30	215344
Ingeniería de homologación	90	14358
Instalación silla y joystick operador	5	17717
Puesta en marcha	5	21693
Capacitación	10	12638
Comisionamiento	10	34691
Servicio soporte post instalación	30	16107
<b>TOTAL</b>		<b>477667</b>

El precio total indicado considera los servicios necesarios para el cambio de una de las dos grúas. Además, considera el gasto por remuneraciones del personal externo.

Por cada grúa el costo, en dólares, del cambio de accionamiento es de USD\$ 1.034.007. Un costo que considera un cambio total de los equipos eléctricos y de control. Desde canalizaciones hasta los equipos de control de velocidad.

Considerando lo anterior, el costo total del upgrade de accionamiento de ambas grúas es de USD\$ 2.068.014.

## CAPITULO IV

### PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN DEL PROYECTO MODERNIZACIÓN

#### 4.1 Inicio de trabajos

La modernización del accionamiento de las grúas P&H 3 y 4 en la fundición Hernán Videla Lira fue un proyecto que requería una organización precisa y un cronograma ajustado, ya que debía realizarse en un plazo limitado de 22 días coincidiendo con la parada general de planta en junio de 2018. Este largo tiempo de detención es la oportunidad en el año para realizar trabajos de esta magnitud.

Se definieron tres etapas claves para la ejecución del proyecto:

- Desmontaje de equipos e infraestructura eléctrica existente
- Montaje de equipos nuevos y trazado de canalizaciones eléctricas nuevas
- Comisionamiento y puesta en marcha

Las etapas anteriormente descritas corresponden a la etapa de ejecución del proyecto. El diseño de ingeniería y la planificación de las tareas se llevó a cabo en etapas previas. En donde se realizaron las etapas de ingeniería de homologación, ingeniería de detalles y el plan de abastecimiento de equipos y materiales. Una vez desarrollado estas tareas previas se analizaron las mejores opciones de planificación de tareas de ejecución.

El proceso comenzó con la planificación de actividades específicas para cada grúa, donde el desmontaje y montaje de la nueva infraestructura se llevaron a cabo de manera de asegurar que al menos una grúa permaneciera operativa para cumplir con los requerimientos de la mantención mayor de la planta. La secuencia de actividades fue organizada en un cronograma estricto que permitió coordinar eficientemente los tiempos para cada actividad de ejecución del proyecto.

Podemos resumir las tareas de cada etapa descrita en la ejecución del proyecto, de la siguiente manera:

- Desmontaje equipamiento existente: parte con el retiro de motores antiguos, tableros de fuerza, canalizaciones en mal estado, componentes eléctricos varios y sistemas de control en las grúas.
- Montaje y conexión eléctrico nuevo: esta etapa contempló la instalación de los nuevos motores, variadores de frecuencia y el nuevo conexión eléctrico y de control.
- Comisionamiento y puesta en marcha: comprendió la parametrización de los variadores, verificación de señales de control y pruebas operativas. Las pruebas operativas incluyeron pruebas en vacío, pruebas con cargas controladas y pruebas con carga completa. Estas pruebas aseguraron el correcto funcionamiento de los sistemas de izaje y traslación.

La planificación y control de las actividades programadas fueron fundamentales para completar las tareas de ejecución del proyecto en el tiempo planificado, además de no incurrir en daños a las personas ni equipos.

## **4.2 Cronograma de actividades**

El cronograma de actividades del proyecto de modernización de las grúas P&H se estructuró en varias etapas críticas, algunas pre y otras post ejecución, todo organizado para asegurar que cada fase se ejecutara de manera precisa y organizada para cumplir con los tiempos que entrega la mantención general de la planta.

Este cronograma fue diseñado para avanzar de forma estructurada desde la fase de ingeniería, el diseño del proyecto, la ejecución del proyecto y las pruebas operativas finales. El proyecto alcanzó una duración total de 150 días considerando las etapas previas y las etapas post ejecución.

El diagrama de Gantt (tabla 4.1) ilustra las etapas de ejecución del proyecto, desde el inicio de las actividades hasta la finalización de estas en cada grúa. Se detallan las actividades previas necesarias para llevar a cabo la ejecución del proyecto.

- Fase de ingeniería y diseño: comprendió la elaboración y aprobación de planos, especificaciones técnicas, ingeniería de detalle, ingeniería de componentes, ingeniería de homologación, cálculos estructurales, cálculos eléctricos.
- Fabricación de tableros eléctricos y control: la fabricación y diseño de los tableros de control tomó 10 semanas. La ejecución contempla la emisión de los planos, gestión operativa y económica de la fabricación, y transporte de los equipos a faena.

Se detallan los tiempos asociados a cada fase del proyecto en la siguiente carta Gantt.

Tabla N° 4.1 Carta Gantt proyecto de modernización

ID	ACTIVIDAD	Días	Inicio	Final	Febrero			Marzo			Abril			Mayo			Junio			Julio		
					04	14	28	04	14	28	04	14	28	04	14	28	04	14	28	04	14	28
<b>UPGRADE SISTEMA ELECTRICO Y CONTROL GRUAS P&amp;H 3 Y 4</b>																						
1	Ingeniería Homologación Gruas	30	04 Febrero	04 Marzo																		
2	Levantamiento en terreno Grua P&H 3 Y 4	14	14 Febrero	28 Febrero																		
3	Diagrama Dimensionales Tableros VDF Gruas P&H 3 & 4	16	28 Febrero	14 Marzo																		
4	Diagrama de Circuitos Gruas P&H 3 & 4	16	28 Febrero	14 Marzo																		
5	Aprobación de Planos Diagrama Dimensionales/Circuitos Tableros VDF	14	14 Marzo	28 Marzo																		
6	Ingeniería interconexión de equipos gruas P&H 3 & 4	14	14 Marzo	28 Marzo																		
7	Emisión de Planos de Ingeniería Tableros VDF Ing.De Interconexión	14	14 Marzo	28 Marzo																		
8	Aprogración de planos de ingeniería de interconexión	14	14 Marzo	28 Marzo																		
9	<b>Importación Equipos</b>	66	28 Febrero	04 Mayo																		
10	Variadores de Frecuencia	60	28 Febrero	28 Abril																		
11	Tableros Integración Local	60	28 Febrero	28 Abril																		
12	Estabilizador de Tensión	30	28 Febrero	28 Marzo																		
13	Motores	60	28 Febrero	28 Abril																		
14	Joystick cabina	30	28 Febrero	28 Marzo																		
15	<b>Construcción de tableros (fuerza y control, variadores)</b>	70	04 Marzo	14 Mayo																		
16	Traslado de matriales a FHVL	8	28 Mayo	04 Junio																		
17	<b>Ejecución Upgrade Sistema Electrico y Control gruas P&amp;H 3 &amp; 4</b>	24	04 Junio	28 Junio																		
18	<b>Monitoreo + Entrega final proyecto</b>	30	28 Junio	28 Julio																		

### **4.3 Recursos humanos involucrados**

Para la correcta ejecución del proyecto de modernización del sistema de accionamiento de los puentes grúas se contó con un equipo especializado, distribuidos en turno diurnos y nocturnos para maximizar los tiempos de mantención general de la planta.

El equipo estuvo compuesto por profesionales de distintas disciplinas, que facilitaron la ejecución de cada fase del proyecto, asegurando que se cumpliera el cronograma sin dejar de lado la seguridad en cada una de las actividades ejecutadas.

- Administrador de proyecto: responsable de supervisar la planificación y avances de las actividades. También su función es mantener informado al mandante de cada paso del proyecto, tiempos, avances, etc.
- Supervisor de terreno: coordinador y supervisor de las actividades de terreno.
- Capataces: encargados de gestionar las actividades de montaje y desmontaje.
- Técnicos especialistas: a cargo de las instalaciones de los variadores y sistemas de control, así como la parametrización de los equipos.
- Prevencionistas: encargados de asegurar el cumplimiento de las normas de seguridad en cada fase del proyecto.
- Personal de planta: personal de la empresa mandante, relacionado con el proyecto en toda la etapa de ejecución, encargados de validar componentes y configuraciones.

### **4.4 Construcción tableros fuerza y control**

Dado que el tiempo para la instalación de equipos es acotado, la manera de desarrollar e implementar los nuevos tableros de equipos fue la fabricación de tableros listos para instalar. Los tableros y gabinetes de fuerza y control fueron fabricados antes de la detención de la planta en instalaciones del ganador de licitación, ABB.

La fabricación de estos tableros se fue completando a medida que iban llegando los componentes, y tomo alrededor de 70 días con traslado a faena incluido.

Esta forma de trabajar ahorra bastante tiempo al momento de instalar equipos en faena. Solo se tuvo que concentrar la fuerza de trabajo en el desmontaje y montaje de canalizados y motores sobre las grúas.

La etapa de planificación fue clave para cumplir con los tiempos asociados, las únicas complicaciones fueron los largos tiempos que demoran la importación de los variadores desde fabrica.

Figura N° 4.1 Gabinetes de variadores



Fuente: Documentos del proyecto

Para proteger estos equipos de ambientes industriales adversos, se utilizaron gabinetes de acero inoxidable con grado de protección NEMA 4X, resistente al polvo y humedad. Estos gabinetes incluyen un sistema de aire acondicionado que mantiene y garantiza una temperatura ambiente controlada que protege los variadores y componentes electrónicos de los equipos.

Figura N° 4.2 Gabinete de aire acondicionado



Fuente: Documentos del proyecto

#### 4.5 Cambios en el hardware y equipos

Para optimizar el rendimiento de las grúas, se instalaron variadores de frecuencia que controlan todos los movimientos, incluyendo el izaje, la traslación y el desplazamiento del gancho principal y auxiliar. Los motores fueron reemplazados y demás se aumentaron sus capacidades en cuanto a potencia. Dejando los siguientes motores por cada movimiento.

- Motor del carro: 30 HP, para movimientos de traslación del carro sobre la grúa.
- Motores del puente (2): 45 HP, optimizar el movimiento a lo largo de la nave conversión.
- Motores de ganchos auxiliares (2): 68 HP, diseñado para ayudar en tareas al gancho principal, y algunas tareas secundarias.
- Motor de gancho principal: 105 HP, destinado a movimientos principales de izaje.

La repotenciación de los motores tiene que ver con una mirada a futuro por parte de las jefaturas, quienes aceptaron estas mejoras sugeridas por parte del equipo de ingeniería.

## **4.6 Instalación de equipos**

Se detallan las etapas de modernización de las grúas PH 3 y 4 en la fundición Hernán Videla Lira. El comienzo de las tareas de ejecución fue el 04 de Junio. Comenzando las tareas en grúa P&H 3, dejando la grúa P&H 4 en operación hasta que se termine con la grúa 3. Esto para dejar una grúa operativa para tareas de la mantención mayor de la planta. Luego de terminada la grúa # 3, se comenzaron los trabajos en la grúa # 4.

### **4.6.1 Ejecución upgrade puente grúa PH 3**

Los días contemplados para ejecutar el trabajo de modernización, serán divididos en las 3 etapas anteriormente mencionadas, con la duración siguiente.

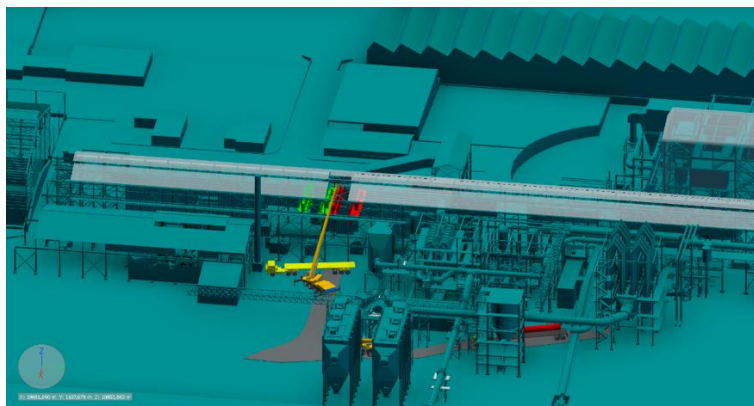
- Desmontaje de infraestructura existente: 4 días de trabajo. Incluye el retiro de motores, tableros, canalizados y cableados antiguos.
- Montaje de equipamiento nuevo: 8 días de trabajo. Incluye la instalación de gabinetes pre-fabricados, nueva canalización de cables, motores nuevos y mejoras en sala operador.
- Comisionamiento y puesta en marcha: 4 días de trabajo. Incluye prueba de señales, pruebas de energización y primeras pruebas con carga.

Tabla N° 4.2 Carta Gantt trabajos grúa P&H n°3

ID	ACTIVIDAD	Días	Inicio	Final	Junio								Julio							
					04	08	16	17	18	20	28	04	08	16	17	18	20	28		
<b>UPGRADE PUEBTE GRUA PH 3</b>		<b>54</b>	<b>04 Junio</b>	<b>28 Julio</b>																
1	<b>Etapa de desmontaje y montaje</b>	<b>12</b>	<b>04 Junio</b>	<b>16 de Junio</b>																
2	Desmontaje de infraestructura existente	4	04 Junio	08 Junio																
3	Montaje de equipamiento nuevo	8	08 Junio	16 Junio																
4	<b>Comisionamiento</b>	<b>4</b>	<b>16 Junio</b>	<b>20 Junio</b>																
5	Prueba de señales de control	1	16 Junio	17 Junio																
6	Parametrización variadores	1	16 Junio	17 Junio																
7	Pruebas en modo local de movimientos	1	17 Junio	18 Junio																
8	Pruebas en vacío	1	17 Junio	18 Junio																
9	Pruebas con carga	2	18 Junio	20 Junio																
10	<b>Puesta en marcha</b>	<b>8</b>	<b>20 Junio</b>	<b>28 Junio</b>																
11	Pruebas operacionales	8	20 Junio	28 Junio																
12	<b>Etapa de monitoreo y entrega final</b>	<b>30</b>	<b>28 Junio</b>	<b>28 Julio</b>																

El desarrollo de los trabajos comenzó con la ubicación de la grúa en el centro de la nave conversión. Esto por las condiciones ideales de espacio para los trabajos de la grúa de desmontaje de los equipos. Antes de comenzar los trabajos se dejaron aisladas y bloqueadas las energías asociadas al equipo. Después del retiro de la infraestructura existente, se realizó el aseo de la plataforma de la grúa, dejando todo en orden y listo para el montaje de los equipos y la canalización del cableado nuevo.

Figura N° 4.3 Esquema maniobras desmontaje grúa n°3



Fuente: Documentos del proyecto

Con el puente grúa PH 4, se realizó el traslado del puente grúa PH 3 hacia el costado norte de la nave en donde se realizarán los trabajos de montaje del equipamiento nuevo y los trabajos de canalización de conexiones nuevas.

Todo el comisionamiento y primeras pruebas con carga se realizaron en el lado norte de la nave.

Con la finalización del comisionamiento y pruebas operativas se entregaron equipos a operaciones. Quienes mantuvieron el equipo en constante funcionamiento durante todo el mes de monitoreo y ajustes finos finales.

#### **4.6.2 Ejecución upgrade puente grúa PH 4**

Los días contemplados para ejecutar el trabajo de modernización serán divididos en las 3 etapas anteriormente mencionadas, con la duración siguiente.

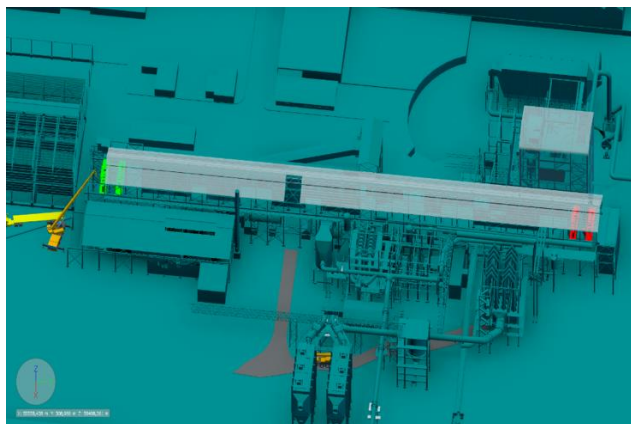
- Desmontaje de infraestructura existente: 4 días de trabajo. Incluye el retiro de motores, tableros, canalizados y cableados antiguos.
- Montaje de equipamiento nuevo: 8 días de trabajo. Incluye la instalación de gabinetes pre-fabricados, nueva canalización de cables, motores nuevos y mejoras en sala operador.
- Comisionamiento y puesta en marcha: 4 días de trabajo. Incluye prueba de señales, pruebas de energización y primeras pruebas con carga.

Tabla N° 4.3 Carta Gantt trabajos grúa P&H n°4

ID	ACTIVIDAD	Días	Inicio	Final	Febrero			Marzo			Abril			Mayo			Junio			Julio		
					04	14	28	04	14	28	04	14	28	04	14	28	04	14	28	04	14	28
<b>UPGRADE SISTEMA ELECTRICO Y CONTROL GRUAS P&amp;H 3 Y 4</b>																						
1	Ingeniería Homologación Gruas	30	04 Febrero	04 Marzo	█																	
2	Levantamiento en terreno Grúa P&H 3 Y 4	14	14 Febrero	28 Febrero	█																	
3	Diagrama Dimensionales Tableros VDF Gruas P&H 3 & 4	16	28 Febrero	14 Marzo				█														
4	Diagrama de Circuitos Gruas P&H 3 & 4	16	28 Febrero	14 Marzo	█																	
5	Aprobación de Planos Diagrama Dimensionales/Circuitos Tableros VDF	14	14 Marzo	28 Marzo				█														
6	Ingeniería interconexión de equipos gruas P&H 3 & 4	14	14 Marzo	28 Marzo				█														
7	Emisión de Planos de Ingeniería Tableros VDF Ing.De Interconexión	14	14 Marzo	28 Marzo				█														
8	Aprogración de planos de ingeniería de interconexión	14	14 Marzo	28 Marzo				█														
9	<b>Importación Equipos</b>	66	28 Febrero	04 Mayo	█			█			█											
10	Variadores de Frecuencia	60	28 Febrero	28 Abril	█			█			█											
11	Tableros Integración Local	60	28 Febrero	28 Abril	█			█			█											
12	Estabilizador de Tensión	30	28 Febrero	28 Marzo	█			█			█											
13	Motores	60	28 Febrero	28 Abril	█			█			█											
14	Joystick cabina	30	28 Febrero	28 Marzo	█			█			█											
15	<b>Construcción de tableros (fuerza y control, variadores)</b>	70	04 Marzo	14 Mayo				█			█			█								
16	Traslado de matriales a FHVL	8	28 Mayo	04 Junio							█			█								
17	<b>Ejecución Upgrade Sistema Electrico y Control gruas P&amp;H 3 &amp; 4</b>	24	04 Junio	28 Junio										█			█					
18	<b>Monitoreo + Entrega final proyecto</b>	30	28 Junio	28 Julio													█					

El desarrollo de los trabajos comenzó con la ubicación de la grúa en el lado sur de la nave conversión. Esto por las condiciones ideales de espacio para los trabajos de la grúa de desmontaje de los equipos. Antes de comenzar los trabajos se dejaron aisladas y bloqueadas las energías asociadas al equipo. Después del retiro de la infraestructura existente, se realizó el aseo de la plataforma de la grúa, dejando todo en orden y listo para el montaje de los equipos y la canalización del cableado nuevo.

Figura N° 4.4 Esquema maniobras desmontaje grúa n°4



Fuente: Documentos del proyecto

#### **4.7 Puesta en marcha del sistema**

Tras la instalación de los nuevos variadores de frecuencia y motores, se llevaron a cabo una serie de pruebas de izaje para asegurar que el sistema funcionara correctamente bajo las condiciones operativas normales. Estas pruebas permiten verificar que los movimientos de izaje sean precisos, suaves y que el sistema mantenga la seguridad y el control durante la operación de las grúas.

El movimiento de izaje es uno de los más críticos, ya que considera el levante de cargas peligrosas, como lo es el cobre fundido a altas temperaturas, no solo es un tema operacional sino también un tema de seguridad. Para las pruebas con cargas se tomaron todas las medidas de seguridad necesarias para evitar daños a terceros y a los equipos.

La puesta en marcha considera el ajuste de los parámetros de los variadores en búsqueda de la mejor sensibilidad de los movimientos por parte de los operadores de puente grúa. Estas asistencias fueron consideradas hasta un mes después del término de la instalación de los variadores. La entrega final y conforme de los equipos se realizó luego de toda esta etapa de puesta en marcha y ajustes finales.

#### **4.7.1 Pruebas iniciales**

Durante la puesta en marcha, se llevaron a cabo pruebas exhaustivas para garantizar la correcta operatividad del sistema. Las pruebas incluyeron los sistemas de seguridad del movimiento de izaje, pruebas de encoder de motor de izaje y pruebas de señales de control. Además, se realizaron pruebas de parametrización de los variadores y del sistema de control para confirmar el correcto accionamiento de los movimientos.

#### **4.7.2 Prueba de funcionamiento sin carga**

Verificar el funcionamiento de los sistemas de control y accionamiento de los motores sin aplicar carga completa al gancho principal.

En esta prueba, se ejecutaron movimientos de izaje (subir y bajar) sin carga para comprobar que los motores y los variadores respondieran correctamente a los comandos del sistema de control. Se revisaron y ajustaron los tiempos de aceleración y desaceleración, así como los tiempos de frenado y magnetizado de los motores.

Se revisaron además los movimientos del carro y movimiento transversal de los puentes grúas. Revisando los accionamientos de apertura y cierre de frenos, comandos de partida y detención del movimiento, tiempos de aceleración y tiempos de desaceleración.

#### **4.7.3 Prueba de funcionamiento con olla sin metal**

La finalidad de estas pruebas fue revisar el comportamiento del sistema de control instalado. Revisar el estado y variables operacionales de los variadores al momento de trabajar con una carga controlada.

Se utilizó la “olla” de carga de metal vacía para realizar pruebas de izaje controlado. Esto permitió simular el comportamiento de la grúa al levantar y bajar una carga real.

El sistema de izaje levanto la carga sin complicaciones, la prueba ayudó a revisar y mejorar parámetros de velocidades del variador. Se verificó la estabilidad de la carga en cada fase del movimiento y la capacidad de los variadores para controlar la velocidad de elevación.

#### **4.7.4 Prueba de funcionamiento con olla y carga completa**

Se realizaron pruebas con cargas cercanas al límite máximo de capacidad de las grúas. Esto permitió asegurar que el sistema de izaje, los frenos y los motores pudieran manejar cargas completas de manera segura, sin provocar sobrecargas en los equipos. La grúa PH fue sometida a esta prueba con pesos que replicaban la operación normal de los equipos.

El sistema debía ser capaz de izar la carga máxima sin esfuerzo excesivo del motor o el variador. Se comprobó que los frenos eran capaces de detener y mantener la carga en posición de forma segura.

Se probaron, además los movimientos transversales y del carro con carga completa.

#### **4.7.5 Prueba de movimiento combinados (gancho y puente)**

La finalidad de las pruebas fue verificar el control simultáneo de izaje y traslación bajo carga, simulando condiciones operativas reales.

Se ejecutaron movimientos combinados de izaje y traslación de la carga para verificar la capacidad del sistema de controlar ambos movimientos de forma simultánea.

El objetivo fue evaluar la estabilidad de la carga y la precisión de los movimientos al operar con variadores de frecuencia.

La grúa fue capaz de levantar y trasladar la carga sin oscilaciones ni descontrol en el movimiento. Los variadores fueron ajustados durante estas pruebas, en búsqueda de las mejores condiciones de operación por parte del personal del área de operaciones.

#### **4.7.7 Problemas durante la puesta en marcha**

A lo largo de la fase de puesta en marcha, surgieron varios problemas que requirieron ajustes adicionales en el cronograma y en las configuraciones del equipo. Los principales inconvenientes fueron:

- Acceso seguro para realizar algunas pruebas de calibración en la grúa, lo que generó un retraso adicional de 1 día. Se tuvo que adaptar la logística, utilizando equipos de elevación y manlifts (brazo articulado) adicionales para permitir a los técnicos realizar las pruebas en las áreas más complicadas de la grúa.
- Otro problema detectado fue la falta de capacitación adecuado del personal tanto operadores de grúa como personal mantenedor en el manejo de nuevos sistemas de control y variadores. Esto provocó retrasos en la fase de pruebas y la necesidad de realizar capacitaciones adicionales para asegurar que los operadores y mantenedores estuvieran familiarizados con los nuevos equipos instalados.

#### **4.8 Tiempos de implementación**

La implementación del proyecto de modernización de las grúas PH se organizó en una serie de etapas que se ejecutaron durante la parada de planta, permitiendo realizar el

desmontaje, instalación y puesta en marcha sin afectar la operación continua de la planta. Aunque el proyecto fue cuidadosamente planificado, se presentaron algunos retrasos debido a problemas logísticos y técnicos. Este capítulo detalla los tiempos reales de implementación, comparándolos con los tiempos estimados y explicando las acciones tomadas para gestionar los retrasos.

#### **4.8.1 Duración de la instalación**

La instalación y pruebas de los equipos fueron programadas para un total de 15 días efectivos de trabajo, con turnos diurnos y nocturnos para maximizar la productividad. Sin embargo, la falta de acceso adecuado a ciertas áreas y otros factores imprevistos ocasionaron retrasos adicionales, los cuales se gestionaron mediante la reasignación de recursos y ajustes en el cronograma.

- Desmontaje de Equipos Antiguos: Inicialmente estimado en 5 días por grúa, el desmontaje se extendió un día adicional debido a problemas de acceso en algunas áreas críticas del puente grúa.
- Instalación de Nuevos Componentes: Incluye el montaje de motores, VDF y gabinetes de control, se completó en el tiempo estimado de 8 días por grúa. El montaje de los tableros (VDF, control y fuerza) y pruebas de motores, se realizó instalaciones de ABB fue fundamental para optimizar el tiempo de instalación en el sitio, asegurando que los componentes estuvieran listos para el montaje final.
- Pruebas y Ajustes: Originalmente planificadas para realizarse en 2 días, las pruebas de puesta en marcha requirieron un día adicional debido a la necesidad de ajustar parámetros en los VDF y realizar capacitaciones adicionales para el personal.

## 4.9 Capacitaciones

Para mejorar el entendimiento y mejorar los procesos tanto de operación como de mantención, se realizaron jornadas de capacitación al personal de planta. La capacitación involucró tanto personal de operaciones como de mantenimiento. La capacitación se enfocó en tres áreas principales:

- Configuración de señales y operación de variadores de frecuencia: el equipo de mantenimiento fue entrenado en la configuración de parámetros de los variadores de frecuencia para asegurar un control óptimo de velocidad y aceleración en los movimientos de izaje y traslación.
- Mantenimiento preventivo y resolución de fallas: los técnicos recibieron formación en el diagnóstico y solución de problemas comunes en los variadores de la serie ACS800 de la empresa ABB. Además, se realizó una revisión del sistema de control y motores.
- Seguridad y protocolos de operación: se capacitó a los operadores en los nuevos protocolos de seguridad, además de informar de las características y capacidades de los nuevos equipos instalados.

## **CAPÍTULO V**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Este capítulo se centrará en el análisis de los resultados obtenidos tras la modernización del accionamiento eléctrico y control de los puentes grúas P&H 3 y 4.

El enfoque está en analizar la reducción en los tiempos de mantenimiento y la confiabilidad operativa tras el cambio de los motores de anillos rozantes, que controlaban su velocidad mediante el cortocircuito de resistencias, por motores de jaula de ardilla controlados por variadores de frecuencia.

La incorporación de variadores de frecuencia ha traído consigo la integración del sistema anti-balanceo (anti-sway), el cual permite minimizar las oscilaciones de la carga durante el transporte mediante un análisis de software por parte del variador. Este sistema de control no solo aumenta la seguridad operativa, también optimiza la eficiencia de los movimientos reduciendo los tiempos de operación y el riesgo de accidente asociados a derrames de material fundido a alta temperatura (1200°C).

En conjunto, la implementación de variadores de frecuencia y el anti-sway ha transformado las operaciones de las grúas en acciones más seguras, precisas y eficientes, lo que se refleja en una reducción del desgaste mecánico, menores fallas eléctricas y una disminución en tiempos de mantenimiento preventivo.

#### **5.1 Mantenimiento**

El mantenimiento de los puentes grúas siempre ha sido un ítem importante tanto para el equipo eléctrico como el equipo mecánico de mantenimiento. Estos equipos deben mantener una revisión constante por parte de los equipos de técnicos, ya que son equipos con alta complejidad en cuanto a las tareas que desarrollan (izaje de cargas pesadas).

Los puentes grúas P&H 3 y 4 son equipos que datan de los años 90', por lo cual sus componentes y equipos tienen una antigüedad importante. Esta antigüedad también impacta el mantenimiento y uso de recursos de mantenimiento. Los equipos requieren de una mayor frecuencia y tiempos de mantenimiento. Los componentes de recambio suben de precio y son difíciles de adquirir para el equipo de abastecimiento. Estos factores de obsolescencia son los que originan estos proyectos de modernización de equipos complejos.

El impacto en el mantenimiento y por consecuencia en la operación, se mide a través de una serie de indicadores relacionados a la gestión del mantenimiento. Estos factores son determinantes a la hora de una gestión eficaz en el mantenimiento de una empresa.

Para medir el impacto y las mejoras originadas del cambio de accionamiento en los puentes grúas, se analizaron algunos de los más importantes.

### **5.1.1 Calendario de mantención**

Dentro del plan de mantenimiento, antes de implementación de variadores de frecuencia, las grúas P&H 3 y 4 requerían un estricto calendario de mantención preventiva semanal debido a la antigüedad de estos equipos, que demandaban inspecciones constantes y ajustes en sus componentes. El programa de mantenimiento de las grúas consideraba cuatro días a la semana (lunes, martes, jueves y viernes) de 08:30 am a 13:00 pm, lo que representa un tiempo de 04 horas y 30 minutos por día de mantención, un total de 18 horas semanales programadas.

Durante este periodo de mantención, se realizaban las siguientes actividades de inspección y mantenimiento:

- Revisión de contactos de potencia en contactores (fijos y móvil)
- Limpieza y ajuste de conexiones

- Verificación de tensión en porta-carbones y carbones de los motores
- Inspección de anillos rozantes
- Verificaciones de desgaste en tomacorriente naciente – poniente
- Verificaciones de límite máximo subir, dispositivos de seguridad

Este programa de mantención buscaba minimizar las fallas en puentes grúas P&H, aunque las limitaciones de la tecnología implicaban una alta frecuencia de intervenciones.

Tabla N° 5.1 Desglose horas mantenimiento semanal antes del proyecto

GRÚAS P&H	DÍAS MANTENIMIENTO	HORAS DE MANTENIMIENTO	TOTAL SEMANAL
3	Lunes y jueves	4.5 horas	9 horas
4	Martes y viernes	4.5 horas	9 horas

Tras la modernización, la frecuencia y duración de las intervenciones de mantenimiento programado se redujeron en un 66%. Las grúas requieren menos reparaciones y presentan una operación más estable luego de la modernización, permitiendo disminuir el calendario de mantención semanal a solo un día por semana en cada grúa. Los horarios de mantenimiento quedaron establecidos desde las 09:00 am a las 12:00 pm, una duración de tres horas por grúa. Totalizando seis horas semanales entre ambas grúas por semana.

Tabla N° 5.2 Desglose horas mantenimiento semanal después del proyecto

GRÚAS P&H	DÍAS MANTENIMIENTO	HORAS DE MANTENIMIENTO	TOTAL SEMANAL
3	Lunes	3 horas	3 horas
4	Jueves	3 horas	3 horas

Este cambio representa una reducción significativa en las horas de mantenimiento programado, permitiendo maximizar la disponibilidad operacional de las grúas.

La modernización ha dado como resultado una operación más estable y confiable, disminuyendo la carga de mantenimiento programado de estos equipos.

## **5.2 Indicadores de mantenimiento (KPI)**

Para evaluar con precisión el impacto de la modernización de las grúas en el mantenimiento y disponibilidad de los equipos, se utilizaron una serie de indicadores claves de rendimiento que permiten cuantificar las mejoras en términos de confiabilidad y eficiencia de los activos.

Dentro de los principales, y más importantes, indicadores de mantenimiento encontramos los siguientes:

- MTBF (Mean Time Between Failure o Tiempo Medio Entre Fallas): nos indica el promedio de tiempo entre ocurrencias de fallas en un mismo equipo. Un MTBF alto nos indica menos fallas y por lo tanto mayor disponibilidad del equipo para ser operado.
- MTTR (Mean Time To Repair o Tiempo Medio De Reparación): representa promedio de tiempo que toma realizar una reparación después de una falla. Este indicador nos permite conocer la eficiencia del equipo de mantenimiento.
- Disponibilidad: nos indica la cantidad de tiempo que las grúas están en condiciones de ser operadas.
- Confiabilidad: evalúa la probabilidad de que el equipo pueda cumplir su función designada durante un periodo de tiempo determinado.

Para analizar, se consideraron periodos específicos de tiempo, tanto antes como después de la modernización de los puentes grúas P&H. Se utilizaron registros históricos de operación en régimen normal de trabajo incluyendo fallas y reparaciones en este periodo, proporcionando una base sólida para realizar comparaciones. Además, septiembre 2017 mostro un patrón de fallas repetitivas y prolongadas, especialmente debido a los problemas de anillos rozantes y sistemas eléctricos. Este periodo de tiempo se caracteriza por una alta demanda de producción y una significativa carga operacional de los equipos. Por lo tanto, septiembre de 2018 permite capturar con precisión los efectos de la modernización de los equipos, reflejando los beneficios obtenidos por la implementación de los variadores de frecuencia y motores de jaula de ardilla.

### **5.2.1 Mean time between failure o tiempo medio entre fallas (MTBF)**

El MTBF es un indicador de mantenimiento que mide el tiempo promedio entre ocurrencias de falla en un sistema o equipo. En las grúas P&H, el MTBF se calcula dividiendo el tiempo total de operación del equipo por el número total de fallas en un periodo específico.

Un MTBF alto es un indicativo que el equipo es confiable y se mantendrá en servicio durante más tiempo antes que ocurra una falla, lo cual es esencial para asegurar la continuidad operacional.

Cálculo de tiempo medio entre falla (MTBF):

$$MTBF = \frac{\sum \text{Horas Operación}}{N^{\circ} \text{ Total de Fallas}}$$

*N° ec (1)*

### 5.2.1.1 Comparación del MTBF antes y después de la modernización

La modernización fue crucial para reducir las fallas y mejorar la estabilidad operativa de los puentes grúas P&H. Los motores de jaula de ardilla en comparación con motores de anillos rozantes requieren de menos tiempo de mantenimiento debido a su diseño robusto y confiable, lo que disminuye significativamente las probabilidades de fallas causada por desgaste de componentes.

El cambio de motores e implementación de variadores reflejó un aumento del MTBF, gracias a una disminución de las horas de mantención y tasa de fallas en los periodos evaluados.

Para analizar el cálculo de MTBF, se registró un promedio de 6 fallas mensuales antes de la modernización, con una duración de 4 horas en promedio por cada falla.

Cálculo de MTBF antes de la modernización:

- Horas mensuales: 720 horas (24 horas \* 30 días)
- Horas de fallas: 24 horas (6 fallas \* 4 horas)
- 

$$MTBF = \frac{720 - 24}{6} = 116 \text{ horas} \quad N^{\circ} \text{ ec } (2)$$

Cálculo de MTBF después de la modernización:

- Horas mensuales: 720 horas (24 horas \* 30 días)
- Horas de fallas: 6 horas (3 fallas \* 2 horas)

$$MTBF = \frac{720 - 6}{3} = 238 \text{ horas} \quad N^{\circ} \text{ ec } (3)$$

El incremento en el MTBF de 116 horas a 238 horas, tras la modernización, representa una mejora significativa en la disponibilidad de las grúas. En promedio, el tiempo entre fallas aumentó, representando una mejora importante en la disminución de número y duración de fallas.

Este aumento en MTBF tiene implicaciones positivas para la operación y el mantenimiento de las grúas, contribuyendo directamente en su eficiencia y confiabilidad. A continuación, se destacan los beneficios específicos asociados a un MTBF mejorado:

- Mayor disponibilidad: con un MTBF más alto implica que las grúas estarán disponibles para la operación durante más tiempo sin interrupciones, aumentando la eficiencia de la planta y producción.
- Reducción de costos de mantenimiento: al requerir menos intervenciones, los costos asociados al mantenimiento se reducen significativamente.
- Planificación de mantenimiento predictivo: un MTBF positivo permite anticipar la próxima intervención futura, facilitando la implementación de un plan de mantenimiento predictivo.

### **5.2.2 Mean time to repair o tiempo medio de reparación (MTTR)**

El MTTR es un indicador que mide el tiempo promedio necesario para reparar un activo después de una falla. Su importancia radica en la capacidad del equipo técnico para minimizar el tiempo de inactividad de los equipos y mejorar la eficiencia en las reparaciones. Así como también obtener un diagnóstico del modelo de mantenimiento.

Un MTTR bajo y un MTBF alto, aseguran una mayor disponibilidad para la operación y nos indica que el modelo de mantenimiento está siendo eficiente y bien aplicado.

El cálculo de MTTR:

$$MTTR = \frac{\sum \text{Horas de Reparación}}{N^{\circ} \text{ de Fallas}} \quad N^{\circ} \text{ ec ( 4)}$$

### 5.2.2.1 Comparación del MTTR antes y después de la modernización

La disminución de los tiempos de mantenimiento y resolución de fallas después de la modernización de los puentes grúas se refleja en la cantidad de tiempo que el equipo de mantenimiento demora en solucionar problemas en los equipos. El autodiagnóstico que realiza un variador de frecuencia minimiza y ayuda a solucionar los problemas de una manera más rápida y eficiente.

Cálculo de MTTR antes de la modernización:

- Tiempo total de reparación mensual: 24 horas.
- Numero de fallas mensual: 6 fallas

$$MTTR = \frac{24}{6} = 4 \text{ horas} \quad N^{\circ} \text{ ec ( 5)}$$

Cálculo de MTTR después de la modernización:

- Tiempo total de reparación mensual: 6 horas.
- Numero de fallas mensual promedio: 3 fallas.

$$MTTR = \frac{6}{3} = 2 \text{ horas} \quad N^{\circ} \text{ ec ( 6)}$$

La reducción del MTTR de 4 a 2 horas, después de la modernización, implica varios beneficios importantes para la operación:

- Menor tiempo de inactividad: con reducción en el MTTR significa que las grúas están fuera de servicio por menos tiempo, lo cual impacta positivamente en la disponibilidad del equipo para ser utilizado.
- Optimización de recursos de mantenimiento: al reducir el tiempo necesario para generar las reparaciones, el equipo de mantenimiento puede enfocarse en otras tareas críticas de la planta.
- Mayor confiabilidad y continuidad operacional: la combinación de indicadores de MTTR bajo y un MTBF alto, asegura que las grúas operen de manera confiable, continua y sin interrupciones.

### **5.3 Disponibilidad y Confiabilidad de los activos**

La disponibilidad y confiabilidad de los activos son indicadores fundamentales en el planeamiento y control del mantenimiento, ya que permite optimizar la productividad y reducir los tiempos de inactividad, asegurando que los puentes grúas estén operativos y puedan cumplir con sus funciones cuando lo requieran.

Cuando nos referimos a estos indicadores, nos referimos a los conceptos siguientes,

- Disponibilidad: es la capacidad para estar en condiciones de ejecutar una función específica en un momento dado o durante un intervalo de tiempo determinado. Esto significa que el equipo está operativo y listo para su uso cuando se necesite.

- Confiabilidad: es la probabilidad de que un equipo cumpla con la función para la cual fue diseñado, de manera continua y sin fallos en un intervalo específico de tiempo.

Aunque ambos conceptos están relacionados, la disponibilidad se refiere al estado actual del equipo, mientras que la confiabilidad predice la probabilidad de funcionamiento del equipo en el futuro.

### 5.3.1 Disponibilidad de los puentes grúas P&H

La disponibilidad es la probabilidad de que un sistema, equipo o componente realice la función prevista cuando sea requerido. Se mide en porcentaje de tiempo en que los equipos están operativos y disponibles para su uso. Un aumento en la disponibilidad indica una mayor capacidad del equipo para cumplir con la demanda de trabajo.

La disponibilidad se determina utilizando la siguiente formula:

$$D = \frac{\text{Tiempo Planificado} - \text{Tiempo Detenciones Programadas}}{\text{Tiempo Total Planificado}} \times 100 \quad \text{N}^{\circ} \text{ ec (7)}$$

Para este análisis, se seleccionó una semana en septiembre de cada año de referencia. Durante esta semana se consideró el tiempo de mantenimiento, condición operacional y mantención programada.

Cálculo disponibilidad antes de la modernización:

- Horas operación: 168 horas
- Sin uso por condición operacional: 7 horas (1 hora diaria)
- Numero de fallas: 2 falla (4 hora promedio por falla)
- Mantención semanal: 9 horas

$$D = \frac{168 - 7 - 8 - 9}{168} \times 100 = 85.71 \% \quad N^{\circ} ec (8)$$

Cálculo de la disponibilidad después de la modernización:

- Horas operación: 168 horas
- Sin uso por condición operacional: 7 horas
- Numero de fallas: 1 falla (2 horas promedio por falla)
- Mantenimiento semanal: 3 horas

$$D = \frac{168 - 7 - 2 - 3}{168} \times 100 = 91.07 \% \quad N^{\circ} ec (9)$$

Estos resultados muestran que la disponibilidad de las grúas P&H aumentó tras la modernización, esta mejora es debido a la implementación de variadores de frecuencia y motores de jaula de ardilla. Con una disponibilidad del 91.07% después de la modernización, las grúas P&H se encuentran dentro de los rangos recomendados por los estándares de clase mundial para equipos industriales críticos, sobre los 90 % en 168 horas de servicio continuo.

### 5.3.2 Confiabilidad de los puentes grúas P&H

La confiabilidad mide la probabilidad de que el equipo funcione sin fallas durante un tiempo futuro determinado. Una alta confiabilidad implica que el equipo esta preparado para operar correctamente sin experimentar fallas. La fórmula para calcular la confiabilidad, considerando un tiempo específico de operación (t), es:

$$\text{Confiabilidad } R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad N^{\circ} ec (10)$$

Donde:

- R: Confiabilidad en el tiempo.

- $\lambda$ : Tasa de fracaso. (N° de fallas/ tiempo total de funcionamiento)
- t: Tiempo de operación.
- e: Base logarítmica natural (Aproximadamente 2,718)

Para analizar la confiabilidad en uno de los puentes P&H, antes y después de la modernización, se evaluarán los datos de un periodo de una semana de trabajo (168 horas) y un periodo de 2 días (48 horas) para la comparación de resultados.

Cálculo de confiabilidad antes de la modernización:

- Horas operación: 168 horas
- Condición operacional: 7 horas (1 hora por día)
- Numero de fallas: 2 fallas (4 horas promedio por falla)
- Mantención semanal: 9 horas

Tasa de falla ( $\lambda$ ) se calcula:

$$\lambda = \frac{2}{168 - 8 - 9 - 7} = 0.0138 \text{ horas} \quad N^{\circ} ec (11)$$

- Confiabilidad de 168 horas:

$$R (168) = e^{-0.0138*168} * 100 = 9.84\% \quad N^{\circ} ec (12)$$

- Confiabilidad de 48 horas:

$$R (48) = e^{-0.0138*48} * 100 = 51.56\% \quad N^{\circ} ec (13)$$

Esto significa que, antes de la modernización la probabilidad que las grúas operen sin fallar durante una semana (168 horas) alcanzaba un 9.84% y durante dos días es de 51.56%.

Cálculo de la confiabilidad después de la modernización:

- Horas operación: 168 horas
- Condición operacional: 7 horas (1 hora por día)
- Numero de fallas: 1 falla (2 horas promedio por falla)
- Mantenimiento semanal: 3 horas

$$\lambda = \frac{2}{168 - 7 - 2 - 3} = 0.00641 \text{ horas} \quad N^{\circ} ec (14)$$

La confiabilidad se calcula como:

- Confiabilidad de 168 horas:

$$R(168) = e^{-0.00641 \cdot 168} * 100 = 34.07\% \quad N^{\circ} ec (15)$$

- Confiabilidad de 48 horas:

$$R(48) = e^{-0.00641 \cdot 48} * 100 = 73.51\% \quad N^{\circ} ec (16)$$

Tras la modernización, la probabilidad de las grúas opere sin fallas durante una semana completa es de 34.07% mientras que el periodo de 2 días es de 73.51%.

Estos resultados indican que, tras la modernización, la probabilidad de que las grúas operen sin fallas durante 48 horas aumento aproximadamente en un 22%, lo que mejora la confiabilidad de las operaciones.

- Mayor disponibilidad: el aumento en la disponibilidad, de 85.71% a 91.07% significa que las grúas están operativas durante un mayor porcentaje del tiempo total. Una reducción de tiempos de inactividad y una mayor capacidad para cumplir con los objetivos de producción.
- Mayor confiabilidad: la mejora en la confiabilidad en un periodo de 48 horas, de 51.56% a 73.51% indica que las grúas tienen una mayor probabilidad de operar sin fallas en un período de tiempo determinado, lo que contribuye a la continuidad de las operaciones.

Tabla N° 5.3 Comparativa indicador confiabilidad

Periodo	Confiabilidad de 169 horas	Confiabilidad de 48 horas	Observaciones
Pre-modernización	9.84 %	51.56 %	Baja probabilidad, alta probabilidad de falla
Post-modernización	34.07 %	73.51 %	Mayor probabilidad, menor probabilidad de falla

En general los indicadores de mantenimiento han logrado mejoras en sus valores finales. Lo que demuestra que la modernización del sistema de control y sistema eléctricos de los puentes grúas fue una inversión de capital que logró su objetivo.

Además, estas mejoras en los indicadores permiten planificar las mantenciones preventivas con tiempos más predecibles, lo que produce que se pueda realizar incluso una proyección de fallas en estos equipos.

Las mejoras de rendimientos aportan al equipo operacional y de mantenimiento. Sumando valor agregado al trabajo de las personas y al rendimiento mejorado en la producción.

## **CAPITULO VI**

### **CONCLUSIONES**

En el desarrollo de este resumen del proyecto, de modernización del sistema eléctrico y control de los puentes grúas, se han expuesto una serie de datos sobre la metodología, planificación, ventajas y costos asociados a la implementación de los cambios. Todos aquellos aspectos importantes y que justifican la inversión de capital han sido desarrollados y enumerados en los capítulos de este documento.

Entonces, y en base a lo desarrollado, podemos afirmar que el proyecto de modernización fue un éxito en cuanto a datos operacionales y mejoras en la seguridad de los activos y personas.

El proyecto e inversión no considera una devolución inmediata del costo monetario del proyecto. Fue ideado y desarrollado en base a los capitales de expansión de activos de la compañía. No obstante, las mejoras operacionales y los mejores índices de disponibilidad expuestos en el capítulo V, conllevaran a un aumento importante en la producción anual de la empresa. Esta situación desencadenara en el retorno de inversión durante los años consiguientes a la implementación del proyecto.

La descripción detallada del proyecto contemplaba las etapas de ingeniería, la etapa de adquisición de equipos, la etapa de planificación de trabajos, la etapa de ejecución de los trabajos, etapa de comisionamiento, etapa de puesta en marcha y etapa de ajustes finales. Todas estas etapas fueron descritas, y resumidas, en este trabajo de análisis de las mejoras que se obtienen de modernizar las instalaciones. El objetivo se cumple desde el punto de vista analítico e informativo.

Se describió el sistema de control utilizado con anterioridad a los trabajos de modernización, para dar contexto a las realidades opuestas en tecnología, y también se

describió el sistema a reemplazar el antiguo esquema de control. Se describieron sus partes, nuevo esquema, equipos a instalar y funcionamiento.

Los cambios realizados sin duda alguna favorecen la continuidad operacional, y dan al equipo y a la empresa una nueva forma de operar y mantener estos equipos. El equipo de mantenimiento ve mejorada su eficiencia y eficacia al momento de enfrentar nuevos desafíos de mantenimiento en estos equipos. Los indicadores de mantenimiento han mejorado, luego de los cambios, de manera significativa. La menor cantidad y duración de fallas, sumado a la nueva confiabilidad mejorada, dan por demostrado que el cambio de equipos ha sido efectivo y ha mejorado el rendimiento de este activo de la empresa.

Nueva tecnología, nuevos equipos, mejores indicadores de mantenimiento y mejoras en la parte operacional, sin duda desencadenan en un equipo mucho más confiable y preparado para la continuidad operacional y los nuevos desafíos de producción.

Todos los aspectos anteriores descritos, considerar mejoras al proceso y la seguridad. Razones más que suficientes para poder determinar que el proyecto es una mejora real al proceso productivo de la empresa, y está más que justificado en cuanto a inversión de capital e inversión en seguridad.

## BIBLIOGRAFIA

- ABB. (s.f.). *Convertidores de frecuencia regenerativos ACS800-11*. Obtenido de <https://new.abb.com/drives/es/convertidores-baja-tension-ca/industriales/convertidores-industriales-ac800/convertidores-unicos-ac800/acs800-11>
- Energy, U. D. (2022). Obtenido de Energy Efficiency with Variable Frequency Drives: <https://www.energy.gov/efficiency/variable-frequency-drives>
- fracttal. (s.f.). *5 indicadores clave en el departamento de mantenimiento*. Obtenido de <https://www.fracttal.com/es/guias-mantenimiento/indicadores-de-mantenimiento>
- Maquiclick. (s.f.). *¿Qué es un variador de frecuencia regenerativo?* Obtenido de <https://fabricantes-maquinaria-industrial.es/variador-frecuencia-regenerativo/#:~:text=E1%20variador%20de%20frecuencia%20regenerativo%20en%20gr%C3%BAas,-En%20una%20gr%C3%BAa&text=Cuando%20una%20carga%20se%20convierte,potencia%20mec%C3%A1nica%20en%20energ%>
- Montt, E. D. (2021). *Control de accionamientos eléctricos*. Obtenido de <https://www.studocu.com/cl/document/universidad-tecnica-federico-santamaria/control-de-accionamientos-electricos/introduccion-accionamiento-corriente-electrica-presentacion/15505772>
- Motor anillos rozantes y rotor bobinado*. (s.f.). Obtenido de <https://www.areatecnologia.com/electricidad/motor-anillos-rozantes.html>
- Spobu. (s.f.). *VNS0*. Obtenido de <https://www.spobu.com/products/joysticks/joystick-vns0.html>
- Suazo, L. (s.f.). *8 indicadores de mantenimiento para la gestión de activos*. Obtenido de <https://traction.com/es/blog/8-indicadores-indispensables-para-la-gestion-del-mantenimiento>
- Telemecanique. (s.f.). *Regulación de velocidad de los motores asíncronos trifásicos*. Obtenido de [https://llamados.ancap.com.uy/docs\\_concursos/ARCHIVOS/2%20LLAMADOS%20FINALIZADOS/2018/REF.%2018-2018%20-](https://llamados.ancap.com.uy/docs_concursos/ARCHIVOS/2%20LLAMADOS%20FINALIZADOS/2018/REF.%2018-2018%20-)

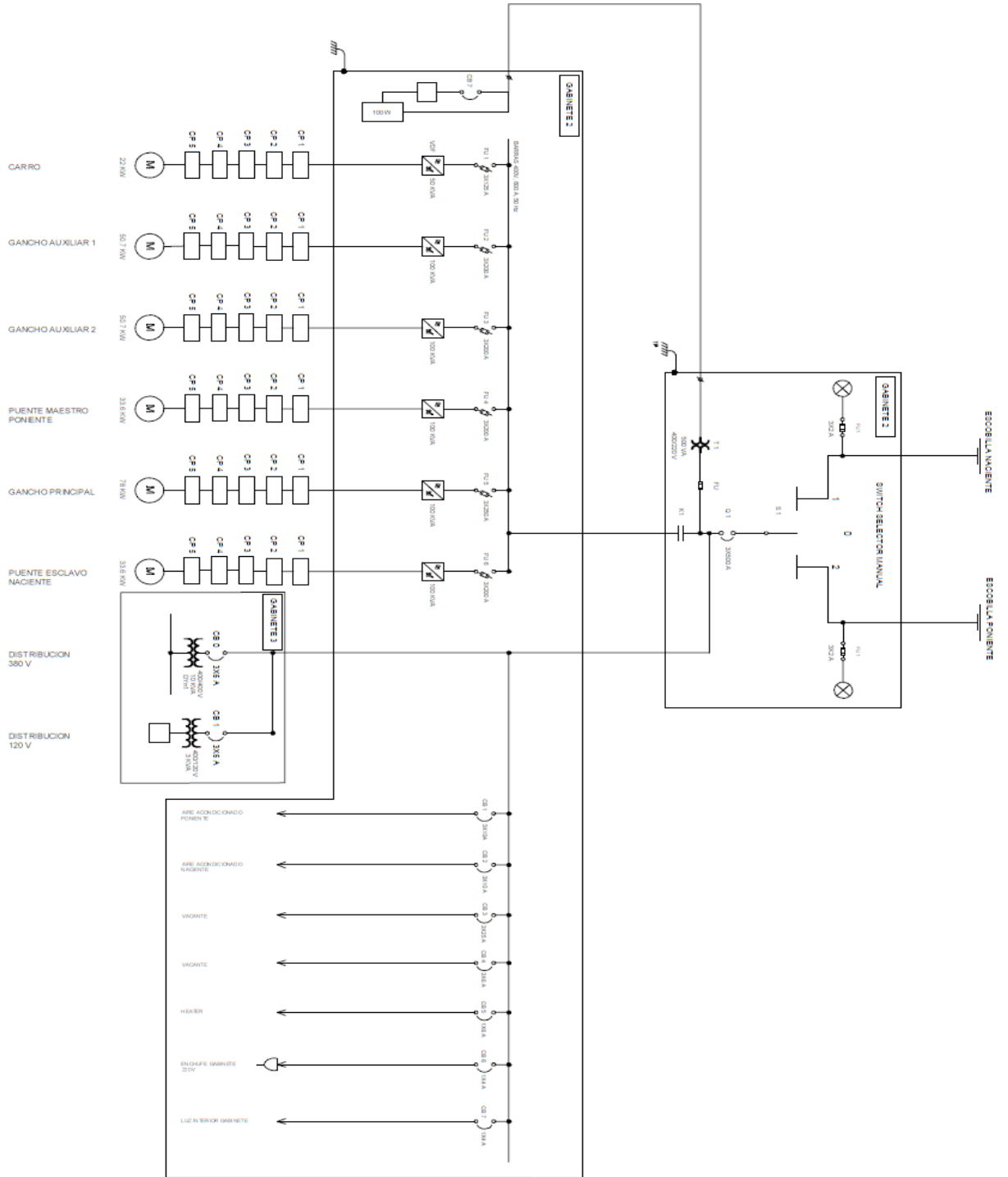
%20OFICIAL%20TALLER%20B%20-  
%20PLANTA%20PAYSAND%C3%9A%20-  
%20PERFIL%20ELECTRICIDAD/MATERIAL%20DE%20ESTUDIO/REGUL  
ACI%C3%93N%20DE%20VELOCIDAD%20DE%20MOTORE

Vergara, C. H. (2016). *Fusión de Concentrados en Fundición Hernán Videla Lira*.

Obtenido de <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/03/01.-Fusion-de-Concentrados-en-Fundicion-Hernan-Videla-Lira.pdf>

# ANEXO 1

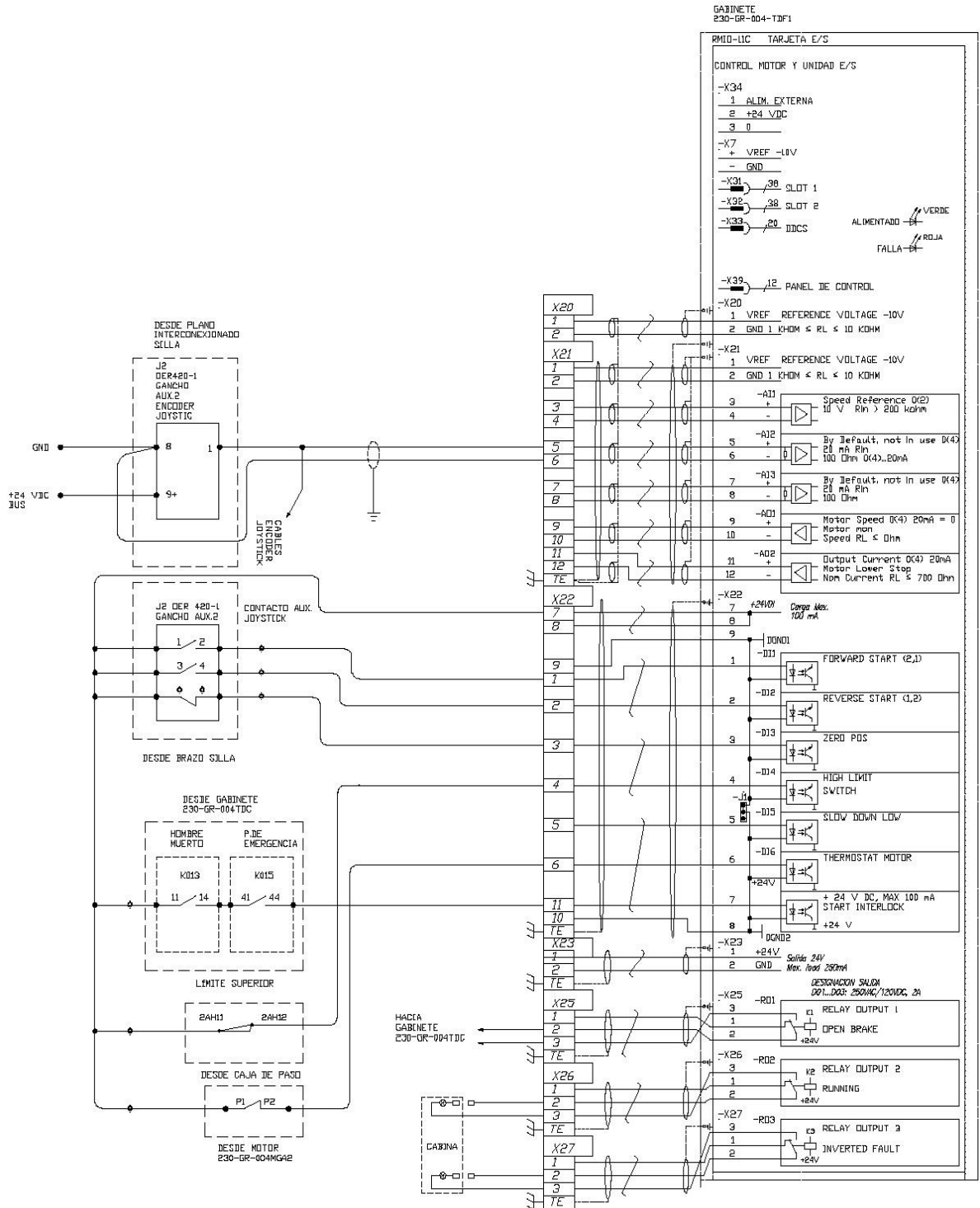
-Unilineal circuito de fuerza puentes grúas





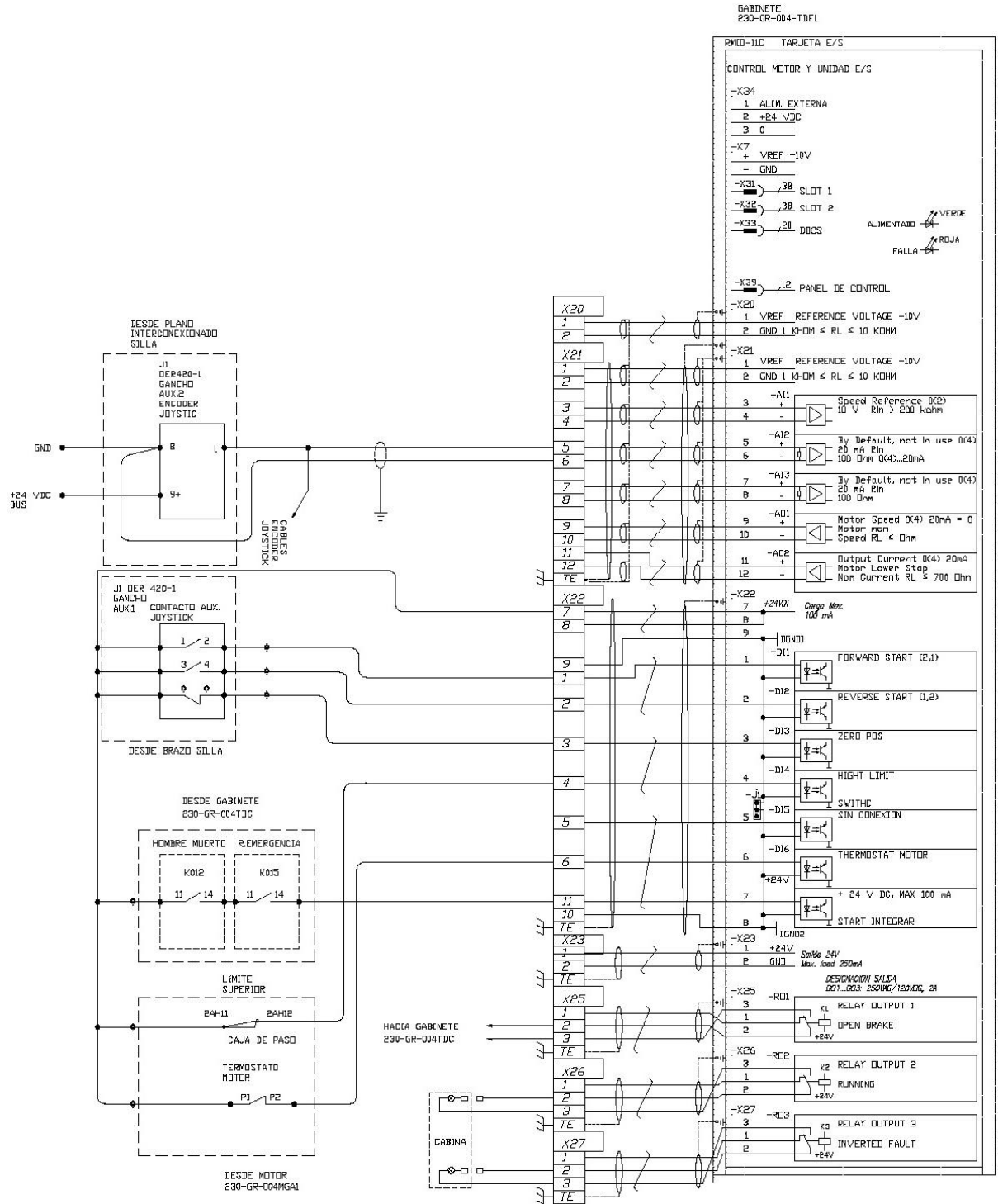
# ANEXO 3

- Esquema de control de velocidad movimiento de gancho auxiliar n°2



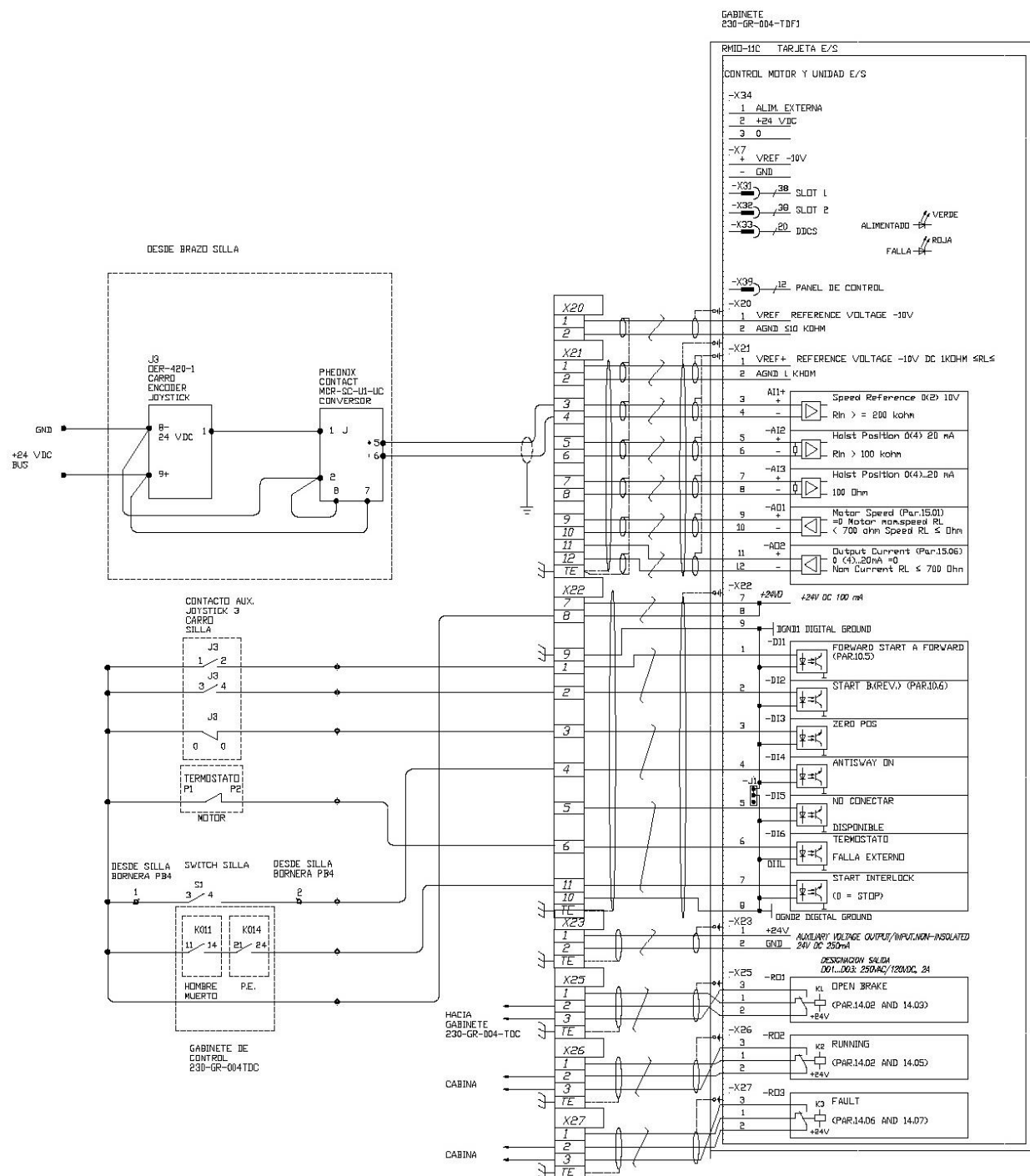
# ANEXO 4

- Esquema de control de velocidad movimiento de gancho auxiliar n°1



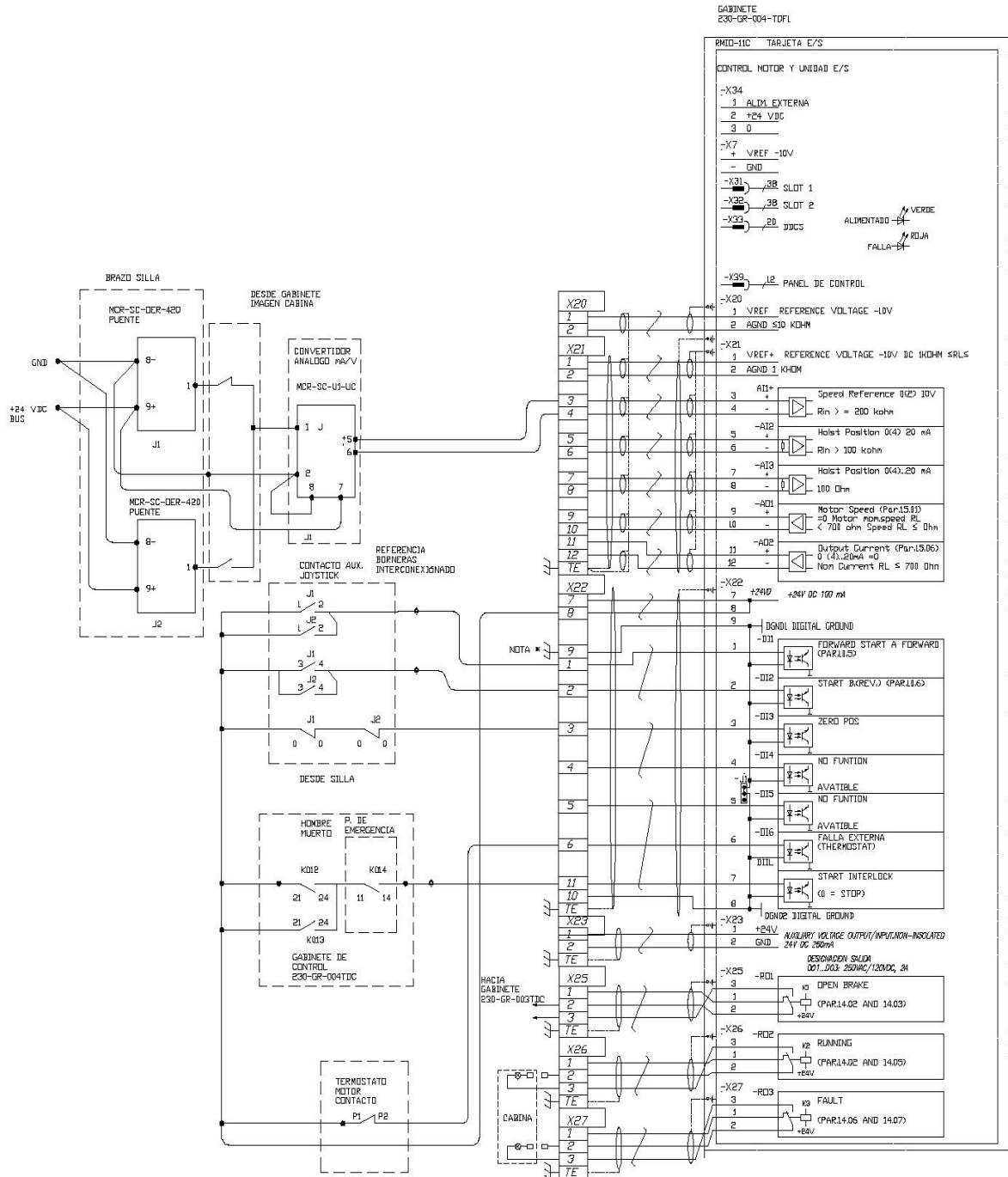
## ANEXO 5

-Esquema de control de velocidad movimiento del carro



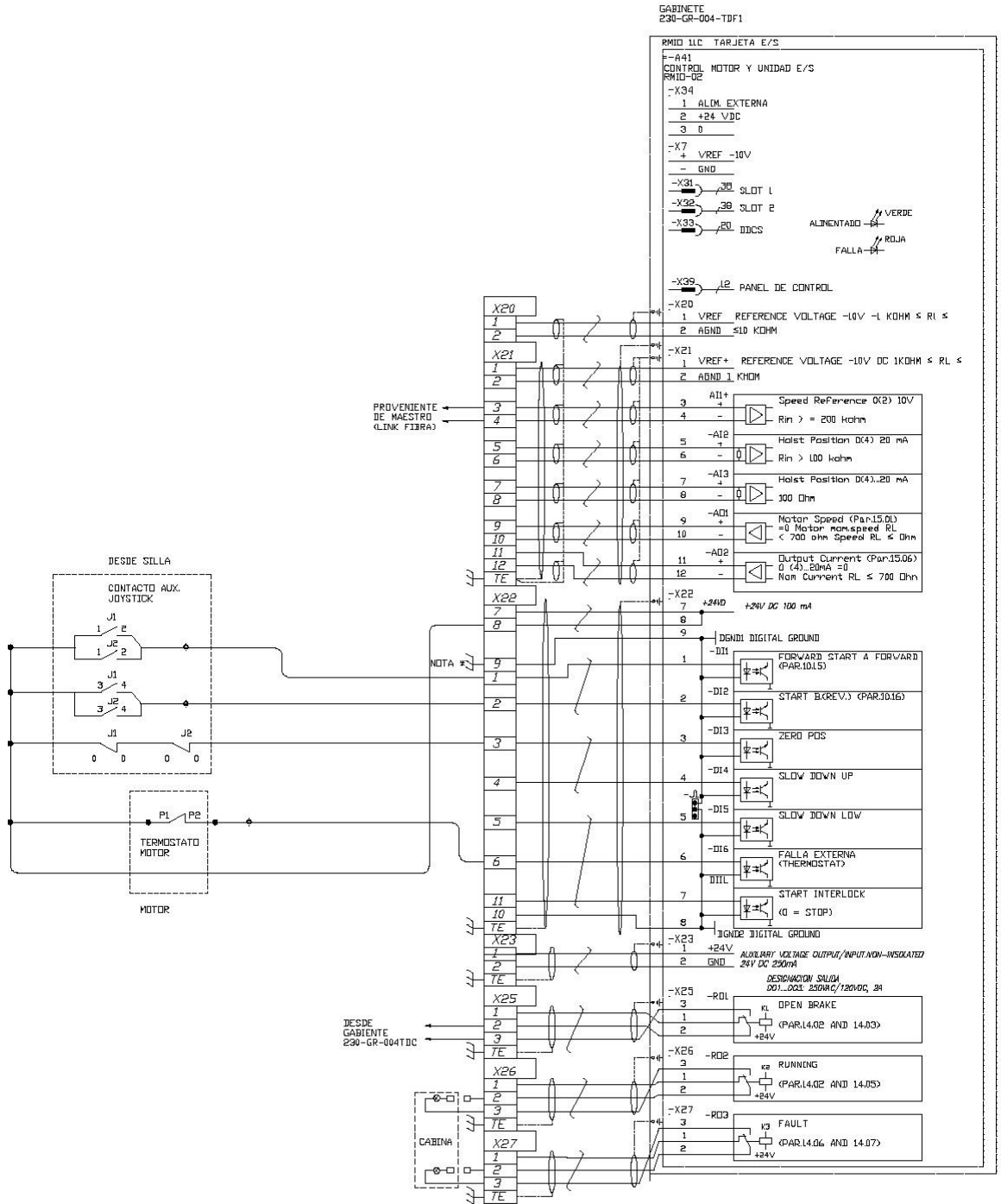
## ANEXO 6

- Esquema de control de velocidad movimiento de traslación puente motor 1 (maestro)



# ANEXO 7

- Esquema de control de velocidad movimiento de traslación puente motor 2 (esclavo)



NOTA 2: DGND PUENTE ESCLAVO CONECTADA A DGND PUENTE MAESTRO