



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

FACULTAD TECNOLÓGICA  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA PARA EL  
CONTROL DE PROCESOS DE EMBARQUE**

Profesor guía: Jonathan Agüero Ferrera

Andrés Alejandro Marín Aróstica  
Jorge Rubén Ramírez Vega

Copiapó, Chile 2024



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

FACULTAD TECNOLÓGICA  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA PARA EL  
CONTROL DE PROCESOS DE EMBARQUE**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título  
de Ingeniero en ejecución en electricidad.

Profesor guía: Jonathan Agüero Ferrera

Andrés Alejandro Marín Aróstica  
Jorge Rubén Ramírez Vega

Copiapó, Chile 2024



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

## DEDICATORIAS

*“Dedico este trabajo primeramente a Dios por darme vida y salud para lograr culminar mi carrera profesional, a mi esposa María José por su amor incondicional y apoyo durante todo este proceso, a mis padres Lina y Humberto los cuales fueron un pilar fundamental para poder concretar mis estudios.”*

*Andrés Marín Aróstica*

*“Este trabajo está dedicado de manera muy especial a mis padres, Jorge y Magali, quienes me enseñaron que con esfuerzo y sacrificio se alcanzan los mejores sueños.”*

*“A mi compañera y amor, María Inés, gracias por estar, por tu paciencia y apoyo, parte de este logro también es tuyo.”*

*“A mis hijos(as), Rubén, Andrés, Antonia y Violeta este es el camino.... y ustedes lo iluminan.”*

*Jorge Ramírez Vega*

# ÍNDICE

DEDICATORIAS .....	ii
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos .....	1
1.3 Planteamiento del problema.....	2
1.4 Antecedentes .....	2
1.5 Justificación.....	3
1.6 Alcance.....	3
CAPÍTULO II .....	5
MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Variadores de frecuencia Sinamics G120 55kW .....	5
2.1.1 Etapas y funcionamiento de un variador de frecuencia. ....	5
2.1.2 Clases de aplicación para los variadores .....	7
2.1.2 Tipo de regulación.....	8
2.3 Autómata programable Siemens PLC S7-300 .....	9
2.3.1 PLC y su funcionamiento.....	9
2.3.2 Partes fundamentales de un PLC.....	10
2.4 TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) .....	11
2.5 Protocolos de comunicación. ....	12
2.5.1 Modelo OSI.....	12
2.5.2 Protocolo Profibus industrial .....	14
2.5.3 Profibus DP .....	15
2.5.3.1 Medio físico .....	16
2.5.4 Red profinet.....	17
2.5.4.1 Profinet IO.....	18

2.5.4.2 Medio físico .....	18
2.6 Simatic Field PG .....	20
2.7 Alimentador de banda .....	21
2.8 Correa transportadora.....	22
2.9 Integrador Thermo Scientific Ramsey Micro-Tech 9000 .....	23
2.10 Motor asincrónico WEG 37 kW. ....	24
2.10.1 Origen de los motores de inducción.....	25
2.10.2 Partes de un motor asincrónico. ....	25
2.10.3 Principio de funcionamiento .....	27
2.10.3 Formas de controlar un motor trifásico.....	27
CAPÍTULO III .....	29
ESTUDIO DE POTENCIA Y CÁLCULO DE ALIMENTADORES. ....	29
3.1 Tag number de equipos en terreno. ....	30
3.2 Cálculo de distancias para circuitos de fuerza. ....	31
3.3. Cálculo de sección de conductores para alimentación de motor.....	33
3.3.1 Datos de motor .....	33
3.3.2 Cálculo de potencia absorbida de motor. ....	34
3.3.3 Método de instalación de conductores. ....	34
3.3.4 Cálculo de sección de conductores por máxima corriente admisible .....	35
3.3.5 Cálculo de sección de conductores por máxima caída de tensión. ....	38
3.3.5.1 Cálculo de sección para alimentador N°1 Planta Magnetita. ....	39
3.3.5.2 Cálculo de sección para alimentador N°2 Planta Magnetita. ....	40
3.3.5.3 Cálculo de sección para alimentador N°3 Planta Magnetita. ....	40
3.3.5.4 Cálculo de sección para alimentador N°4 Planta Magnetita. ....	41
3.3.5.5 Cálculo de sección para alimentador N°5 Planta Magnetita. ....	41
3.3.5.6 Cálculo de sección para alimentador N°1 Cerro Negro Norte. ....	41
3.3.5.7 Cálculo de sección para alimentador N°2 Cerro Negro Norte. ....	41
3.3.5.8 Cálculo de sección para alimentador N°3 Cerro Negro Norte. ....	42
3.3.5.9 Cálculo de sección para alimentador N°4 Cerro Negro Norte. ....	42

3.3.5.10 Cálculo de sección para alimentador N°5 Cerro Negro Norte.....	42
3.3.5.11 Cálculo de sección para alimentador N°6 Cerro Negro Norte.....	43
3.3.6 Resumen para cálculos de conductores.....	43
3.4 Estudio de potencia para definición de variadores de frecuencia .....	44
3.4.1 Power module variador Sinamic G120 .....	44
CAPÍTULO IV.....	46
PARAMETRIZACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA SIEMENS SINAMIC G120.....	46
4.1 Panel de control BOP-2.....	46
4.2 Parametrización de Puesta en marcha con el Operator Panel BOP-2 .....	47
4.2.1 Clase de aplicación.....	48
4.2.2 Ajuste la norma de motor (P100).....	50
4.2.3 Ajuste la tensión de conexión del convertidor (P210). .....	50
4.2.4 Ajuste el tipo de motor (P300).....	50
4.2.5 Introducir código de motor (P301).....	51
4.2.6 Parámetro de motor generales (P304-311).....	51
4.2.7 Refrigeración de motor (P335).....	51
4.2.8 Seleccione el ajuste predeterminado de interfaces del convertidor adecuado para su aplicación (P0015).....	51
4.2.9 Límites de consigna de velocidad (P 1080, 1082). .....	52
4.2.10 Tiempo de rampa de aceleración y desaceleración (P 1120,1121). .....	52
4.2.11 Tiempo de deceleración después del comando DES3 detección rápida (P1135).....	53
4.2.12 Identificación de datos del motor (P1900).....	53
4.2.13 Dirección PROFIBUS / Dirección PB (P0918). .....	54
CAPÍTULO V .....	55
CONFIGURACIÓN DE COMUNICACIÓN PROFIBUS EN PLC PARA VARIADORES DE FRECUENCIA SIEMENS SINAMICS G120. ....	55
5.1 Topología de red profibus a implementar y configuración en TIA Portal. ....	55
5.2 Programación de s7 1500 y comando por telegramas.....	58

5.2.1 Bloque de función STW_VDF_1.....	59
5.2.2 Bloque de función ZSW_VDF_1.....	61
5.2.3 Bloque de función HSW_VDF_1.....	63
5.2.4 Bloque de función HIW_VDF_1.....	65
5.2.5 Bloque de datos globales (DB).....	67
5.3 Pantalla de visualización en DCS.....	68
5.4 Pruebas en taller de comunicación.....	69
CAPÍTULO VI.....	71
SUSTENTABILIDAD Y CONFIABILIDAD DEL PROYECTO.....	71
6.1 Descripción del sistema actual en ruta de embarque.....	71
6.1.1 Datos de rendimiento de correas transportadoras.....	71
6.1.2 Costos del mantenimiento.....	72
6.1.3 Costos del mantenimiento correctivo por detenciones no programadas.....	73
6.1.4 Costos de producción.....	75
6.1.5 Costos indirectos.....	76
6.2 Causas de detenciones no programadas y tiempos de mantenimiento.....	77
6.2.1 Causas de fallas no programadas en la ruta de embarque.....	78
6.3 Cumplimiento de programas de producción.....	80
6.4 Resultados.....	82
6.5 Análisis de costo y beneficio.....	83
6.5.1 Costo de implementación del proyecto.....	83
6.5.1.1 Costo inicial.....	83
6.5.1.2 Costos operativos.....	84
6.6 Beneficios del proyecto.....	86
6.6.1 Reducción de costos por mantenimiento correctivo.....	86
6.6.2 Reducción de tiempos de detención en ruta de embarque.....	86
6.6.3 Mejora en eficiencia operativa.....	86
6.6.4 Optimización del consumo energético.....	87
6.6.5 Mejor cumplimiento del forecast.....	87

6.7 Análisis de rentabilidad del proyecto.....	87
6.7.1 Costos totales de inversión.....	87
6.7.2 Costos operativos anuales. ....	87
6.7.3 Beneficios totales estimados. ....	88
6.7.4 Recomendación del proyecto. ....	88
CONCLUSIONES .....	89
ABSTRACT.....	90
BIBLIOGRAFÍA .....	92

## INDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1 Etapas de variador de frecuencia.....	6
Figura N° 2.2 Convertidores de frecuencia Sinamic G120.....	7
Figura N° 2.3 Prueba de control escalar curva de Velocidad /Voltaje.....	8
Figura N° 2.4 Tabla comparativa de regulaciones.....	9
Figura N° 2.5 PLC s7-317-2 PD/PN CPU.....	11
Figura N° 2.6 Capas de Modelo OSI .	14
Figura N° 2.7 Capas de Modelo OSI Red Profibus .	15
Figura N° 2.8 Cable Profibus estándar.....	17
Figura N° 2.9 Cable Profinet estándar.....	19
Figura N° 2.11 Simatic PG Siemens M6 .....	20
Figura N° 2.12 Alimentador de banda .	21
Figura N° 2.13 Correas transportadoras.....	22
Figura N° 2.14 Electrónica Pesometro Thermo fisher scientific.....	24
Figura N° 2.15 Placa de motor asincrónico WEG 37 kW.....	25
Figura N° 2.16 Partes de un motor de inducción.....	26
Figura N° 3.1 Flujo de correas de embarque área planta magnetita.....	29
Figura N° 3.2 Flujo de correas de embarque área cerro negro norte.....	30
Figura N° 3.3 Plano disposición de canalizaciones correa CT-16 y alimentadores, área CNN.....	32
Figura N° 3.4 Plano disposición de canalizaciones correa CT-07 y alimentadores, área PM.....	32
Figura N° 3.5 Tipos de power module para variadores Sinamics G120.....	45
Figura N° 4.1 Panel BOP-2.....	47
Figura N° 4.2 Guía puesta en marcha variadores Sinamic .....	48
Figura N° 4.3 Clase de aplicación variadores Sinamic .....	49
Figura N° 4.4 Ajuste predeterminado 7 bus de campo profibus.....	52
Figura N° 5.1 Topología de red profibus .	56

Figura N° 5.2 Direccionamiento de red profibus en TIA Portal.....	57
Figura N° 5.3 Telegrama estándar 1 PZD 2/2.....	58
Figura N° 5.4 Telegrama de sinamic red profibus en TIA Portal.....	58
Figura N° 5.5 Bloque de función STW.....	59
Figura N° 5.6 Estructura de bloque de datos para palabra de mando STW.....	60
Figura N° 5.7 Bloque de función ZSW.....	61
Figura N° 5.8 Estructura y variables declaradas del bloque de datos ZSW.....	62
Figura N° 5.9 Bloque de función HSW.....	63
Figura N° 5.10 Estructura de segmentos y variables de bloque de función HSW.....	64
Figura N° 5.11 Bloque de función HIW.....	65
Figura N° 5.12 Estructura de segmentos y variables de bloque de función HIW.....	66
Figura N° 5.13 DB de envío y recepción de datos de otro controlador.....	67
Figura N° 5.14 Tabla de variables de envío y recepción.....	68
Figura N° 5.15 HMI de pruebas en taller.....	68
Figura N° 5.15 Equipos en prueba.....	69
Figura N° 5.15 Pruebas en la programación.....	70
Figura N° 5.15 Parametrización de variador sinamic G120.....	70
Gráfico N° 6.1 Rendimiento actual del sistema de embarque CT-09.....	72
Gráfico N° 6.2 Costos totales del mantenimiento del área de embarque.....	73
Gráfico N° 6.3 Costos de mantenimiento por actividades fuera de programa.....	74
Gráfico N° 6.4 Costos de producción por tonelada año 2023.....	75
Gráfico N° 6.5 Costos de producción por tonelada año 2024.....	76
Gráfico N° 6.6 Consumo energético puerto totoralillo.....	76
Figura N° 6.1 Factura mensual consumo energético Puerto Totoralillo.....	77
Gráfico N° 6.5 Costos por detenciones de ruta de embarque desde 2016 al 2024.....	79
Gráfico N° 6.6 Costos por detenciones de ruta de embarque año 2024.....	79
Gráfico N° 6.7 Cumplimiento del programa de producción año 2023.....	81
Gráfico N° 6.8 Cumplimiento del programa de producción año 2024.....	81
Figura N° 6.2 Transacción SAP MMBE resumen de stock.....	85

## INDICE DE TABLAS

Tabla N° 3.1 Definición de Tag Number en CMP.....	30
Tabla N° 3.2 Definición de Tag Number alimentadores área PM (Planta Magnetita)31	
Tabla N° 3.3 Definición de Tag Number alimentadores área PM (Planta magnetita) 31	
Tabla N° 3.4 Largo de conductores por equipo, área planta magnetita. ....	33
Tabla N° 3.5 Largo de conductores por equipo, área cerro negro norte. ....	33
Tabla N° 3.6 Datos de motor. ....	33
Tabla 3.10 Capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados según su instalación.....	39
Tabla N° 3.11 Sección de conductores del proyecto planta magnetita. ....	43
Tabla N° 3.12 Sección de conductores del proyecto cerro negro norte.....	43
Tabla N° 4.1 Lista de parámetros configurados en Sinamic.....	54
Tabla N° 5.1 lista de direccionamiento de esclavos.....	57
Tabla N° 6.1 Resumen de costos de mantenimiento.....	74
Tabla N° 6.2 Resumen de por fallas en ruta de embarque.....	80
Tabla N° 6.3 Beneficios estimados del proyecto. ....	88

## RESUMEN

El proyecto tuvo como objetivo principal la implementación de 11 variadores de frecuencia SINAMICS G120 con comunicación PROFIBUS DP en motores de 37 kW empleados en correas alimentadoras del área de embarque de la planta de embarque en el Puerto Punto Totalillo. Este proyecto buscó reemplazar partidas directas existentes, reduciendo la variabilidad de la carga en las correas transportadoras, lo que resultó en la optimización de los procesos operativos y una mejora en la eficiencia general del sistema.

Para alcanzar este objetivo general, se realizaron cálculos detallados de los alimentadores eléctricos, considerando la potencia de los motores y la longitud de los circuitos para asegurar un adecuado dimensionamiento del conductor. Asimismo, se determinaron y configuraron las parametrizaciones óptimas de los variadores de frecuencia Siemens.

Se diseñó y configuró un sistema de comunicación mediante el protocolo PROFIBUS DP para la intercomunicación entre PLC y los variadores de frecuencia, permitiendo un control remoto eficiente y la recopilación de datos de las máquinas eléctricas. Finalmente, se llevó a cabo una evaluación integral para demostrar que la implementación del sistema contribuye significativamente a reducir la variabilidad del proceso, validando la viabilidad técnica y los beneficios operativos del proyecto.

## **ABSTRACT**

The main objective of the project was the implementation of 11 SINAMICS G120 frequency converters with PROFIBUS DP communication for 37 kW motors used in feeder belts in the shipment area of the loading plant at Puerto Punto Totoralillo. This project aimed to replace the existing direct start systems, reducing load variability in the conveyor belts, which resulted in the optimization operational processes and improvement overall system efficiency.

To achieve this general objective, detailed calculations of the electrical feeders were carried out, considering the motor power and circuit length to ensure appropriate conductor sizing. In addition, the optimal parameter configurations for Siemens frequency converters were determined and set up.

A communication system using the PROFIBUS DP protocol was designed and configured for intercommunication between the PLC and frequency converters, enabling efficient remote control and data collection from the electrical machines. Finally, a comprehensive evaluation was conducted to demonstrate that the implementation of the system significantly reduces process variability, validating the technical feasibility and operational benefits of the project.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

En la planta del Puerto Totoralillo existen once alimentadores de correas con motores WEG de 50Hp comandados desde sala eléctrica N°234-ER-003 con partida directa. Este sistema es ineficiente para el proceso ya que genera inestabilidad de la carga que se transporta, generando detenciones no programadas y por consiguiente retraso en los despachos de naves de carguío. Para lo cual el proyecto busca implementar la aplicación de variadores de frecuencia para el control de estos motores en cintas alimentadoras y así estabilizar el flujo de carga.

### **1.1 Objetivo general**

Implementar 11 variadores de frecuencia sinamics G120 con comunicación profibus DP, para motores de 37 kW en correas alimentadoras del área de embarque, los cuales sustituirán partidas directas, Este proyecto tiene como objetivo reducir la variabilidad de la carga en las correas transportadoras del área de embarque, optimizando así los procesos operativos y mejorando la eficiencia general del sistema.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Generar cálculo de alimentadores según potencia de motores y largo de circuitos según su caída de tensión.
- Determinar parametrización de variadores de frecuencia Siemens vectorial o escalar para la aplicación.
- Configurar comunicación con protocolo profibus DP, para el control remoto y análisis de datos de cada máquina eléctrica.
- Demostrar que la implementación del proyecto logra disminuir la variabilidad del proceso.

### **1.3 Planteamiento del problema.**

Actualmente se presentan detenciones del proceso de embarque por la inestabilidad de la carga que se transporta sobre las correas transportadoras, esto debido a varios factores como; experiencia de los operadores de cargador frontal, distancia de la carga entre cancha y alimentador, cantidad de equipos de carga (cargadores frontales).

Estas variables generan peaks de carga que a su vez producen; lecturas erróneas en instrumentación peso métrica, desalineamientos y atollo en traspasos de correas, daños a cintas y poleas lo cual lleva a detenciones no programadas, quiebres de programa de mantenimiento e incumplimiento de forecast de producción.

### **1.4 Antecedentes**

La presente propuesta de implementación de variadores se realizó en el Puerto Punta Totalillo, embarcadero perteneciente a la Compañía Minera de Pacífico S.A. (CMP), principal productor de minerales de hierro en la costa americana del Pacífico, creada a inicios de la década de los 80 como continuadora de la Compañía de Acero del Pacífico S.A de la década de los 40 (CAP S.A, 2022).

CAP Minería posee yacimientos importantes en el norte de Chile, como el yacimiento de Cerro Negro Norte, Minas El Romeral y Mina Los Colorados, en donde se explota el mineral, para ser llevado a las plantas procesadoras como Planta Magnetita o Planta Pellets en donde se trata el material recuperando el hierro y formando pellets.

Al finalizar el proceso el tratamiento en hierro gross o pellets, se realiza en el embarque de los Puertos Punta Totalillo o Puerto las losas para su exportación. CAP ha buscado modernizar sus procesos, mejorando la eficiencia energética y la sostenibilidad de sus operaciones. Además, sus productos se exportan principalmente a mercados asiáticos, especialmente a China, el mayor consumidor de mineral de hierro a nivel mundial según (CAP, 2023).

## **1.5 Justificación**

La implementación se enfoca en reducir el exceso de detenciones de un alimentador de banda debido a una carga la cual es inestable; esto puede ser un problema crítico ya que afecta directamente en la productividad de la planta.

El desarrollo e implementación de la propuesta daría un sistema de control y monitoreo de las funciones, lo cual permite una respuesta rápida ante eventos anómalos, facilitando la identificación temprana de problemas y optimizando la operación del alimentador de banda, garantizando un funcionamiento que es más estable, así como continuo.

Lo anterior mencionado, también se relaciona con un interés personal en la optimización de procesos industriales, ya que el área industrial minero, lleva a garantizar equipos funcionalmente óptimos, también realizaría un aporte importante en tener soluciones más prácticas que pueden ser implementadas en diversas plantas de producción.

## **1.6 Alcance**

El objetivo del proyecto es diseñar un sistema de control mediante variadores de frecuencia en los motores de las correas alimentadoras. Para ello, se realizará primero un estudio detallado de los alimentadores a utilizar, seguido de la implementación de la parametrización de los variadores Siemens Sinamics G120 y la configuración de la comunicación PROFIBUS. Esto permitirá demostrar la sustentabilidad y confiabilidad del proyecto. El propósito principal es optimizar y controlar el flujo de carga transportado por las correas de embarque, reduciendo la variabilidad del proceso y las detenciones no programadas.

La implementación de esta propuesta tiene el potencial de incrementar significativamente tanto la eficiencia en la producción como en el mantenimiento de la planta. Al reducir las detenciones, se evitarían los retrasos actuales en la cadena de producción, lo que resultaría en un aumento de la productividad. Además, la mejora en el control y la estabilidad operativa disminuiría la necesidad de intervenciones correctivas, optimizando los recursos de mantenimiento y reduciendo los costos asociados.

De esta manera, la propuesta no solo aborda un problema específico, sino que resuelve un desafío importante y generalizado en la industria minera. Su implementación generará un impacto positivo en la eficiencia operativa, productiva y de mantenimiento en las plantas concentradoras mineras, mejorando la rentabilidad y asegurando una mayor sostenibilidad a largo plazo.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

En el presente capítulo se describen conceptos relevantes para la implementación de variadores de frecuencia en los sistemas de control de procesos de embarque; analizando su funcionamiento, beneficios y aplicaciones específicas. Se explorarán los principios de operación de los variadores, su integración con sistemas de automatización y las tecnologías de comunicación que permiten su supervisión y control.

#### **2.1 Variadores de frecuencia Sinamics G120 55kW**

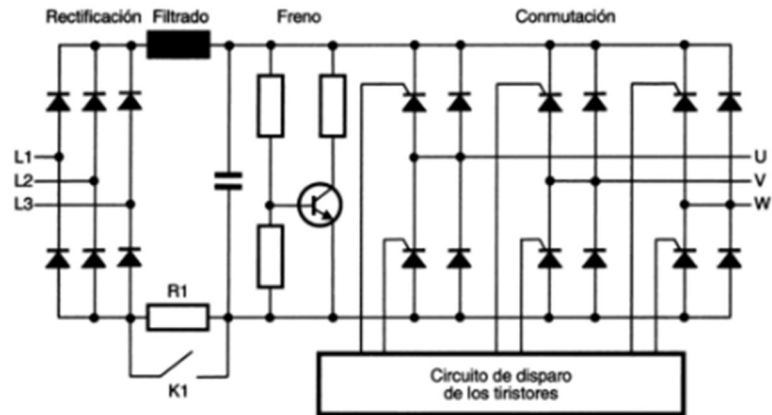
El control de procesos y el ahorro de energía son las dos principales razones para el empleo de variadores de frecuencia. Históricamente, los variadores de frecuencia fueron desarrollados originalmente para el control de procesos, pero el ahorro energético ha surgido como un objetivo tan importante como el primero.

El variador de frecuencia es un dispositivo electrónico que permite controlar y regular la velocidad de motores eléctricos de inducción, esta regulación se realiza por medio del control de la frecuencia de alimentación que se le suministra al motor. Estos permiten el correcto funcionamiento de los motores eléctricos, ya que regulan la velocidad a la cual funcionan.

##### **2.1.1 Etapas y funcionamiento de un variador de frecuencia.**

En la figura 2.1 se logra observar las diferentes etapas que componen un variador de frecuencia.

**Figura N° 2.1 Etapas de variador de frecuencia**



Fuente: Convertidores de frecuencia, controladores de motores y SRR (2000)

Las diferentes etapas que componen este variador de frecuencia son:

- **Rectificador:** esta etapa convierte la red de suministro de corriente alterna en continua, monofásica o trifásica mediante diodos potencia, que permiten el flujo de corriente en una sola dirección, Pero la corriente continua no está exenta de componentes de CA y armónicos residuales. Requiere un mayor filtrado.
- **Bus de continua:** mediante condensadores de potencia, almacenan y filtran la corriente continúa suavizando la onda pulsante obtenida de la etapa de rectificación y reserva energía suficiente para proporcionar la intensidad requerida por el motor.
- **Inversión:** desde la tensión del bus de corriente continua, En esta etapa, la corriente continua se convierte nuevamente en corriente alterna, pero con frecuencia y voltaje ajustables. Esto se logra principalmente con transistores bipolares IGBT o tiristores SCR. Como resultado se genera una corriente alterna que puede ser ajustada según las necesidades del motor, permitiendo un control preciso de la velocidad y el torque.
- **Control y entradas y salidas:** Regula la frecuencia y el voltaje aplicados al motor en función de las necesidades del proceso. Los circuitos de control con

microprocesadores y procesadores ejecutan algoritmos de control para la protección, regulación, entradas y salidas, tanto analógicas como digitales. Además, se incluye el interfaz de comunicaciones con buses u otros dispositivos de control y usuario.

El variador de frecuencia Sinamics G120, es un convertidor apto para una gran gama de aplicaciones, Siemens en 2005 lanzó la serie SINAMICS que incluye tanto el módulo de control, como el módulo de potencia.

Control Unit controla y vigila el Power Module y el motor conectado. Permite la comunicación controlando el convertidor de modo local o centralizado.

Power Module para motores en un rango de potencia de 0,37 kW a 250 kW. Para un funcionamiento flexible del motor con la máxima fiabilidad se emplea la tecnología IGBT más moderna con modulación PWM.

**Figura N° 2.2 Convertidores de frecuencia Sinamic G120**



Fuente: Convertidores estándar Sinamic (2024)

### **2.1.2 Clases de aplicación para los variadores**

Existe gran variedad de aplicaciones al momento de integrar un variador de frecuencia en cualquier proceso, el cual según Siemens (2022) nos presenta dos aplicaciones para el proceso de producción.

- Standard Drive Control (SDC): Se centra en el control básico de velocidad y torque. Es ideal para aplicaciones que requieren un control efectivo y confiable

sin necesidad de dinámicas complejas. Adecuado para aplicaciones donde las condiciones de carga son estables y no requieren cambios rápidos.

- Dynamic Drive Control (DDC): Está diseñado para aplicaciones más dinámicas y complejas, donde se requieren respuestas rápidas y precisas a cambios en la carga y en las condiciones de operación.

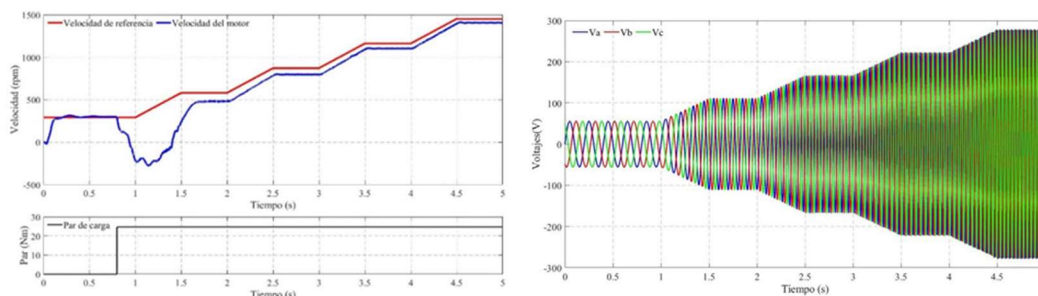
### 2.1.2 Tipo de regulación

Los variadores de frecuencia utilizan diferentes métodos de control para gestionar el funcionamiento de los motores eléctricos, siendo los más comunes el control escalar y el control vectorial.

- El control escalar: también conocido como control por voltaje/frecuencia (V/f), ajusta la frecuencia y el voltaje de manera proporcional para controlar la velocidad del motor. Se utiliza cuando no hay grandes requisitos de respuestas dinámicas de un motor.

Existe una relación directa entre voltaje y frecuencia en una curva donde se ajusta el voltaje de salida del variador en función de la frecuencia de operación. Normalmente, la curva es lineal en el rango nominal.

**Figura N° 2.3 Prueba de control escalar curva de Velocidad /Voltaje**



a) Par de carga y seguimiento de velocidad

b) Voltaje de control

Fuente: Estudio de co-simulación escalar en Instituto Tecnológico de Celaya México (2022).

- Control vectorial: es un método más avanzado y preciso, que regula de manera independiente el par y el flujo de corriente voltaje del motor, utiliza modelos matemáticos para separar o descomponer la corriente, permitiendo controlar

ajustar tanto la magnitud como el ángulo del campo magnético en el estator y el rotor.

Descompone la magnitud de la corriente del motor en 2 vectores. Un vector para controlar la corriente de magnetización o excitación inducida en el rotor del motor para controlar el torque. El otro vector controla el flujo de corriente y voltaje de línea en el estator para controlar la velocidad.

Los variadores SINAMIC implementan internamente un modelo predefinido de control escalar y vectorial en sus máquinas determinando establecidos en su configuración.

**Figura N° 2.4 Tabla comparativa de regulaciones.**

Característica	Control Escalar (V/f)	Control Vectorial
<b>Complejidad</b>	Simple	Complejo
<b>Precisión</b>	Baja precisión, control indirecto	Alta precisión, control directo
<b>Control del par</b>	No ofrece control preciso del par	Control preciso del par en tiempo real
<b>Costo</b>	Bajo	Más alto debido a la mayor complejidad
<b>Rendimiento</b>	Adecuado para aplicaciones sencillas	Ideal para aplicaciones críticas
<b>Aplicaciones</b>	Ventiladores, bombas, cintas transportadoras	Grúas, ascensores, aplicaciones de servomotores

## 2.3 Autómata programable Siemens PLC S7-300

### 2.3.1 PLC y su funcionamiento.

Un controlador lógico programable, es un dispositivo electrónico especializado en la automatización de procesos industriales, capaz de recibir, analizar, resolver y tomar acción en una máquina o proceso en diferentes situaciones deseadas por un usuario mediante un lenguaje no informático en tiempo real. Diseñado para recibir información de sensores y dispositivos de entrada, procesarla con base en un programa predefinido y luego generar señales de salida para controlar actuadores como motores, válvulas o accionamientos.

### 2.3.2 Partes fundamentales de un PLC.

- Unidad de procesamiento CPU: Es el "cerebro" del PLC. Se encarga de ejecutar el programa lógico almacenado en su memoria, procesar las señales de entrada y generar las señales de salida necesarias para controlar el sistema.
- Memoria: Almacena tanto el programa que controla el PLC como los datos que se utilizan durante la ejecución del programa.
- Módulo de Entradas: Recibe las señales de entrada desde los dispositivos de campo como sensores, interruptores y botones.
- Módulo de Salidas: Envía señales de salida para controlar los actuadores como motores, relés, válvulas, y sistemas de iluminación.
- Fuente de Alimentación: Suministra energía eléctrica al PLC para que pueda funcionar. Convierte la energía de la red eléctrica en voltajes apropiados para los componentes internos del PLC.
- Módulo de comunicación: Facilita la comunicación entre el PLC y otros dispositivos como HMI (interfaz hombre máquina) o redes industriales como Profinet o Profibus DP.

En este caso se utilizará un PLC de la marca Siemens de tipo modular, ya que se puede adaptar al requerimiento del usuario agregando, quitando o reemplazando los módulos.

**Figura N° 2.5 PLC s7-317-2 PD/PN CPU.**



Fuente: Siemens AG 2024

La lógica de control que acepta este autómata programable es Ladder el cual se caracteriza por representar gráficamente el circuito de control de un proceso, con ayuda de símbolos de contactos normalmente cerrados (N.C.) y normalmente abiertos (N.A.), relés, temporizadores, contadores, registros de desplazamiento, etc. Cada uno de estos símbolos representa una variable lógica cuyo estado puede ser verdadero o falso.

#### **2.4 TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal)**

Es un software el cual entrega diferentes herramientas de automatización totalmente integradas en la aplicación. Tía portal es un software el cual contiene conjunto de reglas programables que permite que el equipo de hardware funcione según las necesidades del proceso. El software normalmente se almacena en un dispositivo de memoria no volátil (memoria flash, ROM, discos duros y cintas magnéticas). Un software PLC es el corazón del sistema PLC y se compone de instrucciones, funciones y elementos utilizados para monitorear o controlar el PLC. te proporciona acceso sin restricciones a nuestra gama completa de servicios de automatización digitalizada, desde la planificación digital y la ingeniería integrada hasta la operación transparente.

## **2.5 Protocolos de comunicación.**

Un protocolo de comunicación es un conjunto de reglas y estándares que permiten a dos o más dispositivos intercambiar información de manera efectiva y precisa a través de una red o medio de transmisión. Estos protocolos definen cómo los datos deben ser empaquetados, transmitidos, recibidos y verificados para garantizar que la información se entregue correctamente y sin errores.

Se ha establecido de forma serial que un mensaje será enviado desde un equipo de terreno, Unidad Terminal Remota (RTU) a un equipo que procesa el dato, como un PLC, Unidades terminales Maestro (MTU) mediante una serie de bits digitales, por tanto, un código se encargará de decirnos cuál es el significado de cada bit en una comunicación serial. Este código se codifica al inicio de la transmisión y se decodifica al final de la transmisión.

Para entender mejor cómo funcionan los protocolos, se suele hacer referencia al modelo OSI (Open Systems Interconnection).

### **2.5.1 Modelo OSI**

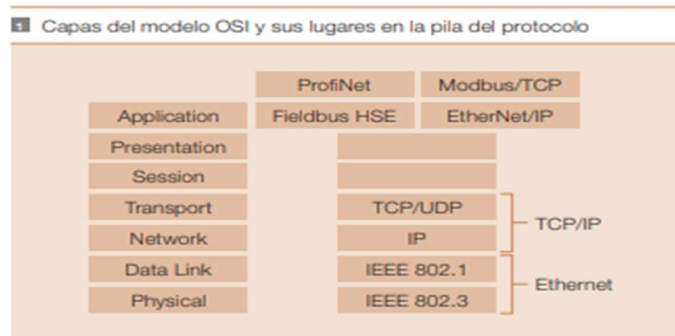
También conocido como Interconexión de Sistemas Abiertos o Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos, creado por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) en 1970. divide la comunicación en siete capas. Cada capa tiene una función específica y se encarga de manejar un aspecto diferente de la transmisión de datos. Los protocolos de comunicación a menudo operan en una o más de estas capas.

- Física: Establece los elementos físicos involucrados en la transferencia de datos, como los tipos de medios de transmisión (cables, fibra óptica, señales inalámbricas), la tasa de transferencia de datos, y las señales eléctricas o técnicas de modulación empleadas para transmitir la información en bits. Un ejemplo de esto incluye Ethernet, RS232 o RS485.
- Enlace de datos: Es responsable de establecer una conexión sin errores entre dos nodos que están conectados de manera directa y gestionar el acceso al medio compartido.

- Red: Define cómo los paquetes de datos son enrutados desde el origen hasta el destino. Incluye el direccionamiento lógico (como las IP en Internet) y los algoritmos de enrutamiento.
- Transporte: Garantiza la transmisión confiable de datos desde un dispositivo de origen hasta un dispositivo de destino, gestionando el control de flujo y la corrección de errores.
- Sesión: Gestiona y controla las sesiones de comunicación entre dispositivos, estableciendo, manteniendo y finalizando la comunicación.
- Presentación: Traduce los datos a un formato que las aplicaciones puedan entender. También se encarga de la encriptación, compresión, y la codificación de los datos.
- Aplicación: Proporciona las interfaces de usuario final y las aplicaciones que permiten a los dispositivos utilizar la red para enviar o recibir datos.

Los protocolos de comunicación son esenciales para el intercambio de datos en redes de todo tipo, desde redes industriales hasta Internet. Proporcionan las reglas y procedimientos necesarios para que la información sea transmitida de manera efectiva, garantizando la interoperabilidad, eficiencia y seguridad en las comunicaciones. Cada protocolo está diseñado para satisfacer las necesidades específicas de su aplicación, ya sea para la transmisión de datos en tiempo real en la industria o la navegación en la web.

**Figura N° 2.6 Capas de Modelo OSI.**



Según: Revista ABB 2/2006

### 2.5.2 Protocolo Profibus industrial

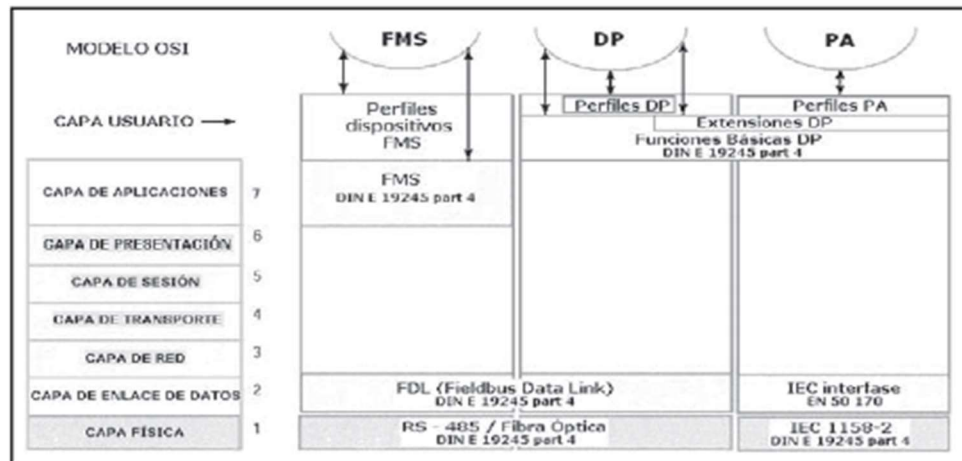
Es un protocolo de comunicación estándar, desarrollado para la automatización industrial, utilizado para la interconexión y control de dispositivos de campo, como sensores, actuadores, PLCs y sistemas de control distribuido. Es uno de los sistemas de comunicación más ampliamente adoptados en la automatización de procesos y manufactura debido a su robustez y capacidad para manejar grandes volúmenes de datos en tiempo real.

Profibus fue desarrollado por empresas alemanas Bosch, Klöckner Möller y Siemens en la década de los 80, este protocolo fue diseñado como un sistema de bus de campo abierto, que no dependiera de ningún fabricante en un entorno industrial.

El estándar original se lanzó en 1989 bajo el nombre DIN 19245, y desde ese momento ha sido constantemente actualizado para ajustarse a las demandas cambiantes de la automatización industrial. En la actualidad, Profibus está gestionado por la organización PI (PROFIBUS & PROFINET International), que garantiza la interoperabilidad entre dispositivos y el desarrollo continuo del protocolo.

Este protocolo está basado en el modelo OSI y utiliza tres capas separadas: la capa de aplicación, la capa de enlace de datos y la capa física. Hay dos variantes principales de Profibus que están adaptadas a diferentes tipos de aplicaciones industriales, tal como Profibus DP y PA, nos centraremos en Profibus DP.

**Figura N° 2.7 Capas de Modelo OSI Red Profibus .**



Según: Antonio Creus Instrumentación industrial octava edición, 2010.

### 2.5.3 Profibus DP

Por sus siglas DP (Decentralized Peripherals) periferia descentralizada es una versión del protocolo PROFIBUS diseñado para la comunicación rápida y eficiente entre un controlador PLC y dispositivos de campo como sensores, actuadores y módulos de E/S (entrada y salida) en aplicaciones industriales. Su principal enfoque es la automatización discreta, donde la velocidad y el control en tiempo real son críticos, como en líneas de producción y sistemas de control de maquinaria, sus principales características son:

- Alta velocidad de transmisión: Se distingue por proporcionar velocidades de transferencia elevadas, que pueden alcanzar hasta los 12 Mbps. Esto facilita un intercambio de datos ágil y en tiempo real, ideal para sistemas donde la sincronización y la rapidez de respuesta son esenciales.
- Arquitectura maestro-esclavo: La comunicación sigue una estructura maestro-esclavo, donde el dispositivo maestro PLC o controlador gestiona la comunicación en el bus, y los dispositivos esclavos (sensores, actuadores, etc.) responden a las solicitudes del maestro. Esto garantiza un intercambio de datos eficiente y estructurado dentro del sistema.

- **Compatibilidad con otros protocolos:** es compatible con otros protocolos y tecnologías, como Profinet (Ethernet industrial), lo que facilita la conexión con redes de nivel superior o sistemas de control distribuido (DCS). Esto permite una integración fluida entre diferentes niveles de automatización.
- **Diagnóstico y monitoreo:** Brinda funciones avanzadas de diagnóstico, lo que posibilita la identificación y notificación de fallos en la red o en los dispositivos conectados. Esto favorece el mantenimiento predictivo y disminuye los períodos de inactividad.
- **Limitaciones:** Admite una amplia variedad de dispositivos en una única red, permitiendo la conexión de hasta 126 nodos (maestros y esclavos combinados) en un solo bus. Esto lo convierte en una opción ideal para instalaciones industriales que necesitan integrar numerosos dispositivos en un mismo sistema de control.

#### **2.5.3.1 Medio físico**

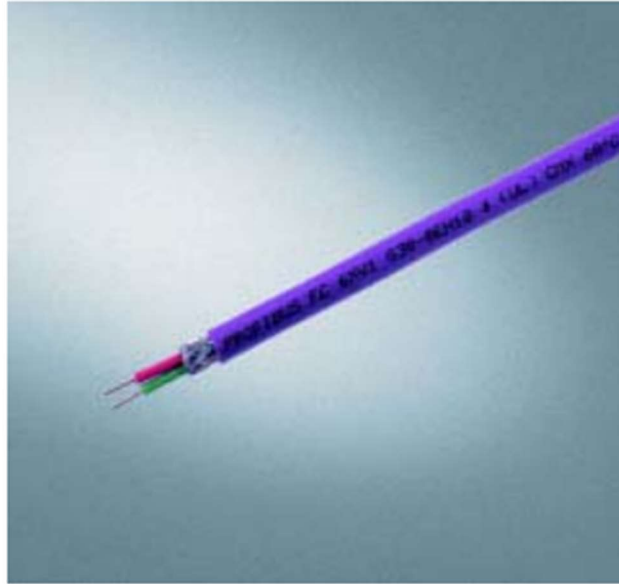
Los cables utilizados en una red Profibus DP o rs485 es un par trenzado de cobre apantallado que difieren por sus recubrimientos y tipo de alambre.

Para una red Profibus DP por norma IEC 61158/EN 50 170:

- **Conexión A:** conductores verdes
- **Conexión B:** conductores rojos

Los núcleos internos de los alambres están recubiertos por aislantes de color verde o rojo. Conductores de igual color tienen que conectarse unificadamente en la misma conexión A o B en todos los terminales de bus y en general en todas las conexiones de bus de un segmento.

**Figura N° 2.8 Cable Profibus estándar.**



Según: Siemens IK PI, 2004 IEC 61158/EN 50170.

#### **2.5.4 Red profinet**

Es un estándar de red industrial que utiliza Ethernet como medio de comunicación para la automatización de procesos y fabricación, permite la interconexión y comunicación entre dispositivos de campo, controladores y sistemas de supervisión (como SCADA y HMI), proporcionando una plataforma robusta y adaptable para la integración de sistemas.

En el año 2003 se introduce profinet un protocolo basado en Ethernet industrial, como evolución de Profibus. Fue desarrollado por “PROFIBUS & PROFINET International” (PI) con el objetivo de ofrecer una solución más flexible, con capacidad de integrar el control en tiempo real, la automatización de procesos y la conectividad con redes empresariales.

La velocidad de la red depende del tipo de comunicación utilizada, ya que está basada en Ethernet industrial, su velocidad es de 100 Mbps. Esta es la velocidad típica de la mayoría de las aplicaciones Profinet y es suficiente para la mayoría de las tareas de automatización industrial.

Existen varios tipos de red Profinet, diseñados para diferentes aplicaciones en el entorno industrial. Estos tipos permiten cubrir distintas necesidades de comunicación, desde la integración de dispositivos simples hasta la ejecución de tareas en tiempo real y la automatización distribuida, algunos como Profinet IO, CBA, IRT, RT y MRP. Nos centraremos en Profinet IO.

#### **2.5.4.1 Profinet IO**

Es una de las redes más utilizadas en el mercado diseñada específicamente para la comunicación entre controladores como PLC y dispositivos remotos de entrada y salida, como sensores, actuadores, y otros dispositivos de campo en una red industrial.

Este protocolo cuenta con una topología de red flexible como línea, estrella, anillo y árbol, permitiendo a los técnicos diseñar redes de acuerdo con la disposición física de los equipos en la planta, lo que facilita la expansión y reconfiguración de la red cuando sea necesario.

#### **2.5.4.2 Medio físico**

Los cables utilizados en este protocolo son ethernet industrial, Cable de bus estándar (4 hilos) categoría 5e, con un aislamiento de polietileno y PVC en su recubrimiento. Este tipo de cable soporta velocidades de hasta 100 Mbps en aplicaciones Fast Ethernet y 1 Gbps en aplicaciones Gigabit Ethernet, se considera un máximo de 100 metros por segmento, en caso de aumentar el tramo se puede utilizar switches o fibra óptica que puede llegar hasta los 26 km de distancia.

**Figura N° 2.9 Cable Profinet estándar.**



Según: data sheet 6XV18402AH10 ,2024.

**Figura N° 2.10 Tabla de medios físicos.**

Propiedad física	Técnica de conexión	Tipo de cable / medio de transmisión	Velocidad de transferencia / Servicio	Long. máx. segmento	Ventajas
		<b>Estándar</b>			
Eléctrica	Conector RJ 45 ISO 60603-7	100Base-TX Cable de cobre de par trenzado 2x2, simétrico y apantallado, exigencia de transmisión según CAT 5 IEEE 802.3	100 Mbits/s / dúplex	100 m	Conexión de cable simple y económica
Óptica	SCRJ 45 ISO/IEC 61754-24	100Base-FX Cable de fibra óptica POF (Polymer Optical Fiber) 980/1000 µm (sección del núcleo/sección externa) ISO/IEC 60793-2	100 Mbits/s / dúplex	50 m	Uso con grandes diferencias de potencial Insensible a la radiación electromagnética Baja atenuación del cable Posibilidad de segmentos considerablemente más largos
		Fibra óptica recubierta de plástico (Polymer Cladded Fiber, PCF) 200/230 µm (sección del núcleo/sección externa) ISO/IEC 60793-2	100 Mbits/s / dúplex	100 m	
	BFOC (Bayonet Fiber Optic Connector) y SC (Subscriber Connector) ISO/IEC 60874	Cable de fibra óptica – fibra monomodal 10/125 µm (sección del núcleo/sección externa) ISO/IEC 60793-2	100 Mbits/s / dúplex	26 km	
		Cable de fibra óptica – fibra multimodal 50/125 µm y 62,5/125 µm (diámetro de núcleo/diámetro exterior) ISO/IEC 9314-4	100 Mbits/s / dúplex	3000 m	

Según: Manual de sistema de red Profinet, 2012.

## 2.6 Simatic Field PG

El simatic field PG es un hardware de siempre utilizado para la programación en campo, actualmente este consta de TIA Portal preinstalado para una configuración, puesta en marcha, servicio y mantenimiento rápidos y eficientes.

Este equipo es robusto soporta todo tipo de condiciones industriales, incluso las más extremas (choques, vibraciones o perturbaciones electromagnéticas), y automatiza todo tipo de tareas a través de conexiones PROFIBUS y PROFINET.

El equipo cuenta con un procesador Intel® Core™ i5-8400H (8ª generación, 4 cores, 8 threads), 8 MB Cache, hasta 4.2 GHz con tecnología turbo boost. Una memoria RAM de 8 / 16 / 32 GB DDR4-SDRAM, 2666 MHz y un disco sólido de 250 GB/500 GB /1TB

**Figura N° 2.11 Simatic PG Siemens M6**



Fuente: Productos Siemens, Controladores Simatics.

## 2.7 Alimentador de banda

El alimentador de banda es una correa transportadora de corto alcance, con grandes tolvas que almacenan cargas, especialmente de finos, la cual distribuyen de manera uniforme en correas transportadoras a través de un buzón o chute de traspaso.

Están equipos de una correa de no más de 20 metros de largo y los anchos rodean desde las 10” hasta las 80”, cuentan con una gran cantidad de polines de impacto, los cuales cumplen la función de amortiguar la carga que cae desde la altura y a su vez distribuyen longitudinalmente.

Su fuerza de movimiento y tracción la cumplen a través de motores eléctricos asíncronos conectados a grandes reductores capaces de mover cargas a grandes torques.

**Figura N° 2.12 Alimentador de banda.**



Fuente: Puerto Totoralillo, alimentador de banda, cancha embarque CNN.

## 2.8 Correa transportadora

Las correas transportadoras tienen la función de transportar materiales a granel o finos desde un lugar a otro de manera uniforme y continuo, es uno de los equipos más utilizados hoy en la minería, por su confiabilidad y su disminución de operarios en la operación.

La primera correa transportadora fue creada por el fabricante e inventor Thomas Robbins quien diseñó un sistema de cinta transportadora para transportar carbón y minerales para la empresa Thomas Edison's Ore-Milling Company. Las correas transportadoras cuentan con los siguientes componentes: Faja o cinta, Poleas o tambores, Polines, Contrapeso, Motor, Reductor, Raspadores, Mesa y Periféricos de seguridad.

La relevancia de una cinta transportadora radica en su capacidad para mejorar la eficiencia y la productividad. Esto abarca el proceso de transporte de materiales o productos en una gran variedad de industrias, al ser automatizado la producción se vuelve rápida y consigue volúmenes elevados.

**Figura N° 2.13 Correas transportadoras.**



Fuente: Puerto Totalillo, correas transportadoras, cancha embarque CNN.

## **2.9 Integrador Thermo Scientific Ramsey Micro-Tech 9000**

El piezómetro es un equipo electromecánico, que ayuda a monitorear y controlar la producción de las cintas transportadoras, A través de celdas de pesaje, sensores y una unidad de control se puede medir el flujo de la carga y la velocidad del transportador, así mismo podría modificar la velocidad del equipo.

Un Pesómetro está montado directamente sobre la plataforma de una correa transportadora. El conjunto del Pesómetro contiene los polines de peso y la celda de carga que detecta el peso que pasa sobre el conjunto. La carga que está sobre la correa pasa a los polines de peso y luego a la celda de carga. La salida de la celda de carga es proporcional al peso sobre el Pesómetro.

Un sensor de velocidad de la correa está directamente conectado a la polea de cola de la correa o a uno de los polines de retorno de diámetro grande. El sistema electrónico de la balanza acepta dos señales de entrada (una para la velocidad de la correa y la otra para la lectura de la celda de carga) y las convierte en señales eléctricas equivalentes a las toneladas métricas totales que pasan por la correa transportadora y las toneladas métricas instantáneas por hora.

**Figura N° 2.14 Electrónica Pesómetro Thermo fisher scientific.**



Fuente: Pesómetro Correa CV-016 Candelaria, 2023.

### **2.10 Motor asincrónico WEG 37 kW.**

Los motores trifásicos son un tipo de motor eléctrico que funciona con un sistema trifásico de corriente alterna (CA), son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales y comerciales debido a su eficiencia, capacidad de manejar cargas pesadas y facilidad de control.

**Figura N° 2.15 Placa de motor asincrónico WEG 37 kW.**



Fuente: Placa de motor feeder Puerto Punta Totalillo, 2024.

### **2.10.1 Origen de los motores de inducción.**

El motor de inducción fue inventado por el ingeniero serbio Nikola Tesla en 1887. Es uno de los tipos de motores eléctricos más utilizados en la industria debido a su simplicidad, robustez y bajo coste. La denominación "asíncrono" proviene del hecho de que la velocidad del rotor no es igual, si no menor a la velocidad del campo magnético giratorio del estator, de ahí el término "a sincronía".

### **2.10.2 Partes de un motor asincrónico.**

El motor de inducción trifásico está compuesto fundamentalmente según WEG 2024, por dos partes: estator y rotor. El estator es la parte fija con devanados trifásicos que generan un campo magnético giratorio al ser alimentados con corriente alterna y el Rotor, parte móvil que puede ser de polos salientes (para baja velocidad) o cilíndrico (para alta velocidad). Se magnetiza para sincronizarse con el campo magnético del estator.

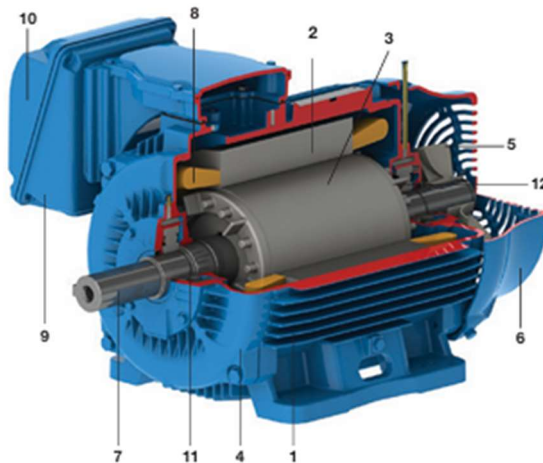
En el estator se compone de:

- Carcasa: es la estructura soporte del conjunto de construcción robusta en hierro fundido, acero o aluminio inyectado, resistente a corrosión y normalmente con aletas (1).
- Núcleo de chapas: hechas de acero magnético (2).
- Devanado trifásico: tres conjuntos iguales de bobinas, una para cada fase, formando un sistema trifásico equilibrado ligado a red trifásica de alimentación (8).

Y en el rotor:

- Eje: transmite la potencia mecánica desarrollada por el motor (7).
- Núcleo de chapas: las chapas poseen las mismas características de las chapas del estator (3).
- Barras y anillos de cortocircuito: son de aluminio inyectado sobre presión en una única patasca (12).
- otras partes: Ventilador (5) Tapa deflectora (6) Caja de conexión (9) Terminales (10) Rodamientos (11)

**Figura N° 2.16 Partes de un motor de inducción.**



Según: Guía de especificaciones de motores eléctricos WEG, 2020.

### **2.10.3 Principio de funcionamiento**

En los motores de inducción, el estator crea un campo magnético giratorio debido a la alimentación de corriente alterna. Este campo magnético variable genera un cambio de flujo magnético en el rotor. Como consecuencia, por la ley de Faraday, se induce una corriente eléctrica en las barras conductoras del rotor, lo que a su vez produce un campo magnético en el rotor.

Este campo inducido interactúa con el campo del estator, generando una fuerza que mueve el rotor. Es así cómo se transforma la energía eléctrica en energía mecánica en los motores de inducción. La velocidad del rotor es siempre un poco menor que la del campo magnético, de ahí el término asíncrono.

### **2.10.3 Formas de controlar un motor trifásico.**

La mayoría de las redes eléctricas industriales suministran energía trifásica, lo que hace que los motores trifásicos asíncronos sean una opción práctica y eficiente para una variedad de aplicaciones en el mundo industrial. La velocidad de un motor asíncrono depende del diseño del motor y de la frecuencia de la fuente de alimentación, generalmente, estos motores tienen velocidades nominales estandarizadas, como 1800 RPM (revoluciones por minuto) o 3600 RPM, en sistemas de 60 Hz, y 1500 RPM o 3000 RPM en sistemas de 50 Hz.

Para controlar un motor asíncrono trifásico, existen varias técnicas y dispositivos que permiten variar la velocidad y la dirección de rotación, así como brindar protección y control en diferentes situaciones. Algunas de las formas más comunes de controlar un motor asíncrono trifásico son las siguientes:

- Arranque directo: Conecta el motor directamente a la red eléctrica trifásica, permitiendo que arranque a su velocidad nominal sin un encendido suave. Se utiliza en aplicaciones sin grandes cargas inerciales.
- Arranque estrella-delta: Disminuye la corriente de arranque en motores de alta potencia. Inicialmente, se conecta en configuración estrella para reducir la corriente, y luego se cambia a delta para el funcionamiento normal.

- Arranque suave (soft-start): esta técnica permite un arranque gradual del motor, evitando picos de corriente durante el encendido. Se utilizan dispositivos electrónicos, como arrancadores suaves, para controlar gradualmente la velocidad del motor hasta alcanzar su valor nominal.
- Variadores de frecuencia (inversores de frecuencia): estos dispositivos permiten controlar la velocidad del motor ajustando la frecuencia de la corriente suministrada al motor. Al cambiar la frecuencia, se modifica la velocidad del campo magnético giratorio del estator, lo que resulta en un cambio de velocidad en el motor. Los variadores de frecuencia también pueden proporcionar protección contra sobrecarga, cortocircuitos y otras condiciones anormales.

### CAPÍTULO III

#### ESTUDIO DE POTENCIA Y CÁLCULO DE ALIMENTADORES.

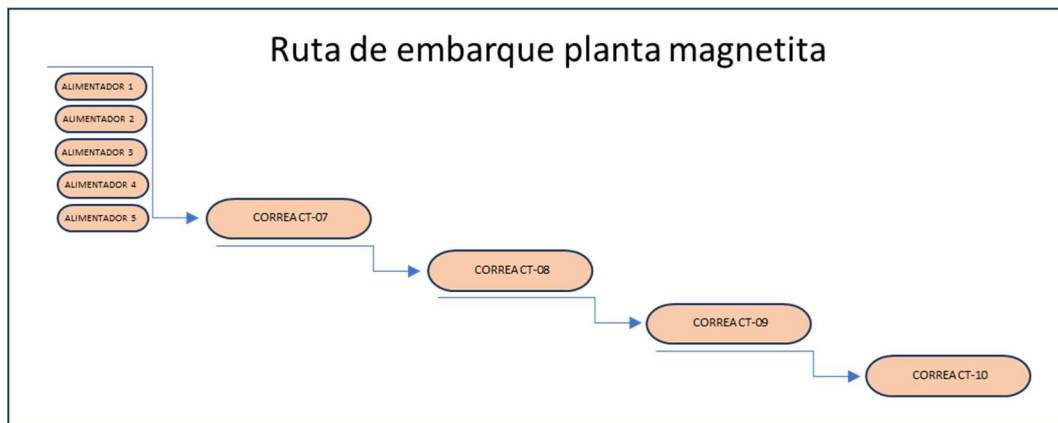
En este capítulo se proponen los cálculos de alimentadores según caída de tensión, donde para ello se realiza un estudio de largo y tendido de circuito, además de establecer variadores de frecuencia apropiados a la potencia de motores, también se asignan los tags de equipos en terreno.

En puerto Totoralillo se trabaja con dos áreas en el proceso, estas pertenecen a la mina Cerro Negro Norte (CNN) y Planta Magnetita (PM), cada una con una cancha de acopio de 350.000 toneladas de capacidad.

Estas áreas cuentan con su propio sistema de recepción de alimentadores y embarque distribuidos por correas.

La ruta de embarque planta magnetita, está compuesta por la siguiente estructura, según figura 3.1.

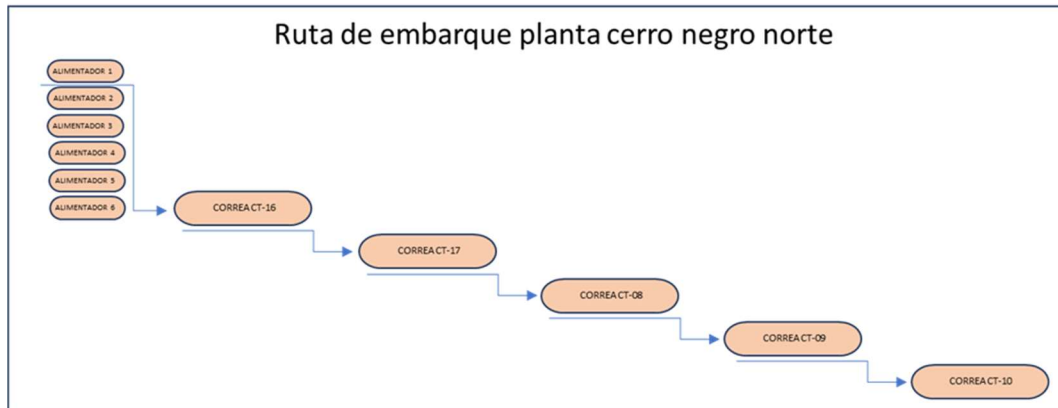
**Figura N° 3.1 Flujo de correas de embarque área planta magnetita.**



Fuente: Estructura sistema de embarque PM, Puerto Totoralillo

La ruta de embarque planta cerro negro norte, está compuesta por la siguiente estructura, según figura 3.2.

**Figura N° 3.2 Flujo de correas de embarque área cerro negro norte.**



Fuente: Estructura sistema de embarque CNN, Puerto Totoralillo

### 3.1 Tag number de equipos en terreno.

Previo al cálculo de conductores se asigna un Tag Number (*Número de etiqueta*) para cada motor y equipo en terreno, el Tag number es el identificativo único de cada equipo para el control de procesos y mantenimiento, este identifica dentro de su designación los sistemas y subsistemas en donde se encuentra ubicado el equipo, detallado a continuación en tabla 3.1.

**Tabla N° 3.1 Definición de Tag Number en CMP**

Descripción TAG	Sociedad	Valle	3° Descripción	4° Descripción	5° Descripción	6° Descripción	7° Descripción
CMP Cía. Minera del pacífico	F						
Valle Copiapó		5					
Puerto Totoralillo			2				
Planta Magnetita				3			
Cerro Negro Norte				4			
Área Filtrado					1		
Área Apilamiento					2		
Área Embarque					4		
1° número de equipo						XX	
2° número de equipo							XX

Para el proyecto se asignaron los siguientes tags numbers, para el área de embarque magnetita y cerro negro norte según tabla 3.2 y 3.3.

**Tabla N° 3.2 Definición de Tag Number alimentadores área PM (Planta Magnetita)**

<b>Embarque PM (Planta Magnetita)</b>	<b>Tag Number</b>
Alimentador 1	FS23455-1
Alimentador 2	FS23455-2
Alimentador 3	FS23455-3
Alimentador 4	FS23455-4
Alimentador 5	FS23455-5

**Tabla N° 3.3 Definición de Tag Number alimentadores área PM (Planta magnetita)**

<b>Embarque Cerro Negro Norte (CNN)</b>	<b>Tag Number</b>
Alimentador 1	FS24491-1
Alimentador 2	FS24491-2
Alimentador 3	FS24491-3
Alimentador 4	FS24491-4
Alimentador 5	FS24491-5
Alimentador 6	FS24491-6

### **3.2 Cálculo de distancias para circuitos de fuerza.**

Para el cálculo de distancias desde la nueva sala eléctrica a cada correa alimentadora y su motor, es necesario generar mediciones precisas y concordadas con lo existente en terreno, de esta manera complementamos los cálculos matemáticos de sección y caídas de tensión en el proyecto para por consiguiente esté se encuentre dentro de lo normativo. Para estos cálculos nos apoyamos en la planimetría existente y la verificación en terreno de la ruta de conductores.



Luego de verificar en terreno los tendidos y rutas de conductores además de la disponibilidad de canalizaciones existentes, se ejecuta el cálculo de distancia para cada alimentador según tabla 3.4 en área PM y tabla 3.5 en área CNN.

**Tabla N° 3.4 Largo de conductores por equipo, área planta magnetita.**

CALCULO DE LARGO DE CONDUCTORES AREA PM						
Equipo	Tag equipo	Desde		Hasta		Metros
Alimetador 1 cancha PM	FS23155-1	Sala electrica N°6	VDF 01	Motor alimentador 1	FS23155-M1	364
Alimetador 2 cancha PM	FS23155-2	Sala electrica N°6	VDF 02	Motor alimentador 2	FS23155-M2	316
Alimetador 3 cancha PM	FS23155-3	Sala electrica N°6	VDF 03	Motor alimentador 3	FS23155-M3	268
Alimetador 4 cancha PM	FS23155-4	Sala electrica N°6	VDF 04	Motor alimentador 4	FS23155-M4	220
Alimetador 5 cancha PM	FS23155-5	Sala electrica N°6	VDF 05	Motor alimentador 5	FS23155-M5	172

**Tabla N° 3.5 Largo de conductores por equipo, área cerro negro norte.**

CALCULO DE LARGO DE CONDUCTORES AREA PM						
Equipo	Tag equipo	Desde		Hasta		Metros
Alimetador 1 cancha PM	FS24191-1	Sala electrica N°6	VDF 06	Motor alimentador 1	FS24191-M1	301
Alimetador 2 cancha PM	FS24191-2	Sala electrica N°6	VDF 07	Motor alimentador 2	FS24191-M2	349
Alimetador 3 cancha PM	FS24191-3	Sala electrica N°6	VDF 08	Motor alimentador 3	FS24191-M3	397
Alimetador 4 cancha PM	FS24191-4	Sala electrica N°6	VDF 09	Motor alimentador 4	FS24191-M4	445
Alimetador 5 cancha PM	FS24191-5	Sala electrica N°6	VDF 10	Motor alimentador 5	FS24191-M5	493
Alimetador 6 cancha PM	FS24191-6	Sala electrica N°6	VDF 11	Motor alimentador 6	FS24191-M6	541

### 3.3. Cálculo de sección de conductores para alimentación de motor.

#### 3.3.1 Datos de motor

Según los datos obtenidos de la placa de motores y el largo de cada circuito, podemos realizar varios cálculos previos:

**Tabla N° 3.6 Datos de motor.**

DATOS DE MOTOR				
Ítem	Abreviatura	Descripción	Valor	Unidad
1.	Pn	Potencia nominal de motor	37	Kilo Watts
2.	I	Corriente nominal de motor	74	Amperios
3.	V	Voltaje de funcionamiento	380	Volts
4.	FS	Factor de servicio	1,15	
5.	Cos $\phi$	Factor de potencia de motor	0,85	
7.	rpm	Velocidad de motor	1470	rpm
8.	Frame	Dimensiones de motor	326T	
9.	T°	Temperatura de trabajo	40°	Celsius

### 3.3.2 Cálculo de potencia absorbida de motor.

Según los datos de motor podemos calcular la potencia real absorbida:

$$P = \sqrt{3} * V * I * \cos\varphi$$

$$P = \sqrt{3} * 380 * 74 * 0.85$$

$$P = 41.399,74 = 41,4 \text{ kW}$$

Donde:

$P =$  Potencia total de motor

$\sqrt{3} =$  Factor de conversión de circuitos trifásicos

$V =$  Voltaje

$I =$  Corriente

$\cos \varphi =$  Factor de potencia

### 3.3.3 Método de instalación de conductores.

El tipo de instalación corresponde al método de sujeción en el tendido de conductores, para este proyecto trabajaremos con cables monopolares, montados en escalerillas, la cual corresponde a una instalación de tipo F, donde la S.E.C. (Superintendencia de electricidad y combustibles) en RIC N°4 2019, indica para la instalación tipo F “Cables mono conductores (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 3.7 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 <sup>2</sup> ]	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

Según, Pliego técnico RIC N°4 2019, SEC.

### 3.3.4 Cálculo de sección de conductores por máxima corriente admisible

Para el cálculo de sección por máxima corriente admisible, aplicamos:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * V * \cos \varphi}$$

Donde:

$$P = 41,4 \text{ kW} = 41.399 \text{ W}$$

$$V = \text{Voltaje de línea} = 380\text{V}$$

$$\cos \varphi = \text{Factor de potencia} = 0,85$$

Entonces:

$$I = \frac{41399}{\sqrt{3} * 380 * 0.85} = \frac{41399}{559,45} = 73,999 \approx 74 A$$

Al resultado de corriente le aplicamos un factor del 25%, como sistema de protección de conductor y motor, obteniendo:

$$I = 74 * 1,25 = 92,5 A$$

Según las características de la carga y las condiciones de instalación se considera que el aislamiento del conductor es XLPE, esto según tabla de 4.2 de RIC 04 de la SEC, expresada a continuación.

**Tabla 3.8 Características y condiciones de uso de conductores aislados**

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, construido con cobre recocido, cableado, compactado o comprimido; con aislación de policloruro de vinilo PVC, con cubierta o chaqueta de nylon.	THWN	Apto para ser instalado en ductos, molduras y bandejas (solo tipo THHN/TC a partir del calibre 1/0 AWG). En ambientes secos. La cubierta lo hace resistente a la acción de aceites, grasas, ácidos y gasolina.	75	2,08 a 3,31	0,38	600	PVC	Nylon o similar
				5,26	0,51			
				8,37 a 13,3	0,76			
				21,2 a 33,6	1,02			
				42,4 a 107	1,27			
				126,7 a 253	1,52			
Conductor eléctrico unipolar o multipolar, sin armadura ni pantalla; construido de cobre recocido, desnudo o recubierto de una capa metálica; sólido clase 1 o cableado clase 2 cableado, con aislación de polietileno reticulado (XLPE) y cubierta termoplástica de cloruro de polivinilo (PVC) tipo ST2.	RV	Apto para ser instalado 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.	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							
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							

Fuente: Pliego técnico RIC N°4 2019, SEC.

La corriente calculada y que circulará por el conductor será de 92.5 amperes, por lo tanto, se escoge un conductor ideal, según tabla C.52-bis de la norma UNE-HD 60364-5-52 en ella se describen los valores de sección para cada intensidad admisible según tipo de instalación.

Tabla 3.9 Capacidad de corriente admisible con temperatura ambiente 40°

Método de instalación de la tabla B.52-1	Número de conductores cargados y tipos de aislamiento																	
	A1	PVC 3	PVC 2		PVC 3	PVC 2	XLPE 3	XLPE 2										
A2	PVC 3	PVC 2			XLPE 3		XLPE 2											
B1				PVC 3	PVC 2				XLPE 3			XLPE 2						
B2			PVC 3	PVC 2				XLPE 3	XLPE 2									
C					PVC 3			PVC 2		XLPE 3			XLPE 2					
E							PVC 3			PVC 2		XLPE 3	XLPE 2					
F								PVC 3			PVC 2		XLPE 3	XLPE 2				
1	2	3	4	5a	5b	6a	6b	7a	7b	8a	8b	9a	9b	10a	10b	11	12	13
Sección mm <sup>2</sup>																		
<b>Cobre</b>																		
1,5	11	11,5	12,5	13,5	14	14,5	15,5	16	16,5	17	17,5	19	20	20	20	21	23	-
2,5	15	15,5	17	18	19	20	20	21	22	23	24	26	27	26	28	30	32	-
4	20	20	22	24	25	26	28	29	30	31	32	34	36	36	38	40	44	-
6	25	26	29	31	32	34	36	37	39	40	41	44	46	46	49	52	57	-
10	33	36	40	43	45	46	49	52	54	54	57	60	63	65	68	72	78	-
16	45	48	53	59	61	63	66	69	72	73	77	81	85	87	91	97	104	-
25	59	63	69	77	80	82	86	87	91	95	100	103	108	110	115	122	135	146
35	-	-	-	95	100	101	106	109	114	119	124	127	133	137	143	153	168	182
50	-	-	-	116	121	122	128	133	139	145	151	155	162	167	174	188	204	220
70	-	-	-	148	155	155	162	170	178	185	193	199	208	214	223	243	262	282
95	-	-	-	180	188	187	196	207	216	224	234	241	252	259	271	298	320	343
120	-	-	-	207	217	216	226	240	251	260	272	280	293	301	314	350	373	397
150	-	-	-	-	-	247	259	276	289	299	313	322	337	343	359	401	430	458
185	-	-	-	-	-	281	294	314	329	341	356	368	385	391	409	460	493	523
240	-	-	-	-	-	330	345	368	385	401	419	435	455	468	489	545	583	617

Según la norma UNE-HD 60364-5-52, tabla C.52-bis.

Según las características de la carga y las condiciones de instalación se considera que el aislamiento del conductor es XLPE en líneas monopolaes y considerando que la carga consume 92,5 amperes. Desplazando estos datos en la figura 3.6 nos encontramos con un conductor de 16mm<sup>2</sup>.

### 3.3.5 Cálculo de sección de conductores por máxima caída de tensión.

Para el cálculo de sección por máxima caída de tensión admisible, aplicamos:

$$S = \frac{\sqrt{3} * \rho * L * I * \cos \varphi}{\Delta V}$$

Donde:

$S$  = Sección de conductor

$L$  = Largo de circuito

$\rho$  = Resistividad de cobre

$I$  = Corriente

$\cos \varphi$  = Factor de potencia

$\Delta V$  = % de caída de tensión

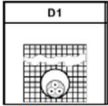
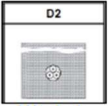

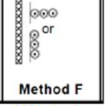
La resistividad del cobre es de  $0,017 \text{ mm}^2/\text{m}$

La caída de tensión la calcularemos en 3%, donde

$$\Delta V = 380 * 3\% = 11,4\text{v}$$

Por lo tanto, con los datos obtenidos calcularemos la sección de conductores para cada alimentador, según tabla de capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados según su instalación.

**Tabla 3.10 Capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados según su instalación.**

CABLES PARA TENDIDO FIJO TEMPERATURA DE SERVICIO 90°C. APLICA a THHN, RV, RV-K,RZ1, RZ1-K.					
Sección nominal [mm <sup>2</sup> ]	Sección en sistema americano [AWG] o [kcmil]	 Método de instalación D1. Temp. ambiente 20°C	 Método de instalación D2. Temp. ambiente 20°C	 Method E Método de instalación E. Temp. ambiente 30°C	 Method F 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

Según, Pliego técnico RIC N°4 2019, SEC.

### 3.3.5.1 Cálculo de sección para alimentador N°1 Planta Magnetita.

Considerando que el circuito tiene un largo total de 364 metros, para el alimentador N°1 obtenemos.

$$S = \frac{\sqrt{3} * 0,017 * 364 * 97,18 * 0.85}{11,4} = \frac{885.33}{11,4} = 77,66 \text{ mm}^2$$

Comparando este resultado en la tabla de capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados según su instalación, del pliego técnico RIC N°4, se asignará un conductor de 3/0 awg.

### **3.3.5.2 Cálculo de sección para alimentador N°2 Planta Magnetita.**

Considerando que el circuito tiene un largo total de 316 metros, para el alimentador N°2 obtenemos.

$$S = \frac{\sqrt{3} * 0,017 * 316 * 97,18 * 0.85}{11,4} = \frac{768.58}{11,4} = 67,42 \text{ mm}^2$$

Comparando este resultado en la tabla de capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados según su instalación, del pliego técnico RIC N°4, se asignará un conductor de 2/0 awg.

### **3.3.5.3 Cálculo de sección para alimentador N°3 Planta Magnetita.**

Considerando que el circuito tiene un largo total de 268 metros, para el alimentador N°3 obtenemos.

$$S = \frac{\sqrt{3} * 0,017 * 268 * 97,18 * 0.85}{11,4} = \frac{651.83}{11,4} = 57,18 \text{ mm}^2$$

Comparando este resultado en la tabla de capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados según su instalación, del pliego técnico RIC N°4, se asignará un conductor de 2/0 awg.

#### **3.3.5.4 Cálculo de sección para alimentador N°4 Planta Magnetita.**

Considerando que el circuito tiene un largo total de 220 metros, para el alimentador N°4 obtenemos.

$$S = \frac{\sqrt{3} * 0,017 * 220 * 97,18 * 0.85}{11,4} = \frac{535,09}{11,4} = 46,94 \text{ mm}^2$$

Comparando este resultado en la tabla de capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados según su instalación, del pliego técnico RIC N°4, se asignará un conductor de 1/0 awg.

#### **3.3.5.5 Cálculo de sección para alimentador N°5 Planta Magnetita.**

Considerando que el circuito tiene un largo total de 172 metros, para el alimentador N°5 obtenemos.

$$S = \frac{\sqrt{3} * 0,017 * 172 * 97,18 * 0.85}{11,4} = \frac{418,34}{11,4} = 36,70 \text{ mm}^2$$

Comparando este resultado en la tabla de capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados según su instalación, del pliego técnico RIC N°4, se asignará un conductor de 1/0 awg.

#### **3.3.5.6 Cálculo de sección para alimentador N°1 Cerro Negro Norte.**

Considerando que el circuito tiene un largo total de 301 metros, para el alimentador N°1 obtenemos.

$$S = \frac{\sqrt{3} * 0,017 * 301 * 97,18 * 0.85}{11,4} = \frac{732,10}{11,4} = 64,22 \text{ mm}^2$$

Comparando este resultado en la tabla de capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados según su instalación, del pliego técnico RIC N°4, se asignará un conductor de 2/0 awg.

#### **3.3.5.7 Cálculo de sección para alimentador N°2 Cerro Negro Norte.**

Considerando que el circuito tiene un largo total de 349 metros, para el alimentador N°2 obtenemos.

$$S = \frac{\sqrt{3} * 0,017 * 349 * 97,18 * 0,85}{11,4} = \frac{848,84}{11,4} = 74,46 \text{ mm}^2$$

Comparando este resultado en la tabla de capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados según su instalación, del pliego técnico RIC N°4, se asignará un conductor de 3/0 awg.

### 3.3.5.8 Cálculo de sección para alimentador N°3 Cerro Negro Norte.

Considerando que el circuito tiene un largo total de 397 metros, para el alimentador N°3 obtenemos.

$$S = \frac{\sqrt{3} * 0,017 * 397 * 97,18 * 0,85}{11,4} = \frac{965,59}{11,4} = 84,70 \text{ mm}^2$$

Comparando este resultado en la tabla de capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados según su instalación, del pliego técnico RIC N°4, se asignará un conductor de 3/0 awg.

### 3.3.5.9 Cálculo de sección para alimentador N°4 Cerro Negro Norte.

Considerando que el circuito tiene un largo total de 445 metros, para el alimentador N°4 obtenemos.

$$S = \frac{\sqrt{3} * 0,017 * 445 * 97,18 * 0,85}{11,4} = \frac{1082,34}{11,4} = 94,94 \text{ mm}^2$$

Comparando este resultado en la tabla de capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados según su instalación, del pliego técnico RIC N°4, se asignará un conductor de 4/0 awg.

### 3.3.5.10 Cálculo de sección para alimentador N°5 Cerro Negro Norte.

Considerando que el circuito tiene un largo total de 493 metros, para el alimentador N°5 obtenemos.

$$S = \frac{\sqrt{3} * 0,017 * 493 * 97,18 * 0,85}{11,4} = \frac{1199,09}{11,4} = 105,2 \text{ mm}^2$$

Comparando este resultado en la tabla de capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados según su instalación, del pliego técnico RIC N°4, se asignará un conductor de 4/0 awg.

### 3.3.5.11 Cálculo de sección para alimentador N°6 Cerro Negro Norte.

Considerando que el circuito tiene un largo total de 541 metros, para el alimentador N°6 obtenemos.

$$S = \frac{\sqrt{3} * 0,017 * 541 * 97,18 * 0,85}{11,4} = \frac{1315,83}{11,4} = 115,4 \text{ mm}^2$$

Comparando este resultado en la tabla de capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados según su instalación, del pliego técnico RIC N°4, se asignará un conductor de 250 MCM awg.

### 3.3.6 Resumen para cálculos de conductores

A continuación, se detallan tablas de resúmenes con sección de conductores según largo de circuito para ambas plantas.

**Tabla N° 3.11 Sección de conductores del proyecto planta magnetita.**

SECCION DE CONDUCTORES SEGÚN LARGO DE CIRCUITO								
Equipo	Tag equipo	Desde		Hasta		Metros	mm2	AWG
Alimetador 1 cancha PM	FS23155-1	Sala electrica N°6	VDF 01	Motor alimentador 1	FS23155-M1	364	77,66	3/0
Alimetador 2 cancha PM	FS23155-2	Sala electrica N°6	VDF 02	Motor alimentador 2	FS23155-M2	316	67,42	2/0
Alimetador 3 cancha PM	FS23155-3	Sala electrica N°6	VDF 03	Motor alimentador 3	FS23155-M3	268	57,18	2/0
Alimetador 4 cancha PM	FS23155-4	Sala electrica N°6	VDF 04	Motor alimentador 4	FS23155-M4	220	46,94	1/0
Alimetador 5 cancha PM	FS23155-5	Sala electrica N°6	VDF 05	Motor alimentador 5	FS23155-M5	172	36,70	1/0

**Tabla N° 3.12 Sección de conductores del proyecto cerro negro norte**

SECCION DE CONDUCTORES SEGÚN LARGO DE CIRCUITO								
Equipo	Tag equipo	Desde		Hasta		Metros	mm2	AWG
Alimetador 1 cancha CNN	FS24191-1	Sala electrica N°6	VDF 06	Motor alimentador 1	FS24191-M1	301	64,22	2/0
Alimetador 2 cancha CNN	FS24191-2	Sala electrica N°6	VDF 07	Motor alimentador 2	FS24191-M2	349	74,46	3/0
Alimetador 3 cancha CNN	FS24191-3	Sala electrica N°6	VDF 08	Motor alimentador 3	FS24191-M3	397	84,70	3/0
Alimetador 4 cancha CNN	FS24191-4	Sala electrica N°6	VDF 09	Motor alimentador 4	FS24191-M4	445	94,94	4/0
Alimetador 5 cancha CNN	FS24191-5	Sala electrica N°6	VDF 10	Motor alimentador 5	FS24191-M5	493	105,2	4/0
Alimetador 6 cancha CNN	FS24191-6	Sala electrica N°6	VDF 11	Motor alimentador 6	FS24191-M6	541	115,4	250MCM

### **3.4 Estudio de potencia para definición de variadores de frecuencia**

Para el estudio de potencia solo se considera la placa de motor como referencia y asigna un 25% adicional en caso de que en algún momento se requiera aumentar la capacidad de la planta.

Para esta selección de equipo ideal se evaluó solo dos condiciones relevantes, primero el power module que es la unidad de potencia del variador de frecuencia, la cual está fielmente enlazada a lo que comentamos al inicio que es la potencia de motor más un 25% y como segunda selección se considera un control unit para el tipo de control que se requiere en el proyecto.

Adicionalmente para este tipo de variadores la marca ofrece otros accesorios adicionales que cubren diferentes tipos de aplicaciones, tales como:

- Filtro de red.
- Bobina de red.
- Bobina de salida.
- Filtro senoidal.
- Resistencia de freno.
- Brake Relay para controlar un freno de mantenimiento de motor.

#### **3.4.1 Power module variador Sinamic G120**

En la placa de características del Power Module se encuentra, entre otros, los siguientes datos:

- Nombre:
- Datos técnicos:
- Referencia:
- Versión:

Para la aplicación del proyecto hemos asignado el modelo PM230 con un rango de potencia de 45 a 55 kW, este equipo cuenta con modelos sin filtro o con filtro de red integrado de clase A. Están previstos para la integración en un armario eléctrico. Adicionalmente este equipo no está dimensionado para el régimen generador.

### Figura N° 3.5 Tipos de power module para variadores Sinamics G120



Figura 2-1 Power Module, grado de protección IP20

#### PM230, 3 AC 400 V

Tamaño	FSA	FSB	FSC	FSD	FSE	FSF	FSGX
Rango de potencia (kW): IP20	0,37 ... 3	4 ... 7,5	11 ... 18,5	22 ... 37	45 ... 55	75 ... 90	--
Rango de potencia (kW): PT	3	7,5	18,5	--	--	--	--

Fuente: Manual Variadores de frecuencia Sinamics G120 Siemens.

## **CAPÍTULO IV**

### **PARAMETRIZACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA SIEMENS SINAMIC G120.**

La adecuada configuración de los variadores de frecuencia es esencial para garantizar un rendimiento óptimo en los sistemas de control de velocidad de motores eléctricos. En sistemas de transporte utilizados en procesos de embarque, donde las condiciones de carga son variables y pueden impactar la estabilidad operativa, una correcta parametrización es crucial para prevenir problemas como paradas imprevistas y desgaste prematuro de componentes.

En este capítulo se realiza una propuesta de los parámetros esenciales que deben ajustarse en un variador de frecuencia para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente del equipo. Se abordarán tanto los parámetros básicos de motor hasta los más avanzados profundizando en la protección de motor y comunicación. Asimismo, se discutirán las prácticas recomendadas para la configuración inicial y los ajustes dinámicos que pueden realizarse en función de las condiciones operativas, mejorando así la eficiencia energética y reduciendo los costos de mantenimiento.

#### **4.1 Panel de control BOP-2**

Un operator panel sirve para la puesta en marcha, el diagnóstico y el control del convertidor, así como para la copia de seguridad y la transferencia de los ajustes del convertidor. El BOP-2 se conecta al convertidor mediante una interfaz RS232. El BOP-2 reconoce automáticamente variantes de control Units de la gama de SINAMICS.

**Figura N° 4.1 Panel BOP-2**



Fuente: Manual Basic Operator Panel 2 Siemens (2016)

#### **4.2 Parametrización de Puesta en marcha con el Operator Panel BOP-2**

Los variadores sinamic proporcionan una guía de puesta en marcha rápida, con esta herramienta facilita la parametrización del variador con un menú rápido de ajuste. Antes de empezar se deben recopilar datos necesarios como:

- Datos de placa motor, tal como: tipo de motor, como está conectado, corriente, amperaje, RPM, norma, frecuencia y datos generales.
- Tipo de aplicación: puede ser bomba, correa transportadora, elevador y más aplicaciones.
- Limitaciones de velocidad en RPM según las necesidades de la operación.
- Se define el tipo de regulación del variador de frecuencia si es escalar o vectorial.
- Seleccionar el ajuste predeterminado de interfaz que existen en las diferentes opciones según las necesidades.

**Figura N° 4.2 Guía puesta en marcha variadores Sinamic**

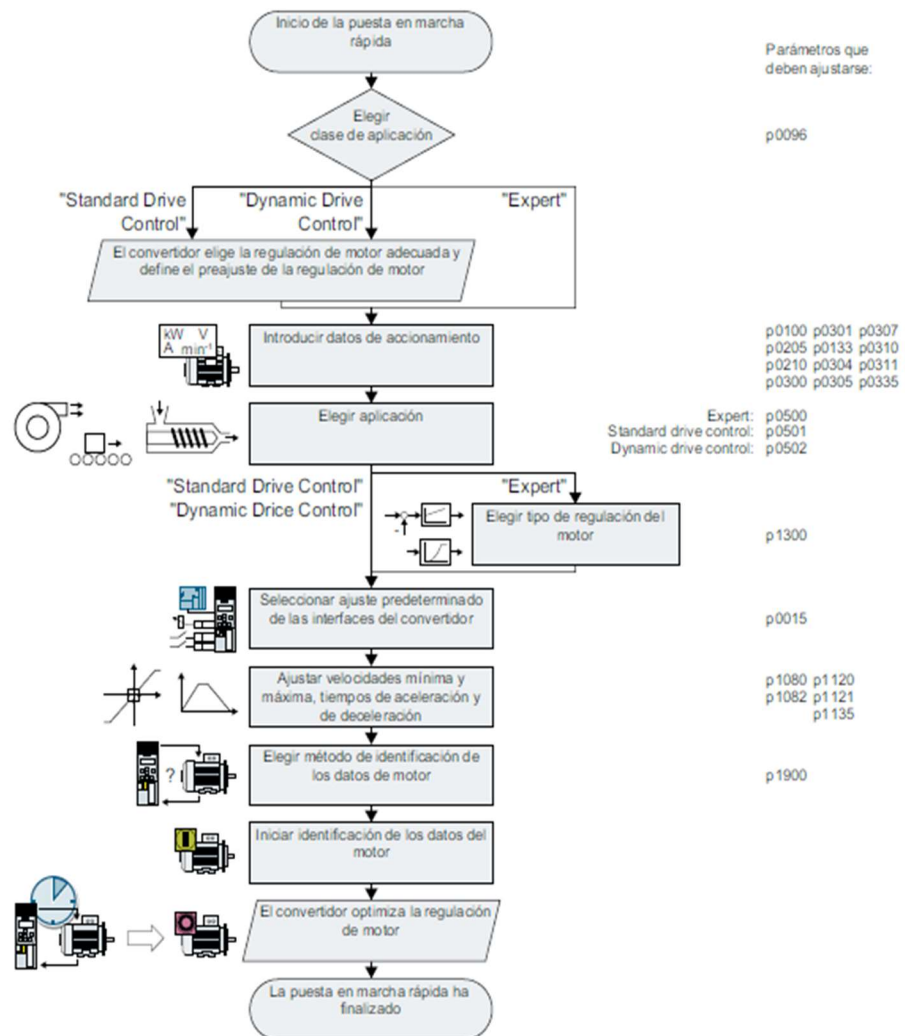


Figura 5-5 Puesta en marcha rápida con el Operator Panel BOP-2

Fuente: Manual Convertidor con las Control Units CU240B-2 y CU240E Siemens (2018)

### 4.2.1 Clase de aplicación

En este apartado se selecciona el tipo de regulación que lleva el variador, tenemos dos tipos de regulaciones, Standard Drive Control y Dynamic Drive Control.

La selección de este tipo de aplicación se hizo según las recomendaciones mencionadas en el manual del equipo. La que mejor se adecua a las condiciones de terreno y la

aplicación es Standard Drive Control por la potencia, su carga constante y tipo de motor.

**Figura N° 4.3 Clase de aplicación variadores Sinamic.**

Clase de aplicación	Standard Drive Control	Dynamic Drive Control
Características	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tiempo de compensación típico tras un cambio de velocidad: 100 ms ... 200 ms</li> <li>Tiempo de compensación típico tras un golpe de carga: 500 ms</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>Standard Drive Control es adecuado para los siguientes requisitos: <ul style="list-style-type: none"> <li>Potencias de motor &lt; 45 kW</li> <li>Tiempo de aceleración 0 – velocidad asignada (en función de la potencia asignada del motor): 1 s (0,1 kW) ... 10 s (45 kW)</li> <li>Aplicaciones con par de carga constante, sin golpes de carga</li> </ul> </li> <li>Standard Drive Control no se ve afectado por los ajustes imprecisos de los datos del motor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tiempo típico de compensación tras un cambio de velocidad: &lt; 100 ms</li> <li>Tiempo de compensación típico tras un golpe de carga: 200 ms</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>Dynamic Drive Control regula y limita el par motor</li> <li>Precisión de par alcanzable: <math>\pm 5\%</math> para 15% ... 100% de la velocidad asignada</li> <li>Se recomienda Dynamic Drive Control para las siguientes aplicaciones: <ul style="list-style-type: none"> <li>Potencias de motor &gt; 11 kW</li> <li>En caso de golpes de carga 10% ... &gt;100% del par asignado del motor</li> </ul> </li> <li>Se requiere Dynamic Drive Control para un tiempo de aceleración 0 – velocidad asignada (dependiendo de la potencia asignada del motor): &lt; 1 s (0,1 kW) ... &lt; 10 s (132 kW).</li> </ul>
Ejemplos de aplicación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bombas, ventiladores y compresores con característica flujo-velocidad</li> <li>Chorro en húmedo o en seco</li> <li>Molinos, mezcladoras, amasadoras, trituradoras, agitadores</li> <li>Sistemas transportadores horizontales (cintas transportadoras, transportadores de rodillos, transportadores de cadena)</li> <li>Cabezales simples</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bombas y compresores con máquinas de desplazamiento positivo</li> <li>Hornos rotativos</li> <li>Extrusora</li> <li>Centrifugadoras</li> </ul>
Motores utilizables	Motores asíncronos	Motores asíncronos y síncronos
Power Modules utilizables	PM240-2, PM240P-2	
Frecuencia de salida máx.	550 Hz	240 Hz

Fuente: Manual Convertidor con las Control Units CU240B-2 y CU240E Siemens, 2018.

#### **4.2.2 Ajuste la norma de motor (P100).**

En este parámetro se define la norma que utiliza o está confeccionado el motor:

- KW 50HZ: IEC
- HP 60HZ: NEMA
- KW 60HZ: IEC 60 Hz

En nuestro caso es norma IEC 50Hz.

#### **4.2.3 Ajuste la tensión de conexión del convertidor (P210).**

En este apartado se define la tensión de alimentación de entrada del variador de frecuencia. en nuestro caso sería un valor de 400 Volts.

#### **4.2.4 Ajuste el tipo de motor (P300).**

Si la placa de características del motor lleva impreso un código de motor de 5 cifras, seleccione el tipo de motor con código de motor que corresponda, este parámetro es para motores de la marca siemens el cual sirve para una identificación más rápida de los datos de motor, en este caso es otro fabricante con código distinto de motor en la placa de características.

Motores sin código de motor en la placa de características:

- INDUCT: Motor asíncrono no Siemens
- 1L... IND: Motores asíncronos 1LE1, 1LG6, 1LA7, 1LA9

Motores con código de motor en la placa de características

- 1LE1 IND 100: 1LE1. 9
- 1PC1 IND: 1PC1
- 1PH8 IND: Motor asíncrono

En nuestro caso INDUCT: motor asincrónico no Siemens.

#### **4.2.5 Introducir código de motor (P301).**

En este parámetro se inserta el código de motor Siemens. En el parámetro anterior se selecciona un motor asincrónico no siempre por ende el valor en este parámetro es 0.

#### **4.2.6 Parámetro de motor generales (P304-311)**

En este apartado se introducen los datos básicos de placa de motor asignada como:

- Tensión(V): 380 V.
- Intensidad (I): 74 A.
- Potencia (kW): 37 kW.
- Frecuencia (Hz): 50Hz.
- Velocidad (RPM): 1475 RPM.

#### **4.2.7 Refrigeración de motor (P335)**

Se selecciona la refrigeración actual del motor, las distintas opciones son:

SELF: Refrigeración natural, FORCED: Refrigeración independiente, LIQUID: Refrigeración por líquido y NO FAN: Sin ventilador

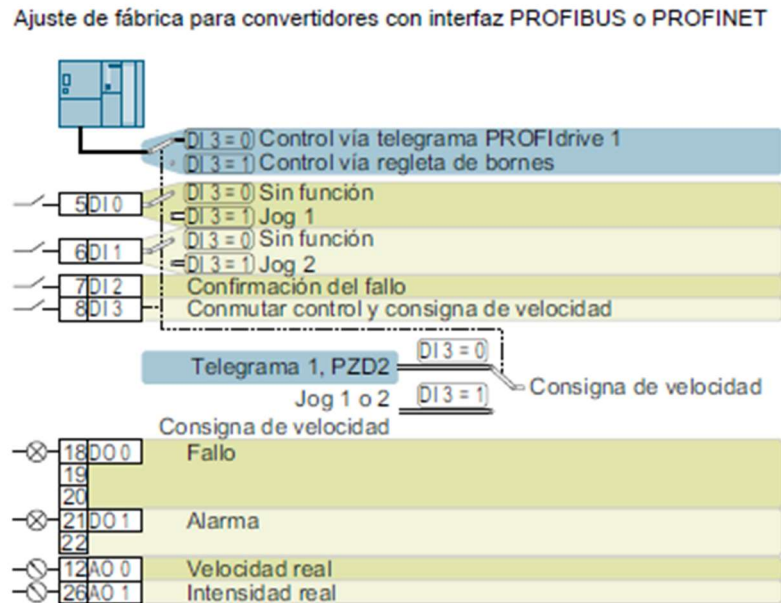
La selección es “Refrigeración natural” sin ventilador.

#### **4.2.8 Seleccione el ajuste predeterminado de interfaces del convertidor adecuado para su aplicación (P0015).**

En este punto se seleccionó el ajuste predeterminado de interfaces del convertidor adecuado para su la aplicación, lo que hace el ajuste dependiendo del tipo de control o necesidades se define cada acción a las entradas y salidas digitales o análogas del control unit.

Existen varios tipos de ajuste predefinidos, nosotros utilizaremos: el Ajuste predeterminado 7: "bus de campo con conmutación de juego de datos".

**Figura N° 4.4 Ajuste predeterminado 7 bus de campo profibus.**



Fuente: Manual Convertidor con las Control Units CU240B-2 y CU240E Siemens, 2018.

Este control permite la comunicación profibus con un maestro DP, además en los ajustes definidos de la bornera se puede cambiar el método de control de comunicación de Bus a control por lógica cableada.

#### **4.2.9 Límites de consigna de velocidad (P 1080, 1082).**

Este parámetro tiene la función de definir los valores máximos y mínimos en RPM para la consigna de velocidad.

Valor Min: 0 RPM.

Valor Max: 1475 RPM.

#### **4.2.10 Tiempo de rampa de aceleración y desaceleración (P 1120,1121).**

Parámetro para ajustar el tiempo que se demora en llegar a la consigna establecida.

Tiempo ajustado para ambos parámetros: 10 s.

#### **4.2.11 Tiempo de deceleración después del comando DES3 detección rápida (P1135)**

Este es el tiempo que se toma el variador, desde que se establece el comando Stop y se detiene.

Valor: 0 s,

#### **4.2.12 Identificación de datos del motor (P1900)**

Seleccione el método según el cual el convertidor mide los datos del motor conectado:

- OFF: sin identificación de los datos del motor.
- STIL ROT: medir datos de motor en parada y con el motor en giro. Tras la identificación de los datos del motor, el convertidor desconecta el motor.
- STILL: ajuste recomendado: Medir datos del motor en parada. Tras la identificación de los datos del motor, el convertidor desconecta el motor. Seleccione este ajuste si el motor no puede girar libremente, p. ej., en zonas de desplazamiento limitadas mecánicamente.
- ROT: Medir datos del motor en giro. Tras la identificación de los datos del motor, el convertidor desconecta el motor.
- ST RT OP: Ajuste como STIL ROT. Tras la identificación de los datos del motor, el motor acelera hasta la consigna actual.
- STILL OP: Ajuste como STILL. Tras la identificación de los datos del motor, el motor acelera hasta la consigna actual.

La mejor opción para este proceso es la opción **STIL ROT**.

Fuera del apartado de configuración rápida se busca el parámetro que permite direccionar el esclavo, en este caso el variador de frecuencia existe 2 maneras de establecer la dirección mediante el parámetro P0918 o con los DIP establecidos en el control unit.

#### 4.2.13 Dirección PROFIBUS / Dirección PB (P0918).

Si ajusta todos los interruptores DIP a "OFF" (0) o a "ON" (1) permite la configuración con el parámetro P 0918.

La dirección establecida en el bus esclavo: 2.

**Tabla N° 4.1 Lista de parámetros configurados en Sinamic.**

Parametrización variador Sinamic G120		
N de parametro	Descripción del parametro	Ajuste
P100	Ajuste la norma de motor	KW 50HZ
P210	Ajuste la tensión de conexión del convertidor	400 V
P300	Ajuste el tipo de motor	INDUCT
P301	Introducir código de motor	0
P304	Tensión asignada del motor	380 V
P305	Intensidad asignada del motor	74 A
P307	Potencia asignada del motor	37 kW
P310	Frecuencia asignada del motor	50 Hz
P311	Velocidad asignada del motor	1475 RPM
P335	Refrigeración del motor	SELF
P15	Seleccione el ajuste predeterminado de interfaces del convertidor adecuado para su aplicación.	7
P1080	Velocidades mínima RPM	0 RPM
P1082	Velocidades máxima RPM	1475 RPM
P1120	Tiempo de rampa de aceleración	10 s
P1121	Tiempo de rampa de deceleración	10 s
P1135	Tiempo de deceleración después del comando DES3	0 s
P1900	Seleccione el método según el cual el convertidor mide los datos del motor conectado:	STILL ROT

## CAPÍTULO V

### CONFIGURACIÓN DE COMUNICACIÓN PROFIBUS EN PLC PARA VARIADORES DE FRECUENCIA SIEMENS SINAMICS G120.

La implementación de variadores de frecuencia en el ámbito industrial cada vez es más avanzada, hoy en día existe el control de variadores por método de lógica cableada, el cual sigue siendo muy útil pero a larga distancia, tiempo de fallas y falta de información de variables en tiempo real del equipo, no es lo más adecuado para hoy en un proceso de minero. Para un control del proceso más robusto se establece un diseño de red profibus para un control más eficiente y fiable con la capacidad para gestionar más datos y variables con el fin poder realizar un control más experto y facilitar el análisis de datos.

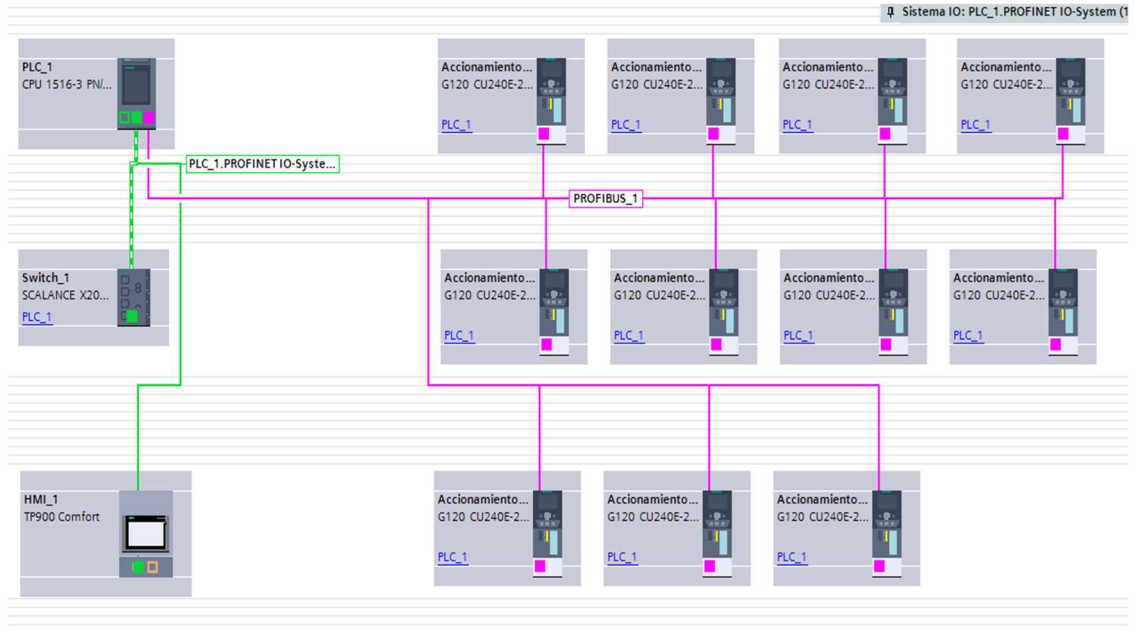
Los variadores sinamic son reconocidos por su versatilidad y rendimiento, permite fácilmente la integración de equipos con comunicación profibus. La configuración de estos equipos busca definir los parámetros específicos en el PLC s7 1500, como la asignación de direcciones, selección del telegrama de datos a utilizar y principalmente la programación del autómatas para la interconexión de datos. La herramienta utilizada en este proyecto que permite la programación es TIA Portal, la plataforma de Siemens para sus controladores.

#### **5.1 Topología de red profibus a implementar y configuración en TIA Portal.**

Para el diseño del diagrama e implementación del sistema utilizar se realizan diagramas para la topología de red a utilizar en TIA Portal, se determina la configuración y conexiones de la red.

En la figura N° 5.1 se observa los 11 variadores sinamic establecidos en la red como esclavos profibus, comandado por un controlador maestro s7 1500 para la toma de variables e interconexión de datos. El tipo actual de topología es en Bus o troncal.

**Figura N° 5.1 Topología de red profibus.**

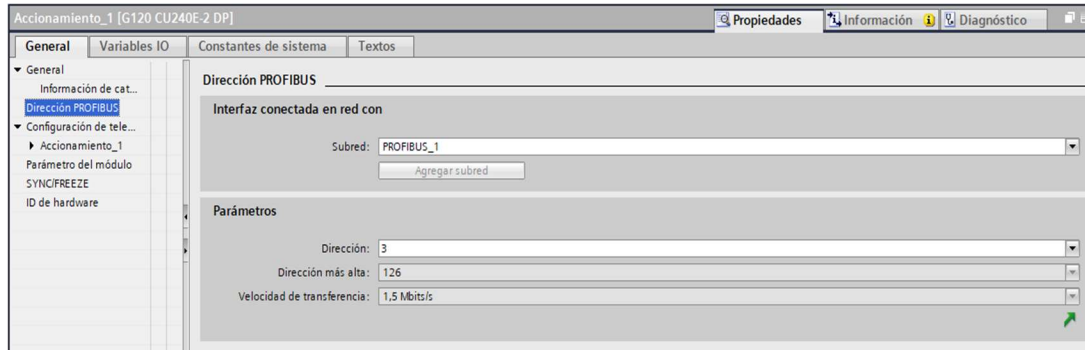


Fuente: Software Tia portal v16.

En TIA Portal se configura la red profibus en donde se direccionan los 11 esclavos y se selecciona el telegrama de comunicación el cual debe coincidir con el configurado en el sinamic.

En el apartado de configuración del accionamiento se abre una pestaña, la cual se establece una dirección del esclavo en cada variador de frecuencia. La velocidad de transferencia en este protocolo seleccionada es la predeterminada de 1,5 Mbit/s, la más rápida.

**Figura N° 5.2 Direccionamiento de red profibus en TIA Portal.**



Fuente: Software Tia portal v16.

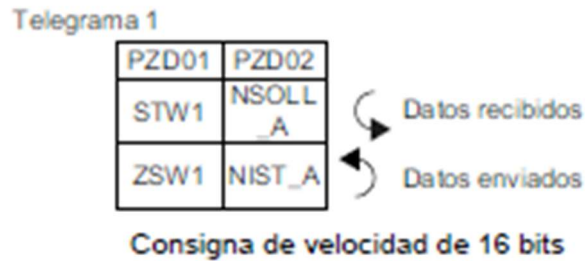
Como se menciona en el marco teórico, la red profibus tiene un máximo de 156 esclavos por troncal. Se genera una tabla de direccionamiento de los equipos de terreno junto a su ubicación, tag y la red asociada.

**Tabla N° 5.1 lista de direccionamiento de esclavos.**

DIRECCIONES DE RED PROFIBUS (MAX256 ESCLAVOS)					
Equipo	Tag	Sala electrica	Esclavo /Maestro	Direccion	Nombre de red
Controlador	S/N	Sala electrica N° 6	S7 1500		2 PROFIBUS_1
Alimentador 1 cancha PM	FS23115-1	Sala electrica N° 6	Accionamiento 1		3 PROFIBUS_1
Alimentador 2 cancha PM	FS23115-2	Sala electrica N° 6	Accionamiento 2		4 PROFIBUS_1
Alimentador 3 cancha PM	FS23115-3	Sala electrica N° 6	Accionamiento 3		5 PROFIBUS_1
Alimentador 4 cancha PM	FS23115-4	Sala electrica N° 6	Accionamiento 4		6 PROFIBUS_1
Alimentador 5 cancha PM	FS23115-5	Sala electrica N° 6	Accionamiento 5		7 PROFIBUS_1
Alimentador 1 cancha CNN	FS24191-1	Sala electrica N° 6	Accionamiento 6		8 PROFIBUS_1
Alimentador 2 cancha CNN	FS24191-2	Sala electrica N° 6	Accionamiento 7		9 PROFIBUS_1
Alimentador 3 cancha CNN	FS24191-3	Sala electrica N° 6	Accionamiento 8		10 PROFIBUS_1
Alimentador 4 cancha CNN	FS24191-4	Sala electrica N° 6	Accionamiento 9		11 PROFIBUS_1
Alimentador 5 cancha CNN	FS24191-5	Sala electrica N° 6	Accionamiento 10		12 PROFIBUS_1
Alimentador 6 cancha CNN	FS24191-6	Sala electrica N° 6	Accionamiento 11		13 PROFIBUS_1

El último paso será configurar el telegrama de comunicación. El telegrama a utilizar es telegrama estándar 1, PZD 2/2. Este telegrama es utilizado para la comunicación entre el controlador y el variador de frecuencia. PZD 2/2 hace referencia a que hay 2 palabras de datos de proceso enviadas desde el maestro al esclavo y 2 palabras de datos que son enviadas desde el esclavo al maestro. Estos datos para que sean procesados por el variador o entendidos se tratan en datos Hexadecimal.

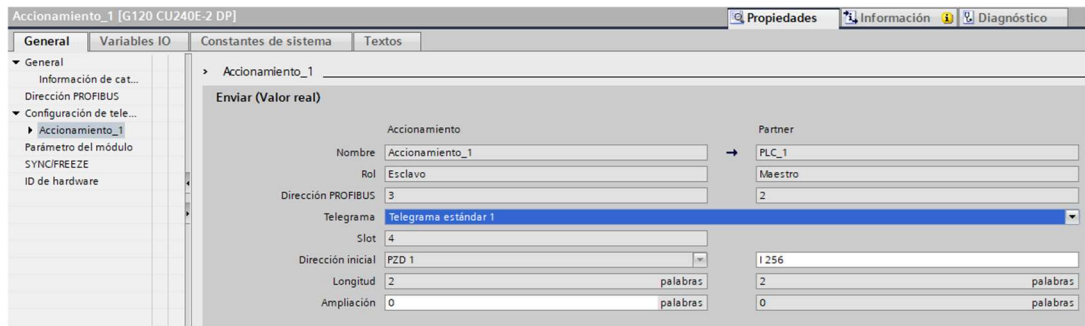
**Figura N° 5.3 Telegrama estándar 1 PZD 2/2.**



Fuente: Manual Convertidor con las Control Units CU240B-2 y CU240E Siemens, 2018.

En el software TIA Portal se configura el telegrama mencionado el cual más vale la redundancia debe coincidir con el configurado en el variador de frecuencia sinamic.

**Figura N° 5.4 Telegrama de sinamic red profibus en TIA Portal.**



Fuente: Software Tia portal v16.

## 5.2 Programación de s7 1500 y comando por telegramas.

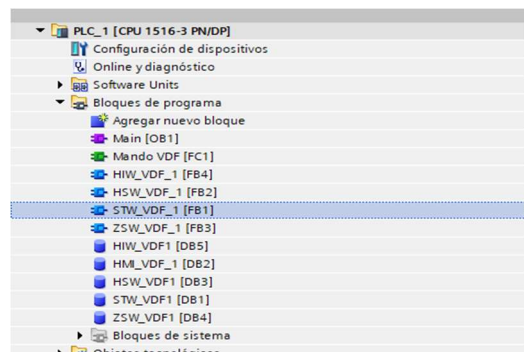
En el software TIA Portal para la programación del controlador se realiza la lógica de control, cabe destacar que para la programación existen muchas maneras, formas y software de cómo plantear una lógica de control, pero cada programador sigue su regla. Se trabajará con 4 tipos de bloques de programación, la utilización de bloques en TIA Portal sirve para estructurar y organizar tu programa en diferentes partes o rutinas que se irán ejecutando una detrás de la otra. Por lo tanto, será más fácil seguir el programa para diagnosticar fallos y para ver el funcionamiento.

- Bloque de organización (OB): Los OB de ciclo se procesan cíclicamente. Los OB de ciclo son bloques lógicos de orden superior en el programa, en los que se pueden programar instrucciones o llamar otros bloques.
- Bloque de función (FB): Los bloques de función son bloques lógicos que depositan sus valores de forma permanente en bloques de datos de instancia, de modo que siguen estando disponibles después de procesar el bloque.
- Función (FC): Las funciones son bloques lógicos sin memoria.
- Bloque de datos (DB): Los bloques de datos (DB) sirven para almacenar datos del programa.

En la programación especificada en esta propuesta, solo se diseña un ejemplo base para los 11 variadores involucrados en el proyecto. Se inicia creando bloques de función, el cual básicamente se va a utilizar para realizar una programación más ordenada al momento de llamar variables de proceso.

### 5.2.1 Bloque de función STW\_VDF\_1.

**Figura N° 5.5 Bloque de función STW.**



Fuente: Software TIA Portal.

El primer bloque para crear tiene el nombre de STW significa palabra de mando, lo que hace este bloque es mandar órdenes de estado binario o hexadecimal desde el controlador al variador Sinamic según el telegrama estándar 1. Las órdenes utilizadas son:

- Marcha / Pàro: Orden de partir y para motor

- Reset falla: Reset de falla generales
- Inversión giro

En la siguiente **Figura N° 5.6** se puede apreciar la declaración de variables en este bloque y su estructura.

**Figura N° 5.6 Estructura de bloque de datos para palabra de mando STW.**

	Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Remanencia	Accesible d...	Escrib...	Visible en ..	Valor de a...	Supervis...	Comentario
1	Input									
2	ON_OFF	Bool	false	No remane...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Orden de partir /parar motor
3	RESET	Bool	false	No remane...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Reset de falla, sobrecarga, corto circuito.
4	INVERSION	Bool	false	No remane...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	inversion de giro de motor.
5	Output									
6	STW	Word	16#0	No remane...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	PALABRA CREADA PARA EL ENVIO EN LA...
7	InOut									

**Segmento 1: Valor inicial principal para hechar a correr el variador de frecuencia, en HEXADECIMAL 16#47E.**  
 Este palabra que estamos: enviando directamente al vdf es para decirle las condiciones ideales que debe estar.

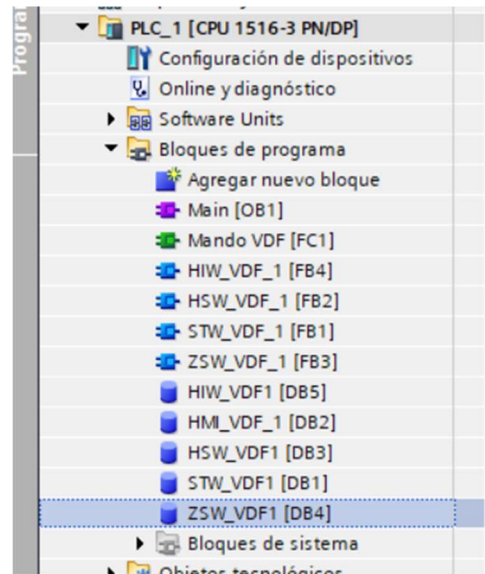
**Segmento 2: ON OFF DE VDF**  
 EN ESTA ESTAPA CAMBIAMOS LA PALBRA ESTADO INICIAL EN HEXADECIMAL 16#47E. Agendado en el bit 0 se transfor...

**Segmento 3: PALABRA CREADA PARA IR GUARDANDO Y TRATANDO EL DATO.**  
 EN ESTA ESTAPA CAMBIAMOS LA PALBRA ESTADO INICIAL EN HEXADECIMAL 16#47E. Agendado en el bit 0 se transfor...

Fuente: Software TIA Portal

### 5.2.2 Bloque de función ZSW VDF\_1.

Figura N° 5.7 Bloque de función ZSW.



Fuente: Software Tia portal v16.

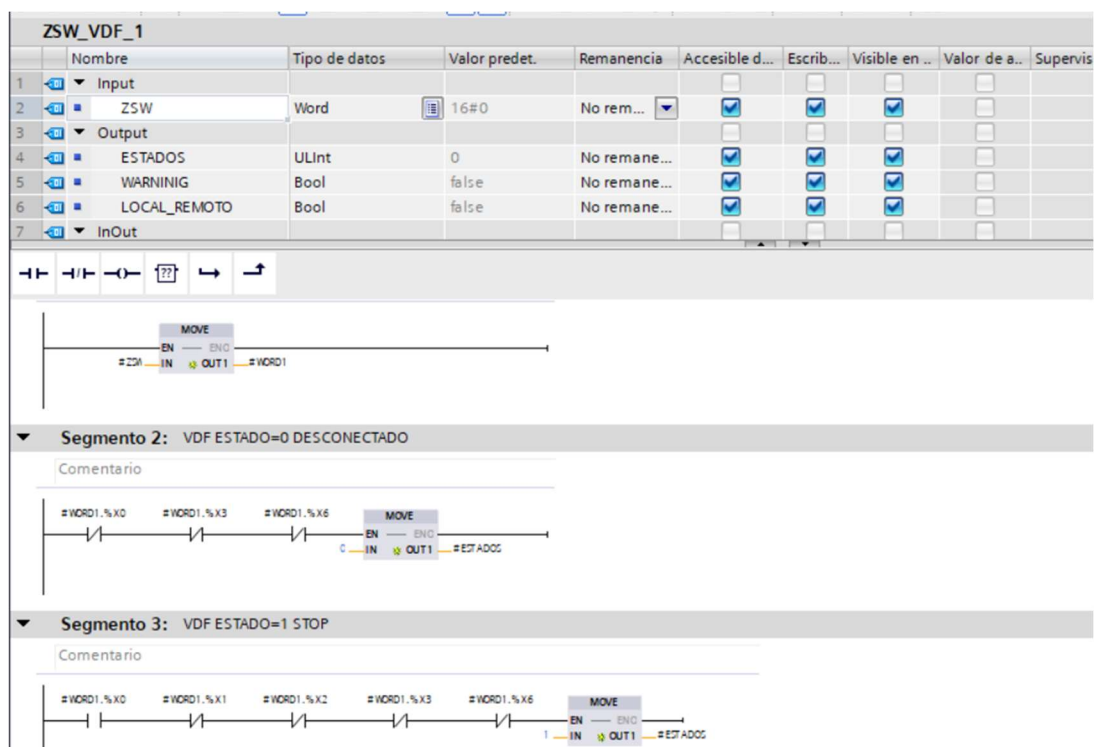
El segundo bloque creado es para la lectura de datos binarios entregados desde el variador sinamic al controlador, esta información entrega nos brinda los siguientes estados del accionamiento con el telegrama 1 estándar:

- Equipo energizado: Accionamiento se encuentra con su alimentación.
- Equipo con estado Run: Hace referencia a que está llegando la orden de marcha de la palabra de estado STW, mencionada anteriormente.
- Equipo con estado Running: Motor corriendo o girando.
- Equipo con falla: Falla general en el accionamiento, esta falla puede ser cualquier falla que se presenta en el panel.
- Equipo con enclavamiento (Necesita un flanco ascendente en la palabra de control STW “Marcha”): Ante una falla, la cual es reconocida por el operador, el equipo queda en estado de enclavamiento lo cual protege en caso de que la orden de “Marcha” se haya dado antes de reconocer la falla.

- Equipo con alarma activa: Accionamiento con alarma activa, solo es un aviso de alarma, la cual no siempre detiene el variador.
- Equipo listo para comunicar con mando de bus: Estado de equipo de Local/ Remoto.
- Equipo con dirección de motor directo o inverso: Motor corriendo hacia la derecha o reversa.

Estos estados son los que entrega el variador de frecuencia, pero en la lógica programada en el bloque solo se utiliza cinco estados que necesitará el operador: desconectado, stop, marcha derecha, Marcha reversa, falla y listo para correr. Al igual que la palabra de estado STW, también la recepción del controlador de los estados es tratada o leída en hexadecimal.

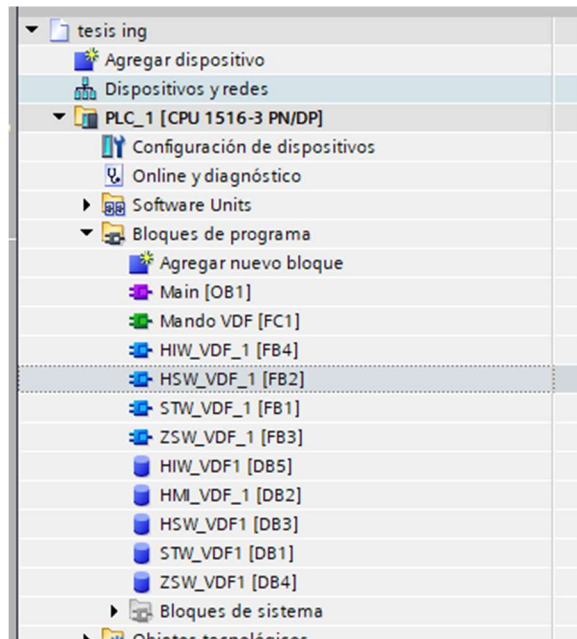
**Figura N° 5.8 Estructura y variables declaradas del bloque de datos ZSW.**



Fuente: Software Tia portal v16.

### 5.2.3 Bloque de función HSW VDF\_1

Figura N° 5.9 Bloque de función HSW.



Fuente: Software Tia portal v16.

El tercer bloque creado hace referencia al ajuste de velocidad entregado por el operador o usuario que ajusta la consigna de velocidad del variador sinamic. En estos segmentos se realizan cálculos matemáticos, lo que se hace es tomar el valor de rpm de una hmi o otro dispositivo y transformar el dato de RPM un dato tipo Real para poder tratar el valor, con el fin de enviar el rango numérico de 0-16384 cuentas para que sean entendidas por el variador de frecuencia. En otras palabras, se transforma de un dato Real a un dato tipo entero con su respectivo escalamiento.

Cálculo matemático para tratamiento de datos y escalamiento:

$$factor1: \frac{\text{Cuentas digitales (Word)}}{\text{Ref o rpm velocidad del motor (Real)}}$$

$$factor1: \frac{16348.0}{1500.0} = 10,9226$$

Con el factor 1 se define como una constante para setpoint de velocidad del usuario, para enviar el escalamiento de 0-16348 en donde:

$$0 \text{ cuentas digitales} = 0 \text{ RPMs}$$

$$16348 \text{ cuentas digitales} = 1500.0 \text{ RPMs}$$

Como tenemos el constante factor 1, se establece un segundo factor.

$$\text{factor 2: RPM (deseadas por el usuario)} \times \text{Cuentas digitales (Word)}$$

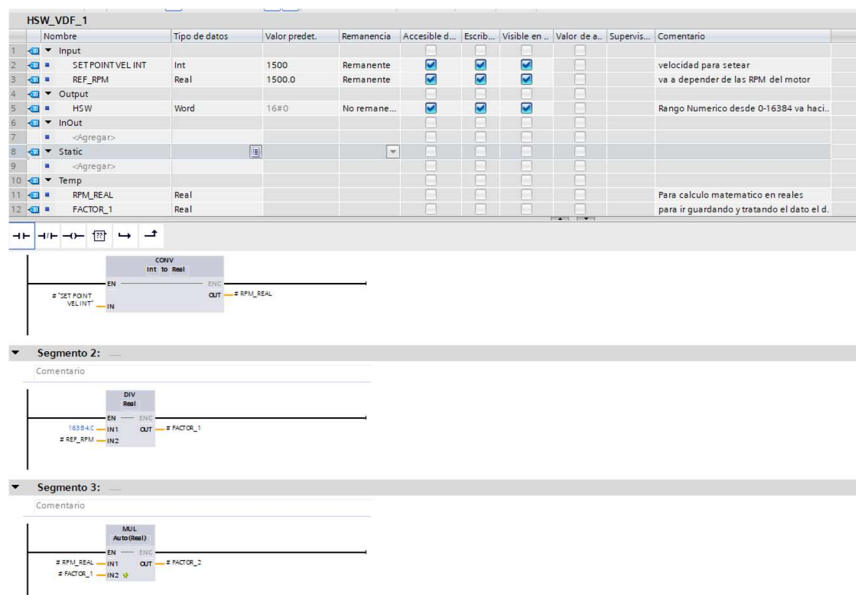
Ejemplo 1:

$$\text{factor 2: } 750 \text{ RPM} \times 16348.0$$

$$\text{factor 2: } 8192,0 \text{ cuentas digitales}$$

El factor 2 es enviado al variador de frecuencia para que sea entendido el lenguaje de procesamiento de datos.

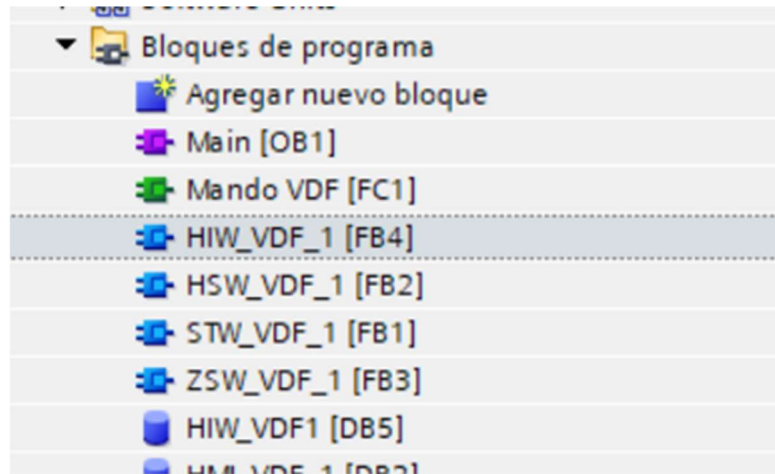
**Figura N° 5.10 Estructura de segmentos y variables de bloque de función HSW.**



Fuente: Software Tia portal v16.

#### 5.2.4 Bloque de función HIW VDF\_1.

Figura N° 5.11 Bloque de función HIW.



Fuente: Software Tia portal v16.

Se crea el último bloque de función con el fin de conocer y monitorear las rpms actual del motor, al igual que el bloque HSW se realizan cálculos matemáticos, lo que se hace es tomar el valor de rpm actual del accionamiento y transformar el dato de RPM un dato tipo Real para poder tratar el valor, con el fin de enviar el rango numérico de 0.0-16384.0 cuentas para que sean entendidas en este caso por el PLC. Se transforma un dato tipo entero o a un dato tipo real con su respectivo escalamiento según las rpms actuales del motor.

Cálculo matemático para tratamiento de datos y escalamiento:

$$\text{factor 1: } \frac{\text{Cuentas digitales (Real)}}{\text{Ref actual de rpm del motor (Real)}}$$

$$\text{factor 1: } \frac{16348.0}{1500.0} = 10,9226$$

Con el factor 1, es el mismo que se realiza en bloque de función HSW, lo que cambia es que se define como una constante para la referencia actual de velocidad del accionamiento. Como ejemplo, para obtener el factor 2 y actualmente el motor va a 1500 rpms, se afirma que:

$$\text{factor 2: } \frac{\text{Cuentas digitales (Real)}}{\text{factor 1}}$$

$$\text{factor 1: } \frac{16348.0}{10,9226} = 1500 \text{ RPMs}$$

**Figura N° 5.12 Estructura de segmentos y variables de bloque de función HIW.**

HIW_VDF_1							
	Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Remanencia	Accesible d...	Escrib...	Visible e
1	Input				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	HIW	Int	0	No remane...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	REF_RPM	Real	1500.0	Remanente	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Output				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	InOut				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Static				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Temp				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	HIW_REAL	Real			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	FACTOR_1	Real			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	FACTOR_2	Real			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Diagram 1: REAL block configuration. Inputs: EN, IN1 (16384.0), IN2 (#REF\_RPM). Output: OUT (#FACTOR\_1).

**Segmento 3:** .....

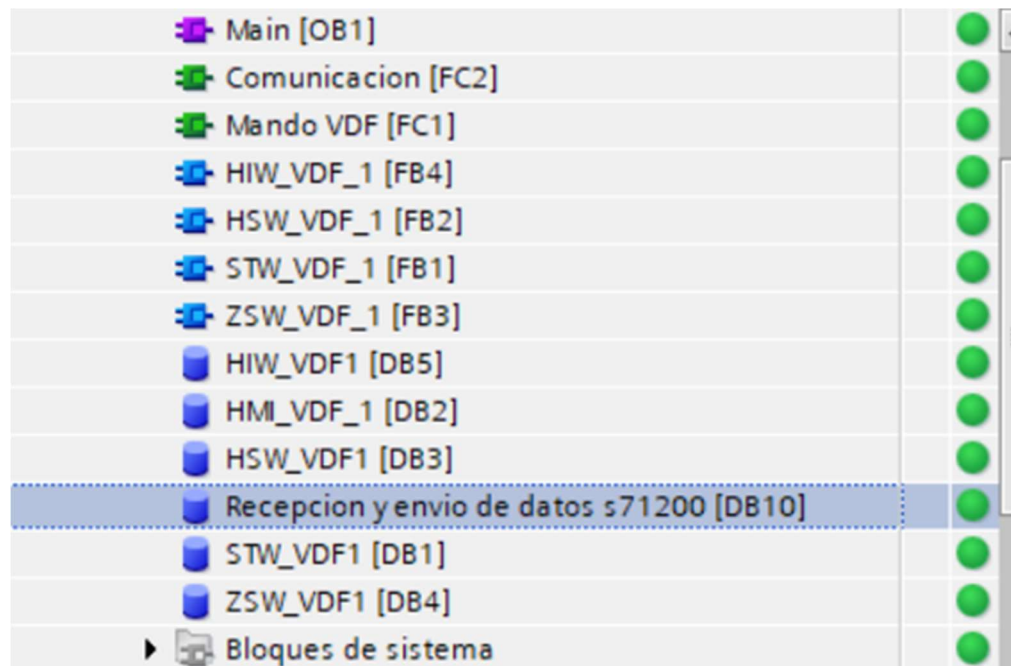
Comentario

Diagram 2: DIV Auto (Real) block configuration. Inputs: EN, IN1 (#HIW\_REAL), IN2 (#FACTOR\_1). Output: OUT (#FACTOR\_2).

Fuente: Software Tia portal v16.

### 5.2.5 Bloque de datos globales (DB).

Figura N° 5.13 DB de envío y recepción de datos de otro controlador.



Fuente: Software Tia portal v16.

Se agrega un bloque de datos globales para declarar las variables a utilizar por un HMI y un DB de recepción de datos de otro controlador. Las variables por declarar son

- Partir /Parar.
- Reset.
- Inversión de giro.
- Estados de variador sinamic.
- Consigna de velocidad o Set point.
- Referencia de velocidad actual.

**Figura N° 5.14 Tabla de variables de envío y recepción.**

Recepcion y envio de datos s71200							
	Nombre	Tipo de datos	Offset	Valor de arranq...	Valor de observación	Remanen...	Visible e...
1	Static					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Recepcion de comandos de DCS	Int	0.0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Recepcion de Set Point velocidad DCS	Int	2.0	0	1500	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Envio Ref velocidad VF 1	Int	4.0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Envio de estados a DCS	Int	6.0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	<Agregar>					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

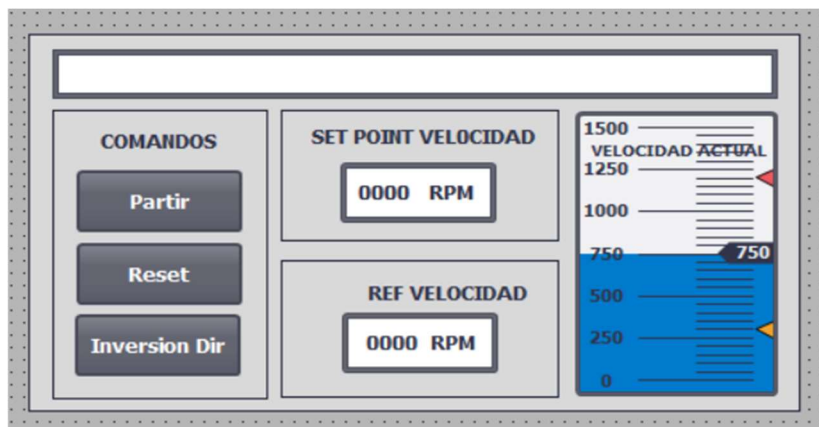
Fuente: Software Tia portal v16.

Las variables declaradas en este db de datos globales son datos que se pueden utilizar en cualquier bloque creado, en donde pueden ser llamadas cuando las requiera el programador. En la figura se observan las variables que son enviadas y recibidas desde el dcs para el monitoreo y comandos de ambos controladores.

### 5.3 Pantalla de visualización en DCS.

Se realiza una pantalla para las pruebas generadas en taller para el ajuste y monitoreo de los variadores de frecuencia, solo se realiza un ejemplar para un alimentador.

**Figura N° 5.15 HMI de pruebas en taller**



Fuente: Software Tia portal v16.

#### 5.4 Pruebas en taller de comunicación.

En este punto, con el controlador programado, la interfaz HMI creada, y la configuración del sinamic lista, es posible comenzar a realizar pruebas de comunicación y control para observar cómo se comporta el accionamiento.

Las pruebas iniciales se realizaron sin mayores complicaciones, con errores de ajuste en la parametrización del variador de frecuencia y programación que se solucionaron a la brevedad, las pruebas de comunicación se realizan en taller de instrumentación por la prestaciones y equipos que se necesita.

**Figura N° 5.15 Equipos en prueba.**



Fuente: Comunicación s7 1500 y variador sinamic g120 taller de instrumentación, 2024.

**Figura N° 5.15 Pruebas en la programación.**



Fuente: Comunicación s7 1500 y variador sinamic g120 taller de instrumentación, 2024.

**Figura N° 5.15 Parametrización de variador sinamic G120.**



Fuente: Comunicación s7 1500 y variador sinamic g120 taller de instrumentación.

## CAPÍTULO VI

### SUSTENTABILIDAD Y CONFIABILIDAD DEL PROYECTO

En este capítulo se demostrará que con la implementación del proyecto se logra disminuir la variabilidad del proceso y minimizar el costo del mantenimiento correctivo, asegurando la confiabilidad y disponibilidad física de los equipos.

Para ello lo primero será recuperar una base de datos desde SAP Logon 770 los avisos y órdenes de mantenimiento correctivo por detenciones no programadas de la ruta de embarque y sus costos, además de los retrasos en las cargas de naves que esto implica, así como también los cambios de componentes y repuestos de equipos dañados por estas detenciones.

El objetivo es proporcionar una visión clara del estado actual del sistema, identificar áreas de oportunidad y establecer una base para futuras optimizaciones. A través de este análisis, se busca no solo entender el rendimiento actual, sino también crear un marco para la toma de decisiones informadas que contribuyan al mejoramiento continuo del proceso.

#### **6.1 Descripción del sistema actual en ruta de embarque.**

##### **6.1.1 Datos de rendimiento de correas transportadoras.**

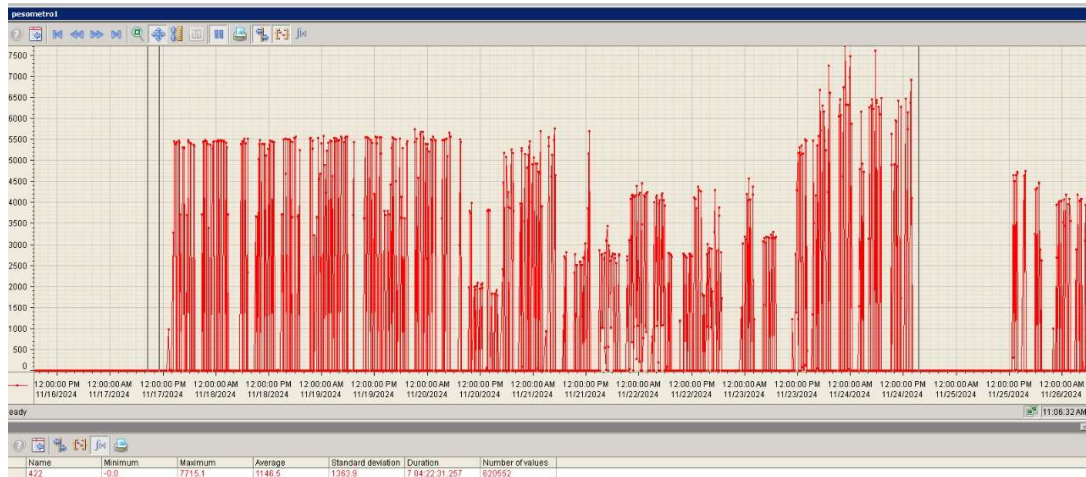
Esta sección presenta un análisis de los datos de rendimiento de las correas transportadoras del área de embarque y específicamente de la correa CT-09, donde se obtienen las lecturas de flujo de material con pesometro WIT-422, evaluando tanto su capacidad de carga como su eficiencia operativa. Se abordarán métricas claves, como la capacidad de carga por hora, la velocidad de las correas, los tiempos de inactividad, antes y después de implementar mejoras en el sistema.

Datos de correa transportadora CT-09:

- Potencia motriz: 2x300 HP
- Reductores Mecánicos: Paramax 9085
- Torque de correa: 73 kNm

- Velocidad de correa: 2,4 mts/seg
- Largo de correa: 320 mts
- Ancho de correa: 1,8 mts
- Capacidad de carga: 23,5 ton
- Flujo de carga: 5.000 ton/hrs

**Gráfico N° 6.1 Rendimiento actual del sistema de embarque CT-09.**



Fuente: HMI sala de control embarque pesometro 422, correa CT-09.

### 6.1.2 Costos del mantenimiento.

Los costos del área de mantenimiento corresponden a los gastos asociados a la conservación, reparación y mejoras del área de embarque en puerto, estos se encuentran agrupados en las siguientes áreas:

- Mantenimiento mecánico.
- Mantenimiento eléctrico e instrumentación.
- Automatización y control.
- Servicios Técnicos.
- Etc.

De los cuales se clasifican en los siguientes tipos de mantenimiento:

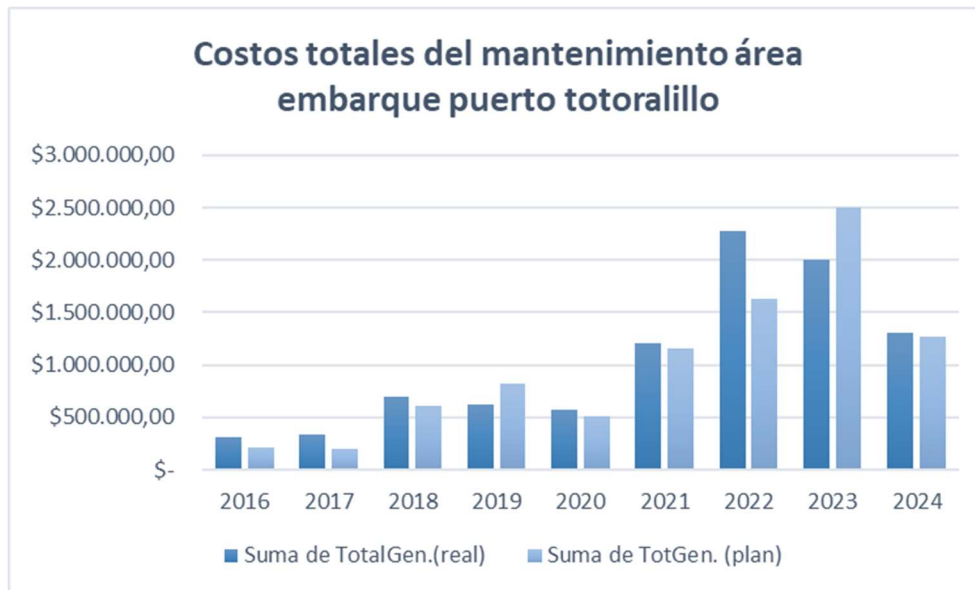
- Mantenimiento preventivo.

- Mantenimiento correctivo.
- Mantenimiento predictivo.

A continuación, se agrupan los costos reales y planificados anuales desde el año 2016 al 2024, considerando:

- Actividades planificadas a corto plazo.
- Actividades planificadas a largo plazo.
- Actividades correctivas.
- Intercambio de repuestos.
- Insumos de mantenimiento.

**Gráfico N° 6.2 Costos totales del mantenimiento del área de embarque.**



Fuente: Gráfico obtenido desde base de datos, SAP Logon 770 versión 2021, Puerto Totoralillo

### 6.1.3 Costos del mantenimiento correctivo por detenciones no programadas.

El siguiente gráfico ilustra la evolución de los costos asociados al mantenimiento correctivo a lo largo del tiempo. Este tipo de mantenimiento se realiza en respuesta a fallos inesperados de los equipos, suele generar costos variables y, en muchos casos, más elevados debido a la urgencia de las reparaciones y la necesidad de reemplazo de

componentes. El gráfico refleja las variaciones de estos costos, permitiendo identificar patrones o incrementos en momentos específicos, lo que puede ser útil para analizar la efectividad de las estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo implementadas en la organización.

**Gráfico N° 6.3 Costos de mantenimiento por actividades fuera de programa.**



Fuente: Gráfico obtenido desde base de datos, SAP Logon 770 versión 2021, Puerto Totoralillo

**Tabla N° 6.1 Resumen de costos de mantenimiento.**

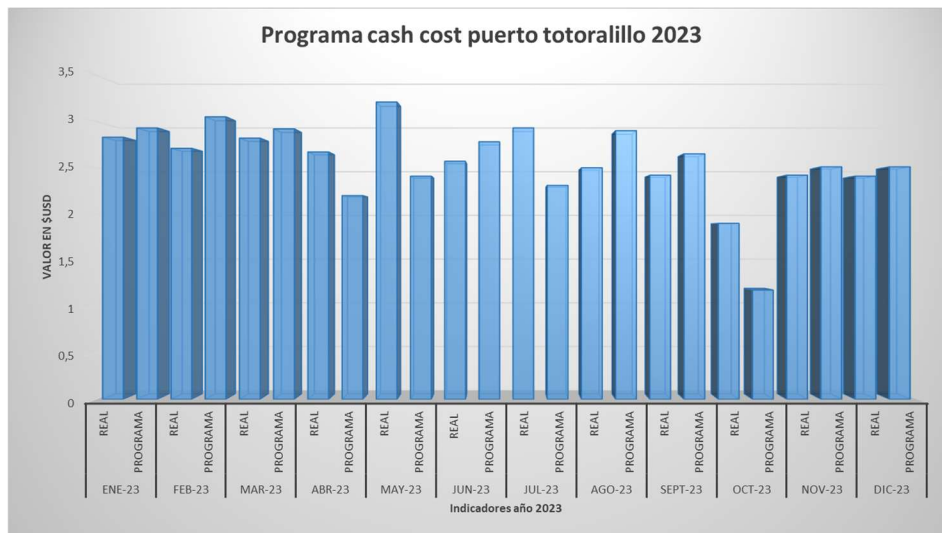
Resumen de costos por mantenimiento		
Año	Costos por mantenimiento área embarque	Costos de mantenimiento por actividades no programadas
2018	\$ 702.198,34	\$ 137.000
2019	\$ 623.927,76	\$ 166.560
2020	\$ 567.690,98	\$ 151.969
2021	\$ 1.208.802,74	\$ 157.677
2022	\$ 2.272.807,53	\$ 402.994
2023	\$ 1.996.435,80	\$ 182.374
2024	\$ 1.301.078,81	\$ 132.350
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 8.672.941,96</b>	<b>\$ 1.330.923,07</b>

### 6.1.4 Costos de producción.

Los costos de producción son todos los gastos involucrados en la producción y embarque de tonelada de fierro, la producción corresponde al filtrado del producto que llega a puerto desde las plantas magnetita y cerro negro norte, el apilamiento en canchas de almacenamiento y hasta el embarque del producto, Estos costos se representan entonces como la tonelada final embarcada y se controlan desde la planificación de producción como el budget, que representa el costo programado en versus el costo final de producción en toneladas embarcadas.

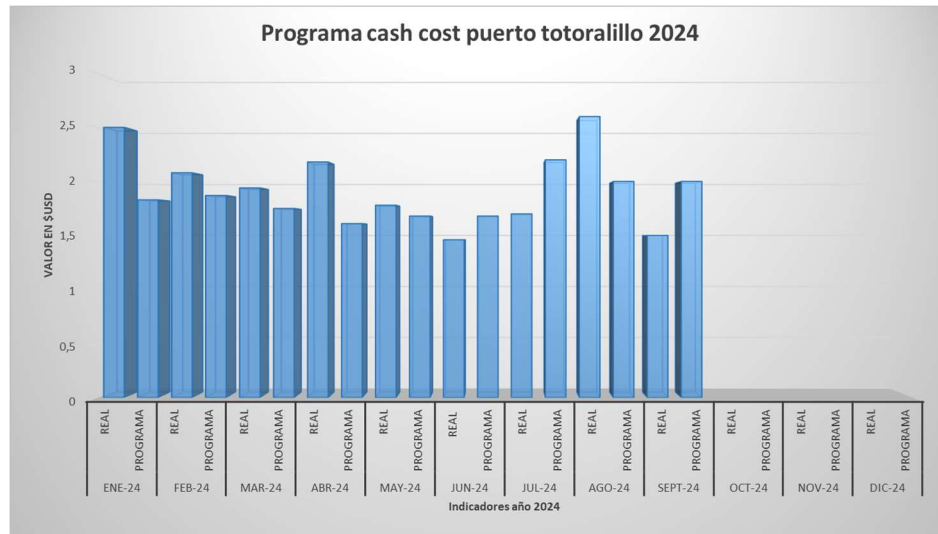
A continuación, se detallan los costos por budget de los años 2023 y 2024, datos obtenidos desde cumplimiento anual de producción en CMP valle de Copiapó.

**Gráfico N° 6.4 Costos de producción por tonelada año 2023.**



Fuente: Gráfico obtenido desde base de datos, indicadores de cumplimiento de producción, CMP Valle Copiapó.

### Gráfico N° 6.5 Costos de producción por tonelada año 2024.



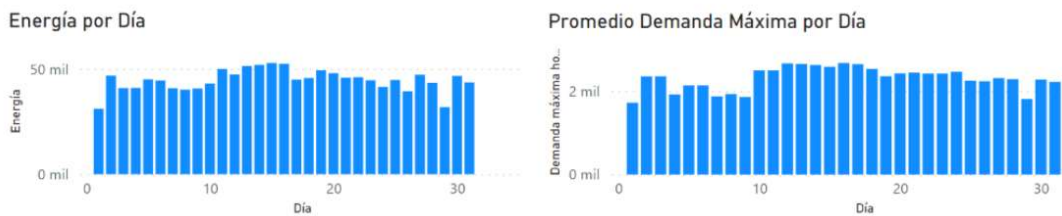
Fuente: Gráfico obtenido desde base de datos, indicadores de cumplimiento de producción, CMP Valle Copiapó.

#### 6.1.5 Costos indirectos.

Se clasifica como costo indirecto el consumo energético de puerto Totalillo. Estos costos están directamente relacionados con la demanda de energía eléctrica utilizada en puerto para la operación de equipos de planta, iluminación, calefacción, y otros sistemas dentro de las instalaciones de producción.

A continuación, se grafican los costos por consumo energético en el puerto Totalillo.

#### Gráfico N° 6.6 Consumo energético puerto Totalillo.



Fuente: Facturación consumo energético marzo 2023.

**Figura N° 6.1 Factura mensual consumo energético Puerto Totoralillo.**



Fuente: Facturación consumo energético marzo 2023

## 6.2 Causas de detenciones no programadas y tiempos de mantenimiento.

El mantenimiento adecuado y la gestión de los tiempos de parada en las correas transportadoras son fundamentales para garantizar el rendimiento eficiente y la continuidad operacional. Las paradas no programadas pueden ocasionar importantes pérdidas de tiempo y afectar la producción. A continuación, se detallan los aspectos relacionados con los tiempos de paradas y mantenimiento en las correas transportadoras:

- **Paradas no programadas:**
  - **Causas comunes:** Las paradas imprevistas generalmente son causadas por fallas mecánicas, desgaste excesivo de componentes, obstrucciones o daños en la correa. Problemas con los motores, rodillos o el sistema de tensado también pueden ocasionar interrupciones inesperadas.
  - **Impacto en la producción:** Las paradas no planificadas afectan la continuidad de las operaciones y pueden generar retrasos significativos en la cadena de producción o en el transporte de materiales.
  - **Acciones correctivas:** Es esencial contar con equipos de mantenimiento preparados para abordar fallas rápidamente, además de realizar análisis detallados de las causas para evitar recurrencias.

### 6.2.1 Causas de fallas no programadas en la ruta de embarque.

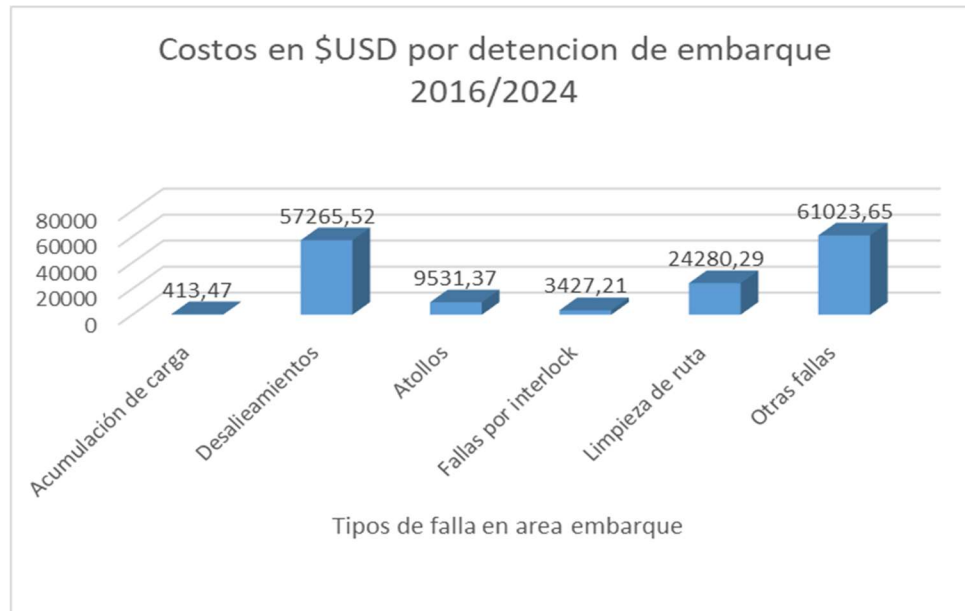
Las fallas no programadas en la ruta de embarque pueden generar retrasos y pueden afectar la eficiencia en las operaciones logísticas. Actualmente ocurren hasta 50 detenciones por fallas del proceso de embarque, enlazadas a la inestabilidad de carga en las cintas transportadoras, cada una con retrasos de 0,5 a 3 horas de detención, algunas de las principales causas por la inestabilidad de carga son:

- **Desalineamientos de cintas:** Desplazamiento de la cinta transportadora fuera de su trayectoria longitudinal, lo cual genera daños de componentes, desgaste de polines y cinta, cortes de correas.
- **Acumulación de carga:** La acumulación de carga en las cintas y transportadoras, ocurre por la inestabilidad de la carga y desalineamientos de las cintas, causando atollos, sobrecarga y daños de componentes, desgaste acelerado de la cinta.
- **Atollos:** Los atoros o atollos en correas transportadoras, es la interrupción de material en los chutes de traspaso de estas y ocurren por el bloqueo o atasco de material en esta zona, las causas son alta humedad del material, exceso de carga en las cintas transportadoras, falta de sistemas de distribución de carga en los traspasos.
- **Fallas por interlock:** Las fallas por interlock corresponden a la activación de los sistemas de seguridad que contienen las correas transportadoras, estos dispositivos detienen el proceso con el fin de evitar daños en la cinta. Las causas de estas activaciones son desalineamientos, acumulación de carga y atollos.

Para todas estas condiciones existe un costo adicional considerado el mantenimiento correctivo o limpieza de ruta, este ítem también tiene un costo en horas hombre, tiempo de detención y materiales.

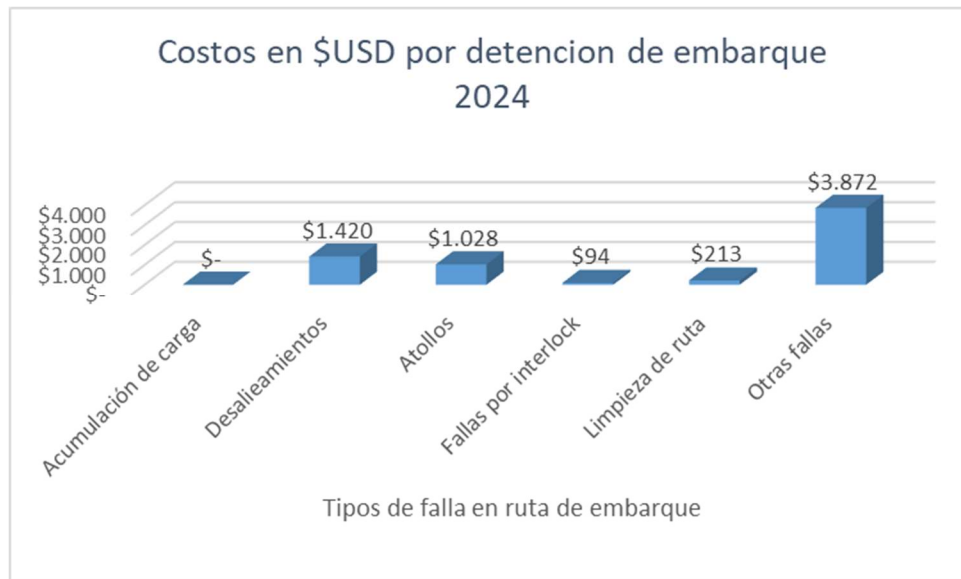
El análisis de estas causas y la implementación de medidas correctivas y preventivas son fundamentales para minimizar las fallas no programadas y mejorar la eficiencia del proceso logístico.

**Gráfico N° 6.5 Costos por detenciones de ruta de embarque desde 2016 al 2024.**



Fuente: Gráfico obtenido desde base de datos, SAP Logon 770 versión 2021, Puerto Totoralillo.

**Gráfico N° 6.6 Costos por detenciones de ruta de embarque año 2024.**



Fuente: Gráfico obtenido desde base de datos, SAP Logon 770 versión 2021, Puerto Totoralillo

**Tabla N° 6.2 Resumen de por fallas en ruta de embarque.**

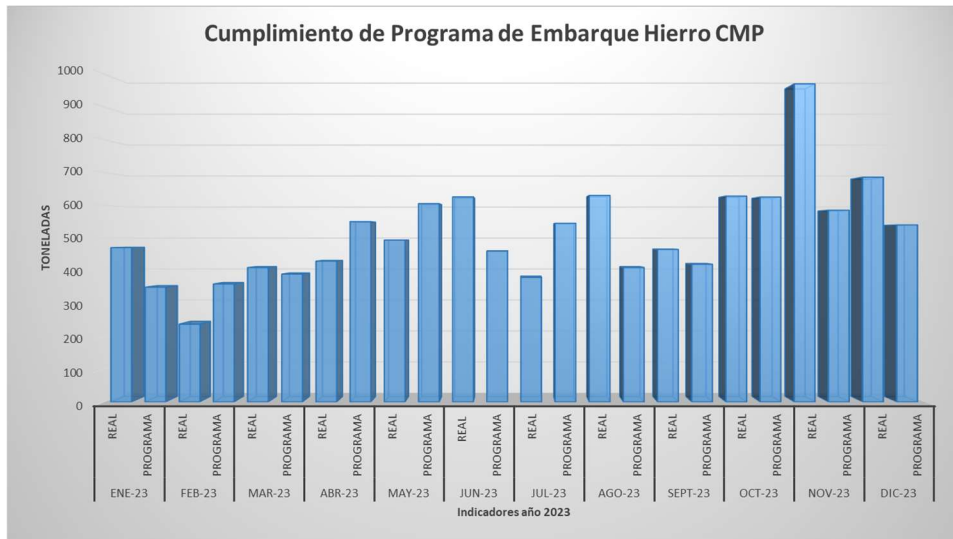
Tipos de falla en ruta de embarque							
Año	Acumulación de carga	Desalineamientos	Atollos	Fallas por interlock	Limpieza de ruta	Otras fallas	
2016	\$ 34	\$ 5.975	\$ 277	\$ 262	\$ 2.268	\$ 4.719	
2017	\$ 13	\$ 5.601	\$ 305	\$ 267	\$ 1.894	\$ 5.492	
2018	\$ 12	\$ 8.189	\$ 286	\$ 490	\$ 2.428	\$ 7.933	
2019	\$ 21	\$ 6.872	\$ 477	\$ 411	\$ 2.185	\$ 5.492	
2020	\$ 81	\$ 4.982	\$ 1.859	\$ 411	\$ 4.249	\$ 6.713	
2021	\$ 8	\$ 6.687	\$ 191	\$ 583	\$ 2.914	\$ 9.764	
2022	\$ 37	\$ 9.162	\$ 858	\$ 308	\$ 2.112	\$ 7.323	
2023	\$ 207	\$ 8.377	\$ 4.252	\$ 600	\$ 6.017	\$ 9.716	
2024	\$ -	\$ 1.420	\$ 1.028	\$ 94	\$ 213	\$ 3.872	
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 413</b>	<b>\$ 57.266</b>	<b>\$ 9.531</b>	<b>\$ 3.427</b>	<b>\$ 24.280</b>	<b>\$ 61.024</b>	

### 6.3 Cumplimiento de programas de producción.

El cumplimiento del programa de producción es un indicador de la gestión de producción y las operaciones. En puerto Totalillo se mide con el porcentaje de cumplimiento y se enfoca en cumplir con los plazos y la calidad establecidas en el programa de producción. El cumplimiento del programa de producción es fundamental para optimizar los recursos y minimizar los costos. Este índice es llamado forecast, y se establece como el valor programado versus el valor real.

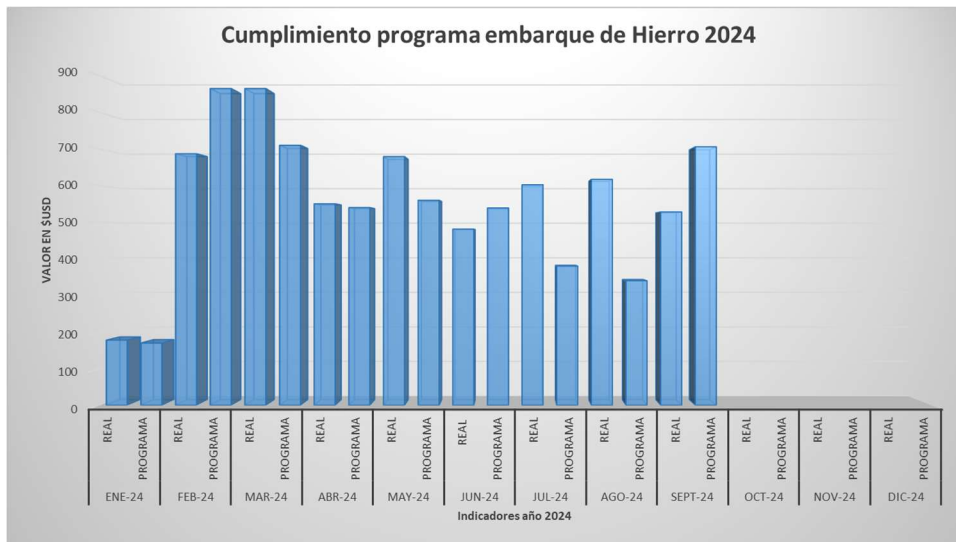
A continuación, se grafican los cumplimientos de forecast de los años 2023 y 2024 en puerto Totalillo, estos datos son obtenidos del cumplimiento de producción anual de CMP en el valle de Copiapó.

**Gráfico N° 6.7 Cumplimiento del programa de producción año 2023.**



Fuente: Gráfico obtenido desde base de datos, indicadores de cumplimiento de producción, CMP Valle Copiapó.

**Gráfico N° 6.8 Cumplimiento del programa de producción año 2024.**



Fuente: Gráfico obtenido desde base de datos, indicadores de cumplimiento de producción, CMP Valle Copiapó.

## 6.4 Resultados.

El análisis de costos por detenciones de la ruta de embarque es una evaluación que permite entender los impactos económicos derivados de las paradas no planificadas o interrupciones en el proceso de embarque de fierro magnético. Este análisis se enfoca en identificar los costos adicionales generados por las detenciones, que pueden afectar la eficiencia operativa y la rentabilidad de la empresa.

De acuerdo con los hallazgos obtenidos se puede disuadir de que existe un incremento en costos de operación y mantenimiento debido a las detenciones no programadas, según los ítems expresados a continuación.

- **Correa transportadora CT-09:** De acuerdo con el rendimiento obtenido de la correa transportadora, esta alcanza un flujo de carga de 5.000 toneladas por hora, siendo esta el área crítica del proceso, y en donde se debe salvaguardar el proceso.
- **Costos de mantenimiento:** Se presenta un alza en el gasto por costos de mantenimiento correctivo, debido a las detenciones no programadas, los datos muestran una tendencia de crecimiento en estos costos, debido al aumento de producción de la planta y equipos.
- **Costos de producción:** Los costos de producción se evalúan desde el año 2016 al 2024, y se evidencia una variación al alza del budget, destacando nuevamente los costos por detenciones no programadas del proceso.
- **Consumo Energético:** Se clasifica el consumo energético como un costo indirecto el cual interviene de manera indirecta con los costos operativos, este costo también muestra un creciente debido al aumento de producción, además de ser unos de los puntos a controlar con la implementación de un proyecto de mejora.
- **Causas de Detenciones No Programadas:** Este análisis asocia las causas que más destacan en las detenciones no programadas, los cuales contribuyen significativamente en los costos por aumento de horas de intervención por quiebres de programa de mantenimiento y daño de equipos.

- **Cumplimiento del Programa de Producción:** El Forecast o cumplimiento de programa de producción fue evaluado con los datos obtenidos en los años 2023 y 2024, los resultados muestran una variabilidad en el cumplimiento, lo que remarca la importancia en mejorar la gestión de producción y la optimización de recursos para disminuir los costos operacionales.

## 6.5 Análisis de costo y beneficio.

El análisis de costos y beneficios es la importancia de implementar acciones correctivas y preventivas para reducir los costos asociados a los eventos que generan una inestabilidad del proceso, para luego proponer mejoras que den confiabilidad a la operación, disponibilidad de equipos y el aumento de producción.

### 6.5.1 Costo de implementación del proyecto.

#### 6.5.1.1 Costo inicial.

- **Cableado de proyecto (X):** La valorización del cableado se contempla sólo como mano de obra externa, el material o conductores se realiza con excedentes de proyecto, estos costos por lo tanto se miden como horas hombre, con un valor unitario de \$7,5 US por metro.

Tendido de alimentadores área cancha apilamiento planta magnetita.

$$1.340 \text{ mts} * 7,5 \text{ US} = \$10.050 \text{ US}$$

Tendido de alimentadores área cancha apilamiento cerro negro norte.

$$2.525 \text{ mts} * 7,5 \text{ US} = \$18.937,5 \text{ US}$$

- **Conexión de proyecto (Y):** La valorización del conexionado se contempla también se proyecta sólo como mano de obra externa y su costo tiene un valor en horas hombre de \$41,5 US, y se estima un tiempo de ejecución de 36 horas.

$$41,5 \text{ US} * 36 \text{ hrs} = \$1.494 \text{ US}$$

- **Programación y puesta en servicio de variadores (Z):** La valorización de la programación de variadores de frecuencia y puesta en servicio, se proyecta con mano de obra eléctricos y operadores de CMP además un encargado del área de automatización y control también de CMP, y se valoriza con los siguientes costos por horas hombre.
  - Eléctrico CMP: \$15 US
  - Operador CMP: \$13 US
  - Ingeniero de automatización y control CMP: \$23 US

Para la implementación se consideran dos eléctricos CMP más dos operadores y un ingeniero de automatización y control por cinco días de intervención.

- Eléctrico CMP:  $42 \text{ hrs} * 2 * 15 \text{ US} = \$1.260 \text{ US}$
- Operador CMP:  $42 \text{ hrs} * 2 * 13 \text{ US} = \$1.092 \text{ US}$
- Ingeniero de automatización y control CMP:  $42 \text{ hrs} * 23 \text{ US} = \$966 \text{ US}$

#### 6.5.1.2 Costos operativos.

- **Mantenimiento preventivo de nuevos equipos (A):** El mantenimiento preventivo de los nuevos equipos variadores de frecuencia se ejecutarán por plan matriz con el área de mantenimiento eléctrico y el área de monitoreo de condiciones (moncon) y tendrán frecuencias de mantenimiento de acuerdo a lo establecido por confiabilidad puerto:

Mantenimiento eléctrico:

- Mantenimiento trimestral: 1 hora de intervención por equipo.
- Mantenimiento semestral: 2 horas de intervención por equipo.
- Mantenimiento anual: 3 horas de intervención por equipo.

Monitoreo de condiciones:

- Mantenimiento mensual: 0,3 horas de intervención por equipo.

Lo anterior estará establecido con horas de mantenimiento CMP y tendrá un costo de \$15 US por hora de intervención, por lo tanto, el costo anual será:

Mantenimiento eléctrico:  $11 \text{ hrs} * 15 \text{ US} = \$165 \text{ US}$

Monitoreo de condiciones:  $0,3 * 12 * 15 \text{ US} = \$54 \text{ US}$

- **Reemplazo de componentes críticos (B):** Se considera además la codificación en SAP para el stock en bodega de un variador nuevo en caso de fallas, el cual estará codificado con stock mínimo de un equipo.

Valor unidad:  $\$6.394 \text{ US}$

Valor stock:  $\$6.394 \text{ US}$

**Figura N° 6.2 Transacción SAP MMBE resumen de stock.**

The screenshot shows the SAP MMBE (Material Stock Summary) interface for material 50144925. The title bar reads "Visualizar material 50144925 (Materiales mantenimiento)". The material name is "VARIADOR FREC SCHNEIDER ATV71HD37N4" and the plant is "MP12 Los Colorados". The current period is "012.2024".

**Datos de valoración generales**

Stock total	2	UM base	UN	Unidad
Sector		Tipo valoración		
Cat.valoración	3040	<input type="checkbox"/> UM valorada		
Cat.ValorPedCite		<input checked="" type="checkbox"/> LM act.		Anál.precio mat.
Cat.valor.proy.		Determ.precio	2	Pr operación

**Precios y valores**

	Moneda de la sociedad	Moneda del grupo
Tipo moneda	Moneda de la sociedad	Moneda del grupo
Ledger	0L	0L
Moneda	Moneda de la sociedad	Moneda del grupo
Vista valor.	Legal	Legal
Clave de moneda	USD	USD
Precio estándar	0,00	0,00
Prec.inter.per.	6.394,91	6.562,77
Cantidad base	1	1
Control de precio	V	V
Valor stock	12.789,82	13.125,53
Valor/Precio PIP	0,00	0,00
Precio futuro	0,00	0,00
Inl.valid.precio		

Fuente: SAP Logon 770 versión 2021, Puerto Totoralillo, para valor referencial.

## **6.6 Beneficios del proyecto.**

### **6.6.1 Reducción de costos por mantenimiento correctivo.**

Mejorar la confiabilidad de la operación en las correas del área de embarque implementando adicionalmente un programa de mantenimiento predictivo y preventivo, para garantizar una disminución en costos de intervención por detenciones no programadas.

- **Beneficio estimado (E):** La implementación del proyecto podrá reducir en más de \$150.000US los costos anuales por mantenimiento correctivo, el cual podría alcanzar alrededor de un 12% del costo anual del mantenimiento en el área de embarque.

### **6.6.2 Reducción de tiempos de detención en ruta de embarque.**

La reducción de detenciones no programadas de la ruta de embarque asegura cumplimientos con la naviera, minimizando los costos por derrame, o costos por demora en transporte y logística, el cual alcanza a valores de sanción de \$25.000US por día de retraso, actualmente se producen cerca de 50 detenciones no programadas con un promedio de 1,8 horas cada una.

- **Beneficio estimado (F):** La implementación del proyecto podrá reducir hasta en 80 horas las detenciones anuales, la cual podría disminuir el costo por derrame en un total de \$83.000 US.

### **6.6.3 Mejora en eficiencia operativa.**

En un sistema más confiable donde se presentan menos detenciones del proceso, se genera una mayor producción, generando un cambio de tiempos en falla a tiempos de producción, por lo tanto, aumenta la confiabilidad de los equipos para operaciones.

- **Beneficio estimado (G):** La implementación aumentará la producción en más de 80 horas del proceso, las cuales equivalen a más de 416.000 toneladas embarcadas, que según el valor actual de la tonelada de fierro magnético en pellet feed, menos los costos de producción corresponden a \$20.800.000 US.

#### 6.6.4 Optimización del consumo energético.

Al presentarse una disminución en las detenciones no programadas, se evitarán las puestas en servicio de correas con carga, lo cual genera una sobre corriente de partida, además al implementar variadores de frecuencia en los motores de correas alimentadoras, se controlarán de mejor manera las rampas de corriente de partida.

- **Beneficio estimado (H):** La implementación optimizará el consumo energético del área de embarque.

#### 6.6.5 Mejor cumplimiento del forecast.

Al mejorar la confiabilidad de los equipos y del proceso, se podrá contar con un mejor cumplimiento del forecast, reduciendo los costos directos e indirectos se avanza en la optimización de recursos, y en la entrega de un mejor servicio para los clientes.

- **Beneficio estimado:** Se espera un incremento de un 7% de producción en el sistema de embarque, aumentando a lo menos dos barcos de 208.000 toneladas de pellet feed,

### 6.7 Análisis de rentabilidad del proyecto.

#### 6.7.1 Costos totales de inversión.

La inversión inicial corresponde a:

$$\begin{aligned} X + Y + Z &= \text{Costos de inversión} \\ &= 10.050 + 18.937,5 + 1.494 + (1.260 + 1.092 + 966) \end{aligned}$$

$$\text{Costos de inversión} = \$33.799 \text{ US}$$

#### 6.7.2 Costos operativos anuales.

Los costos operativos anuales corresponden a:

$$A + B = \text{Costos operativos anuales}$$

$$\text{Costos operativos anuales} = (165 + 54) + 6.394$$

$$\text{Costos operativos anuales} = \$6.613 \text{ US}$$

### 6.7.3 Beneficios totales estimados.

Los beneficios del proyecto destacan en los siguientes ítems:

**Tabla N° 6.3 Beneficios estimados del proyecto.**

Beneficios estimados del proyecto			
Ítem	Descripción	Valor	Unidad
1.	Reducción de costos por mantenimiento correctivo	\$ 150.000	US
2.	Reducción de tiempos por detención no programada	\$ 83.000	US
3.	Mejora en eficiencia operativa	\$20.800.000	US
4.	Mejora de cumplimiento forecast	416.000	Toneladas

### 6.7.4 Recomendación del proyecto.

De acuerdo con el análisis de costos y beneficios, La rentabilidad esperada es super significativa, y la contribución a la mejora continua de la planta, además del impacto adicional que tendrá sobre sustentabilidad y el ahorro energético.

El proyecto se hace completamente recomendable, y se convierte de inmediato en una gran oportunidad de mejora para el aumento de producción, la confiabilidad de los equipos de operaciones y la disminución de horas de intervención por fallas no programadas del área de mantenimiento.

## CONCLUSIONES

El proyecto propuesto para mejorar la confiabilidad y eficiencia operativa en la ruta de embarque del puerto Totoralillo representa una oportunidad significativa para optimizar los costos operativos y aumentar la rentabilidad del proceso. A través de un análisis detallado de los costos de mantenimiento, los tiempos de detención no programada y el impacto en la producción, se identificó un claro beneficio en la reducción de gastos, principalmente en mantenimiento correctivo, consumo energético y derrames por retrasos en la carga.

La implementación de variadores de frecuencia en el control de los procesos de embarque demostró ser una medida efectiva en las instalaciones portuarias. A través de la regulación de velocidad de las correas transportadoras, la integración de variables rescatadas de los accionamientos y monitoreo de datos se logró una optimización del flujo de carga, reduciendo el consumo energético y minimizando el desgaste de los componentes, lo que a su vez disminuyó los tiempos de mantenimiento correctivo y los tiempos de inactividad.

El proyecto no solo contribuyó a reducir los costos directos e indirectos asociados a las fallas no programadas, sino que también permitió un aumento de la producción, mejor cumplimiento del forecast y una mayor disponibilidad de equipos, lo que se tradujo en una mejora sustancial en la eficiencia operativa y en el servicio brindado a los clientes.

Los beneficios estimados, como la reducción de tiempos de detención y el aumento en la producción, justificaron completamente la inversión inicial y los costos operativos anuales. El análisis de rentabilidad del proyecto reveló un retorno significativo en términos económicos, lo que hizo que la implementación fuera una inversión estratégica a largo plazo. En resumen, el proyecto no solo mejoró la confiabilidad y sustentabilidad del proceso, sino que también optimiza el uso de recursos, mejora la eficiencia energética y aseguró un incremento en la producción. Por lo tanto, se recomendó su implementación como una acción crucial para el futuro de la planta y sus operaciones logísticas.

## **ABSTRACT**

The proposed project to improve reliability and operational efficiency in the shipping route at Totoralillo port represented a significant opportunity to optimize operational costs and increase the profitability of the process. Through a detailed analysis of maintenance costs, unplanned downtime, and production impact, a clear benefit was identified in reducing expenses, primarily in corrective maintenance, energy consumption, and delays caused by loading setbacks.

The implementation of variable frequency drives (VFDs) in controlling shipping processes proved to be an effective measure in port facilities. By regulating the speed of conveyor belts, integrating variables retrieved from the drives, and monitoring data, it was possible to optimize cargo flow, reduce energy consumption, and minimize component wear. This, in turn, reduced corrective maintenance times and operational downtime.

The project not only helped reduce direct and indirect costs associated with unplanned failures but also allowed for increased production, better forecast compliance, and greater equipment availability. These improvements resulted in a substantial enhancement of operational efficiency and the service provided to customers.

The estimated benefits, such as reduced downtime and increased production, fully justified the initial investment and annual operational costs. The project's profitability analysis revealed a significant economic return, making its implementation a strategic long-term investment. In summary, the project not only improved the reliability and sustainability of the process but also optimized resource use, enhanced energy efficiency, and ensured an increase in production. Therefore, its implementation was recommended as a crucial action for the future of the plant and its logistical operations.



## BIBLIOGRAFÍA

- ABB, Ipo Ruohonen. (2006). Modelo OSI. Buses de campo para accionamiento, (2), 2.
- Alvarez, M. (2000). Convertidores de frecuencia, controladores de motores y SSR. Barcelona, España: Marcombo Boixareu (Pag,11.)
- CAP (2023, 17 enero). La nueva ruta de CAP - CAP S.A. Principal Grupo Minero Siderúrgico de Chile. CAP S.A. Principal Grupo Minero Siderúrgico de Chile. <https://www.cap.cl/cap/la-nueva-ruta-de-cap/2023-01-17/164502.html>
- CMP (2023). Reporte de sostenibilidad - 01 Desarrollo del negocio minero. <https://www.cmp.cl/reporte-sostenibilidad/>
- CMP (2023, 31 diciembre). Reporte de sostenibilidad - Estados financieros. <https://www.cmp.cl/reporte-sostenibilidad/>
- Creus, A. (2011). Instrumentación Industrial. Barcelona, España: Marcombo.
- Detalles del producto - Global eBusiness - Siemens WW. (s. f.). <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/WW/Catalog/Product/6ES7317-2EK14-0AB0>
- Historia - CAP S.A IR. (2022, 13 diciembre). CAP S.A IR. <https://investor.cap.cl/compania/historia/>
- Legorreta, A. G., Montañez, F. D. J. G., & Mondragón, V. M. J. (2022). Co-simulación de un motor de inducción trifásico con control escalar. Pistas Educativas, 44(143).
- SEC (2020, 31 diciembre). Pliegos técnicos - Reglamento de Seguridad de las Instalaciones de Consumo de Energía Eléctrica- Decreto 08. Pliego técnico

normativo RIC N° 04. <https://www.sec.cl/reglamento-de-seguridad-de-las-instalaciones-de-consumo-de-energia-electrica-decreto-08/>

Siemens , A.G. (2012). Profinet. Manual de sistema, (1), 23.

Siemens, IK PI. (2004). Cables de bus. PROFIBUS, (4), 22.

Siemens. (2022). Convertidores estándar SINAMICS G120. mall industry siemens. Global eBusiness Recuperado de <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/WW/Catalog/Products/10215579>

UNE (2022, noviembre). Norma UNE-HD 60364-5-52:2022- Instalaciones eléctricas de baja tensión Parte 5-52: Selección e instalación de equipos eléctricos - Canalizaciones. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0070481>

WEG. (12/2020.). Guía Práctica de Capacitación Técnico Comercial Motores Eléctricos. Jaraguá do Sul - SC - Brasil. WEG Recuperado de <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hb1/hee/WEG-guia-practica-de-capacitacion-tecnico-comercial-50026117-brochure-spanish-web.pdf>