



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**CAMBIO DE COMPONENTES DEL PUENTE GRÚA DE LA NAVE 1 DE
MOLIENDA DE MINERA CODELCO DIVISIÓN SALVADOR**

Proyecto de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título
de ingeniero de ejecución en electricidad

Profesor Guía: Juan Carlos Madrigal Lobos

Sebastián Alonso Álvarez Quintanilla
Danny Alexander Campos Escudero

Copiapó, Chile 2024

DEDICATORIA

¡La peor lucha es la que no se hace! Karl Marx

Dedicado a Alexandra y Melissa

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestro docente guía el Sr. Juan Madrigal por su paciencia y acompañamiento constante que permitieron que este proyecto de titulación fuese concretado. Sus consejos y recomendaciones fueron siempre útiles cuando no salían de mi pensamiento las ideas para escribir y concretar lo que hoy he logrado.

Además, agradecemos a Codelco División Salvador por permitir desarrollar este proyecto de titulación dentro de sus instalaciones y apoyar el crecimiento profesional y técnico de sus profesionales.

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo General	2
1.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Metodología de trabajo	3
1.4 Resumen de capítulos.....	3
CAPÍTULO II	5
MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Puente Grúa.....	5
2.2 Motores de inducción.....	7
2.3 Fórmulas para determinar intensidad de corriente y seccionamiento de conductor para un motor trifásico	9
2.4 Tipos de arranque de un motor trifásico	10
2.4.1 Arranque directo	10
2.4.2 Arranque estrella - triángulo.....	11
2.4.3 Arranque de motores de devanados partidos “part – winding”	11
2.4.4 Arranque estatórico por resistencias	12
2.4.5 Arranque por autotransformador	13
2.4.6 Arranque electrónico	13
2.4.7 Arranque rotórico por resistencias de los motores de anillos	14
2.5 Variadores de frecuencia.....	15
2.6 Disponibilidad de un equipo	18
2.7 Software CADe_simu	20
CAPÍTULO III	21
COMPONENTES DEL PUENTE GRÚA.....	21
3.1 Levantamiento de componentes del puente grúa	21
3.2 Disponibilidad puente grúa	29
3.2 Fallas puente grúa	30
CAPÍTULO IV.....	33
CAMBIO DE COMPONENTES DE PUENTE GRÚA.....	33

4.1 Reemplazo de componentes del puente grúa	33
4.2 Motores trifásicos por utilizar	34
4.3 Cálculo de protecciones y alimentadores para motores trifásicos	35
4.3.1 Determinación de corriente nominal de cada motor	36
4.3.2 Determinación de corriente total del circuito de motores	37
4.3.3 Determinación de conductores en base a RIC-N04	37
4.3.4 Determinación de sección del alimentador principal.....	41
4.3.5 Determinación de protección de sobrecarga.....	43
4.3.6 Determinación de protección de corto circuito (ITM).....	44
4.4 Estimación de costos de implementación cambio de componentes.....	46
CAPÍTULO V	49
SIMULACIÓN EN SOFTWARE CADe_simu.....	49
CAPÍTULO VI.....	61
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE VARIADOR DE FRECUENCIA EN LABORATORIO	61
CAPÍTULO VII	71
IMPLEMENTACIÓN DE CAMBIO DE COMPONENTES	71
CAPÍTULO VIII.....	80
CONCLUSIONES	80
ANEXO A TABLAS DE SECCIÓN DE CONDUCTORES	83
ANEXO B TIPOS DE FUSIBLES, ITM Y RELÉ TÉRMICO NORMALIZADOS.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1.1: Vista panorámica Nave 1 Molienda – DSAL.....	2
Figura N° 2.1: Puente grúa monorriel de 32 t.....	6
Figura N° 2.2: Puente grúa birriel.....	7
Figura N° 2.3: Partes de un motor eléctrico trifásico.....	8
Figura N° 3.1: Sistema de control y fuerza de puente grúa.....	22
Figura N° 3.2: Motor de corriente continua.....	23
Figura N° 3.3: Banco de resistencia.....	24
Figura N° 3.4: Sistema de comando para movimiento de puente grúa.....	25
Figura N° 3.5: Sistema de barras conductoras de electrificación (Tipo pantógrafo).....	26
Figura N° 3.6: Eje de transmisión de puente grúa.....	27
Figura N° 3.7: Disponibilidad Puente Grúa Nave 1 Molienda – 2022.....	29
Figura N° 3.8: Distribución de tipo de fallas Puente Grúa Nave 1 Molienda – 2022.....	30
Figura N° 3.9: Pareto de fallas eléctricas Puente Grúa Nave 1 Molienda – 2022.....	31
Figura N° 4.1: Características constructivas tipo RV – K.....	37
Figura N° 4.2: Características constructivas multi conductor.....	38
Figura N° 4.3: Diagrama Unilineal de protecciones.....	45
Figura N° 5.1: Simulación CADe_simu partida de motor en sentido horario con VDF a 25 Hz / 750 rpm.....	51
Figura N° 5.2: Simulación CADe_simu partida de motor en sentido antihorario con VDF a 25 Hz / 750 rpm.....	52
Figura N° 5.3: Simulación CADe_simu partida de motor en sentido horario con VDF a 50 Hz / 1.500 rpm.....	55
Figura N° 5.4: Simulación CADe_simu partida de motor en sentido antihorario con VDF a 50 Hz / 1.500 rpm.....	56
Figura N° 5.5: Simulación CADe_simu Falla de sobrecarga en motor trifásico 380 V (en modo VDF).....	57
Figura N° 5.6: Simulación CADe_simu partida directa de motor trifásico 380 V / 50 Hz / 1.500 rpm (en sentido horario).....	58

Figura N° 5.7: Simulación CADe_simu partida directa de motor trifásico 380 V / 50 Hz / 1.500 rpm (en sentido antihorario).....	59
Figura N° 5.8: Simulación CADe_simu Falla de sobrecarga en motor trifásico (modo partida directa).....	60
Figura N° 6.1: Armado de tablero de control y fuerza.....	64
Figura N° 6.2: Conexionado de relé de control	65
Figura N° 6.3: Variador de frecuencia ABB – ACS 830	66
Figura N° 6.4: Configuración de variador de frecuencia.....	67
Figura N° 6.5: Medición de corriente de partida del motor.....	68
Figura N° 6.6: Sistema de comando a distancia inalámbrico.....	69
Figura N° 7.1: Sistema de barras conductoras de electrificación.....	71
Figura N° 7.2: Canalización de conductores tipo Festoon.....	72
Figura N° 7.3: Moto reductor trifásico.....	73
Figura N° 7.4: Variador de frecuencia gancho principal.....	74
Figura N° 7.5: Gabinete de control y fuerza del puente grúa.....	75
Figura N° 7.6: Ganchos de izaje tipo polipasto.....	76
Figura N° 7.7: Motores trifásicos implementados en los ganchos de polipasto.....	77
Figura N° 7.8: Variador de frecuencia para carro y traslación del puente grúa.....	78
Figura N° 7.9: Vista frontal puente grúa post cambio de componentes.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 2.1: Ventajas de uso de variador de frecuencia frente al resto de arranques.....	17
Tabla N° 2.2: Desventajas de uso de variador de frecuencia frente al resto de arranques..	18
Tabla N° 3.1: Planes matrices puente grúa – 2022.....	32
Tabla N° 4.1: Características de motores a utilizar en el proyecto.....	35
Tabla N° 4.2: Presupuesto de materiales motores trifásicos.....	46
Tabla N° 4.3: Presupuesto de materiales tablero de control y fuerza	47
Tabla N° 4.4: Presupuesto de materiales para sistema radio control a distancia.....	48
Tabla N° 4.5: Resumen de costos.....	48
Tabla N° 5.1: Descripción de componentes de circuito de simulación en CADe_simu....	49
Tabla N° 6.1: Descripción de conexión de entradas discretas de 24 V c.c para poder comandar el variador de frecuencia a través del radio control.....	61
Tabla N° 6.2: Placa de datos del motor trifásico.....	61
Tabla N° 6.3: Rampas de acelerar / desacelerar.....	62
Tabla N° 6.4: Selección referencia velocidad.....	62
Tabla N° 6.5: Función marcha paro.....	62
Tabla N° 6.6: Límites de protección.....	63
Tabla N° A.1: Capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados...	83
Tabla N° A.2: Intensidades de corriente admisible en amperes para conductores aislados de uso móvil, cables planos y similares.....	85

RESUMEN

El puente grúa de la nave 1 de molienda de la planta concentradora de Codelco División Salvador desempeña un papel fundamental en el proceso productivo de sulfuros de cobre, lamentablemente, el desgaste y deterioro de sus componentes han afectado la disponibilidad y confiabilidad del equipo. Ante esta problemática, surge la necesidad de realizar un proyecto integral de reemplazo de componentes del equipo con el objetivo de aumentar la disponibilidad, mejorando su rendimiento y asegurando su confiabilidad operativa, considerando que los cálculos de disponibilidad del sistema actual entregaron un valor promedio año 2022 de 85,7 % versus un valor planificado de 94,1 %.

La primera etapa del proyecto permitió evaluar el estado actual de los componentes, identificando defectos y desgastes que limitaban su funcionamiento en el sistema de control y fuerza, motor de corriente continua, banco de resistencia, sistema de comando para movimiento y sistema de barras conductoras de electrificación. Luego, se dimensionó el sistema eléctrico para los nuevos componentes, incluyendo el cálculo de protecciones, cables y dispositivos de control según normativas vigentes, destacando el cálculo de alimentador principal conductor RV – K 202,7 mm² y un multi conductor para la carga de motores de tipo H07VVH6 – F de 4 x 4 mm². Posteriormente, se realizó una simulación con el software CADe_simu que permitió analizar el funcionamiento de motor en partida directa y con la utilización de un variador de frecuencia, además, permitió simular una sobrecarga térmica como protección ante una falla a nivel industrial. Además, las pruebas de laboratorio realizadas permitieron determinar que el uso de variador de frecuencia mejora el control sobre el par de arranque para así proteger la vida útil del embobinado del motor.

El proyecto concluyó con la instalación de los nuevos componentes, asegurando su correcta integración y puesta en marcha, destacando que la planta concentradora de terminó el comisionamiento del proyecto Rajo Inca desde noviembre del 2024 y a la fecha el puente grúa no ha presentado fallas ni desviaciones.

PUENTE GRÚA - DISPONIBILIDAD - VARIADOR DE FRECUENCIA

ABSTRACT

The overhead crane of grinding bay 1 of Codelco's Salvador Division concentration plant plays a fundamental role in the copper sulfide production process. Unfortunately, the wear and deterioration of its components have affected the availability and reliability of the equipment. Given this problem, the need arises to carry out a comprehensive project to replace the equipment's components with the aim of increasing availability, improving its performance and ensuring its operational reliability, considering that the availability calculations of the current system provided an average value for 2022 of 85.7% versus a planned value of 94.1%.

The first stage of the project allowed the current state of the components to be evaluated, identifying defects and wear that limited their operation in the control and force system, direct current motor, resistance bench, movement command system and electrification busbar system. The electrical system was then dimensioned for the new components, including the calculation of protections, cables and control devices according to current regulations, highlighting the calculation of the RV – K 202.7 mm² main feeder conductor and a multi-conductor for the load of H07VVH6 – F type motors of 4 x 4 mm². Subsequently, a simulation was carried out with the CADe_simu software that allowed the analysis of the operation of the motor in direct start-up and with the use of a frequency converter, in addition, it allowed simulating a thermal overload as protection against a failure at an industrial level. In addition, the laboratory tests carried out made it possible to determine that the use of a frequency converter improves control over the starting torque in order to protect the useful life of the motor winding.

The project concluded with the installation of the new components, ensuring their correct integration and start-up, highlighting that the concentrator plant finished the commissioning of the Rajo Inca project since November 2024 and to date the overhead crane has not presented any failures or deviations.

OVERHEAD CRANE - AVAILABILITY - FREQUENCY INVERTER

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

División Codelco Salvador está ubicada en la comuna de Diego de Almagro, Provincia de Chañaral, Región de Atacama, Chile, a 2.600 m sobre el nivel del mar, a una distancia de 1.100 km de la ciudad de Santiago. Hoy en día tiene a su cargo la mina Inca, de explotación subterránea y las minas Campamento Antiguo y Damiana Norte, ambas a rajo abierto. Sus operaciones datan del año 1959, sin embargo, todas estas zonas agotarán sus recursos el año 2022, por lo que la división se refundará a partir de su proyecto Rajo Inca que extenderá la vida útil de la división en 47 años más. El proyecto estructural contempla un período de 22 meses de prestripping, periodo durante el cual se extraerá la roca sin valor comercial o estéril que cubre las reservas minerales y un ramp up de la planta concentradora de siete meses. Por lo tanto, la puesta en marcha se iniciará el segundo semestre de 2022, para alcanzar una producción de 90.000 t en el primer semestre de 2023.

Las operaciones de Codelco División Salvador también consideran un concentrador, procesos de lixiviación, la fundición y refinería en Potrerillos y el Puerto Barquito, ubicado en la ciudad de Chañaral. El puente grúa de la Nave 1 de molienda es un equipo fundamental para el proceso operativo de concentrado de Cu ya que permite el izaje de equipos y componentes, así como también, la ejecución de actividades de mantenimiento preventivo y correctivo de molinos, asegurando su óptimo funcionamiento y eficiencia operacional.

El proyecto consiste en reemplazar componentes del puente grúa de la nave 1 de molienda, lo cual permitirá aumentar la disponibilidad del equipo y entregar mayor confiabilidad al proceso. La importancia de ejecutar estas mejoras se basa en la criticidad del puente grúa, ya que, al estar fuera de servicio, resulta perjudicial por que retrasa el proceso de molienda de mineral de Cu, afectando la producción y aún más la vida útil del activo.

La figura N° 1.1 muestra una vista panorámica de la nave 1 de molienda y se enmarca en color rojo el puente grúa actual.

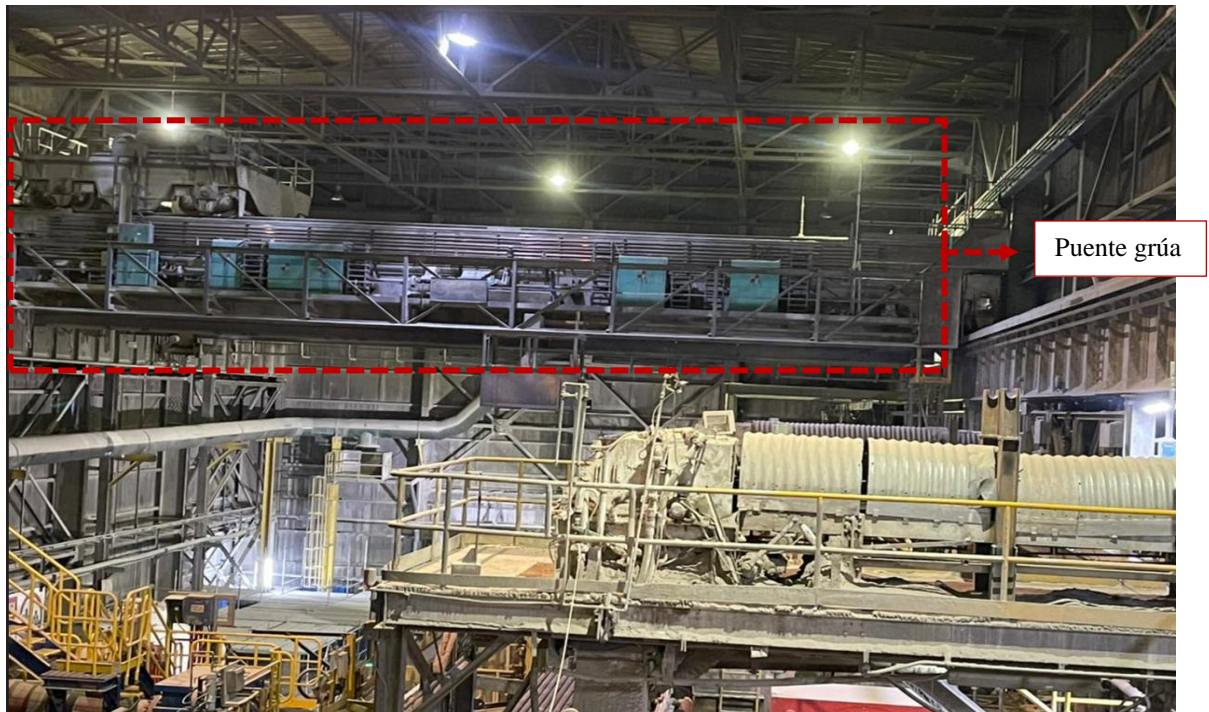


Figura N° 1.1: Vista panorámica Nave 1 Molienda - DSAL.

Fuente: Imagen propia

1.1 Objetivo General

Reemplazar componentes del puente grúa de la nave 1 de molienda, para aumentar la disponibilidad del equipo.

1.2 Objetivos Específicos

- ✚ Realizar levantamiento de estado de los componentes actuales del puente grúa instalado en nave de molienda 1.
- ✚ Determinar componentes de puente grúa que deben ser reemplazados.
- ✚ Calcular protecciones y alimentaciones del circuito de fuerza y control a adquirir.

- ✚ Implementar el reemplazo de componentes de puente grúa.

1.3 Metodología de trabajo

Las principales actividades de la metodología experimental para alcanzar los objetivos específicos son enumeradas a continuación:

1. Inspeccionar visualmente los componentes actuales de puente grúa.
2. Recolectar data de fallas del puente grúa del periodo 2022, mediante la solicitud de la información al área de confiabilidad y determinar la disponibilidad mensualizada del equipo, mediante la utilización de planilla de cálculo de Excel y fórmula de disponibilidad.
3. En base a los puntos 1 y 2 se realizará la propuesta de cambio de componentes del puente grúa.
4. Calcular protecciones y alimentaciones del circuito de fuerza y control a adquirir.
5. Realizar pruebas de simulación con software CADe_simu versión 4.0, simulando el comportamiento de circuitos eléctricos.
6. Realizar pruebas en laboratorio con componentes eléctricos – electrónicos.

1.4 Resumen de capítulos

El capítulo II se centra en el marco teórico, comenzando por la definición y características de un puente grúa, se describen los motores de inducción y tipos de arranque de un motor trifásico, se entregan antecedentes de variadores de frecuencia, se indica la fórmula para calcular la velocidad del rotor de inducción y para calcular la disponibilidad de un equipo.

El capítulo III detalla el levantamiento del estado actual de componentes de puente grúa de la nave de molienda de la planta concentradora y el resultado obtenido en el cálculo de disponibilidad para el puente grúa en el año 2022.

El capítulo IV presenta la propuesta detallada para el cambio de componentes del puente grúa en la nave de molienda de la planta concentradora de División Salvador. El objetivo es aumentar la disponibilidad y confiabilidad del equipo, asegurando una operación más eficiente y segura.

El capítulo V indica las simulaciones realizadas en software CADe_simu, software especializado en la simulación de circuitos eléctricos y sistemas de control. Este software permite modelar y analizar el funcionamiento de sistemas complejos, proporcionando herramientas para simular el comportamiento de componentes eléctricos y mecánicos bajo diferentes condiciones operativas.

El capítulo VI muestra los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio.

El capítulo VII describe el proceso de implementación del cambio de componentes del puente grúa en la nave de molienda de la planta concentradora de División Salvador.

Por último, el capítulo VIII resume todas las conclusiones obtenidas luego de haber desarrollado cada actividad propuesta en la metodología del proyecto.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Puente Grúa

Un puente grúa es un tipo de grúa que se utiliza en fábricas e industrias, para izar y desplazar cargas pesadas, permitiendo que se puedan movilizar piezas de gran porte en forma horizontal y vertical. Si el puente se encuentra rígidamente sostenido por dos o más patas que se desplazan sobre rieles fijados a nivel del piso, entonces se denomina grúa pórtico. Un puente grúa se compone de un polipasto (enrollamiento de la piola acerada), con carro, sostenido o apoyado en una o dos vigas principales dispuestas sobre dos carros o testeras. Estas testeras, a su vez, están apoyadas en vigas carrileras instaladas en la estructura del edificio. El puente es alimentado eléctricamente por medio de un tendido de cable plano del tipo festón. Se denomina alimentación primaria, cuando recorre desde el tablero eléctrico designado hasta la viga principal y alimentación secundaria desde la viga principal hasta el polipasto. La operación se realiza con una botonera colgante o un radiocontrol. El polipasto o aparejo, es el equipo que permite el izaje vertical de la carga. El carro desplaza el aparejo a lo largo de la luz del puente, es decir, recorre la totalidad de la viga principal de forma horizontal. La estructura completa del puente se traslada por el edificio por medio de los carros testeros, que cuentan con un motor eléctrico cada uno. Para definir el tipo de puente grúa a utilizar se deben tener en cuenta los siguientes factores: capacidad o carga nominal, luz o trocha, altura de izaje, tipo de ambiente y ciclos o tiempos de operación. Se pueden fabricar distintos tipos de puente grúa, dependiendo de las dimensiones del lugar y los requerimientos de cada usuario. Los principales tipos de puente grúa son:

Monorriel: El cual está constituido por una viga principal, fabricada con base en un perfil de hierro laminado. Se utiliza generalmente en naves industriales medianas y galpones. La capacidad puede llegar hasta las 10 t, y la luz hasta los 20 m. Aunque estos valores se pueden incrementar, dependerán en gran medida del momento flector que se genere sobre el puente grúa.

Con una menor luz, se puede elevar una mayor carga (puede llegar hasta 25 t), y viceversa, con una carga pequeña, la luz se puede extender (en casos especiales hasta 50 m), la figura N° 2.1 muestra un puente grúa de tipo monorriel de 32 t (Sevencrane, 2024).



Figura N° 2.1: Puente grúa monorriel de 32 t.

Fuente: (Sevencrane, 2024)

Birriel: En este caso, el puente se compone de dos vigas principales, fabricadas con perfil laminado o en viga cajón, constituida en chapa y con uniones soldadas. La configuración birriel permite cumplir con altas exigencias de trabajo, permitiendo elevar cargas muy pesadas llegando a 250 t y en grandes luces. Es una opción versátil y ágil para fábricas de amplia magnitud, ya que permite optimizar el peso de las vigas principales para minimizar la carga sobre ellas. Este diseño permite que el aparejo pueda estar suspendido, o apoyado encima de las vigas, ganando altura de izaje.

Además, se pueden incorporar características especiales, entre las que se pueden enumerar; plataforma de mantenimiento, aparejo dual con dos capacidades y velocidades, una mayor y otra menor, cabina de operación y variador de velocidad, la figura N° 2.2 muestra un puente grúa de tipo birriel de 5 a 800 t.



Figura N° 2.2: Puente grúa birriel de 5 - 800 t.

Fuente: (Aicrane, 2024)

Suspendido: En ciertas instalaciones, la baja altura no permite montar un puente sobre vigas carrileras comunes. Sin embargo, si el techo cuenta con vigas ancladas a él, se puede instalar un puente grúa suspendido, donde los carros testeros se trasladan por el ala inferior de los perfiles. Este diseño, permite ahorrar mucha altura de izaje en lugares estrechos tales como bahías de camiones y módulos de talleres.

2.2 Motores de inducción

El motor de inducción es el tipo más popular de los motores de corriente alterna debido a su simplicidad y facilidad de operación, no tiene un circuito de campo separado; en cambio, depende de la acción transformadora para inducir voltajes y corrientes en su circuito de campo, un motor de inducción es básicamente un transformador giratorio.

Su circuito equivalente es similar al de un transformador, excepto en los efectos de variación de velocidad. Por lo regular, un motor de inducción opera cerca de la velocidad síncrona. El voltaje inducido en el rotor por el movimiento relativo entre el campo magnético del estator y el rotor produce una corriente en el rotor que interactúa con el campo magnético del estator para producir el par inducido en el motor.

En un motor de inducción, el deslizamiento o velocidad a la que se presenta el par máximo se puede controlar variando la resistencia del rotor. El valor del par máximo es independiente de la resistencia del rotor. Una alta resistencia del rotor disminuye la velocidad a la que se presenta el par máximo y por lo tanto incrementa el par de arranque del motor. Sin embargo, paga un precio por este par de arranque al tener una regulación de velocidad muy pobre en su intervalo normal de operación.

Una baja resistencia del rotor reduce el par de arranque del motor a la vez que mejora la regulación de velocidad. Cualquier diseño de un motor de inducción debe estar en un punto medio entre estos dos requerimientos en conflicto. Una manera de lograr este punto medio es a través de la utilización de rotores de barra profunda o de doble jaula. Estos rotores tienen una alta resistencia efectiva en el arranque y una baja resistencia efectiva en condiciones normales de operación, por lo que ofrecen tanto un alto par de arranque como una buena regulación de velocidad en el mismo motor. Este mismo efecto se puede lograr por medio de un rotor devanado en un motor de inducción si varía la resistencia de campo del rotor (Chapman, 2012).

La figura N° 2.3 indica las principales partes del motor eléctrico de inducción.

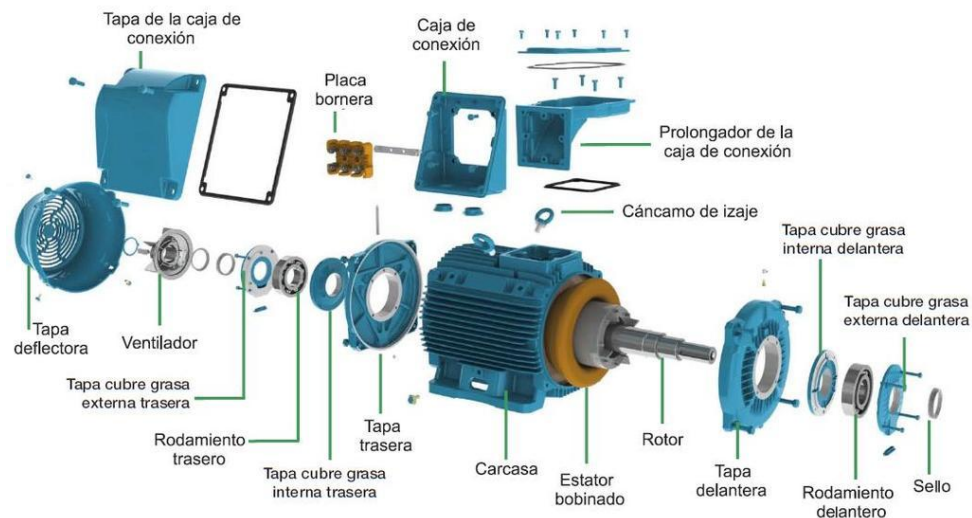


Figura N° 2.3: Partes de un motor eléctrico de inducción.

Fuente: (Suarez, 2017)

El motor asíncrono trifásico está formado por un rotor, que puede ser de dos tipos: a) de jaula de ardilla, b) rotor bobinado y un estator, en el que se encuentran las bobinas inductoras. Estas bobinas son trifásicas y están desfasadas entre sí 120°. Según el Teorema de Ferraris, cuando por estas bobinas circula un sistema de corrientes trifásicas, se induce un campo magnético giratorio que envuelve al rotor. Este campo magnético variable va a inducir una tensión en el rotor según la Ley de inducción de Faraday (Suarez, 2017).

2.3 Fórmulas para determinar intensidad de corriente y seccionamiento de conductor para un motor trifásico

Teniendo en cuenta que los cálculos serán en base a una línea trifásica, se empleará la ecuación N° 2.1 para determinar la intensidad del circuito:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot n \cdot \cos(\varphi)} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.1})$$

Donde:

- ✚ I: Es intensidad del circuito
- ✚ P: Potencia
- ✚ V: Voltaje
- ✚ N: es el rendimiento
- ✚ $\cos(\varphi)$: Factor de potencia

Además, se utilizará la ecuación N° 2.2 para determinar la sección del conductor.

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot I_d \cdot \rho \cdot L \cdot \cos(\varphi) \cdot f_d}{\Delta E} \text{ mm}^2 \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.2})$$

Donde:

- ✚ S: Sección del conductor mm^2
- ✚ I_d : Intensidad de dimensionamiento (I nominal x 1,25)
- ✚ ρ : Resistividad del cobre 0.018
- ✚ L: Largo del conductor en metros

- ✚ $\cos(\varphi)$: Factor de potencia
- ✚ f_d : factor de dimensionamiento 1,1 - motor de régimen no permanente - variable
- ✚ ΔE : Caída de tensión 3 % de 380 V (11,4 V)

2.4 Tipos de arranque de un motor trifásico

Existen 7 tipos de arranque de motor trifásico;

- ✚ Arranque directo.
- ✚ Arranque estrella - triángulo.
- ✚ Arranque de motores de devanados partidos.
- ✚ Arranque estatórico por resistencias.
- ✚ Arranque por autotransformador.
- ✚ Arranque rotórico por resistencias de los motores de anillos.
- ✚ Arranque electrónico.

2.4.1 Arranque directo

Se trata del modo de arranque más sencillo en el que el estator se acopla directamente a la red, el motor se basa en sus características naturales para arrancar. En el momento de la puesta bajo tensión, el motor actúa como un transformador cuyo secundario, formado por la jaula muy poco resistente del rotor, está en cortocircuito. La corriente inducida en el rotor es importante. La corriente primaria y la secundaria son prácticamente proporcionales. A pesar de las ventajas que conlleva (sencillez del equipo, elevado par de arranque, arranque rápido, bajo coste), sólo es posible utilizar el arranque directo en los siguientes casos: cuando la potencia del motor es débil con respecto a la de la red, para limitar las perturbaciones que provoca la corriente solicitada, la máquina accionada no requiere un aumento progresivo de velocidad y dispone de un dispositivo mecánico (por ejemplo, un reductor), que impide el arranque brusco, el par de arranque debe ser elevado (Riega, 2020).

2.4.2 Arranque estrella - triángulo

Sólo es posible utilizar este modo de arranque en motores en los que las dos extremidades de cada uno de los tres devanados estatóricos vuelvan a la placa de bornes.

El bobinado debe realizarse de manera que el acoplamiento en triángulo corresponda con la tensión de la red: por ejemplo, en el caso de una red trifásica de 380 V, es preciso utilizar un motor bobinado a 380 V en triángulo y 660 V en estrella. El principio consiste en arrancar el motor acoplando los devanados en estrella a la tensión de la red, lo que equivale a dividir la tensión nominal del motor en estrella por 3. La punta de corriente durante el arranque se divide por 3: $I_{\text{arranque}} = 1,5 \text{ a } 2,6 I_{\text{nominal}}$. Un motor de 380 V/660 V acoplado en estrella a su tensión nominal de 660 V absorbe una corriente 3 veces menor que si se acopla en triángulo a 380 V. Dado que el acoplamiento en estrella se realiza a 380 V, la corriente se divide nuevamente por 3. Por lo tanto, se divide por un total de 3. El par de arranque se divide igualmente por 3, ya que es proporcional al cuadrado de la tensión de alimentación: $P_{\text{arranque}} = 0,2 \text{ a } 0,5 P_{\text{nominal}}$. La velocidad del motor se estabiliza cuando se equilibran el par del motor y el par resistente, normalmente entre el 75 y 85 % de la velocidad nominal. En ese momento, los devanados se acoplan en triángulo y el motor rinde según sus características naturales.

2.4.3 Arranque de motores de devanados partidos “part – winding”

Este tipo de motor está dotado de un devanado estatórico en dos devanados paralelos con seis o doce bornes de salida. Equivale a dos “medios motores” de igual potencia. Durante el arranque, un solo “medio motor” se acopla en directo a plena tensión a la red, lo que divide aproximadamente por dos tanto la corriente de arranque como el par. No obstante, el par es superior al que proporcionaría el arranque estrella-triángulo de un motor de jaula de igual potencia. Al finalizar el arranque, el segundo devanado se acopla a la red. En ese momento, la punta de corriente es débil y de corta duración, ya que el motor no se ha separado de la red de alimentación y su deslizamiento ha pasado a ser débil.

2.4.4 Arranque estatórico por resistencias

El principio consiste en arrancar el motor bajo tensión reducida mediante la inserción de resistencias en serie con los devanados. Una vez estabilizada la velocidad, las resistencias se eliminan y el motor se acopla directamente a la red. Normalmente, se utiliza un temporizador para controlar la operación. Durante este tipo de arranque, el acoplamiento de los devanados del motor no se modifica. Por lo tanto, no es necesario que las dos extremidades de cada devanado sobresalgan de la placa de bornes. El valor de la resistencia se calcula en base a la punta de corriente que no se debe superar durante el arranque, o al valor mínimo del par de arranque necesario teniendo en cuenta el par resistente de la máquina accionada. Generalmente, los valores de corriente y de par de arranque son: $I_{\text{arranque}} = 4,5 I_{\text{nominal}}$, $P_{\text{arranque}} = 0,75 P_{\text{nominal}}$. Durante la fase de aceleración con las resistencias, la tensión que se aplica a los bornes del motor no es constante. Equivale a la tensión de la red menos la caída de tensión que tiene lugar en la resistencia de arranque. La caída de tensión es proporcional a la corriente absorbida por el motor.

Dado que la corriente disminuye a medida que se acelera el motor, sucede lo mismo con la caída de tensión de la resistencia. Por lo tanto, la tensión que se aplica a los bornes del motor es mínima en el momento del arranque y aumenta progresivamente. Dado que el par es proporcional al cuadrado de la tensión de los bornes del motor, aumenta más rápidamente que en el caso del arranque estrella-triángulo, en el que la tensión permanece invariable mientras dura el acoplamiento en estrella. Este tipo de arranque es, por lo tanto, apropiado para las máquinas cuyo par resistente crece con la velocidad, por ejemplo, los ventiladores.

Su inconveniente consiste en que la punta de corriente es relativamente importante durante el arranque. Sería posible reducirla mediante el aumento del valor de la resistencia, pero esta medida conllevaría una caída de tensión adicional en las bornas del motor y, por lo tanto, una considerable reducción del par de arranque.

2.4.5 Arranque por autotransformador

El motor se alimenta a tensión reducida mediante un autotransformador que, una vez finalizado el arranque, queda fuera del circuito. El arranque se lleva a cabo en tres tiempos: en el primer tiempo, el autotransformador comienza por acoplarse en estrella y, a continuación, el motor se acopla a la red a través de una parte de los devanados del autotransformador. El arranque se lleva a cabo a una tensión reducida que se calcula en función de la relación de transformación. Generalmente, el transformador está dotado de tomas que permiten seleccionar la relación de transformación y, por tanto, el valor más adecuado de la tensión reducida, antes de pasar al acoplamiento a plena tensión, la estrella se abre. En ese momento, la fracción de bobinado conectada a la red crea una inductancia en serie con el motor. Esta operación se realiza cuando se alcanza la velocidad de equilibrio, al final del primer tiempo, el acoplamiento a plena tensión interviene a partir del segundo tiempo, normalmente muy corto (una fracción de segundo). Las inductancias en serie con el motor se cortocircuitan y, a continuación, el autotransformador queda fuera del circuito.

2.4.6 Arranque electrónico

La alimentación del motor durante la puesta en tensión se realiza mediante una subida progresiva de la tensión, lo que posibilita un arranque sin sacudidas y reduce la punta de corriente. Para obtener este resultado, se utiliza un graduador de tiristores montados en oposición de 2 por 2 en cada fase de la red.

La subida progresiva de la tensión de salida puede controlarse por medio de la rampa de aceleración, que depende del valor de la corriente de limitación, o vincularse a ambos parámetros. Un arrancador ralentizador progresivo como el Altistart 3 es un graduador de 6 tiristores que se utiliza para arrancar y parar de manera controlada los motores trifásicos de jaula. Garantiza: el control de las características de funcionamiento, principalmente durante los períodos de arranque y parada, la protección térmica del motor y del arrancador, la protección mecánica de la máquina accionada, mediante la supresión de las sacudidas de par y la reducción de la corriente solicitada. La corriente puede regularse de

2 a 5 I nominal, lo que proporciona un par de arranque regulable entre 0,1 y 0,7 del par de arranque en directo. Permite arrancar todo tipo de motores asíncronos. Puede cortocircuitarse para arrancar por medio de un contactor y mantener al mismo tiempo el dominio del circuito de control. A todo ello hay que añadir la posibilidad de: deceleración progresiva, parada frenada.

2.4.7 Arranque rotórico por resistencias de los motores de anillos

Un motor de anillos no puede arrancar en directo sin provocar puntas de corriente inadmisibles. Es necesario insertar en el circuito rotórico resistencias que se cortocircuiten progresivamente, al tiempo que se alimenta el estator a toda la tensión de red. El cálculo de la resistencia insertada en cada fase permite determinar con rigor la curva de par-velocidad resultante: para un par dado, la velocidad es menor cuanto mayor sea la resistencia. Como resultado, la resistencia debe insertarse por completo en el momento del arranque y la plena velocidad se alcanza cuando la resistencia está completamente cortocircuitada.

La corriente absorbida es prácticamente proporcional al par que se suministra. Como máximo, es ligeramente superior a este valor teórico. Por ejemplo, la punta de corriente correspondiente a un par de arranque de 2 P nominal es aproximadamente de 2 I nominal. Por tanto, la punta es considerablemente más débil, y el par máximo de arranque más elevado, que, en el caso de un motor de jaula, en el que el valor normal se sitúa en torno a 6 I nominal para 1,5 P nominal.

El motor de anillos con arranque rotórico se impone, por tanto, en todos los casos en los que las puntas de corriente deben ser débiles y cuando las máquinas deben arrancar a plena carga. Por lo demás, este tipo de arranque es sumamente flexible, ya que resulta fácil adaptar el número y el aspecto de las curvas que representan los tiempos sucesivos a los requisitos mecánicos o eléctricos.

2.5 Variadores de frecuencia

Se trata de dispositivos electrónicos, que permiten el control completo de motores eléctricos de inducción de corriente alterna, los motores más utilizados son los de motor trifásico de inducción y rotor sin bobinar (jaula de ardilla). Tienen como misión variar la frecuencia de la corriente de alimentación. Se realizan basándose en tiristores que forman contactores estáticos. Se configura con un convertidor alterna/continua y un convertidor continuo/alterna de velocidad variable entre 0 Hz y la frecuencia de red. El variador de frecuencia permite la variación de velocidad total desde 0 rpm a la velocidad nominal del motor a par constante. Su rendimiento es alto, y permite un factor de potencia aproximadamente de uno. Permite la ausencia de sobreintensidades por transitorios. Hace innecesarios elementos de protección del motor (Palau, 2024).

Todos los variadores de frecuencia modernos cuentan con las siguientes partes principales:

Circuito Rectificador: recibe la tensión alterna y la convierte en continua por medio de un puente rectificador de diodos o tiristores. Partiendo de la red de suministro de C.A., monofásica o trifásica, se obtiene c.c. mediante diodos rectificadores.

La función del rectificador es convertir la señal de voltaje de alimentación de CA a CD y controlar el voltaje que llega al inversor. Los más usados son, diodos, DC Chopper y tiristores.

Circuito intermedio: consiste en un circuito LC cuya función principal es suavizar el rizado de la tensión rectificada y reducir la emisión de armónicos hacia la red, condensadores de gran capacidad, almacenan y filtran la c.c. rectificada, para obtener un valor de tensión continua estable y reserva de energía suficiente para proporcionar la intensidad requerida por el motor.

Inversor: convierte el voltaje continuo del circuito intermedio en uno de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos. Los variadores modernos emplean IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor), para generar los pulsos de voltaje de manera

controlada, desde la tensión del bus de continua, un ondulator convierte esta energía en una salida trifásica, con valores de tensión, intensidad y frecuencia de salida variables. Como elementos de conmutación, se usan principalmente transistores bipolares (BJT), CMOS o similares. Las señales de salida, se obtiene por diversos procedimientos como troceado, mediante ciclo convertidores, o señales de aproximación senoidal mediante modulación por anchura de impulsos PWM. Transforma la tensión continua que recibe del bus de continua en otra tensión y frecuencia variables usando pulsos. A continuación, se describen los dos inversores más usados.

Inversor de seis pasos: para variar la frecuencia de la señal de alimentación al motor se ajusta el tiempo de conducción de los SCR's para cada uno de los seis pasos, modificando el tiempo de ciclo.

Inversor PWM: el inversor consiste en seis IGBT's que se encienden y apagan en una secuencia tal, que producen un voltaje en forma de pulsos cuadrados que alimentan al motor.

Para variar la frecuencia del motor, el número de pulsos y su ancho se ajustan resultando en un tiempo de ciclo mayor para bajar la velocidad o tiempo de ciclo menor para subir la velocidad. Para cada frecuencia específica hay un número óptimo de pulsos y anchos que producen la menor distorsión armónica en la corriente que se aproxime a la señal senoidal. Además, existe una etapa de control que es la encargada de activar o desactivar los IGBT's para crear la señal de salida deseada. También tiene funciones de vigilancia de un correcto funcionamiento y monitorización de tensiones, corriente.

La frecuencia portadora de los IGBT se encuentra entre 2 a 16 kHz. Una portadora con alta frecuencia reduce el ruido acústico del motor, pero disminuye el rendimiento. Por otra parte, los IGBT's generan mayor calor. Las señales de control para arranque, parada y variación de velocidad están aisladas galvánicamente para evitar daños en sensores o controles y evitar ruidos en la etapa de control.

Circuito de control. El circuito de control enciende y apaga los IGBT para generar los pulsos de tensión y frecuencia variables. Además, realiza las funciones de supervisión de funcionamiento monitoreando la corriente, voltaje, temperatura, etc. con teclados e interfaces amigables de fácil empleo.

La tabla N° 2.1 enumera las ventajas de utilizar un variador de frecuencia frente al resto de arranques y la tabla N° 2.2 enumera las desventajas de utilizar este tipo de componente electrónico frente al resto de arranques previamente descritos en el capítulo.

Tabla N° 2.1: Ventajas de uso de variador de frecuencia frente al resto de arranques.

N°	VENTAJAS
1	Evita picos o puntas de intensidad en los arranques del motor. (Muy pronunciados en el arranque directo, en estrella-triángulo y medios con arrancadores progresivos). El par se controla totalmente a cualquier velocidad, lo que evita saltos o bloqueos del motor ante la carga. (En un arrancador progresivo la regulación del par es difícil, ya que se basa en valores de tensión inicial).
2	No tiene factor de potencia ($\cos \varphi = 1$), lo que evita el uso de baterías de condensadores y el consumo de energía reactiva (ahorro económico).
3	Comunicación mediante bus industrial, lo que permite conocer en tiempo real el estado del variador y el motor, así como el historial de fallos (facilita el mantenimiento).
4	Los arranques y paradas son controlados, y suaves, sin movimientos bruscos
5	Protege completamente el motor, el variador y la línea.
6	El consumo energético se adapta a la exigencia del motor (ahorro de energía).
7	Mediante contactores externos de bypass (puente) se puede utilizar un solo variador para el control secuencial de varios motores, tanto en arranque como en parada.

Fuente: (Studocu, 2024)

Tabla N° 2.2: Desventajas de uso de variador de frecuencia frente al resto de arranques.

N°	DESVENTAJAS
1	La instalación, programación y mantenimiento, debe ser realizada por personal calificado, ruidos e interferencias en la red eléctrica, que podrían afectar a otros elementos electrónicos cercanos.
2	Para aplicaciones sencillas puede suponer mayor inversión, que un sistema simple (contactor-guardamotor), si bien a la larga se amortiza el gasto suplementario, por el ahorro energético y de potencia reactiva que aporta el variador.
3	Las averías del variador, no se pueden reparar in situ (hay que enviarlos a la casa o servicio técnico). Mientras tanto debe disponerse de otro variador equivalente, o dejar la instalación sin funcionamiento.

Fuente: (Studocu, 2024)

La velocidad del rotor de inducción, en revoluciones por minuto (r.p.m.), viene expresada por la ecuación N° 2.3, de donde se deduce que variando el deslizamiento (S), la frecuencia f_1 o el número de pares de polos (p), se consigue variar la velocidad del motor.

$$n = 60 \frac{f_1}{p} (1 - S) \quad (\text{Ec. N° 2.3})$$

Los métodos de regulación de velocidad de los motores asíncronos pueden ser agrupados en, regulación por variación del número de polos, regulación por variación de las magnitudes del estator y regulación por variación de las magnitudes del rotor.

2.6 Disponibilidad de un equipo

La disponibilidad de una máquina es una métrica que evalúa el rendimiento de los elementos que realizan una función determinada, en un momento determinado, durante un período determinado, en función de los criterios de confiabilidad, mantenibilidad y

soporte para el mantenimiento de los equipos. La misión de calcular la disponibilidad de los equipos industriales es esencial para elegir y seguir las estrategias de mantenimiento adecuadas para cada equipo. Es el porcentaje del tiempo que el equipo estuvo funcionando, comparado con el tiempo total disponible para su uso. La ecuación N° 2.4 muestra el cálculo para obtener la disponibilidad de un equipo en base a 24 h (Alberti, 2020).

$$\% \text{ Disponibilidad equipo} = \frac{24 - h \text{ fallas}}{24} * 100 \quad (\text{Ec. N}^\circ 2.4)$$

El MTBF (Mean Time Between Failures), que significa tiempo medio entre fallas, y el MTTR (Mean Time To Repair), es decir, el tiempo medio para reparar. Estos datos sirven para medir la confiabilidad de los equipos. Ambos índices se utilizan como punto de referencia para la toma de decisiones en las empresas. El MTTR se refiere al tiempo promedio transcurrido entre una falla y la siguiente.

Estas fallas deben estar relacionadas con factores de mantenimiento directo. Los factores externos que afectan la producción, no se consideran defectos en este cálculo. El objetivo siempre es aumentar el MTBF y disminuir el MTTR, la ecuación N° 2.5 muestra el cálculo del indicador MTBF y la ecuación N° 2.6 el cálculo del indicador MTTR.

$$\text{MTBF} = \frac{\text{Tiempo total de operación}}{\text{Número de fallas}} \quad (\text{Ec. N}^\circ 2.5)$$

Donde:

✚ **Tiempo Total de Operación:** Es la suma del tiempo durante el cual el sistema o componente estuvo operando correctamente antes de fallar.

✚ **Número de Fallas:** Es el número total de fallas ocurridas durante el período de observación.

$$\text{MTTR} = \frac{\text{Tiempo total de reparación}}{\text{Número de reparaciones}} \quad (\text{Ec. N}^\circ 2.6)$$

Donde:

- ✚ **Tiempo Total de Reparación:** Es la suma de todo el tiempo dedicado a las reparaciones durante un período específico.
- ✚ **Número de Reparaciones:** Es el número total de reparaciones realizadas en ese mismo período.

2.7 Software CADe_simu

CADe_simu es un programa CAD electrotécnico que permite insertar símbolos organizados en librerías y trazar un esquema eléctrico de una forma fácil y rápida, para posteriormente realizar la simulación. Es un programa con el que se puede simular casi cualquier circuito común contactores, permitiendo ver si se cometen errores, las fallas que se producen y ver cómo solucionarlas. El programa en modo simulación visualiza el estado de cada componente eléctrico cuando está activado al igual que resalta los conductores eléctricos sometidos al paso de una corriente eléctrica. Dentro de las simulaciones que se pueden realizar en el simulador destacan:

- ✚ Alimentaciones tanto de corriente alterna como de corriente continua.
- ✚ Fusibles y seleccionadores.
- ✚ Interruptores automáticos, interruptores diferenciales, relé térmico y disyuntores.
- ✚ Contactores e interruptores de potencia, motores eléctricos.
- ✚ Variadores de velocidad para motores de corriente alterna y corriente continua.
- ✚ Contactos con accionamiento, pulsadores, interruptores, finales de carrera y contactos de relés térmicos.
- ✚ Bobinas, temporizadores, señalizaciones ópticas y acústicas.
- ✚ Detectores de proximidad y barreras fotoeléctricas.
- ✚ Instrumento de medición, amperímetro fluke 375.

CAPÍTULO III

COMPONENTES DEL PUENTE GRÚA

3.1 Levantamiento de componentes del puente grúa

De acuerdo con lo indicado en la metodología experimental se realizó un levantamiento visual del estado de los principales componentes del puente grúa instalado en la nave de molienda de la planta concentradora de División Salvador, cabe destacar que el activo fue construido en el año 1956. Los componentes del puente grúa que fueron incluidos en el levantamiento son:

- ✚ Sistema de control y fuerza.
- ✚ Motor de corriente continua.
- ✚ Banco de resistencia.
- ✚ Sistema de comando para movimiento.
- ✚ Sistema de Barras conductoras de electrificación (Tipo pantógrafo).
- ✚ Eje de transmisión.

La figura N° 3.1 muestra el sistema de control y fuerza del puente grúa, los contactores, bobinas e interruptores son componentes comunes en sistemas de control eléctrico y son fundamentales para la operación controlada y segura de motores eléctricos. En este caso, los contactores se utilizan para controlar la conexión y desconexión de la corriente eléctrica al motor. Las bobinas pueden ser parte de los contactores y se utilizan para activar los contactores y permitir que la corriente fluya hacia el motor. Por otro lado, los interruptores pueden ser utilizados para activar o desactivar ciertas funciones del sistema de control. Al energizar un grupo de resistencias, se puede variar la velocidad del motor de corriente continua mediante la regulación de la cantidad de corriente que fluye a través del motor. Esto permite controlar la velocidad y el movimiento del puente grúa de manera precisa y segura.

Es importante tener en cuenta que el diseño y la implementación de sistemas de control eléctrico deben realizarse siguiendo las normas y prácticas de seguridad eléctrica aplicables para garantizar un funcionamiento confiable y seguro del equipo.

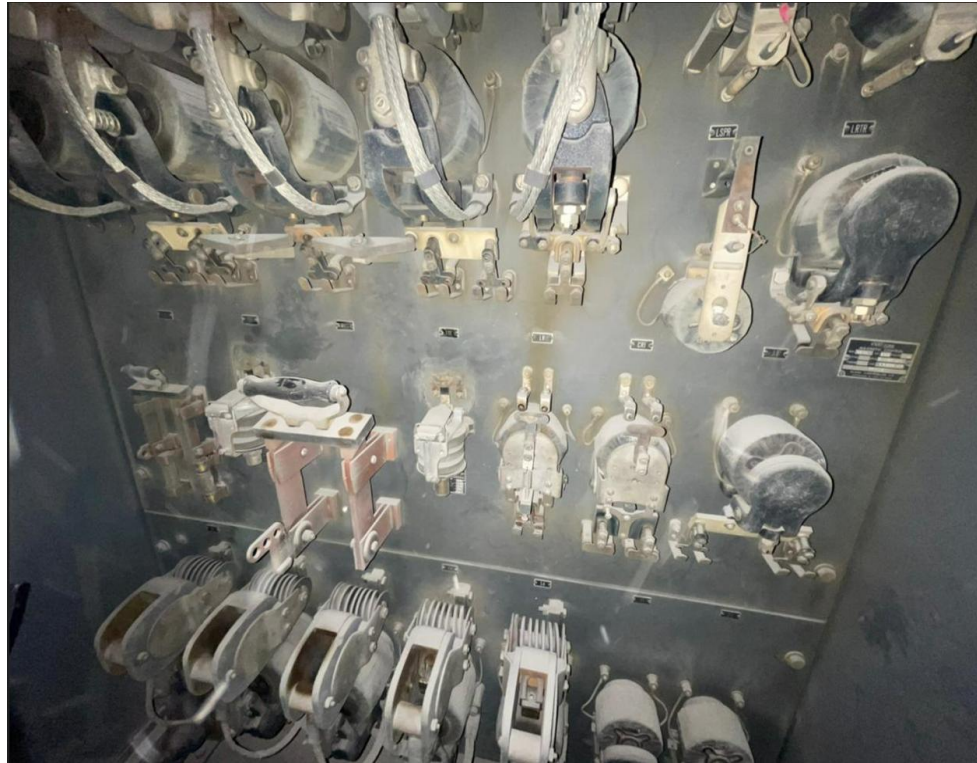


Figura N° 3.1: Sistema de control y fuerza de puente grúa.

Fuente: Imagen propia

La figura N° 3.2 muestra el motor de corriente continua, este motor cuenta con un voltaje de trabajo de 220 VDC que se utiliza para proporcionar la fuerza necesaria para el movimiento del eje de traslación del puente grúa. Un motor de corriente continua prácticamente funciona con un voltaje específico de corriente continua, en este caso, 220 VDC. Este voltaje de trabajo permite que el motor genere la fuerza electromotriz necesaria para impulsar el movimiento del eje de traslación del puente grúa en ambas direcciones. hacia adelante y hacia atrás.

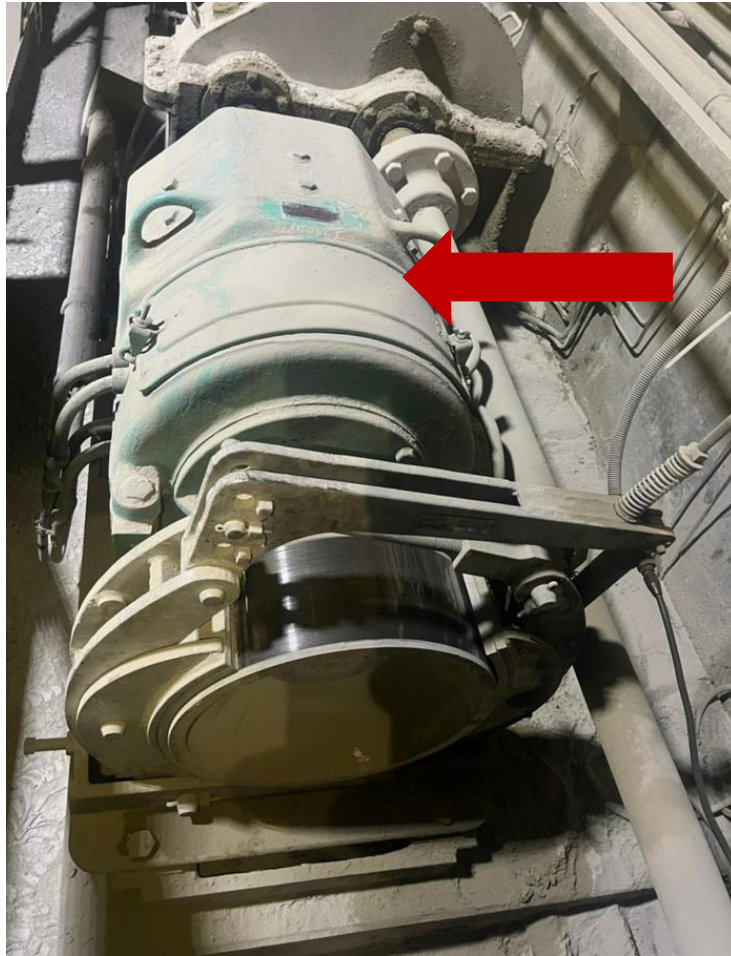


Figura N° 3.2: Motor de corriente continua.

Fuente: Imagen propia

La figura N° 3.3 muestra el banco de resistencia que se utiliza para controlar la velocidad de un motor. Este banco de resistencias está compuesto por 5 grupos de varias resistencias conectadas en serie. Al acoplar o desacoplar estas resistencias en serie con el circuito del motor, se puede variar la velocidad del motor. El principio detrás de este sistema es que, al aumentar la resistencia en el circuito del motor, se reduce la corriente que fluye a través de él, lo que a su vez disminuye su velocidad. Por otro lado, al disminuir la resistencia, se permite que fluya más corriente, lo que aumenta la velocidad del motor. Este tipo de control de velocidad se utiliza a menudo en aplicaciones donde se necesita una regulación fina de la velocidad del motor, como en equipos industriales o maquinaria.

El cambio en la velocidad del motor se logra mediante la manipulación de las resistencias en el circuito, generalmente mediante interruptores u otros dispositivos de control.

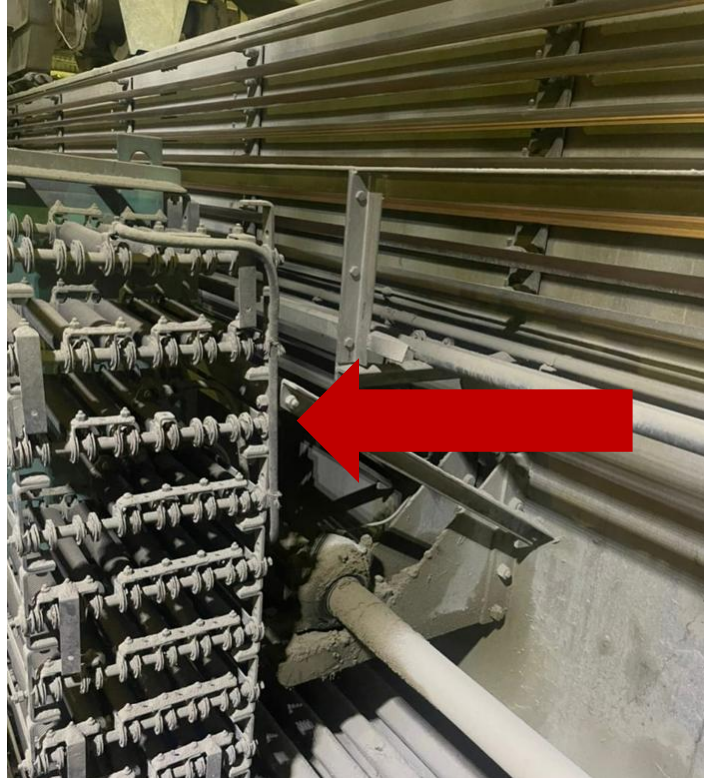


Figura N° 3.3: Banco de resistencia.

Fuente: Imagen propia

La figura N° 3.4 muestra el sistema de comando para movimiento de puente grúa, este sistema cumple la función de accionar los contactores y bobinas del tablero de control para agregar o disminuir cargas de resistencia y poder modular la velocidad del motor. Al activar los contactores y bobinas en el tablero de control, se pueden agregar o quitar resistencias en el circuito del motor del puente grúa, lo que afecta su velocidad.

Este tipo de sistema de control es esencial en aplicaciones de movimiento de grúas, donde es necesario tener un control preciso sobre la velocidad y la carga que se mueve. Al modular la velocidad del motor mediante el ajuste de la resistencia en el circuito, se

puede lograr un movimiento suave y controlado de la grúa, adaptado a las necesidades específicas de carga y operación.



Figura N° 3.4: Sistema de comando para movimiento de puente grúa.

Fuente: Elaboración propia

La figura N° 3.5 muestra el sistema de barras conductoras de electrificación (Tipo pantógrafo), este es el alimentador principal que transporta la energía desde la sala eléctrica hacia el gabinete de control del puente grúa. Este sistema de corriente continua es crucial para la operación del puente grúa, ya que proporciona la energía necesaria para levantar y mover cargas de manera segura y eficiente.

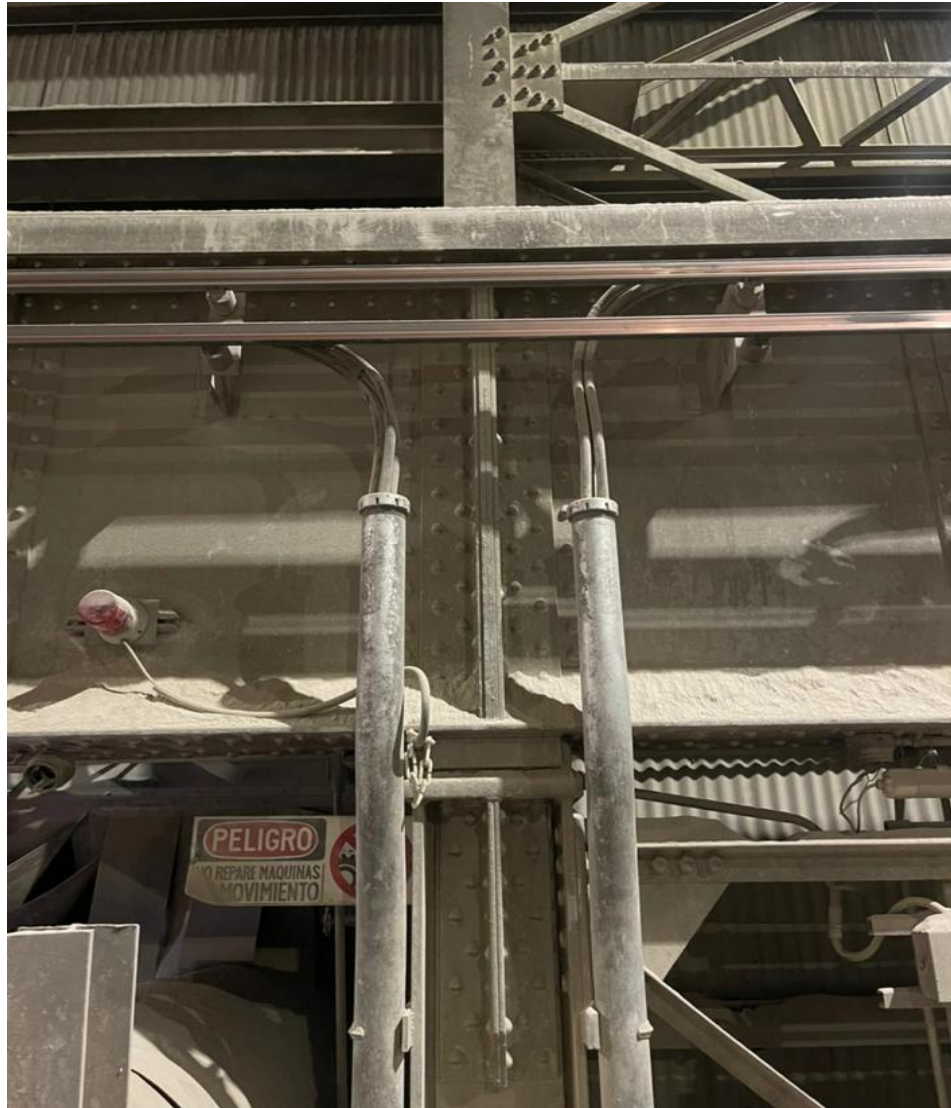


Figura N° 3.5: Sistema de barras conductoras de electrificación (Tipo pantógrafo).

Fuente: Imagen propia

La figura N° 3.6 muestra el eje de transmisión del puente grúa, su principal funcionamiento es realizar el movimiento al puente grúa hacia adelante y atrás mediante el acoplamiento de su motor eléctrico. El eje de transmisión es parte integral del sistema de transmisión del puente grúa. Conecta el motor eléctrico al mecanismo de desplazamiento del puente grúa, permitiendo que la potencia generada por el motor se transfiera al mecanismo de movimiento. Esto permite que el puente grúa se mueva a lo largo de sus carriles en la dirección deseada.

El motor eléctrico, generalmente un motor de corriente alterna o corriente continua, impulsa el eje de transmisión. Dependiendo del diseño específico del puente grúa, el movimiento hacia adelante y hacia atrás puede lograrse mediante la inversión de la dirección del motor o mediante la activación de sistemas de frenado y control de velocidad. En resumen, el eje de transmisión es un componente esencial para la operación del puente grúa, ya que transfiere la potencia del motor al mecanismo de desplazamiento, permitiendo así el movimiento del puente grúa en el lugar de trabajo.

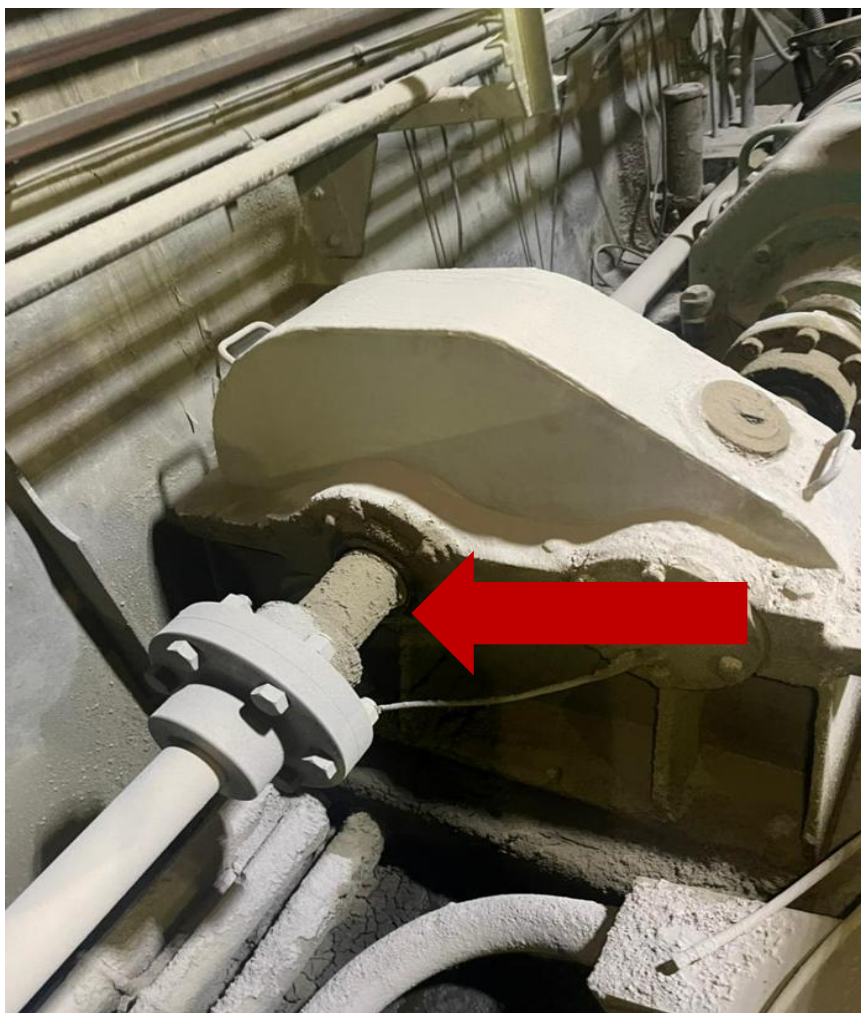


Figura N° 3.6: Eje de transmisión de puente grúa.

Fuente: Imagen propia

Del levantamiento visual realizado a los componentes del puente grúa se han revelado varios problemas y áreas que requieren mejoras significativas, destacando las indicadas a continuación:

- ✚ **Sistema de control y fuerza:** se ha observado falta de hermeticidad y una acumulación elevada de material particulado. Estos problemas pueden afectar el rendimiento y la seguridad del puente grúa.
- ✚ **Motor de corriente continua:** se ha señalado la necesidad de mejorar la mantenibilidad del motor, especialmente, en los anillos y porta carbones del rotor. Esto es crucial para garantizar un funcionamiento óptimo y prolongar la vida útil del componente.
- ✚ **Banco de resistencia:** se han identificado componentes obsoletos en el mercado, junto con problemas de hermeticidad y acumulación de material particulado. Estas deficiencias pueden afectar la capacidad del banco de resistencia para realizar pruebas efectivas y seguras.
- ✚ **Sistema de comando para movimiento:** originalmente el puente grúa estaba diseñado para operar con 5 velocidades, actualmente solo funcionan 2 debido al deterioro de las resistencias y su obsolescencia. Esta limitación impide realizar cambios y reparaciones necesarias en el sistema, lo que afecta la eficiencia operativa del puente grúa.
- ✚ **Sistema de barras conductoras de electrificación (Tipo pantógrafo):** se han identificado problemas de obsolescencia en los repuestos disponibles para este sistema. Esto puede dificultar la realización de mantenimiento y reparaciones necesarias para garantizar un funcionamiento continuo y seguro del puente grúa.

En resumen, es necesario abordar estos problemas de manera prioritaria para mejorar la eficiencia operativa y la seguridad del puente grúa. Esto puede implicar la actualización de componentes obsoletos, la implementación de medidas de mantenimiento preventivo y la búsqueda de soluciones alternativas para los repuestos difíciles de encontrar.

3.2 Disponibilidad puente grúa

El puente grúa de la nave 1 de molienda, presenta constantes fallas debido al fin de su vida útil y a la obsolescencia de algunos de sus componentes y repuestos, los cuales prácticamente no se encuentran disponibles en el mercado. Con el apoyo del área de confiabilidad de División Salvador se logró recopilar toda la data de fallas e imprevistos del año 2022 para el activo, lo que permitió calcular el indicador de disponibilidad mensualizado tal como lo muestra la figura N° 3.7.

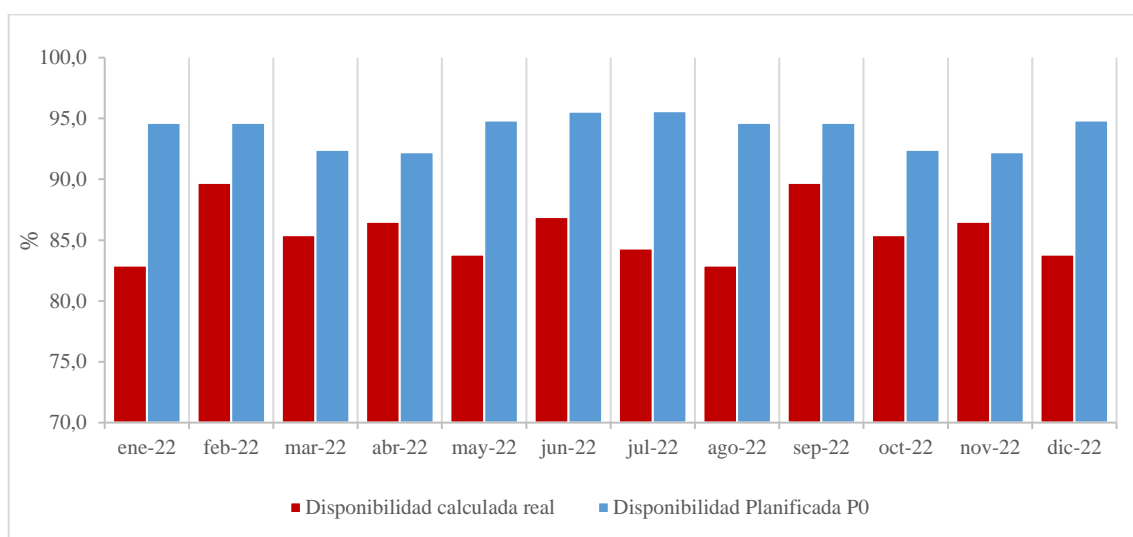


Figura N° 3.7: Disponibilidad Puente Grúa Nave 1 Molienda – 2022.

Fuente: Elaboración propia

La figura N° 3.7 muestra claramente la baja disponibilidad del equipo a lo largo del año 2022. No se logró cumplir el indicador de mantenimiento comprometido en ningún mes del año, lo que indica problemas significativos en la gestión y ejecución del mantenimiento del equipo.

El valor promedio anual de disponibilidad alcanzado fue del 85,7 %, lo cual está considerablemente por debajo de la meta planificada del 94,1 %.

Esta brecha entre el rendimiento real y la meta establecida indica que se deben identificar y abordar las causas subyacentes de la baja disponibilidad.

Para mejorar esta situación, podría ser necesario revisar y ajustar los procesos de mantenimiento, aumentar la frecuencia o calidad de las intervenciones de mantenimiento preventivo, mejorar la capacitación del personal de mantenimiento, asegurar una gestión más efectiva de los repuestos y componentes, y utilizar herramientas de monitoreo y diagnóstico avanzadas para detectar y prevenir fallos de manera proactiva. Es esencial analizar detalladamente las causas de la baja disponibilidad y tomar medidas correctivas adecuadas para garantizar que el equipo funcione de manera óptima y cumpla con las expectativas de rendimiento.

3.2 Fallas puente grúa

La figura N° 3.8 muestra la distribución de horas de fallas mensualizadas imputadas a causas mecánicas y eléctricas, de la gráfica se obtiene que el 70 % de cada mes las fallas son por problemas eléctricos, lo que equivale a 883 h de fallas e imprevistos eléctricos en el año 2022.

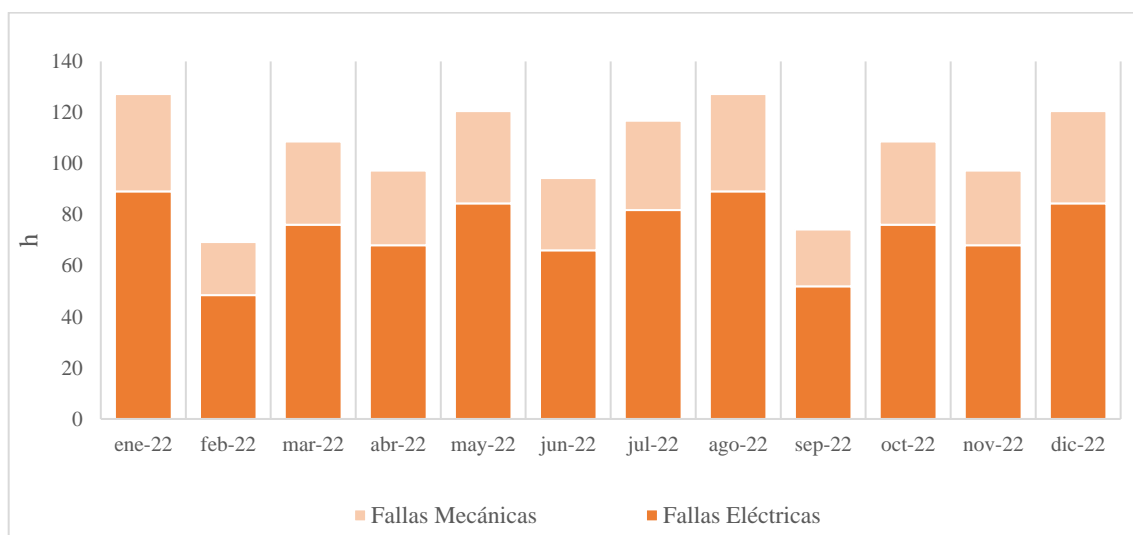


Figura N° 3.8: Distribución de tipo de fallas Puente Grúa Nave 1 Molienda – 2022.

Fuente: Elaboración propia

La figura N° 3.9 muestra el diagrama de Pareto construido para las principales fallas eléctricas del Puente Grúa para el año 2022, donde se ofrece una visualización efectiva de los problemas más relevantes, permitiendo identificar las áreas que requieren un mayor enfoque en términos de mantenimiento y resolución de problemas. La regla del 80/20, también conocida como el principio de Pareto, establece que aproximadamente el 80 % de los efectos provienen del 20 % de las causas. En este caso, se observa que las fallas en contactores y en el banco de resistencia representan aproximadamente el 80 % de las fallas eléctricas del Puente Grúa. Esto sugiere que concentrar los esfuerzos de mantenimiento y mejora en estas dos áreas específicas podría tener el mayor impacto en la reducción de las fallas eléctricas y, por lo tanto, en la mejora de la disponibilidad y el rendimiento general del puente grúa. Es importante analizar detenidamente las causas subyacentes de estas fallas recurrentes en los contactores y el banco de resistencia, implementar medidas correctivas efectivas y establecer un plan de acción para prevenir futuras ocurrencias. Esto puede incluir la actualización de componentes obsoletos, la mejora de los procedimientos de mantenimiento preventivo, el monitoreo continuo del estado de los equipos y la capacitación del personal para una operación más segura y eficiente del puente grúa.

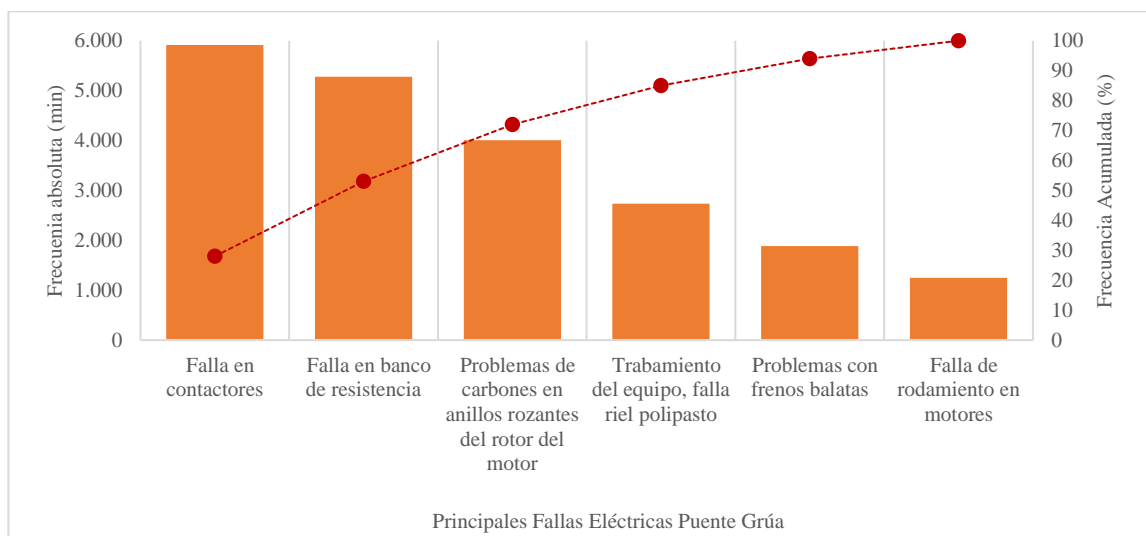


Figura N° 3.9: Pareto de fallas eléctricas Puente Grúa Nave 1 Molienda – 2022.

Fuente: Elaboración propia

Sin duda, los planes matrices eléctricos proporcionan una estructura fundamental para el mantenimiento del puente grúa. Estos planes suelen detallar las actividades de mantenimiento programadas, los intervalos de tiempo para llevar a cabo cada tarea y los recursos necesarios para su ejecución.

La tabla N° 3.1 es una herramienta para garantizar que el mantenimiento, se realice de manera oportuna y efectiva, ayudando a prevenir fallos inesperados y maximizando la disponibilidad y confiabilidad del equipo. Cada elemento dentro de los planes matrices eléctricos probablemente esté diseñado para abordar aspectos específicos del sistema eléctrico del puente grúa, como los contactores, el banco de resistencia, el sistema de control, entre otros. Estos planes pueden incluir actividades de inspección, limpieza, lubricación, ajuste, reparación y reemplazo de componentes, entre otras. Es esencial que estos planes sean revisados y actualizados periódicamente para asegurar que estén alineados con las necesidades cambiantes del equipo y con las mejores prácticas de mantenimiento. Además, la retroalimentación obtenida de las experiencias operativas y de mantenimiento debe ser incorporada para mejorar continuamente la efectividad de los planes. Es la implementación diligente de los planes matrices eléctricos contribuirá significativamente a la gestión efectiva del mantenimiento del puente grúa, lo que a su vez promoverá una operación más segura, confiable y eficiente del equipo.

Tabla N° 3.1: Planes matrices puente grúa - 2022.

DETALLE DE ORDEN DE TRABAJO	PERIODICIDAD
Medición termográfica puente grúa	Quincenal
Mantención eléctrica puente grúa	Mensual

En base a lo expuesto en este capítulo, resulta imperativo realizar el cambio del sistema de control y fuerza, los motores de corriente continua, el banco de resistencia, el sistema de comando para movimiento y el sistema de barras conductoras de electrificación para lograr aumentar la disponibilidad del equipo y con ello la eficiencia operativa y la seguridad del puente grúa.

CAPÍTULO IV

CAMBIO DE COMPONENTES DE PUENTE GRÚA

4.1 Reemplazo de componentes del puente grúa

Las recomendaciones de renovación para mejorar el funcionamiento y la confiabilidad del puente grúa son sólidas y están diseñadas para abordar las principales fallas detectadas durante el año 2022. Estas recomendaciones se centran en actualizar y modernizar los componentes clave del puente grúa, así como en implementar prácticas de mantenimiento preventivo y capacitación del personal. Al abordar estos aspectos, se espera mejorar significativamente la eficiencia operativa del puente grúa y reducir la frecuencia de fallas, lo que a su vez contribuirá a una operación más segura y rentable de la planta concentradora. Es fundamental que estas recomendaciones se implementen de manera adecuada y oportuna, siguiendo un plan de acción estructurado y teniendo en cuenta los recursos disponibles. De esta manera, se puede garantizar que el puente grúa funcione de manera óptima y continúe siendo un componente crucial en el proceso de sulfuro de cobre de la planta concentradora de División Salvador. A continuación, se resumen las recomendaciones:

- ✚ Reemplazo de los motores sincrónicos de corriente continua por motores trifásicos asincrónicos de fácil mantenimiento. Los motores trifásicos asincrónicos suelen ser más robustos y requerir menos mantenimiento en comparación con los motores de corriente continua. Esta actualización mejora la confiabilidad y reducir los costos de mantenimiento a largo plazo.

- ✚ Reemplazo del sistema de control y fuerza por un tablero con repuestos de fácil acceso y stock. Un tablero con repuestos fácilmente accesibles y en stock puede agilizar los procesos de mantenimiento al garantizar la disponibilidad rápida de piezas de repuesto, como contactores y relés. Esto puede reducir el tiempo de inactividad del puente grúa y mejorar su disponibilidad operativa.

- ✚ Sustitución del banco de resistencias por variadores de frecuencia de corriente alterna. El variador de frecuencia de corriente alterna ofrece un control más preciso y eficiente de la velocidad y el torque del puente grúa. Además, reduce el desgaste y el consumo de energía en comparación con los bancos de resistencias tradicionales.
- ✚ Reemplazo del sistema de comando para movimiento de puente grúa por un sistema radio control a distancia tipo joystick inalámbrico. Un sistema de control remoto inalámbrico mejora la seguridad y la comodidad del operador al permitirle controlar el puente grúa desde una distancia segura. Además, puede facilitar la operación en espacios reducidos o de difícil acceso.
- ✚ Cambio del Sistema de barras conductoras de electrificación (Tipo pantógrafo), por los sistemas trifásicos que suelen ser más eficientes y fiables que los sistemas de corriente continua.

Las recomendaciones propuestas apuntan a modernizar y optimizar el puente grúa, mejorando su rendimiento, confiabilidad y seguridad operativa. Sin embargo, la implementación de estos cambios debe estar respaldada por un análisis detallado de costos y beneficios para asegurar que las inversiones realizadas proporcionen un retorno económico favorable y contribuyan al éxito continuo de la planta concentradora de División Salvador. Este enfoque garantizará que las mejoras no solo sean técnicas, sino también económicamente viables, alineando así las decisiones de inversión con los objetivos estratégicos de la organización.

4.2 Motores trifásicos por utilizar

La tabla N° 4.1 resume las principales características y la cantidad requerida de motores seleccionados para desarrollar el proyecto.

Tabla N° 4.1: Características de motores a utilizar en el proyecto

IDENTIFICACIÓN DE MOTOR	CANTIDAD	CARACTERÍSTICAS	
Gancho principal	8 motores	Potencia	18,5 kW
		Velocidad	2.900 rpm
		Voltaje	380 V
		Factor de potencia	0,89
		Rendimiento	0,90
Gancho auxiliar	1 motor	Potencia	15 kW
		Velocidad	2.450 rpm
		Voltaje	380 V
		Factor de potencia	0,89
		Rendimiento	0,88
Traslado Puente	4 motores	Potencia	7,5 kW
		Velocidad	1.468 rpm
		Voltaje	380 V
		Factor de potencia	0,78
		Rendimiento	0,73
Traslado Carro	4 motores	Potencia	2,2 kW
		Velocidad	1.468 rpm
		Voltaje	380 V
		Factor de potencia	0,85
		Rendimiento	0,88

Fuente: Elaboración propia

4.3 Cálculo de protecciones y alimentadores para motores trifásicos

Para determinar el seccionamiento y las protecciones que deben ser utilizadas en el conexionado del motor se realizaron los siguientes cálculos:

4.3.1 Determinación de corriente nominal de cada motor

En base a la ecuación N° 2.1 mostrada en el marco teórico, se calcula la intensidad nominal de cada motor a utilizar en el proyecto.

✚ **Circuito 1:** Motor de gancho principal de 18,5 kW.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * v * n * \cos(\varphi)} = \frac{18.500}{\sqrt{3} * 380 * 0,89 * 0,9} = 35,091 \text{ A}$$

Considerando que se requieren 8 motores, la corriente nominal equivale a:

$$I_{\text{cto 1}} = 31,581 * 8 \rightarrow I_{\text{cto 1}} = 280,728 \text{ A}$$

✚ **Circuito 2:** Motor de gancho auxiliar de 15 kW.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * v * n * \cos(\varphi)} = \frac{15.000}{\sqrt{3} * 380 * 0,89 * 0,88} = 29,099 \text{ A}$$

Considerando que se requiere solo un motor, la corriente nominal equivale a:

$$I_{\text{cto 2}} = 29,099 \text{ A}$$

✚ **Circuito 3:** Motor de traslado de puente de 7,5 kW.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * v * n * \cos(\varphi)} = \frac{7.500}{\sqrt{3} * 380 * 0,78 * 0,73} = 20,013 \text{ A}$$

Considerando que se requieren 4 motores, la corriente nominal equivale a:

$$I_{\text{cto 3}} = 14,609 * 4 \rightarrow I_{\text{cto 3}} = 80,052 \text{ A}$$

✚ **Circuito 4:** Motor de traslado de carro de 2,2 kW.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * v * n * \cos(\varphi)} = \frac{2.200}{\sqrt{3} * 380 * 0,85 * 0,88} = 4,468 \text{ A}$$

Considerando que se requieren 4 motores, la corriente nominal equivale a:

$$I_{\text{cto 4}} = 3,932 * 4 \rightarrow I_{\text{cto 4}} = 17,872 \text{ A}$$

4.3.2 Determinación de corriente total del circuito de motores

Para determinar la corriente total del circuito de motores se debe sumar todas las intensidades de los circuitos.

$$I_{\text{Total}} = I_{\text{cto 1}} + I_{\text{cto 2}} + I_{\text{cto 3}} + I_{\text{cto 4}}$$

$$I_{\text{Total}} = 280,728 + 29,099 + 80,052 + 17,872 \rightarrow I_{\text{Total}} = 407,751 \text{ A}$$

4.3.3 Determinación de conductores en base a RIC-N04

Para determinar el conductor se utiliza la Tabla N°4.2 del RIC-N04, del cual se seleccionan dos tipos de conductores: conductor del alimentador y sub - alimentadores (cargas de los motores). La Figura 4.1 muestra las características constructivas conductor del alimentador tipo RV- K.

Características constructivas	Letras de identificación	Condiciones de uso	Máxima temperatura de servicio [°C]	Espesor de aislamiento		Tensión de servicio [V]	Material aislamiento	Material cubierta exterior
				Sección nominal [mm²]	Espesor [mm]			
Conductor eléctrico unipolar o multipolar, sin armadura ni pantalla; construido de cobre recocido, desnudo o recubierto de una capa metálica; flexible clase 5, con aislación de polietileno reticulado (XLPE) y cubierta termoplástica de cloruro de polivinilo (PVC) designación ST2.	RV-K	Apto para ser instalado directamente enterrado, en ductos, en bandejas, en canastillo, en escalerillas (solo tipo /TC) y al aire libre. En circuitos de distribución en baja tensión, como alimentador o subalimentador flexible para tendido fijo.	90	1,5 a 16	0,7	600/1000	XLPE	PVC
				21,2 a 35	0,9			
				42,2 a 53,5	1,0			
				67,4 a 95	1,1			
				107 a 127	1,2			
				150	1,4			
				177 a 185	1,6			
				240 a 253	1,7			
				300	1,8			
				380 a 400	2,0			
500 a 630	2,2							

Figura N° 4.1: Características constructivas alimentador tipo RV- K.

Fuente: Tabla 4.2 RIC - N04

Por otra parte, la figura 4.2 muestra las características constructivas del multi conductor.

Características constructivas	Letras de identificación	Condiciones de uso	Máxima temperatura de servicio [°C]	Espesor de aislamiento		Tensión de servicio [V]	Material aislamiento	Material cubierta exterior
				Sección nominal [mm²]	Espesor [mm]			
Conductor eléctrico tipo cordón flexible, construido con 2, 3, 4 o 5 conductores de cobre recocido, desnudo o recubierto de una capa metálica; cableados, clase 5, con aislación de policloruro de vinilo PVC/D para temperatura de servicio de 70 °C, con cubierta o revestimiento de PVC/ST5 y rango de voltaje de 300/500 volts.	H05VV-F	Apto para ser usado en instalaciones móviles domiciliarias y para alimentación de electrodomésticos con un esfuerzo mecánico medio. Puede ser usado en interior, en recintos secos y/o húmedos (no apto para instalaciones sumergidas)	70	0,75	0,6	300/500	PVC	PVC
				1,0	0,6			
	1,5			0,7				
	2,5			0,8				
	4			0,8				
	H05VVH2-F							

Figura N° 4.2: Características constructivas del multi conductor

Fuente: Tabla 4.2 RIC - N04

En base a la ecuación N° 2.2 mostrada en el marco teórico, se determina el seccionamiento del conductor mediante el método cálculo de sección en mm² y caída de tensión para los motores trifásicos. Para ello se considera un 25 % de factor de partida en cada corriente nominal obtenida en el punto anterior, un 3 % de caída de tensión equivalente a 11,4 V según establecido por norma, un valor de resistividad del cobre de 0,018 Ωmm²/m. y además se considera factor de dimensionamiento 1,1 para motores de régimen no permanente (variable) de 5 min de operación.

Con el valor obtenido en mm², se ingresa en la tabla 4.5 RIC – N04 (mostrada en anexo A.2) multiconductores planos de capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados, utilizando el método de instalación tipo E, instalación al aire libre y conductor soportado (festoon). De la tabla se elige el conductor más próximo al valor obtenido en mm² y con corriente admisible a transportar, luego se determina la comprobación de la caída de tensión de acuerdo con lo establecido con un 3 % del voltaje nominal (380 V).

En esta instalación no se requiere factor de corrección y capacidad de transporte en ducto, ya que la instalación será al aire libre, ambiente seco y expuesto a una temperatura ambiente 20 a 30 °C.

✚ **Conductor para el Motor de gancho principal de 18,5 kW.**

I nominal: 35,091 x 1,25

I diseño: 43,863 A

ΔE : 3% de 380 V

ΔE : 11,4 V

$$S = \frac{\sqrt{3} * I_d * \rho * L * \cos(\varphi) * f_d}{\Delta E} \text{ mm}^2$$
$$\rightarrow \frac{\sqrt{3} * 43,863 * 0,018 * 60 * 0,89 * 1,1}{11,4}$$
$$S = 5,87 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto, se selecciona un multiconductor comercial de la tabla 4.5 RIC-N04 equivalente a 8,37 mm², 8 AWG que resiste 53 A, a una temperatura ambiente 30°C, método de instalación tipo E.

✚ **Verificación de caída tensión**

$$\Delta E = \frac{\sqrt{3} * I_d * \rho * L * \cos(\varphi) * f_d}{S} \text{ V} \rightarrow \frac{\sqrt{3} * 43,863 * 0,018 * 60 * 0,89 * 1,1}{8,37}$$
$$9,59 \text{ V}$$

ΔE : 9,59 V es menor que 11,4 V cumple

$\Delta E\%$: 9,59 x 100/380 = 2,52 % menor a 3 % cumple

El conductor de 8,37 mm², 8 AWG cumple con la corriente admisible y la caída de tensión requerida por la norma.

✚ **Conductor para el motor de gancho auxiliar de 15 kW**

$$S = \frac{\sqrt{3} * I_d * \rho * L * \cos(\varphi) * f_d}{\Delta E} \text{ mm}^2 \rightarrow \frac{\sqrt{3} * 36,323 * 0,018 * 60 * 0,89 * 1,1}{11,4}$$

$$5,835 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto, se selecciona un multiconductor comercial de la tabla 4.5 RIC-N04 equivalente a 6 mm², que resiste 43 A, a una temperatura ambiente 30°C. método de instalación tipo E.

✚ Verificación de caída tensión

$$\Delta E = \frac{\sqrt{3} * I_d * \rho * L * \cos(\varphi) * f d}{S} \text{ V} \rightarrow \frac{\sqrt{3} * 36,323 * 0,018 * 60 * 0,89 * 1,1}{6}$$
$$11,08 \text{ V}$$

ΔE : 11,08 V es menor que 11,4 V cumple

$\Delta E\%$: $11,08 \times 100/380 = 2,91 \%$ es menor a 3 % cumple

El conductor de 6 mm², cumple con la corriente admisible y la caída de tensión requerida por la norma.

✚ Conductor para el Motor de traslado de puente de 7,5 kW

$$S = \frac{\sqrt{3} * I_d * \rho * L * \cos(\varphi) * f d}{\Delta E} \text{ mm}^2 \rightarrow \frac{\sqrt{3} * 25,016 * 0,018 * 60 * 0,78 * 1,1}{11,4}$$
$$3,52 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto, seleccionamos un multiconductor comercial de la tabla 4.5 RIC-N04 equivalente a 4 mm², que resiste 34 A, a una temperatura ambiente 30°C. método de instalación tipo E.

✚ Verificación de caída tensión

$$\Delta E = \frac{\sqrt{3} * I_d * \rho * L * \cos(\varphi) * f d}{S} \text{ V} \rightarrow \frac{\sqrt{3} * 25,016 * 0,018 * 60 * 0,78 * 1,1}{4}$$
$$10,03 \text{ V}$$

ΔE : 10,03 V es menor que 11,4 V cumple

$\Delta E\%$: $10,03 \times 100/380 = 2,63 \%$ es menor a 3 % cumple

El conductor de 4 mm², cumple con la corriente admisible y la caída de tensión requerida por la norma.

✚ Conductor para el Motor de traslado de carro de 2,2 kW

$$S = \frac{\sqrt{3} * I_d * \rho * L * \cos(\varphi) * f_d}{\Delta E} \text{ mm}^2 \rightarrow \frac{\sqrt{3} * 5,585 * 0,018 * 60 * 0,85 * 1,1}{11,4}$$

0,856 mm²

De acuerdo con lo establecido por la norma del RIC-N04 se debe considerar como mínimo un conductor de 2,5 mm² para cargas de motores trifásicos, Por lo tanto, se selecciona un conductor comercial de la tabla 4.5 RIC-N04 equivalente a 2,5 mm², que resiste 25 A, a una temperatura ambiente 30°C. método de instalación tipo E.

✚ Verificación de caída tensión

$$\Delta E = \frac{\sqrt{3} * I_d * \rho * L * \cos(\varphi) * f_d}{S} \text{ V} \rightarrow \frac{\sqrt{3} * 5,585 * 0,018 * 60 * 0,85 * 1,1}{2,5}$$

3,90 V

ΔE : 3,90 V es menor que 11,4 V cumple

$\Delta E\%$: $3,90 \times 100/380 = 1,02 \%$ es menor a 3 % cumple

El conductor de 2,5 mm², cumple con la corriente admisible y la caída de tensión requerida por la norma.

4.3.4 Determinación de sección del alimentador principal

Para determinar el seccionamiento del alimentador principal, se calcula la corriente del alimentador principal, mediante la siguiente expresión:

$$I_{\text{Alimentador Principal}} = 1,25 * I_N (\text{Motor de mayor potencia}) + \sum I_N (\text{Motores restantes})$$

$$I_{\text{Alimentador Principal}} = 1,25 * 280,728 + \sum (29,099 + 80,052 + 17,872)$$

$$I_{\text{Alimentador Principal}} = 477,933 \text{ A}$$

$$I_{\text{nominal}}: 1,25 * 280,728 + \sum (29,099 + 80,052 + 17,872)$$

$$I_{\text{diseño}}: 477,933 \text{ A}$$

$$\Delta E: 3\% \times 100/380$$

$$\Delta E: 11,4 \text{ V}$$

$$S = \frac{\sqrt{3} * I_d * \rho * L * \cos(\varphi) * f_d}{\Delta E} \text{ mm}^2 \rightarrow \frac{\sqrt{3} * 477,933 * 0,018 * 150 * 0,85 * 1,1}{11,4}$$

$$191,942 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto, se selecciona un conductor RV-K comercial de la tabla 4.4 RIC-N04 equivalente a 202,7 mm², 400 AWG, que resiste 483 A, a una temperatura 90°C, método de instalación tipo F. 3 conductores monopolar con carga, 1 conductor monopolar neutro.

✚ Verificación de caída tensión

$$\Delta E = \frac{\sqrt{3} * I_d * \rho * L * \cos(\varphi) * f_d}{S} \text{ V} \rightarrow \frac{\sqrt{3} * 5,585 * 0,018 * 150 * 0,85 * 1,1}{202,7}$$

$$10,79 \text{ V}$$

ΔE : 10,79 V es menor que 11,4 V cumple

$\Delta E\%$: 10,79 x100/380 = 2,84 % es menor a 3 % cumple

El conductor de 202,7 mm², 400 AWG, cumple con la corriente admisible y la caída de tensión requerida por la norma.

4.3.5 Determinación de protección de sobrecarga

Cada motor debe llevar su protección por sobrecarga, factor que equivale a 1,15 veces la corriente nominal del motor, por lo tanto, se obtiene:

✚ Protección de sobrecarga para el Motor de gancho principal de 18,5 kW

$$1,15 * I_n \rightarrow 1,15 * 35,091 \rightarrow 40,354 \text{ A}$$

Por lo tanto, se elige un relé térmico de regulación de 37 - 50 A.

✚ Protección de sobrecarga para el Motor de gancho auxiliar de 15 kW

$$1,15 * I_n \rightarrow 1,15 * 29,099 \rightarrow 33,463 \text{ A}$$

Por lo tanto, se elige un relé térmico de regulación de 28 - 36 A.

✚ Protección de sobrecarga para el Motor de traslado de puente de 7,5 kW

$$1,15 * I_n \rightarrow 1,15 * 20,013 \rightarrow 23,015 \text{ A}$$

Por lo tanto, se elige un relé térmico de regulación de 17 - 25 A.

✚ Protección de sobrecarga para el Motor de traslado de carro de 2,2 kW

$$1,15 * I_n \rightarrow 1,15 * 4,468 \rightarrow 5,138 \text{ A}$$

Por lo tanto, se elige un relé térmico de regulación de 4 - 6 A.

4.3.6 Determinación de protección de corto circuito (ITM)

Cada motor trifásico debe llevar su protección de corto circuito, factor que equivale a 1,25 veces la corriente nominal del motor, por lo tanto, se obtiene:

✚ Protección de corto circuito para el Motor de gancho principal de 18,5 kW

$$1,25 * I_n \rightarrow 1,25 * 35,091 \rightarrow 43,863 \text{ A}$$

Por lo tanto, se elige un interruptor termomagnético normalizado de 50 A.

✚ Protección de corto circuito para el Motor de gancho auxiliar de 15 kW

$$1,25 * I_n \rightarrow 1,25 * 29,099 \rightarrow 36,373 \text{ A}$$

Por lo tanto, se elige un interruptor termomagnético de 40 A.

✚ Protección de corto circuito para el Motor de traslado de puente de 7,5 kW

$$1,25 * I_n \rightarrow 1,25 * 20,013 \rightarrow 25,016 \text{ A}$$

Por lo tanto, se elige un interruptor termomagnético normalizado de 32 A.

✚ Protección de corto circuito para el Motor de traslado de carro de 2,2 kW.

$$1,25 * I_n \rightarrow 1,25 * 4,468 \rightarrow 5,585 \text{ A}$$

Por lo tanto, se elige un interruptor termomagnético normalizado de 6 A.

La figura 4.3 muestra el diagrama unilíneal de las protecciones, construido de acuerdo con el pliego técnico normativo RIC N° 18.

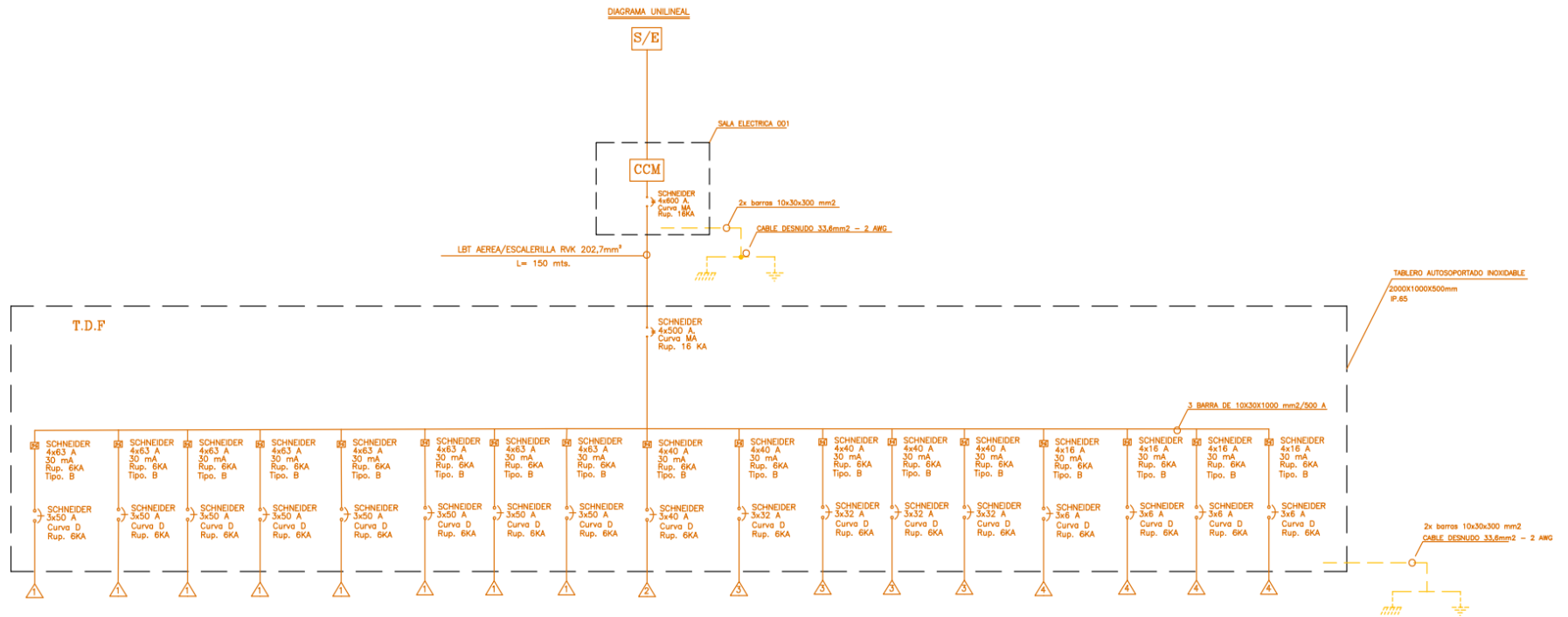


Figura N° 4.3: Diagrama unilíneal de protecciones

Fuente: Elaboración propia

4.4 Estimación de costos de implementación cambio de componentes

Para determinar el costo asociado al cambio de componentes de puente grúa se utiliza el valor del dólar promedio del mes de abril 2024 indicado en el servicio de impuestos internos que equivale a \$ 959,66, lo anterior debido a que los precios de los materiales fueron extraídos en esa moneda. La tabla N° 4.2 muestra en detalle los materiales requeridos con los costos asociados para reemplazar los motores sincrónicos de corriente continua por motores trifásicos.

Tabla N° 4.2: Presupuesto de materiales para motores trifásicos en \$.

MATERIALES	CANTIDAD REQUERIDA	VALOR / UNIDAD (\$)	VALOR TOTAL (\$)
Motor trifásico (moto reductor) de 7,5 kW	4 unidades	1.663.270	6.653.080
Motor trifásico (moto reductor) de 2,2 kW	4 unidades	711.510	2.846.040
Motor trifásico de 15 kW	1 unidad	2.747.476	2.747.476
Motor trifásico de 18,5 kW	8 unidades	3.296.971	26.375.769
Cable plano para fuerza tipo festoon 4 x 4 mm ²	201 m	6.238	1.253.796
Cable plano para fuerza tipo festoon 4 x 2,5 mm ²	188 m	5.278	992.288
Sistema de soporte para cable festoon	25 m	73.510	1.837.749
			\$ 42.706.199

Fuente: Elaboración propia

La tabla N° 4.3 muestra en detalle los materiales requeridos con los respectivos costos para reemplazar el sistema de control y fuerza, incluyendo variadores de frecuencia.

Tabla N° 4.3: Presupuesto de materiales del tablero de control y fuerza, en \$.

MATERIALES	CANTIDAD REQUERIDA	VALOR / UNIDAD (\$)	VALOR TOTAL (\$)
Guarda motor trifásico de 24 - 32 A	9 unidades	36.947	332.522
Guarda motor trifásico de 13 - 18 A	4 unidades	33.972	135.888
Guarda motor trifásico de 4 - 6 A	4 unidades	28.790	115.159
Interruptor mono polar termo magnético de 3 - 6 A	7 unidades	12.955	90.688
Interruptor tri polar termo magnético de 6 A	4 unidades	34.068	136.272
Variador de frecuencia Yaskawa 15 – 38 Kw	5 unidades	1.693.045	8.465.224
Variador de frecuencia Yaskawa 7,5 – 23 kW	2 unidades	1.127.328	2.254.655
Variador de frecuencia Yaskawa 2,2 – 7,1 kW	2 unidades	506.168	1.012.336
Gabinete auto soportado de acero inoxidable	4 unidades	1.427.974	5.711.896
Contactores trifásicos 40 A	17 unidades	117.000	1.989.000
Cable de control RV-K de 1,5 mm ² (cada rollo trae 100 m)	2 rollos	91.885	183.770
Sirena de 110 dB	1 unidad	25.341	25.341
Baliza LED	1 unidad	22.809	22.809
Luz piloto	3 unidades	1.598	4.794
Fusible de 2 - 32 A	30 unidades	2.648	79.440
Bandeja galvanizada de 200 x 100 mm x 3 m	3 unidades	48.646	145.938
Repartidores de 125 A	5 unidades	62.010	310.050
Transformador de control 380 - 110 V	4 unidades	122.194	488.776
ITM de 200 – 600 A	1 unidad	950.000	950.000
Limit Switch tipo cruceta Schneider	4 unidades	128.591	514.364
Desconectador trifásico de 600 A	1 unidad	196.000	196.000
			\$ 23.164.922

Fuente: Elaboración propia

La tabla N° 4.4 muestra en detalle los materiales requeridos para el reemplazo del sistema de comando para movimiento de puente grúa por un sistema de radio control a distancia tipo joystick inalámbrico y pantógrafo.

Tabla N° 4.4: Presupuesto de materiales para sistema radio control a distancia.

MATERIALES	CANTIDAD REQUERIDA	VALOR / UNIDAD (\$)	VALOR TOTAL (\$)
Relé de 11 pines 110 V	17 unidades	12.295	209.015
Base de Relé de 11 pines 110 V	17 unidades	4.862	82.654
Radio control hbc radiomatic emisor receptor	1 unidad	5.749.576	5.749.576
Barras conductoras de electrificación	1 unidad	1.999.594	1.999.594
Porta fusible	30 unidades	25.347	760.410
Terminal de compresión para cables	40 bolsas	11.690	467.600
Limit Switch Schneider tipo pulsador	4 unidades	109.302	437.209
			\$ 9.706.058

Fuente: Elaboración propia

Por último, la tabla N° 4.5 muestra un resumen del costo de los materiales detallados previamente, un porcentaje por el concepto de instalación y montaje y un porcentaje de contingencia dado que los valores son referenciales.

Tabla N° 4.5: Resumen de Costos.

ÍTEM	VALOR TOTAL (\$)
Materiales	75.577.180
Transporte (15%)	11.336.577
Mano de obra (50 %)	37.788.590
Contingencia (20 %)	15.115.436
\$ 139.817.782	

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, implementar la iniciativa propuesta equivale a invertir \$128.481.205 versus comprar un puente grúa nuevo estimado en un valor aproximado de \$1.150.000.000, lo que equivale a un ahorro del 87,9 % del total del costo del activo nuevo, lo que resulta sumamente atractivo ya que permitirá cumplir la disponibilidad planificada.

CAPÍTULO V

SIMULACIÓN EN SOFTWARE CADe_simu

Se desarrollaron simulaciones en el software CADe_simu versión 4.0 para evaluar y validar el diseño de circuitos eléctricos y sistemas de control antes de implementar cambios en equipos reales.

La tabla N° 5.1 identifica los componentes del circuito de simulación en CADe_simu y el tablero de control correspondiente a una partida de un motor trifásico con partida directa y variador de frecuencia.

Tabla N° 5.1: Descripción de componentes de circuito de simulación en CADe_simu.

ID	DESCRIPCIÓN	ID	DESCRIPCIÓN
KM1	Contactador red trifásica modo by pass	KA14	contacto normal abierto, velocidad rápida señal de 24vcc
KM2	Contactador red trifásica modo vdf	P/E	Parada de emergencia
KM3	Contactador avance en sentido horario	OL	Relé térmico protección del motor
KM4	Contactador retroceder en sentido antihorario	ITM	Interruptor termomagnético tripolar (general)
KM5	Contactador salida de red trifásica del vdf y bloquea una retroalimentación al estar en modo by pass.	VDF	Variador de Frecuencia trifásico
KM6	Sistema de iluminación del puente grúa	Selector	Para comandar en modo partida directa y vdf
KA3	Relevador de enclavamiento de encendido (CTRL), comunicación entre emisor (joystick) y receptor.	HL1	Luz piloto de Funcionando
KA9	Contacto normal abierto, radio control señal de 110vac	HL2	Luz piloto de Falla térmica
KA10	Contacto normal abierto, velocidad lenta señal de 24vcc	HL3	Baliza encendido puente
KA11	Contacto normal abierto, velocidad rápida señal de 24vcc	HL4	Sirena movimiento trasladó puente
KA12	Contacto normal abierto, radio control señal de 110vac	HL5	Luz piloto de variador de frecuencia energizado
KA13	Contacto normal abierto, velocidad lenta señal de 24vcc		

Se simuló un circuito de control y fuerza con un motor trifásico y un variador de frecuencia. Se realizaron dos métodos de funcionamiento para el motor trifásico de partida directa, una partida en modo by pass y una partida utilizando un variador de frecuencia de CA configurado con rampas de aceleraciones de 2 velocidades constantes, lenta y rápida para el movimiento del motor asíncrono de 380 V, siendo la primera velocidad de 950 rpm y la segunda velocidad de 1.450 rpm.

La lógica de funcionamiento para el motor de traslado de puente en modo by pass consistió en accionar el botón de encendido (start) del joystick (emisor), lo cual permitió que se active un relé de enclavamiento KA3 en el receptor, lo cual permite activar la bobina del contactor KM1 que energiza la red trifásica para realizar la partida directa del motor. junto con éste se activa KM6 del sistema de iluminación del puente grúa junto con la H3 (baliza), la sirena se activará al momento de accionarse KM3 O KM4.

La figura N° 5.1 muestra la simulación en CADe_simu para la partida de un motor trifásico en sentido horario utilizando variador de frecuencia configurado con velocidad lenta a 25 Hz / 750 rpm. La activación del selector en modo variador de frecuencia, permite la activación directa de los contactores de red KM2-KM5 al pulsar la botonera S-1 permitiendo la energización del contactor KM3 y el funcionamiento del motor en sentido horario.

La figura N° 5.2 muestra la simulación en CADe_simu para la partida de un motor trifásico en sentido antihorario, utilizando variador de frecuencia configurado con velocidad lenta a 25 Hz / 750 rpm. La activación del selector en modo variador de frecuencia, permite la activación directa de los contactores de red KM2-KM5 al pulsar la botonera S-2, permitiendo la energización del contactor KM4 y el funcionamiento del motor en sentido antihorario.

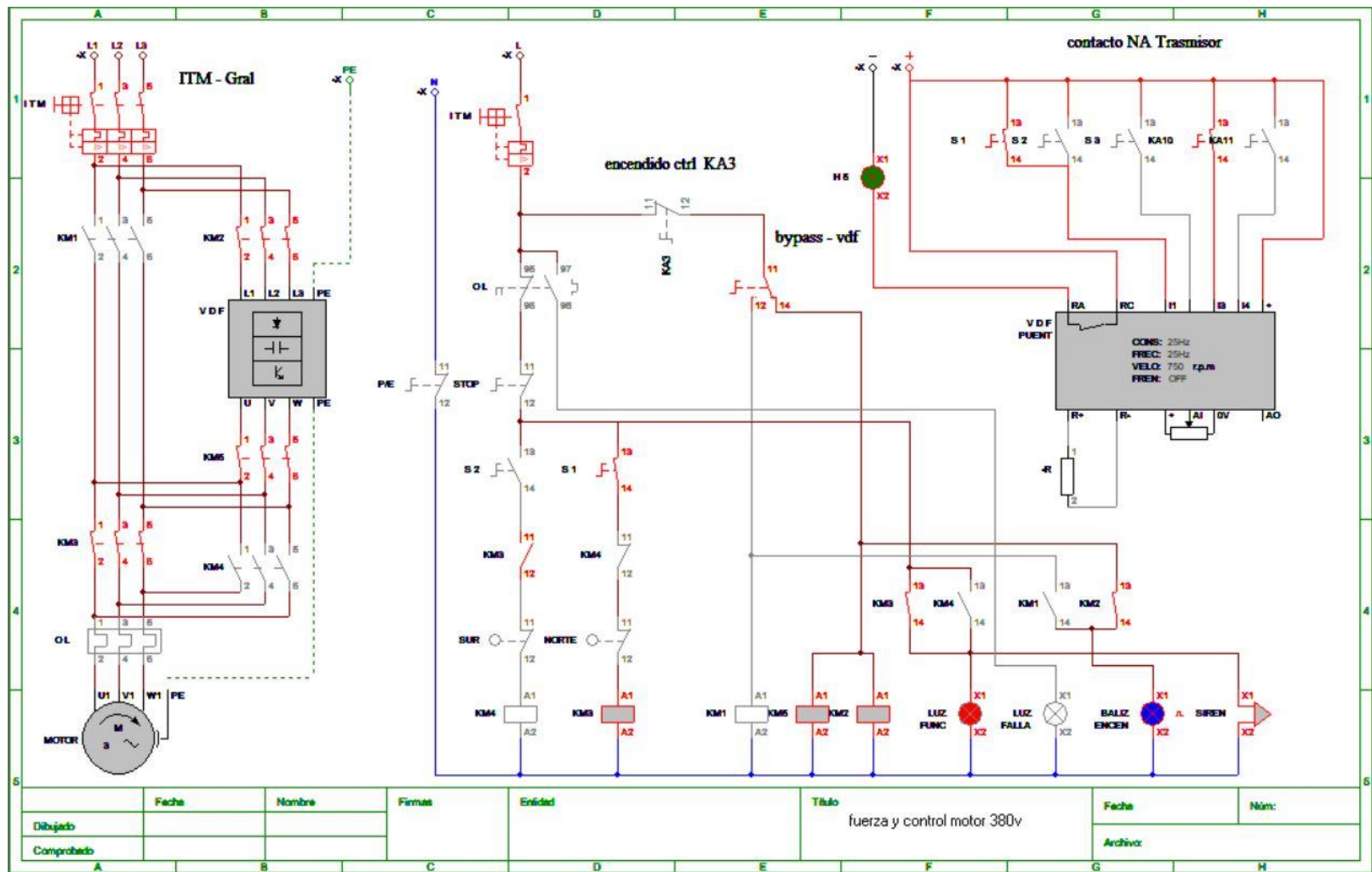


Figura N° 5.1: Simulación CADe_simu partida de motor en sentido horario con VDF a 25 Hz / 750 rpm.

Fuente: Elaboración propia

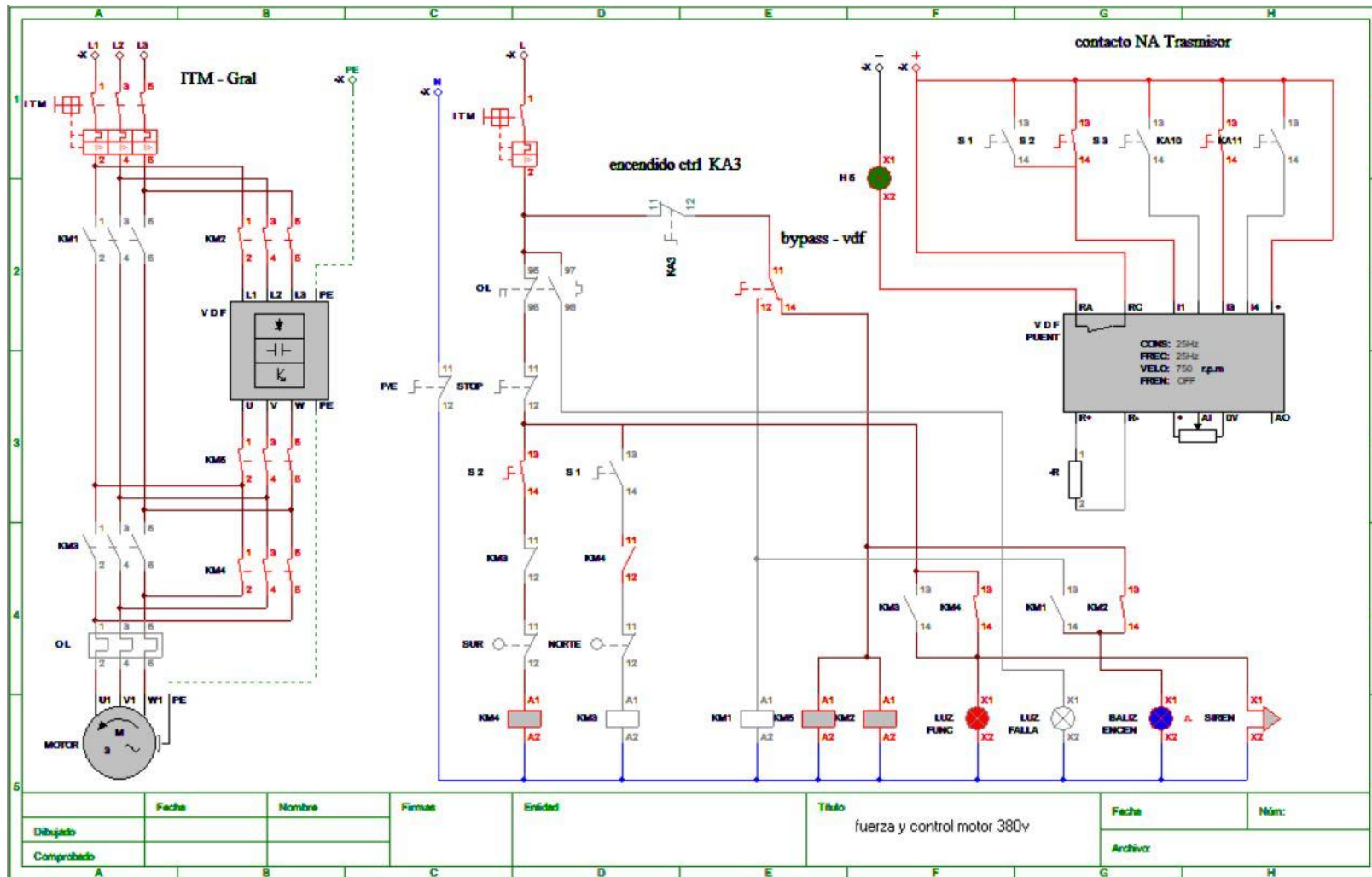


Figura N° 5.2: Simulación CADe_simu Partida de motor en sentido antihorario con VDF a 25 Hz / 750 rpm

Fuente: Elaboración propia

La figura N° 5.3 muestra la simulación en CADe_simu para la partida de un motor trifásico en sentido horario, utilizando variador de frecuencia configurado con velocidad rápida 50 Hz / 1.500 rpm. La activación del selector en modo variador de frecuencia, permite la activación directa de los contactores de red KM2-KM5 al pulsar la botonera S-1, permitiendo la energización del contactor KM3 y el funcionamiento del motor en sentido horario.

La figura N° 5.4 muestra la simulación en CADe_simu para la partida de un motor trifásico en sentido antihorario, utilizando variador de frecuencia configurado con velocidad rápida a 50 Hz / 1.500 rpm. La activación del selector en modo variador de frecuencia, permite la activación directa de los contactores de red KM2-KM5 al pulsar la botonera S-2, permitiendo la energización del contactor KM4 y el funcionamiento del motor en sentido antihorario.

La figura N° 5.5 muestra la simulación en CADe_simu detectando alarma de falla térmica en modo variador de frecuencia, esta consiste en forzar el relé térmico como una sobrecarga, lo cual permite el encendido de luz amarilla para la detención del motor, desactivando directamente los contactores KM3 o KM4. Es crucial contar con sistemas de monitoreo y protección como este para garantizar la seguridad del equipo y prevenir accidentes o averías graves. La detección temprana de condiciones anormales, como sobrecargas térmicas, permite una respuesta rápida y efectiva para evitar daños mayores y mantener la operación del equipo dentro de los límites seguros.

La figura N° 5.6 muestra la simulación en CADe_simu para la partida de un motor trifásico en sentido horario utilizando una partida directa a 50 Hz / 1.500 rpm. La activación del selector en modo by-pass, permite la activación directa del contactor de red KM1 al pulsar la botonera S-1, permitiendo la energización del contactor KM3 y el funcionamiento del motor en sentido horario.

La figura N° 5.7 muestra la simulación en CADe_simu para la partida de un motor trifásico en sentido antihorario, utilizando una partida directa a 50 Hz / 1.500 rpm.

La activación del selector en modo by-pass, permite la activación directa del contactor de red KM1 al pulsar la botonera S-2, permitiendo la energización del contactor KM4 y el funcionamiento del motor en sentido antihorario. Este proceso de arranque directo es una forma común de poner en marcha motores trifásicos y permite un control simple y eficiente de la dirección de rotación del motor. La activación del modo by-pass facilita aún más este proceso al permitir la activación directa del contactor de red y el inicio del funcionamiento del motor sin la necesidad de más pasos o controles complicados.

La figura N° 5.8 muestra la simulación en CADe_ simu detectando alarma de falla térmica en modo by-pass, esta consiste en forzar el relé térmico como una sobrecarga, lo cual permite el encendido de luz amarilla para la detención del motor, desactivando directamente los contactores KM3 o KM4, lo que ayuda a prevenir posibles daños mayores al motor debido a una sobrecarga térmica, incluso cuando el sistema está operando en modo by-pass.

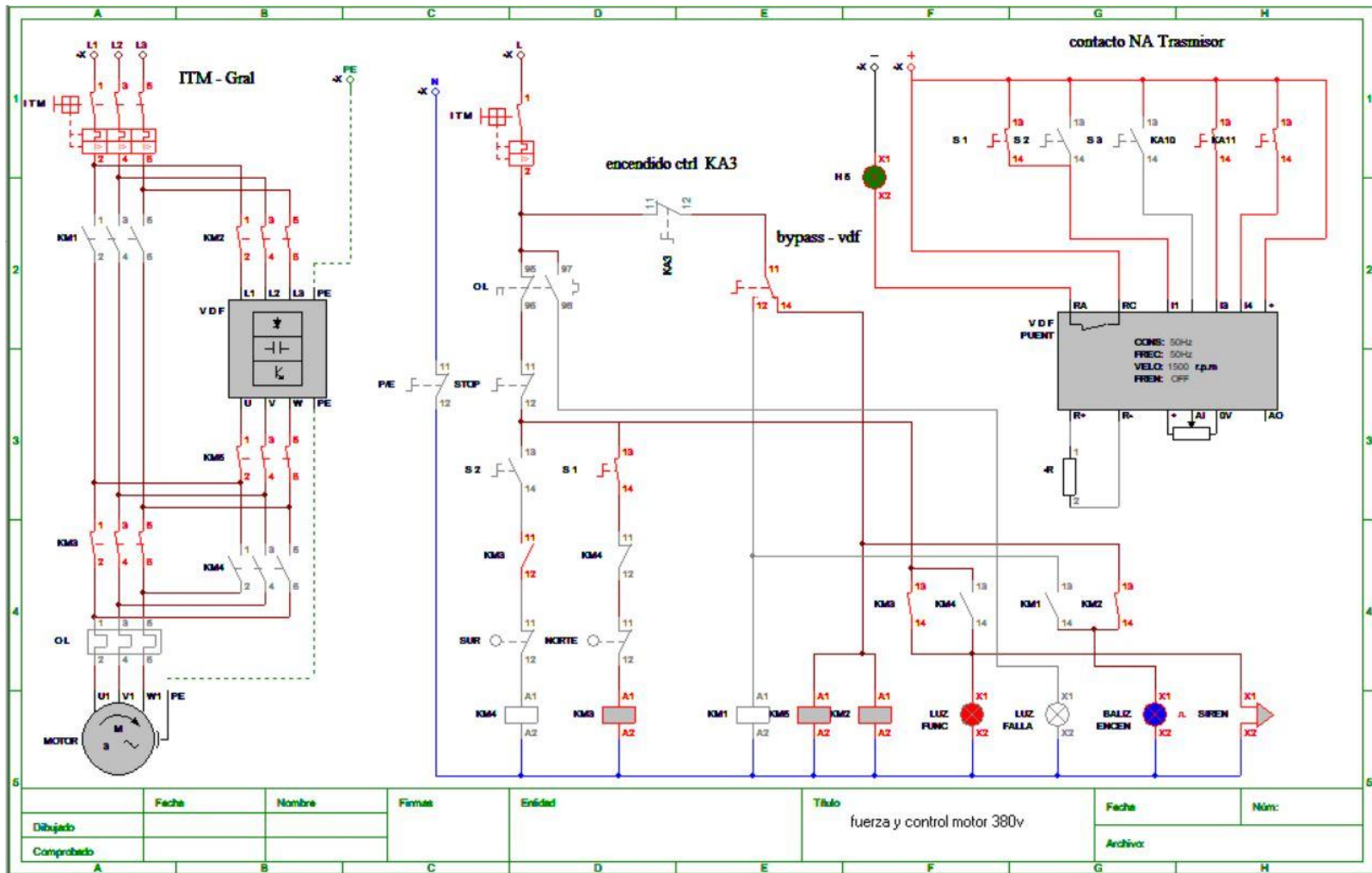


Figura N° 5.3: Simulación CAde_simu Partida de motor en sentido horario con VDF a 50 Hz / 1.500 rpm.

Fuente: Elaboración propia

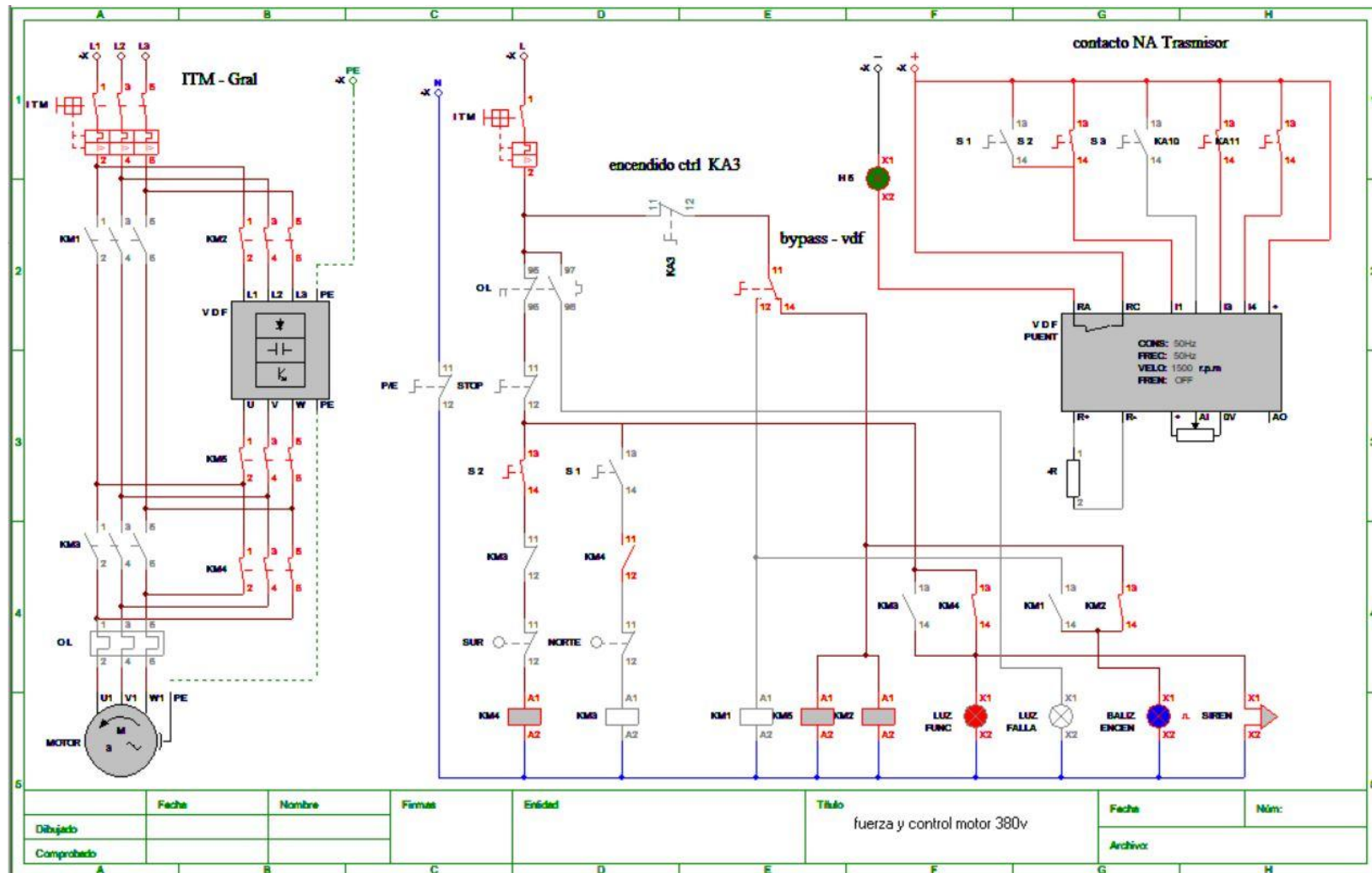


Figura N° 5.4: Simulación CADE_simu Partida de motor en sentido antihorario con VDF a 50 Hz / 1.500 rpm.

Fuente: Elaboración propia

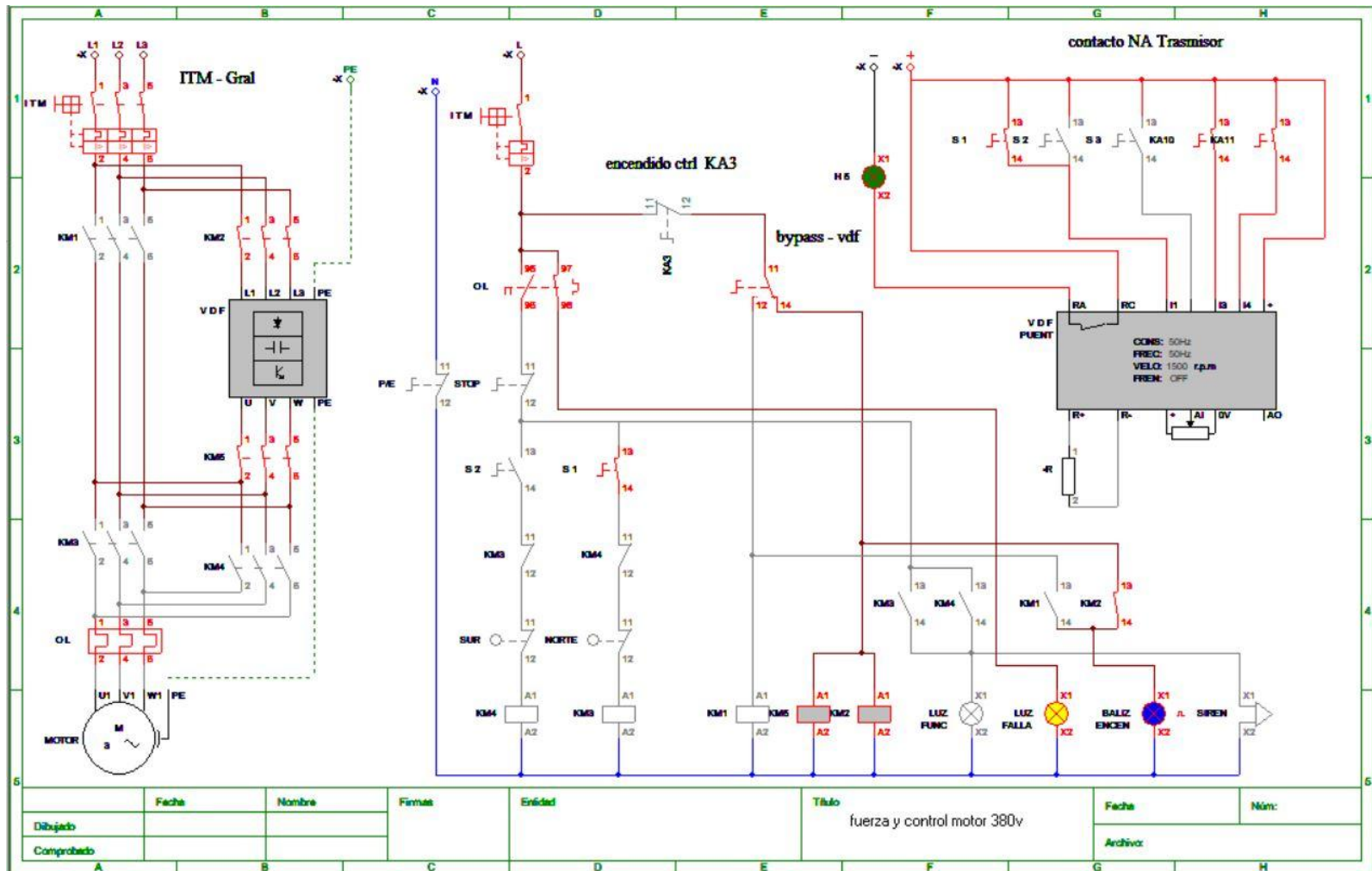


Figura N° 5.5: Simulación CAde_simu Falla de sobrecarga en motor trifásico 380 V (en modo VDF).

Fuente: Elaboración propia

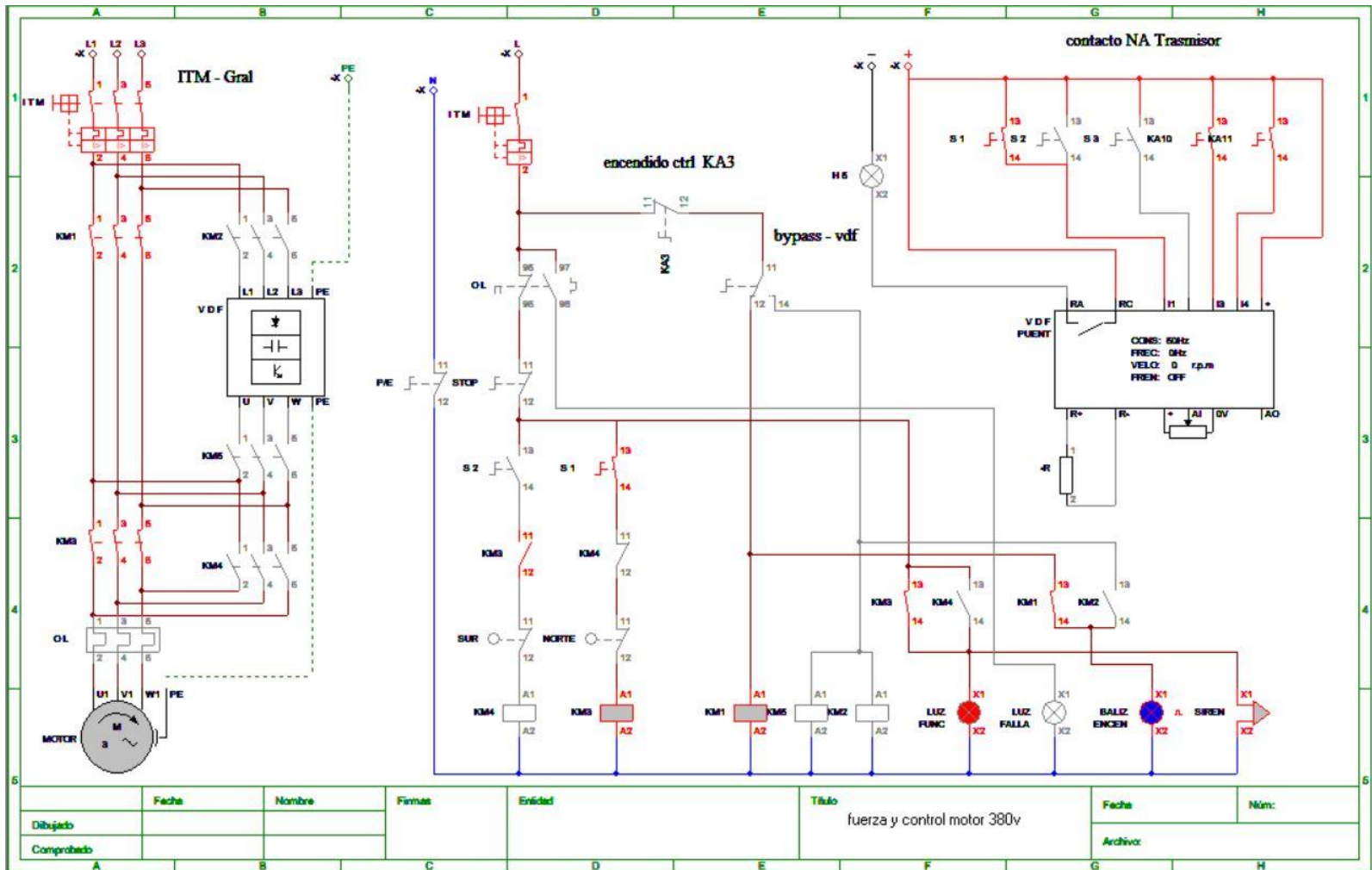


Figura N° 5.6: Simulación CADe_simu Partida directa de motor trifásico 380v / 50 Hz a 1500 r.p.m (en sentido horario)

Fuente: Elaboración propia

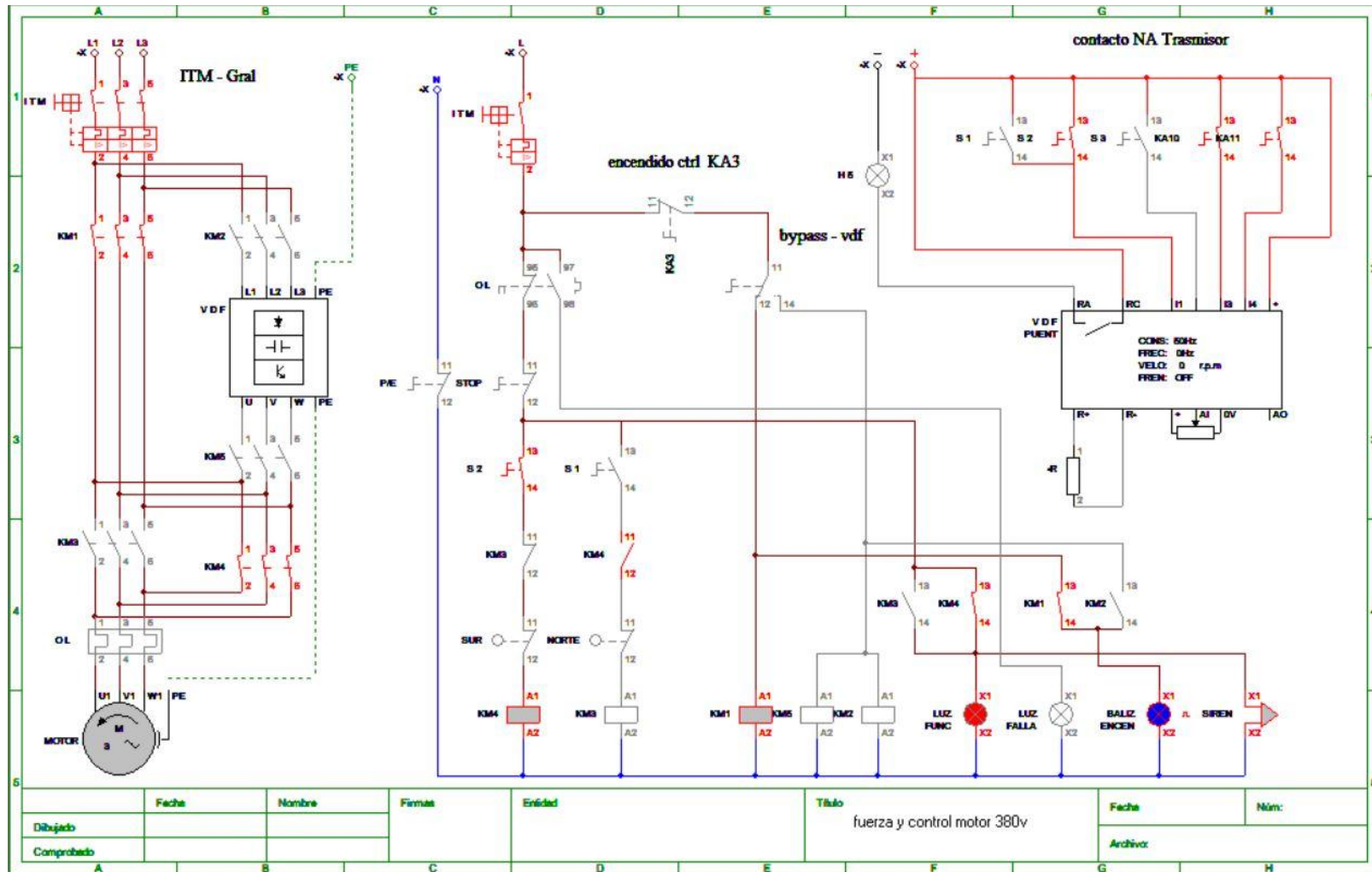


Figura N° 5.7: Simulación CADe_simu Partida directa de motor trifásico 380v / 50 Hz a 1500 r.p.m (sentido antihorario)

Fuente: Elaboración propia

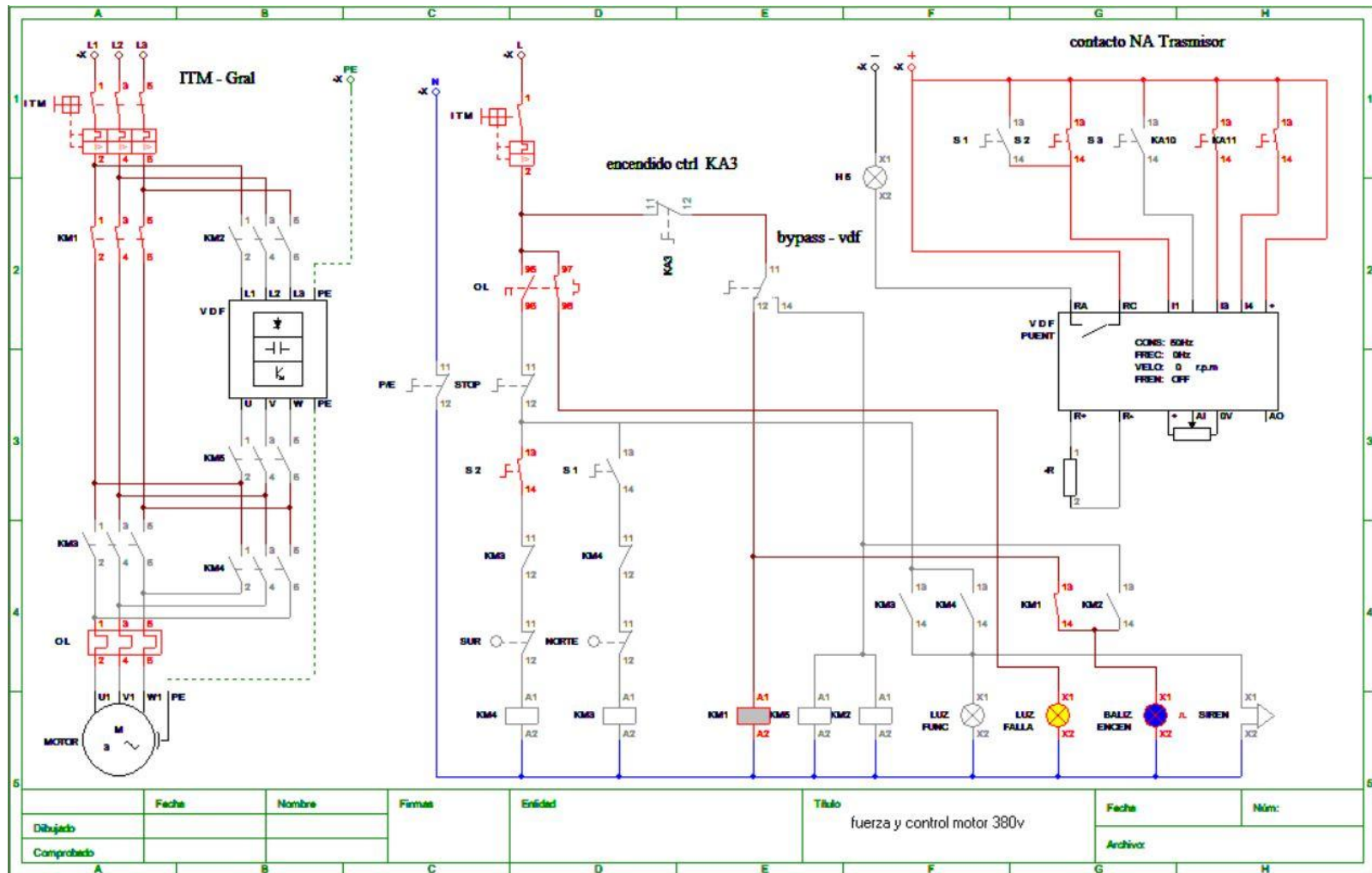


Figura N° 5.8: Simulación CADe_simu Falla de sobrecarga en motor trifásico (modo partida directa)

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO VI
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE VARIADOR DE FRECUENCIA EN
LABORATORIO

Con los resultados obtenidos en la simulación en CADe_simu se realizaron pruebas de laboratorio de funcionamiento de un motor trifásico para evaluar su comportamiento con el variador de frecuencia. Es por ello, que la tabla N° 6.1 describe la conexión de entradas discretas de 24 VDC para poder comandar el variador de frecuencia a través del radio control y la tabla N° 6.2 indica los datos del motor utilizado en pruebas de laboratorio.

Tabla N° 6.1: Descripción de conexión de entradas discretas de 24 VDC para poder comandar el variador de frecuencia a través del radio control.

ID	DESCRIPCIÓN
DI 1	Comando Marcha / paro
DI 2	Comando Inversor de giro
DI 3	Comando Reset de Fallas
DI 4	Comando Velocidad Constante 1
DI 5	Comando Velocidad Constante 2

Tabla N° 6.2: Placa de datos del motor trifásico.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN
Tipo de motor	Motor asíncrono trifásico
Tensión nominal del motor	380 V
Potencia del motor	5.5 kW / 7.5 hp
Factor de potencia	$\cos \varphi$ 0.81
Frecuencia nominal	50 Hz
Intensidad nominal motor	11,3 A a 380 V
rpm del motor	1.475 rpm
Pares polos motor	2 polos

Desde la tabla N° 6.3 a la tabla N° 6.6 se indican la configuración del variador de frecuencia asignando los datos de placa del motor trifásico, límites de protección, tiempos de aceleraciones y velocidades constantes, para realizar una partida del motor marcha/paro con rampas de aceleración.

Tabla N° 6.3: Rampas de acelerar / desacelerar.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN
Tiempo aceleración 1	5 segundos
Tiempo deceleración 1	5 segundos
Tiempo aceleración 2	7 segundos
Tiempo deceleración 2	7 segundos

Tabla N° 6.4: Selección referencia velocidad.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN
Velocidad constante 1	950 rpm
Velocidad constante 2	1.450 rpm

Tabla N° 6.5: Función marcha paro.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN
Función de marcha	automático
Tiempo de magnetización	500 ms
Función de paro	paro libre
Paro emergencia	paro por rampa
Velocidad cero límites	30 ms

Tabla N° 6.6: Límites de protección.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN
Frecuencia máxima	50 Hz
Intensidad máxima de arranque	54,4 A
Velocidad máxima	1.500 rpm

Las actividades principales realizadas en las pruebas de laboratorio fueron las siguientes:

- ✚ **Armado de tablero de control y fuerza:** montaje y conexión de los componentes eléctricos necesarios para el control y la alimentación del puente grúa en un tablero de control.
- ✚ **Programación de relé de enclavamiento para el movimiento del puente grúa mediante radio control a distancia con joystick inalámbrico:** configuración del relé de enclavamiento para permitir el movimiento del puente grúa mediante radio control a distancia, utilizando un joystick inalámbrico para el control.
- ✚ **Programación de variador de frecuencia:** ingresando los parámetros necesarios basados en los datos proporcionados en la placa del motor, como voltaje, potencia, rpm, factor de potencia, entre otros, para asegurar un funcionamiento óptimo del motor.
- ✚ **Pruebas de funcionamiento del motor en modo by pass y vdf:** realización de pruebas para verificar el correcto funcionamiento del motor en modo by-pass y en modo variador de frecuencia (VDF), asegurando que el motor responda adecuadamente a las instrucciones de control.
- ✚ **Mediciones de tensión y corriente:** utilización de un instrumento amperímetro multitester modelo 376 marca Fluke para realizar mediciones precisas de tensión y corriente en diferentes puntos del sistema eléctrico, garantizando que los parámetros eléctricos se mantengan dentro de los límites seguros durante el funcionamiento del puente grúa.

La figura N° 6.1 muestra el tablero de control y fuerza construido con los materiales disponibles en taller de faena, para la realización de pruebas del motor con variador de frecuencia y partida directa. Se sabe que el tablero utilizado se encuentra fuera de normativa vigente, pero fue el recurso disponible para la realización de pruebas. El tablero está compuesto por contactores, interruptores termo magnético, relé de control, relé térmico, transformador de control y luces piloto que se utilizan para proporcionar información visual sobre el estado del sistema eléctrico. Por ejemplo, podrían indicar si el motor está encendido, en marcha, detenido o si se ha producido una falla en el sistema. En resumen, el tablero de control y fuerza construido proporciona los medios necesarios para controlar, proteger y monitorear el motor trifásico durante las pruebas, utilizando una combinación de dispositivos de conmutación, protección y señalización. Esto asegura un funcionamiento seguro y eficiente del sistema eléctrico.

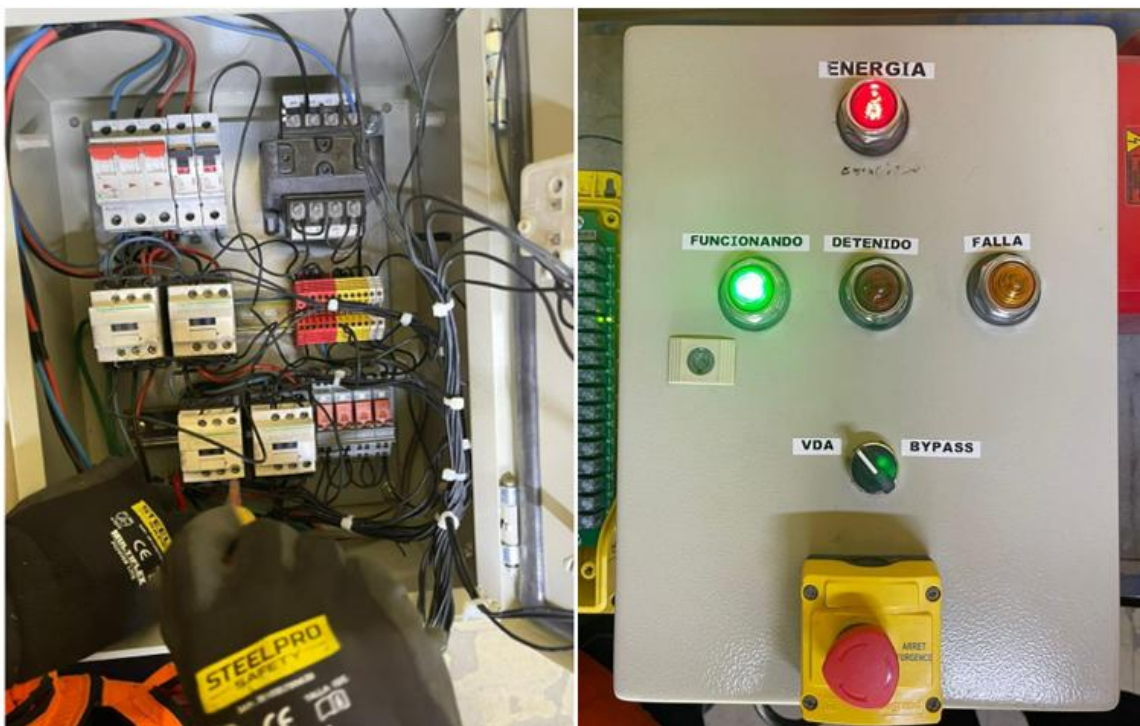


Figura N° 6.1: Armado de tablero de prueba para control y fuerza del motor

Fuente: Imagen propia

La figura N° 6.2 muestra el conexionado de relé de conmutación interna del radio control. Cada relé acciona un movimiento del puente grúa. el sistema de control utiliza relés de conmutación y un radio control para proporcionar una interfaz remota y segura para controlar los movimientos del puente grúa.

Los relés actúan como interruptores controlados por el operador a través del radio control, permitiendo un control preciso y conveniente del equipo desde una distancia segura.

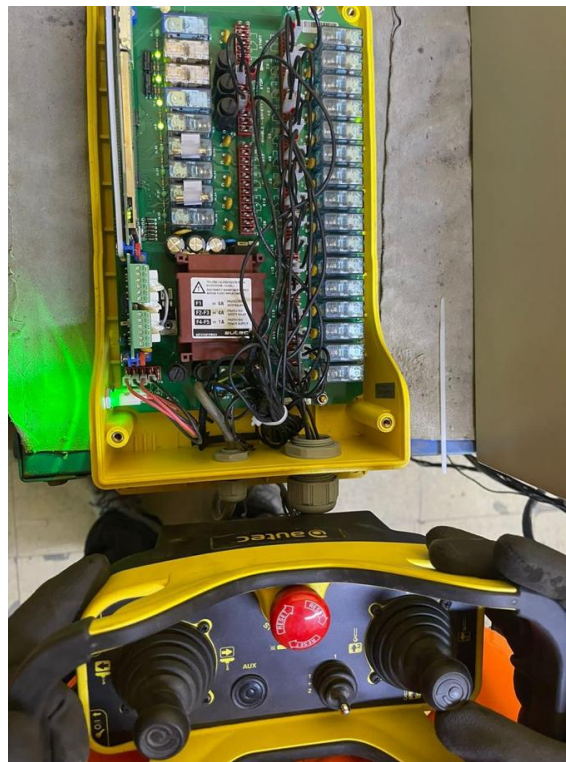


Figura N° 6.2: Conexionado de relé de control

Fuente: Imagen propia

La figura N° 6.3 muestra el variador de frecuencia utilizado para poder realizar pruebas de funcionamiento del motor asíncrono de 380 V a.c. Este variador de frecuencia fue configurado utilizando el modo macro estándar de aceleración constante para dos velocidades: 950 y 1450 rpm.



Figura N° 6.3: Variador de frecuencia ABB - ACS 880.

Fuente: Imagen propia

La figura N° 6.4 muestra la pantalla donde se realizó la configuración del variador de frecuencia con los datos obtenidos de la placa del motor, principalmente se ingresan los datos específicos del motor trifásico, como la potencia nominal, la corriente nominal, la tensión nominal y la frecuencia nominal.

Además, se realiza ajuste de protecciones tales como; límite de corriente, límite de frecuencia, rango de velocidades del motor, tiempo de aceleraciones y tiempo de detención del motor. Estos ajustes de protección y configuración se realizan para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente del sistema, protegiendo tanto al motor como al propio variador de frecuencia. Al ajustar adecuadamente estos parámetros, se

puede optimizar el rendimiento del motor y prolongar su vida útil, al tiempo que se minimiza el riesgo de fallos y averías.



Figura N° 6.4: Configuración de variador de frecuencia.

Fuente: Imagen propia

La figura N° 6.5 muestra el instrumento de medición fluke 375fc, realizando la medición de corriente de partida del motor, lo cual es un aspecto crucial en el análisis del arranque del motor y en la evaluación de su rendimiento.

Algunas consideraciones sobre la medición de la corriente de partida de motor son la corriente de arranque, el impacto en el sistema eléctrico, protección del motor y la optimización del arranque.



Figura N° 6.5: Medición de corriente de partida del motor.

Fuente: Imagen propia

La figura N° 6.6 muestra el sistema de control inalámbrico propuesto para manipular el puente grúa. Este sistema utiliza relés conmutados internamente con señales discretas que se dirigen hacia el gabinete de control del variador de frecuencia.



Figura N° 6.6: Sistema de comando a distancia inalámbrico.

Fuente: Imagen propia

Las actividades principales realizadas en las pruebas de laboratorio proporcionaron una serie de beneficios clave para el proyecto, dentro de los cuales destaca:

- ✚ **Validación del diseño:** las pruebas permitieron validar el diseño del sistema eléctrico del puente grúa, asegurando que todas las conexiones y componentes estuvieran configurados correctamente según las especificaciones del proyecto.
- ✚ **Verificación de funcionamiento:** se realizaron pruebas exhaustivas para verificar el correcto funcionamiento del sistema, incluido el control del movimiento del puente grúa mediante radio control a distancia y joystick inalámbrico, así como el funcionamiento óptimo del motor en diferentes modos de operación, como el modo by-pass y el modo variador de frecuencia (VDF).
- ✚ **Identificación de problemas:** cualquier problema o fallo en el funcionamiento del sistema pudo ser identificado y abordado durante las pruebas de laboratorio, lo que ayudó a prevenir posibles problemas durante la implementación en el sitio.

- ✚ **Ajustes y optimizaciones:** se realizaron ajustes y optimizaciones en la programación del variador de frecuencia y otros componentes para garantizar un rendimiento óptimo del sistema y maximizar la eficiencia energética.
- ✚ **Garantía de seguridad:** se llevaron a cabo pruebas de seguridad para verificar que todos los sistemas de protección, como el relé de enclavamiento, funcionaran correctamente y cumplieran con los estándares de seguridad requeridos.

En resumen, las pruebas de laboratorio fueron fundamentales para garantizar el éxito del proyecto al asegurar que el sistema eléctrico del puente grúa funcionara de manera segura, eficiente y conforme a los requisitos.

CAPÍTULO VII

IMPLEMENTACIÓN DE CAMBIO DE COMPONENTES

A continuación, se listan las actividades ejecutadas:

- ✚ Montaje de barras conductoras de electrificación.
- ✚ Canalización de conductores de motores.
- ✚ Montaje de motores trifásicos.
- ✚ Montaje e instalación de gabinetes de control y fuerza.

La figura N° 7.1 muestra el montaje realizado de barras conductoras de electrificación para la alimentación de cargas de motores del puente grúa. El montaje de barras conductoras de electrificación proporciona una solución eficiente y segura para la alimentación eléctrica de los motores del puente grúa y otras cargas móviles. Este sistema permite la alimentación continua de energía a los motores mientras se desplazan a lo largo de la viga del puente grúa, lo que es crucial para su funcionamiento adecuado.



Figura N° 7.1: Sistema de barras conductoras de electrificación.

Fuente: Imagen propia

La figura N° 7.2 muestra los conductores tipo Festoon para alimentar motores del puente grúa. Los conductores tipo Festoon proporcionan una solución flexible y confiable para la alimentación eléctrica de los motores del puente grúa y otras cargas móviles. Este sistema permite el movimiento continuo de los motores mientras reciben energía eléctrica, lo que es esencial para el funcionamiento eficiente del puente grúa.



Figura N° 7.2: Canalización de conductores tipo Festoon.

Fuente: Imagen propia

La figura N° 7.3 muestra la instalación del motorreductor trifásico y la canalización del cableado eléctrico en bandejas, elementos clave para el funcionamiento eficiente y seguro del puente grúa.

Este montaje asegura que la energía eléctrica se suministre de manera adecuada al motorreductor, permitiendo así el traslado preciso y controlado del puente grúa a lo largo de las vías.



Figura N° 7.3: Moto reductor trifásico.

Fuente: Imagen propia

La figura N° 7.4 muestra el variador de frecuencia para los ganchos principales del puente grúa marca Yaskawa con una capacidad de potencia de 15 – 38 kW, modelo A1000.

El variador de frecuencia A1000 permite controlar la velocidad de los motores de manera precisa y eficiente, diseñado para ofrecer un alto rendimiento energético. Además, está equipado con funciones avanzadas de protección y diagnóstico que ayudan a garantizar un funcionamiento seguro y confiable del sistema. Esto puede incluir protección contra sobre corriente, sobretensión, subtensión, sobrecalentamiento, cortocircuitos, entre otros.



Figura N° 7.4: Variador de frecuencia gancho principal.

Fuente: Imagen propia

La figura N° 7.5 muestra los gabinetes de control y fuerza para el funcionamiento de los motores de traslación del puente grúa, traslación de carro y gancho de izaje. Este gabinete contiene los dispositivos necesarios para controlar el movimiento horizontal del puente grúa a lo largo de las vigas principales. Incluye contactores, relés y variadores de frecuencia.

Gestiona el arranque, la parada y la velocidad de los motores que desplazan el puente grúa, asegurando movimientos suaves y precisos.



Figura N° 7.5: Gabinete de control y fuerza instalado en puente grúa.

Fuente: Imagen propia

La figura N° 7.6 muestra los ganchos de izaje tipo polipasto del puente grúa. Cada componente funciona con dos motores trifásicos. El gancho de izaje es el componente principal utilizado para levantar y mover cargas. Está diseñado para soportar grandes pesos y proporcionar un punto seguro de sujeción. Por otra parte, el polipasto es el mecanismo que convierte la energía motriz en movimiento de elevación. Consiste en un tambor de cable o cadena y un sistema de engranajes.

Los motores trifásicos son conocidos por su eficiencia, potencia y capacidad de manejar cargas pesadas. Proporcionan un funcionamiento suave y constante, crucial para la operación segura de un puente grúa.



Figura N° 7.6: Ganchos de izaje tipo polipasto.

Fuente: Imagen propia

La figura N° 7.7 muestra los motores trifásicos implementados en los ganchos de polipasto. Los motores trifásicos son dispositivos eléctricos que convierten la energía eléctrica en energía mecánica. Utilizan un sistema de tres fases que les permite operar de manera eficiente y con alta potencia.

Los motores trifásicos están montados de manera segura en el sistema de polipasto, generalmente en la estructura que soporta el tambor de cable o cadena. Se acoplan a través de ejes y engranajes que transmiten la potencia del motor al tambor, permitiendo el levantamiento y descenso de la carga.

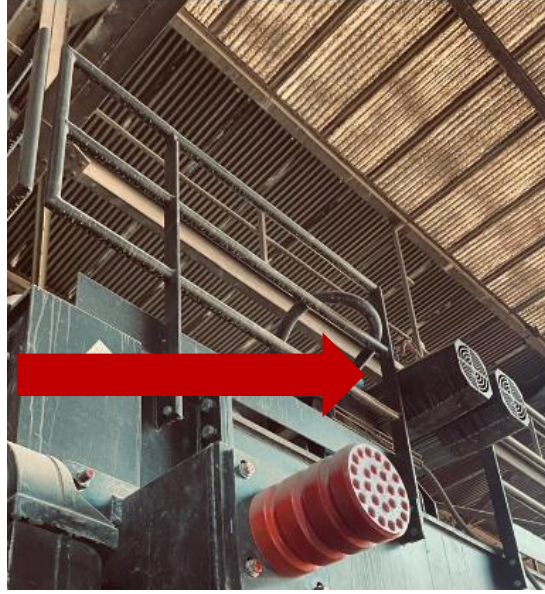


Figura N° 7.7: Motores trifásicos implementados en los ganchos del polipasto.

Fuente: Imagen propia

La figura N° 7.8 ilustra los variadores de frecuencia como componentes esenciales para el control del carro y la traslación del puente grúa. Su implementación mejora significativamente la eficiencia energética, el control preciso del movimiento y la seguridad operativa, mientras que reduce el mantenimiento y el desgaste mecánico.

Estos beneficios hacen que los VDF sean cruciales para el funcionamiento efectivo y seguro de los sistemas de grúas industriales.



Figura N° 7.8: Variador de frecuencia para carro y traslación de puente grúa.

Fuente: Imagen propia

La figura N° 7.9 muestra una vista frontal del puente grúa post el cambio de los componentes mencionados previamente.



Figura N° 7.9: Vista frontal puente grúa post cambio de componentes.

Fuente: Imagen propia

En resumen, el capítulo proporcionó una visión detallada de la modernización del puente grúa mediante la implementación de nuevos componentes.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSIONES

Luego de realizada todas las etapas propuestas en la metodología experimental es posible concluir que la realización del levantamiento visual al estatus actual de los componentes del activo permitió determinar la falta de hermeticidad, altos contenidos de material particulado, obsolescencia y falta de repuestos de estos. En segundo lugar, se determinó la disponibilidad mensualizada del puente grúa, donde los resultados no fueron satisfactorios y se obtuvo un valor promedio año de 85,7% versus un planificado de 94,1%.

Considerando la inspección visual realizada a los componentes del puente grúa y las fallas detectadas durante el año 2022 fue posible elaborar una propuesta de cambio y recomendación de reemplazo de los siguientes componentes del puente grúa, motores de corriente continua reemplazados por motores trifásicos asincrónicos de libre mantenimiento, el sistema de control y fuerza reemplazado por un tablero con repuestos de fácil acceso y stock, por ejemplo, contactores y relés de libre mantenimiento, el banco de resistencias reemplazado por variadores de frecuencia de corriente alterna, el sistema de comando para movimiento de puente grúa reemplazado por un sistema radio control a distancia tipo joystick inalámbrico y por último el sistema de barras conductoras de corriente continua reemplazado por un sistema trifásico.

Se realizó el dimensionamiento del sistema eléctrico para los nuevos componentes, incluyendo el cálculo de protecciones, cables y dispositivos de control según normativas vigentes, destacando el cálculo de alimentador principal conductor RV – K 202,7 mm² y un multi conductor para la carga de motores de tipo H07VVH6 – F de 4 x 4 mm².

La evaluación económica realizada permitió implementar el cambio de componentes ya que la propuesta tuvo una inversión de \$128.481.205 versus la compra de un puente grúa nuevo estimado en un valor aproximado de \$1.150.000.000, lo que significó un ahorro del 87,9% del total del costo del activo nuevo.

Los resultados obtenidos de la simulación con el software CAdE_simu permitieron analizar el funcionamiento de motor en partida directa y con la utilización de un variador de frecuencia, además, permitió simular una sobrecarga térmica como protección ante una falla a nivel industrial.

Con respecto a los resultados obtenidos en la prueba de laboratorio, es posible afirmar que el uso de un variador de frecuencia ofrece mejor control sobre el par de arranque del motor. Esto es especialmente beneficioso porque protege la vida útil del embobinado del motor. Cuando se utiliza un variador de frecuencia, se puede ajustar la frecuencia y la velocidad de manera precisa, lo que permite un arranque suave y controlado del motor. Esto significa que se puede evitar la aplicación de un par excesivo durante el arranque, lo que podría dañar el embobinado del motor y reducir su vida útil. Los resultados de la prueba de laboratorio indican que el uso de un variador de frecuencia proporciona beneficios significativos en términos de control del par de arranque y protección del embobinado del motor, lo que conduce a una mayor fiabilidad y vida útil del sistema en su conjunto.

El proyecto concluyó con la instalación de los nuevos componentes, asegurando su correcta integración y puesta en marcha, destacando que la planta concentradora de terminó el comisionamiento del proyecto Rajo Inca desde noviembre del 2024 y a la fecha el puente grúa no ha presentado fallas ni desviaciones, lo que permite concluir que el proyecto resultó exitoso.

BIBLIOGRAFÍA

- Aicrane. (20 de Marzo de 2024). *Aicrane*. Obtenido de <https://aicrane.cl/puente-grua-birriel/>
- Alberti, A. (24 de Agosto de 2020). *¿Cómo calcular la disponibilidad de una máquina?* Obtenido de <https://www.alsglobal.com/es/News-and-publications/2022/06/como-calcular-a-disponibilidad-de-maquinas-e-equipamentos>
- Chapman, S. J. (2012). *Máquinas Eléctricas* (V Edición ed.). Mc Graw Hill.
- Palau, S. (3 de Julio de 2024). *S&P*. Obtenido de *¿Qué es y para qué sirve un variador de frecuencia?*: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/variador-de-frecuencia/>
- Riega, A. (20 de Octubre de 2020). *Arranque de motores trifásicos*.
- Sevencrane. (25 de Junio de 2024). *Sevencrane*. Recuperado el 15 de Abril de 2024, de <https://www.sevencranes.com/overhead-crane/double-girder-overhead-crane/32-ton-double-girder-overhead-crane.html>
- Studocu*. (15 de Mayo de 2024). Obtenido de <https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-politecnico-nacional/electronica-de-potencia/variadores-de-frecuencia/10604319>
- Suarez, L. X. (2017). *VARIADORES DE FRECUENCIA PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTORES ASINCRÓNICOS JAULA DE ARDILLA*. Tesis , FACULTAD DE FILOSOFÍA, LETRAS Y CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN.
- Telemecanique. (s.f.). *Motores eléctricos - Arranque de motores asincronos trifásicos*. Telemecanique. Obtenido de https://llamados.ancap.com.uy/docs_concursos/ARCHIVOS/2%20LLAMADOS%20FINALIZADOS/2018/REF.%2018-2018%20-%20OFICIAL%20TALLER%20B%20-%20PLANTA%20PAYSAND%20C3%9A%20-%20PERFIL%20ELECTRICIDAD/MATERIAL%20DE%20ESTUDIO/ARRANQUE%20DE%20MOTORES%20AS%20C3%8DNCRONOS%20TR

ANEXO A TABLAS DE SECCIÓN DE CONDUCTORES

Tabla N° A.1: Capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados

CABLES PARA TENDIDO FIJO TEMPERATURA DE SERVICIO 90°C. APLICA a THHN, RV, RV-K, RZ1, RZ1-K.					
Sección nominal [mm ²]	Sección en sistema americano [AWG] o [kcmil]	D1	D2	Method E	Method F
		Método de instalación D1. Temp. ambiente 20°C	Método de instalación D2. Temp. ambiente 20°C	Método de instalación E. Temp. ambiente 30°C	Método de instalación F. Temp. ambiente 30°C
1,5	-	19	23	19	-
2,08	14	30	31	28	-
2,5	-	33	38	32	-
3,31	12	38	39	38	-
4	-	42	59	42	42
5,26	10	48	69	50	50
6	-	52	74	54	55
8,37	8	63	89	67	68
10	-	68	98	75	77
13,3	6	80	114	89	93
16	-	89	126	100	105
21,1	4	103	147	114	126
25	-	113	161	127	141
26,7	3	117	167	133	147
33,6	2	132	189	154	172
35	-	136	194	158	176
42,4	1	150	216	178	200
50	-	159	230	192	216
53,5	1/0	170	245	207	234
67,4	2/0	192	278	240	273
70	-	197	282	246	279
85	3/0	218	315	278	318
95	-	232	339	298	342
107,2	4/0	248	362	322	371
120	-	263	386	346	400
126,7	250	270	396	358	415
150	-	296	431	399	464
152	300	299	437	402	468
177,3	350	325	474	444	518
185	-	332	486	456	533
202,7	400	349	510	483	567
240	-	382	563	538	634
253,3	500	393	576	557	657
300	-	431	629	621	736

Notas:

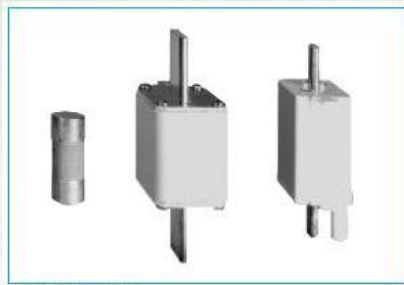
- a) Estos valores de capacidad de corriente aplican para cables aislados sin armadura.
- b) Para tensiones nominales que no excedan 1 kV CA o 1,5 kV CC.
- c) En instalaciones donde los ductos y los cables no están expuestos directamente a radiación solar.
- d) Se deben respetar las condiciones de uso para cada tipo de cable, de acuerdo con lo indicado en la tabla N°4.2.
- e) Las características de los distintos métodos de instalación se indican a continuación:

Método de instalación A1:	Hasta tres conductores monopolares con carga, instalados en ductos embutidos en paredes.
Método de instalación A2:	Cables multiconductores (3 conductores con carga) instalados en ductos embutidos en paredes.
Método de instalación B1:	Hasta tres conductores monopolares instalados en ductos o en bandejas adosadas a paredes.
Método de instalación B2:	Cables multiconductores (3 conductores con carga) instalados en ductos o en bandejas adosadas a paredes.
Método de instalación D1:	Cables monoconductores o multiconductores (3 conductores con carga) instalados en ductos enterrados.
Método de instalación D2:	Cables con cubierta, monoconductores o multiconductores (3 conductores con carga) instalados directamente enterrados.
Método de instalación E:	Cables multiconductores (3 conductores con carga) instalados libremente al aire, en escalerillas porta conductores o en canastillos porta conductores o en bandejas perforadas.
Método de instalación F:	Cables monoconductores (3 conductores con carga), en contacto y en disposición plana, instalados libremente al aire, en escalerillas porta conductores o en canastillos porta conductores o en bandejas perforadas. Para instalaciones enterradas se considera una profundidad de 0,7 metros y una resistividad térmica del suelo de 1 K*m/W.

Tabla N° A.2: Intensidades de corriente admisible en amperes para conductores aislados de uso móvil, cables planos y similares

Sección nominal [mm²]	Sección correspondiente en sistema americano [AWG] o [kcmil]	CABLES TIPO H03VV, H05VV, H05RR, H05RN, H07RN, SPT. Método de instalación E
		Temp. ambiente 30°C
0,5	-	3
0,75	-	6
1	-	10
1,5	-	18,5
2,08	14	22
2,5	-	25
3,31	12	30
4	-	34
5,26	10	40
6	-	43
8,37	8	53
10	-	60
13,3	6	71
16	-	80
21,1	4	91

ANEXO B TIPOS DE FUSIBLES, ITM Y RELÉ TÉRMICO NORMALIZADOS



Cortacircuitos fusibles

aM = Fusible con capacidad para interrumpir parte de las corrientes y uso en motores. Protegen contra altas sobre intensidades hasta su poder de corte nominal, y deben asociarse a dispositivos de protección térmica contra pequeñas sobre intensidades.

La norma chilena NCh 2025/1 para fusibles de baja tensión, de capacidad de ruptura superior a 6 kA y fusión cerrada, indica la siguiente serie de valores de corriente nominal:

2-4-6-8-10-12-16-20-25-32-40-50-63-80-100-125-160-200-250-315-400-500-630-800-1.000-1.250 Amperes

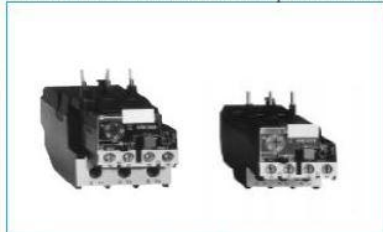
Clases de disparo

Los relés térmicos se utilizan para proteger los motores de las sobrecargas, pero durante la fase de arranque deben permitir que pase la sobrecarga temporal que provoca el pic de corriente, y activarse únicamente si dicho pic, es decir la duración del arranque, resulta excesivamente larga.

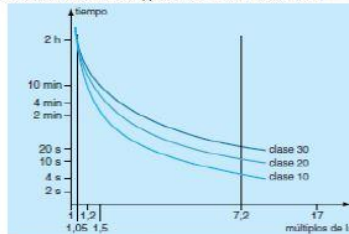
La duración del arranque normal del motor es distinta para cada aplicación; puede ser de tan sólo unos segundos (arranque en vacío, bajo par resistente de la máquina arrastrada, etc.) o de varias decenas de segundos (máquina arrastrada con mucha inercia), por lo que es necesario contar con relés adaptados a la duración de arranque.

La norma IEC 947-4-1-1 responde a esta necesidad definiendo tres tipos de disparo para los relés de protección térmica:

- Relés de clase 10 Válidos para todas las aplicaciones corrientes con una duración de arranque inferior a 10 segundos.
- Relés de clase 20 Admiten arranques de hasta 20 segundos de duración.
- Relés de clase 30 Para arranques con un máximo de 30 segundos de duración.



Relés térmicos LR2-D de Telemecanique



Curvas de disparo de los relés térmicos

Rangos típicos de relés térmicos:

1-1,6 / 1,25-1,6
 1,6-2,5 / 2,5-4
 4-6 / 5,5-8 / 7-10
 9-13 / 12-18 / 17-25
 23-32 / 28-36 / 30-40
 37-50 / 55-70 / 63-80
 80-93