



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

**Implementación de un sistema de abastecimiento de
combustible a 300 GPM para camiones de acarreo en
minería**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR

Edinson SAAVEDRA TARAZONA

ASESOR

Dr. Jorge Elías MOSCOSO SÁNCHEZ

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Saavedra, E. (2026). *Implementación de un sistema de abastecimiento de combustible a 300 GPM para camiones de acarreo en minería*. [Trabajo de Suficiencia Profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Edinson Saavedra Tarazona
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	46899016
URL de ORCID	No Aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Jorge Elías Moscoso Sánchez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07206008
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-3427-9217
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Teresa Esther Nuñez Zuñiga
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08006778
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Jean Carlos Malca Fernandez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	45535181
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Raul Sixto Hinojosa Sanchez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08605661
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.4.10. Sistemas de Control
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	No Aplica

Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Ancash Provincia: Huari Distrito: San Marcos Latitud: -9.552060 Longitud: -77.050807
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Enero de 2021 – Diciembre de 2021
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería eléctrica, Ingeniería Electrónica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01 Sistemas de automatización, Sistemas de Control https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.03 Ingeniería del Petróleo, Energía, Combustibles https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.03



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



ACTA DE SUSTENTACIÓN
TRABAJO DE
SUFICIENCIA PROFESIONAL
ACTA N°16/FIEE-PPP/2026

Los suscritos Miembros del Jurado, docentes permanentes de las Escuelas Profesionales de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha 10 de marzo del 2026, como presidente de Jurado la **DRA. TERESA ESTHER NUÑEZ ZUÑIGA**, integrado por el Miembro de Jurado el **MG. JEAN CARLOS MALCA FERNANDEZ**, el Miembro de Jurado el **MG. RAUL SIXTO HINOJOSA SANCHEZ** y Miembro Asesor el **DR. JORGE ELÍAS MOSCOSO SÁNCHEZ**.

Después de escuchar la Sustentación Presencial del Trabajo de Suficiencia Profesional del Bachiller **EDINSON SAAVEDRA TARAZONA** con código 11190018 que para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico sustentó el Trabajo de Suficiencia Profesional titulado **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLE A 300 GPM PARA CAMIONES DE ACARREO EN MINERÍA**.

El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió otorgarle el calificativo de 18 (Dieciocho).

Ciudad Universitaria, 10 de marzo del 2026


DRA. TERESA ESTHER NUÑEZ ZUÑIGA
Presidente Jurado


MG. JEAN CARLOS MALCA FERNANDEZ
Miembro Jurado


MG. RAUL SIXTO HINOJOSA SANCHEZ
Miembro Jurado


DR. JORGE ELÍAS MOSCOSO SÁNCHEZ
Miembro Asesor



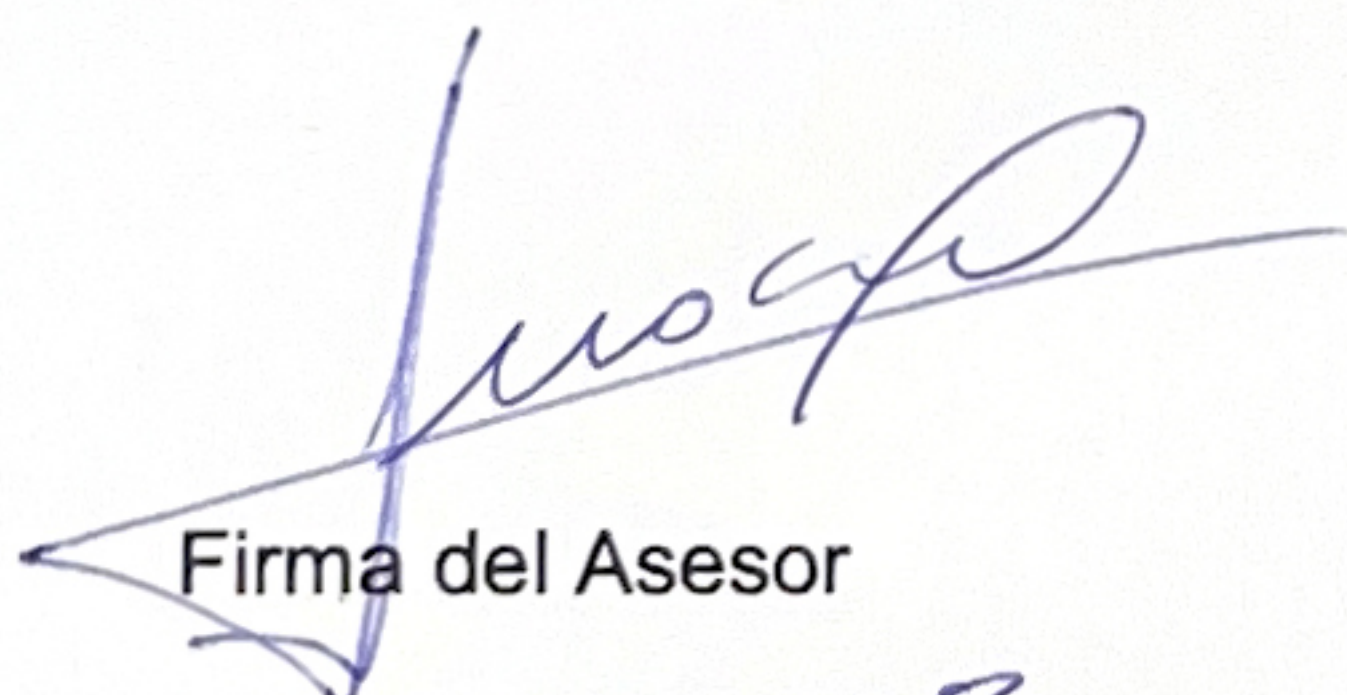
UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **JORGE ELÍAS MOSCOSO SÁNCHEZ** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen N°13/FIEE-PPP/2026 del Trabajo de Suficiencia Profesional titulado **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLE A 300 GPM PARA CAMIONES DE ACARREO EN MINERÍA**, presentado por el bachiller EDINSON SAAVEDRA TARAZONA, para optar al título profesional de Ingeniero Electrónico. CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 6% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título de Ingeniero Electrónico.

Lima, 10 de Marzo del 2026



Firma del Asesor

DNI: 07206008

Nombres y apellidos del asesor:

JORGE ELÍAS MOSCOSO SÁNCHEZ

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado:

a **Dios** por permitirme llegar hasta este escalón en mi vida, a mis **padres** por su apoyo constante e inspirador, a mi **asesor**, quien con sus conocimientos direccionó este trabajo hacia buen puerto, a mi **alma mater**, la **Universidad Nacional Mayor de San Marcos** por los conocimientos brindados y a la empresa **Phoenix EPC** por depositar su confianza en mi persona.

RESUMEN

El presente trabajo profesional detalla el proceso de automatización de un sistema de abastecimiento de combustible a 300 GPM para camiones de acarreo en minería.

La finalidad de este sistema es mejorar la operación de la flota de camiones mineros de carga, reduciendo demoras que impactan en la eficiencia. Estos equipos representan costos significativos alrededor del 45% del costo total de la mina, por lo que minimizar los tiempos muertos, específicamente en el abastecimiento de combustible, es clave para mejorar la productividad y reducir costos.

A lo largo del informe, se describirá en detalle la configuración y parametrización de los equipos que integran el sistema de abastecimiento de combustible, para lograr el control de la bomba centrífuga conectada al variador de velocidad ATV630, el cual se comunica bajo el protocolo de Modbus TCP, este control es gestionado por el controlador principal redundante PLC M580 de Schneider Electric, el cual procesa las lecturas de los instrumentos de campo, entre los que destaca el transmisor de flujo por presión diferencial integrado a un lazo PID, entre otros equipos más que transmiten señales analógicas de 4-20mA y señales discretas.

En conclusión, tras la implementación y configuración del sistema, se realizó la puesta en marcha completa, lo que resultó en una mejora significativa en los tiempos de abastecimiento de 55.2% y minimizando los periodos de inactividad de los camiones. Esta optimización ha tenido un impacto directo en la productividad del proceso minero.

Palabras clave: M580, automatización, minería, abastecimiento, 300 gpm

ABSTRACT

This professional work presents the automation process of a 300 GPM fuel supply system designed for mining haul trucks.

The purpose of this system is to improve the operation of the fleet of mining haul trucks, reducing delays that impact efficiency. These equipment represent significant costs around 45% of the total cost of the mine, so minimizing downtime, specifically in fuel supply, is key to improving productivity and reducing costs.

Throughout the report, the configuration and parameterization of the equipment that makes up the fuel supply system will be described in detail, to achieve control of the centrifugal pump connected to the ATV630 variable frequency drive, which communicates under the Modbus TCP protocol, this control is managed by the redundant main controller PLC M580 from Schneider Electric, which processes the readings from the field instruments, including the differential pressure flow transmitter integrated into a PID loop, among other equipment that transmits 4-20mA analog signals and discrete signals.

In conclusion, after the implementation and configuration of the system, the complete start-up was carried out, which resulted in a significant improvement in supply times of 55.2% and minimizing truck downtime. This optimization has had a direct impact on the productivity of the mining process.

Keywords: M580, automation, mining, suppling, 300 gpm.

INDICE GENERAL

CARÁTULA	i
DEDICATORIA	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
INDICE GENERAL	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABLAS	xvii
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO II: INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD	3
2.1 Institución- Actividad que desarrolla	3
2.2 Periodo de duración de la actividad.	3
2.3 Finalidad y objetivos de la entidad	3
2.4 Razón social	4
2.5 Dirección postal	4
2.6 Nombre y correo electrónico del profesional a cargo.	4
CAPITULO III: DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD	5
3.1 Organización de la actividad	5
3.2 Finalidad y objetivos de la Actividad	6
3.2.1 Finalidad	6
3.2.2 Objetivos	6
3.3 Problemática	7
3.3.1 Problema General	8
3.3.2 Problemas Específicos	8
3.3.3 Justificación e importancia de la investigación	9
3.4 Metodología	12
3.4.1 Bases teóricas	12
3.4.2 Marco conceptual	16
3.5 Procedimiento	33
3.6 Resultado de la actividad	126

CAPITULO IV: DISCUSIÓN DE RESULTADOS	142
CAPITULO V: CONCLUSIONES	147
CAPITULO VI: RECOMENDACIONES	149
CAPITULO VII: BIBLIOGRAFÍA	151
CAPITULO VIII: ANEXOS	155

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Etapas de la industria del petróleo.	17
Figura 2 Bahía o Isla de despacho en Planta de Ventas Conchán.	18
Figura 3 Planta de abastecimiento de combustible en minería.	18
Figura 4 P&ID de sistema de despacho de Diesel B5-S50.	19
Figura 5 Sistema de despacho de combustible de un solo producto por Accuload.	20
Figura 6 Sistema de despacho de combustible de surtidor electrónico PRIME MH.	20
Figura 7 Sistema de despacho de combustible de camiones mineros.	21
Figura 8 Ubicación en la región..	22
Figura 9 Capacidad de producción anual de cobre.	22
Figura 10 Yacimiento Antamina sectorizado en fases.	23
Figura 11 Vista de planta de minera Antamina.	23
Figura 12 Proceso de extracción y procesamiento.	24
Figura 13 Ciclo de transporte de carguío y acarreo.	25
Figura 14 Escala de tiempos según norma ASARCO.	26
Figura 15 Fórmula UEBD.	27
Figura 16 Fórmula de productividad.	27
Figura 17 Proceso de abastecimiento de combustible.	28
Figura 18 Diagrama de bloques en paralelo del controlador PID.	28
Figura 19 Bloque PID en control Expert.	29
Figura 20 Parámetros del bloque PID.	29
Figura 21 Interior de bloque PID en control Expert.	29
Figura 22 Parámetro Mode_PID de Bloque PID.	30
Figura 23 Parámetro Para_PID de Bloque PID.	30
Figura 24 Función de transferencia en el plano s.	30
Figura 25 Respuesta a un escalón unitario de una planta.	31

Figura 26 Curva de respuesta en forma de S.	31
Figura 27 Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta (primer método).	32
Figura 28 Sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional.	32
Figura 29 Oscilación sostenida con periodo P_{cr} .	32
Figura 30 Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica y periodo crítico (segundo método).	32
Figura 31 P&ID del sistema de abastecimiento.	34
Figura 32 Vista de planta de sistema de abastecimiento.	35
Figura 33 Medidor de flujo diferencial instalado en Skid.	36
Figura 34 Medidor de flujo diferencial en operación.	36
Figura 35 Placa de Instrumento FIT.	36
Figura 36 Medidor de flujo diferencial.	37
Figura 37 Plato orificio junto a manifold.	37
Figura 38 Placa de Instrumento.	37
Figura 39 Software Daniel Orifice Flow Calculator.	38
Figura 40 Configuración de flujo máximo.	39
Figura 41 Máximo rango de presión diferencial a detectar.	39
Figura 42 Secuencia de configuración de parámetros en instrumento.	40
Figura 43 Medidor de presión diferencial.	42
Figura 44 Filtro micrónico conectado a transmisor de presión diferencial.	42
Figura 45 Medidor de presión diferencial.	43
Figura 46 Secuencia de configuración de parámetros en instrumento.	43
Figura 47 Placa de instrumento DPIT.	44
Figura 48 Instrumento DPIT en operación.	45
Figura 49 Alarma sonora cuando el filtro micrónico supera 40 psi.	45
Figura 50 Instrumento TIT instalado.	46
Figura 51 Instrumento TIT en operación.	47
Figura 52 Placa de instrumento TIT.	47
Figura 53 Medidor volumétrico QFIT en Skid.	48
Figura 54 Placa de instrumento QFIT.	48
Figura 55 Interior de Medidor de desplazamiento positivo (DP).	48

Figura 56 Acople de eje con sensor pulse.	49
Figura 57 Volumen abastecido a camión minero.	50
Figura 58 W&M(Weights & Measure) Pesos y medidas.	51
Figura 59 Inicio de calibración de Diesel.	51
Figura 60 Proceso de nivelación de Serafín.	51
Figura 61 Patrón volumétrico de 560 galones.	51
Figura 62 Patrón volumétrico de 320 galones.	51
Figura 63 Regleta de patrón volumétrico.	51
Figura 64 Conexión interior de TCS300.	52
Figura 65 Configuración de la señal pulse a recepcionar.	53
Figura 66 Web server de monitoreo de cantidad suministrada.	53
Figura 67 Medidor volumétrico en operación, se muestra flujo y acumulado.	53
Figura 68 Válvula motorizada en Skid.	54
Figura 69 Placa de unidad de mando AM de válvula motorizada.	54
Figura 70 Placa de actuador SQ válvula motorizada.	54
Figura 71 Panel de operación en modo automático.	54
Figura 72 Indicador de válvula cerrada.	55
Figura 73 Indicador de válvula abierta.	55
Figura 74 Interior de válvula motorizada- Pines de alimentación.	55
Figura 75 Interior de válvula motorizada- Pines de control.	55
Figura 76 Diagrama de válvula motorizada.	55
Figura 77 Conexión de válvula motorizada con el plc M580 y gabinete TFC-001.	56
Figura 78 Switch de presión en interior de Skid.	57
Figura 79 Placa de switch de presión.	57
Figura 80 Ajuste detección de presión 40 PSI.	57
Figura 81 Bomba centrífuga acoplada a motor eléctrico.	58
Figura 82 Placa de bomba centrífuga.	58
Figura 83 Placa de motor.	58
Figura 84 Mano-Vacuómetro: Presión de succión antes de la bomba es -7.5 PSI.	59

Figura 85 Manómetro: Presión de descarga después de la bomba es 40 PSI.	59
Figura 86 Interconexión línea descarga y succión.	59
Figura 87 Orificio de restricción con $\varnothing=27.324$ mm.	59
Figura 88 Mantener nivel de aceite en bomba.	60
Figura 89 Pistola Wiggins.	61
Figura 90 Código de pistola wiggins.	61
Figura 91 Colocación de pistola Wiggins.	61
Figura 92 Sistema de recepción wiggins en camión minero.	62
Figura 93 Sistema de recepción wiggins.	62
Figura 94 Ajuste y limpieza de línea de sensado del Sensor JET.	62
Figura 95 Complemento de pistola Wiggins.	62
Figura 96 Filtro tipo canasta en interior de Skid.	63
Figura 97 Limpieza de canastilla de filtro.	63
Figura 98 Interior de filtro tipo canasta.	63
Figura 99 Filtro micrónico.	64
Figura 100 Norma ISO 4406:2017	64
Figura 101 Apertura de filtro micrónico.	65
Figura 102 Instalación de cartuchos en filtro	65
Figura 103 Placa de Filtro micrónico.	66
Figura 104 Placa de eliminador de aire 3-AV	66
Figura 105 Placa de válvula de alivio	66
Figura 106 Detector de puesta tierra-Scully.	67
Figura 107 Aterramiento de camión minero.	67
Figura 108 Gancho de aterramiento.	67
Figura 109 Amortiguador de pulsaciones.	67
Figura 110 Placa de amortiguador de pulsaciones.	67
Figura 111 Fabricación y montaje de estructuras.	68
Figura 112 Fabricación de tuberías.	68
Figura 113 Ejemplo de instalación de tuberías Conduit.	68
Figura 114 Terraja eléctrica para rosca Conduit.	70
Figura 115 Tendido de cables para motor.	70
Figura 116 Armado de gabinete TFC-001.	70

Figura 117 Pruebas de continuidad.	70
Figura 118 Verificación estado de DPIT	71
Figura 119 Comunicador Hart para configuración de transmisor.	71
Figura 120 Conexionado de equipos.	71
Figura 121 Conexionado de equipos.	71
Figura 122 Parámetros de variador VDF.	71
Figura 123 Parámetros de FIT.	71
Figura 124 Interior de gabinete de fuerza.	72
Figura 125 Exterior de gabinete de fuerza.	72
Figura 126 Diagrama Unifilar de TFC-001.	73
Figura 127 Circuito de control en TFC-001.	74
Figura 128 Conexionado de control de ATV630.	74
Figura 129 Modelo de variador de frecuencia.	74
Figura 130 Circuito de control en TFC-001.	75
Figura 131 Regleta de borneras del gabinete TFC-001.	76
Figura 132 Regleta de borneras del gabinete TFC-001.	77
Figura 133 Equipos en gabinete TFC-001.	77
Figura 134 Modbus Poll-Configuración.	78
Figura 135 Direccionamiento de variador de registros.	79
Figura 136 Asignación de petición Modbus TCP.	80
Figura 137 Asignación de petición de entrada(lectura).	80
Figura 138 Asignación de petición salida (escritura).	80
Figura 139 Variables para PLC poder monitorear a ATV630(lectura).	80
Figura 140 Control y monitoreo de velocidad en ATV630 desde M580HSBY.	81
Figura 141 Configuración en AV630 para fuente de control del comando de operación y referencia de velocidad.	82
Figura 142 Tablero Orpak.	83
Figura 143 Panel OrPT para ingreso datos camión.	83
Figura 144 Sistema completo Orpak.	83
Figura 145 Interior de tablero control TC-001.	84
Figura 147 Conexionado de campo a tablero de control TC-001.	84

Figura 148 Conexión de alimentación de los equipos internos en TC-001.	85
Figura 149 Distribución física de los componentes internos en TC-001.	86
Figura 150 Bornas de campo en TC-001.	86
Figura 151 Cotización de sistema redundante Rockwell con Logix5571.	87
Figura 152 Arquitectura referencial de sistema redundante Rockwell.	87
Figura 153 Cotización de sistema redundante Siemens con CPU1515R..	88
Figura 154 Sistema redundante Siemens con CPU1515R.	88
Figura 155 Cotización de sistema redundante Schneider Electric con CPU M580 HSBY.	89
Figura 156 Sistema redundante completo Schneider Electric con M580 HSBY.	91
Figura 157 Características técnicas de H58 2040.	92
Figura 158 Características técnicas de PLC M580.	92
Figura 159 Sistema con módulos empleados con H58 2040.	92
Figura 160 Características técnicas de PLC M340.	93
Figura 161 Arquitectura con CPU 340 modelo P34 2020.	93
Figura 162 Arquitectura con CPU 580 Safety modelo P58 2040S.	94
Figura 163 Unidad de estación remota de M580.	94
Figura 164 Conexión de módulo de entrada analógica AMI 0410.	95
Figura 165 Conexión de módulo de entrada analógica AMI 0410.	95
Figura 166 Conexión de módulo de salida relay DRA 0805.	96
Figura 167 Conexión de módulo de entrada 110Vac tipo contacto DAU 0814.	96
Figura 168 Diagrama de estados del sistema de abastecimiento de combustible..	101
Figura 169 Software EcoStruxure Control Expert V14.1.	102
Figura 170 Software Vijeo Designer V6.2 ServiPack10.	102
Figura 171 Pantalla Home de HMI.	103
Figura 172 Vínculo de HMI con M580.	103

Figura 173 Programas bajo estándar IEC 61131-3.	103
Figura 174 Ladder para habilitar el permisivo de encendido de bomba.	104
Figura 175 Ladder de la señal de cierre previo al despacho.	105
Figura 176 Ladder, monitoreo de estado de variador.	105
Figura 177 Ladder, Parada de emergencia.	106
Figura 178 Ladder, termino de despacho.	107
Figura 179 Ladder, inhibir la señal switch de presión en el arranque.	108
Figura 180 Ladder, listado de alarmas.	109
Figura 181 Programa Vijeo, Grupo de alarmas.	110
Figura 182 Resumen de alarmas de software Vijeo Designer.	110
Figura 183 Ladder, alarma de válvula.	111
Figura 184 Ladder, alarma de saturación de filtro micrónico.	112
Figura 185 Ladder, alarma de bajo caudal.	113
Figura 186 Ladder, alarma de no presionar Start.	113
Figura 187 Ladder, alarma de exceso de flujo.	114
Figura 188 Ladder, alarma por presionar Stop.	115
Figura 189 Ladder, alarma desconexión de Scully.	115
Figura 190 Secuencia para Sirena alarma.	116
Figura 191 Conversión Celsius a Fahrenheit.	116
Figura 192 FBD, lectura de sensores analógicos de 4-20mA.	117
Figura 193 Rango de operación de sensores analógicos de 4-20mA.	117
Figura 194 Secuencia asignación FREQ_VFD_OUTPUT.	118
Figura 195 Bloque PID.	118
Figura 196 Habilitación del bloque PID.	119
Figura 197 Valores del bloque PID.	120
Figura 198 Simulación del sistema ante una señal escalón.	120
Figura 199 Respuesta escalón ante entrada de 15 Hz.	120
Figura 200 Parámetros de Bloque PID.	122
Figura 201 Simulación de sistema de abastecimiento.	122
Figura 202 Respuesta del sistema con controlador PID	122
Figura 203 Respuesta del sistema con controlador PID con parámetros introducidos en el M580.	123

Figura 204 Selección de tipo de control automático o manual.	124
Figura 205 Control en lazo abierto.	124
Figura 206 Variable Param_REF_FREC_MANUAL.	124
Figura 207 Selección de tipo de control automático o manual.	125
Figura 208 Pantallas de HMI en software Vijeo Designer.	125
Figura 209 Tiempo de abastecimiento promedios de datos registrados.	126
Figura 210 Margen de error del proceso de calibración de DPIT-001.	128
Figura 211 Proceso de calibración de transmisor de presión diferencial.	129
Figura 212 Proceso de calibración de transmisor.	129
Figura 213 Funcionamiento de DPIT-001.	129
Figura 214 Margen de error del proceso de calibración de FIT-001.	130
Figura 215 Funcionamiento de FIT-001.	131
Figura 216 Horno de pozo seco RTC-700B.	131
Figura 217 Margen de error del proceso de calibración de TIT-001.	132
Figura 218 Nivelación de serafín 560 gal.	132
Figura 219 Registro de medida del serafín.	132
Figura 220 Margen de error del proceso de calibración de FQIT-001.	133
Figura 221 Medidor volumétrico iniciando operación, muestra flujo y acumulado.	134
Figura 222 Medidor volumétrico terminando operación, muestra flujo y acumulado.	134
Figura 223 Enlace con variador ATV630.	135
Figura 224 Pruebas de funcionamiento en taller.	136
Figura 225 Pruebas de funcionamiento en mina.	136
Figura 226 Gráfica de reducción de tiempo de abastecimiento de combustible.	138
Figura 227 Sistema redundante M580 en modo Hot Standby.	139
Figura 228 Panel frontal lateral derecho.	140
Figura 229 Panel frontal lateral izquierdo.	140
Figura 230 Zona de tableros de Skid.	140
Figura 231 Interior de Skid..	140

Figura 232 Zona lateral de Skid.	140
Figura 233 Zona trasera de Skid.	140
Figura 234 Interconexión de camiones cisterna a Skid.	141
Figura 235 Patio de motogeneradores Cummins de 100 kW(134.1 HP).	141
Figura 236 Bloqueo de seguridad de camión.	141
Figura 237 Estación de abastecimiento de Baja Ley.	141
Figura 238 Diagrama de lazos 01- Entradas analógicas.	156
Figura 239 Diagrama de lazos 02- Entradas y salidas digitales.	157
Figura 240 Diagrama de lazos 03- Vínculo con actuador de válvula motorizada.	158
Figura 241 Diagrama de lazos 04- Entradas digitales.	159
Figura 242 Diagrama de lazos 05- Equipos de campo a tablero de TFC-001.	160
Figura 243 Diagrama de lazos 06- Equipos de campo a tablero de TFC-001 y ORIC-001.	161
Figura 244 Gabinete TFC-001- Listado de componentes.	162
Figura 245 Gabinete TFC-001- Exterior.	163
Figura 246 Gabinete TFC-001- Interior frontal.	164
Figura 247 Gabinete TFC-001- Interior frontal y lateral.	165
Figura 248 Gabinete TFC-001- Cajetín interior #1.	166
Figura 249 Gabinete TFC-001- Cajetín interior #2..	167
Figura 250 Gabinete TFC-001- Cajetín interior #2.	168
Figura 251 Gabinete TFC-001- Placas metálicas de identificación.	169
Figura 252 Gabinete TFC-001- Diagrama unifilar-01 Fuente..	170
Figura 253 Gabinete TFC-001- Diagrama de conexionado-02	171
Figura 254 Gabinete TFC-001- Diagrama de conexionado-03	172
Figura 255 Gabinete TFC-001- Diagrama de conexionado-04	173
Figura 256 Gabinete TFC-001- Diagrama de conexionado-05	174
Figura 257 Gabinete TFC-001- Diagrama de conexionado-06	175
Figura 258 Tablero TC-001- Listado de componentes.	176
Figura 259 Tablero TC-001- Distribución mecánica.	177
Figura 260 Tablero TC-001- Regleta de borneras.	178

Figura 261 Tablero TC-001- Diagrama unifilar-01.	179
Figura 262 Tablero TC-001- Diagrama de conexionado-02.	180
Figura 263 Tablero TC-001- Diagrama de conexionado-03.	181
Figura 264 Tablero TC-001- Diagrama de conexionado-04.	182
Figura 265 Tablero TC-001- Diagrama de conexionado-05.	183
Figura 266 Tablero TC-001- Diagrama de conexionado-06.	184
Figura 267 Tablero TC-001- Diagrama de conexionado-07.	185
Figura 268 Tablero TC-001- Diagrama de conexionado-08.	186

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Planificación de actividades desarrolladas.	5
Tabla 2 Parámetros configurados en el instrumento para medición de flujo.	41
Tabla 3 Relación de presión, caudal y corriente correspondiente.	41
Tabla 4 Parámetros configurados en el instrumento para medición de presión diferencial.	44
Tabla 5 Relación de presión y corriente correspondiente.	45
Tabla 6 Parámetros configurados en el instrumento para medición de temperatura.	46
Tabla 7 Relación de temperatura y corriente correspondiente.	47
Tabla 8 Relación de pulsos por unidad de medida.	50
Tabla 9 Parámetros configurados en el contómetro volumétrico FQIT-001.	52
Tabla 10 Características de bomba.	58
Tabla 11 Características de motor.	58
Tabla 12 Relaciones métricas de tuberías en acero al carbono.	60
Tabla 13 Número de partículas retenidas mayores al tamaño.	64
Tabla 14 Dimensiones en tubería RMC.	69
Tabla 15 Longitud de separación máxima entre soportes.	69
Tabla 16 Tabla Modbus de Variador ATV630.	77
Tabla 17 Registro word ETA del Variador de frecuencia.	81
Tabla 18 Cuadro comparativa entre Siemens y Schneider Electric.	90
Tabla 19 Check list de equipos.	127
Tabla 20 Registro de datos del proceso de calibración del transmisor de presión diferencial.	128
Tabla 21 Registro de datos del proceso de calibración del transmisor de presión diferencial para flujo.	130

Tabla 22 Registro de datos del proceso de calibración del transmisor de temperatura.	132
Tabla 23 Registro de datos del proceso de calibración del medidor volumétrico FQIT-001.	133
Tabla 24 Especificaciones técnicas de camión minero 930E.	137
Tabla 25 Costo de equipos en Tablero de control(TC-001).	144
Tabla 26 Costo de equipos en Tablero de Fuerza y control (TFC-001).	145

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

En la industria minera, la eficiencia operativa de la flota de camiones de acarreo es un factor crítico que impacta directamente en la productividad y los costos de operación. Aproximadamente el 45% del costo total de una mina está asociado a estos equipos, por lo que minimizar los tiempos de inactividad es fundamental para mejorar el rendimiento global de las operaciones (Azañero Ruiz & Guerrero Orrillo, 2019). Uno de los factores que genera demoras en el ciclo operativo es el proceso de abastecimiento de combustible, el cual, en sistemas convencionales de bajo caudal, retardan el suministro de diesel DB5-S50 a los camiones de carga. Es por ello se busca un despacho a alto caudal, además, al ubicarse estratégicamente en los laterales de circulación (debido a su portabilidad), se facilita el acceso y se minimizan las interrupciones en las operaciones, mejorando la productividad general.

El propósito general de este informe es documentar el proyecto y desarrollo del proceso de automatización de un sistema de abastecimiento de combustible a alto caudal para la flota de camiones de acarreo en minería, como parte de mi desempeño laboral. Además, este informe busca resaltar la importancia de la automatización en la industria, evidenciando sus beneficios en la optimización de los tiempos de despacho, la reducción de periodos de inactividad y la mejora de la productividad en las operaciones mineras.

El objetivo del proyecto fue automatizar el sistema de abastecimiento de combustible a 300 gpm, dado que los despachos a bajo caudal en un sistema de lazo abierto generaban periodos de inactividad en los camiones mineros, afectando la eficiencia operativa. Es por ello se requiere un sistema que permita el despacho a alto caudal y lazo **cerrado**, que permita autocompese

ante la saturación de los filtros micrónicos y/o canasta, el bajo nivel de combustible de los camiones cisterna y el nivel del tanque del camión de acarreo entre otras perturbaciones. Este informe documenta el desarrollo del proyecto, con un enfoque en la lógica de programación del controlador lógico programable (PLC), elemento clave para la indicación de la secuencia y estabilidad del sistema.

Durante el desarrollo del informe, se detallará la configuración y parametrización de los dispositivos que conforman el sistema de abastecimiento de combustible, tales como el transmisor de flujo, de temperatura, de presión diferencial para la protección del filtro micrónico, el contador volumétrico, la válvula motorizada con válvula bola, entre otros. Así mismo también se abordará la arquitectura de control basada en el PLC M580 de Schneider Electric en configuración redundante, la integración del transmisor de flujo por presión diferencial para la medición precisa del caudal y la implementación del variador de velocidad ATV630, que opera mediante el protocolo de comunicación Modbus TCP para el control dinámico de la bomba centrífuga y también la pantalla HMI. Asimismo, se describirá la interacción y funcionamiento conjunto con los distintos equipos que conforman el sistema.

Finalmente, las pruebas realizadas en taller y en campo validaron la funcionalidad del sistema de abastecimiento a 300 GPM, asegurando la correcta interacción de todos los componentes y la capacidad del controlador M580 para autorregular el flujo y gestionar condiciones de fallo. La automatización implementada permitió optimizar el proceso de despacho de combustible, reduciendo tiempos muertos y mejorando la eficiencia operativa, lo que se traduce en un incremento significativo en la productividad minera.

CAPITULO II: INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD

2.1 Institución- Actividad que desarrolla

La actividad se realizó en Antamina, una minera polimetálica dedicada a la producción de cobre, zinc, molibdeno y plata, ubicada en el distrito de San Marcos, provincia de Huari, departamento de Áncash. Los trabajos se desarrollaron específicamente en las áreas de chancadora y baja ley, con el propósito de asegurar el abastecimiento de combustible a los camiones mineros durante su recorrido, bajo la responsabilidad de la empresa PHOENIX ENGINEERING PROCUREMENT AND CONSTRUCTION S.A.C.

2.2 Periodo de duración de la actividad.

La implementación del sistema y las pruebas finales se realizaron de octubre del 2021 hasta enero del 2022.

2.3 Finalidad y objetivos de la entidad

Phoenix Engineering Procurement and Construction S.A.C. es una empresa con ocho años de experiencia, conformada por técnicos e ingenieros especializados en proyectos tecnológicos de gran envergadura a nivel nacional. Su **finalidad** es ofrecer servicios avanzados en automatización y control de procesos industriales, incluyendo inspección, programación, calibración, diagnóstico de fallas, mantenimiento integral y suministro de repuestos.

Objetivo: Ofrecer soluciones y servicios especializados, eficientes y de alta calidad para clientes tanto industriales como residenciales.

Proveer servicios de Ingeniería, Procura y Construcción (EPC), ofreciendo soluciones integrales en **Automatización y Control de Procesos**,

Electricidad, Electromecánica y Mantenimiento Industrial, mediante proyectos llave en mano. Con presencia en diversos sectores como Petróleo, Minería, Energía, Edificaciones, Saneamiento entre otros, participa activamente en iniciativas tanto del sector público como privado a nivel nacional.

2.4 Razón social

PHOENIX ENGINEERING PROCUREMENT AND CONSTRUCTION S.A.C.

RUC: 20557954016

CIIU: 74218

2.5 Dirección postal

Mz. B, Lote 16

A.V. los Ficus de Monte Carmelo

Villa el Salvador.

Lima, 15841

Perú

2.6 Nombre y correo electrónico del profesional a cargo.

Jesús A. Huatuco Flores

Gerente general, Jefe de proyecto.

Celular: 976673474

E-mail: jhuatucof@phoenixepc.com, phoenixepc.peru@gmail.com

CAPITULO III: DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

3.1 Organización de la actividad

Para alcanzar los objetivos del trabajo, se planificaron y estructuraron las actividades principales de las especialidades mecánica, tubería, eléctrica e instrumentación de la siguiente manera:

Tabla 1 Planificación de actividades desarrolladas.

Ítem	Actividades
1	TRABAJO PRELIMINAR
1.1	Elaboración de procedimientos constructivos
1.2	Elaboración de plan de trabajo
2	FABRICACIÓN Y MONTAJE DE ESTRUCTURAS METÁLICAS
2.1	Fabricación de estructuras de gabinete
2.2	Fabricación de soportes metálicos
2.3	Fabricación de techo metálico
2.4	Preparación de superficie y aplicaciones de pintura
2.5	Instalación de estructuras de gabinete
2.6	Instalación de soportes metálicos
2.7	Instalación de techo metálico
3	FABRICACIÓN DE TUBERÍAS
3.1	Prefabricado de tuberías y accesorios
3.2	Prueba de radiografía
3.3	Prueba hidrostática
3.4	Preparación de superficie y aplicaciones de pintura
4	MONTAJE DE TUBERÍAS Y EQUIPOS
4.1	Montaje de tuberías
4.2	Montaje de bomba centrífuga
4.3	Montaje de filtro micrónico, brazo de carga, amortiguador, contador volumétrico, indicadores de presión, válvula electromecánica
5	FABRICACIÓN DE COBERTURA LATERAL
5.1	Fabricación de cobertura lateral
5.2	Aplicación de pintura
5.3	Montaje de cobertura lateral
6	INSTALACIONES ELÉCTRICAS
6.1	Construcción de gabinete de fuerza TFC-001 y tablero de control TC-001.

6.2	Instalación de tableros y gabinete.
6.3	Instalación de tuberías y accesorios.
6.4	Instalación de equipos eléctricos.
6.5	Instalaciones de sistemas.
6.6	Tendido de cables y accesorios.
6.7	Pruebas de aislamiento.
6.8	Aplicación de pintura a tubería Conduit galvanizada
7	INSTALACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN
7.1	Instalación de instrumentos para la medición de caudal, presión diferencial, temperatura, entre otros.
7.2	Instalación de tubería galvanizada y accesorios
7.3	Instalación de cables y accesorios
7.4	Aplicación de pintura a tubería y soportes
7.5	Instalación de fitting y tubing inoxidable
7.6	Configuración del sistema
7.7	Precomisionado y comisionado de equipos
7.8	Pruebas de funcionamiento en taller y luego en mina

Fuente. Elaboración propia.

3.2 Finalidad y objetivos de la Actividad

3.2.1 Finalidad

La finalidad de este sistema es **mejorar la operación** de la flota de camiones mineros de carga, reduciendo demoras que impactan en la eficiencia. Estos equipos representan costos significativos alrededor del 45% del costo total de la mina, por lo que minimizar los tiempos muertos, específicamente en el abastecimiento de combustible, es clave para mejorar la productividad y reducir costos. En este trabajo se busca **lograr poner en operación** el sistema de abastecimiento de combustible a 300 galones por minuto (GPM), destinado a los camiones de acarreo, lo cual permitirá agilizar el suministro de diésel DB5-S50, disminuir la inactividad de la flota y fortalecer la eficiencia operativa en un contexto de altos costos de operación.

3.2.2 Objetivos

3.2.2.1 Objetivo General

Implementar y poner en funcionamiento un sistema automático de abastecimiento de combustible a alto caudal con capacidad de 300 GPM para camiones de acarreo en minería.

3.2.2.2 Objetivos Específicos

- **Configurar y acondicionar los instrumentos de campo** del sistema de abastecimiento de combustible, como el flujómetro de placa orificio, transmisor de presión diferencial, transmisor de temperatura y el contómetro volumétrico.
- **Desarrollar el algoritmo de control mediante la programación del PLC M580**, estableciendo una secuencia adecuada que simplifique la operación y mejore la interacción con el sistema, que permita una autorregulación de flujo y una adecuada comunicación con el variador de frecuencia y HMI mediante el protocolo Modbus TCP.
- **Reducir los tiempos de abastecimiento de combustible con el fin de optimizar el flujo operativo y así mejorar la productividad**, lo que permitirá validar el desempeño del sistema automatizado y la integridad funcional.

3.3 Problemática

La minería juega un papel importante en la economía peruana, con un aporte proyectado del 9% al PBI, impulsada por inversiones y altos precios del cobre (MINEM, 2025).

En la industria minera, los camiones de acarreo representan aproximadamente el 45% del costo total de operación de una mina. Este alto costo se debe a factores como la depreciación del equipo, costos de mantenimiento, personal especializado, desgaste de componentes, consumo de combustible y la necesidad de una infraestructura adecuada para su óptima operación. (Azañero Ruiz & Guerrero Orrillo, 2019)

Por esta razón, el monitoreo constante de los tiempos operativos efectivos de la flota de camiones mineros es fundamental para identificar y reducir pérdidas operativas. Uno de los principales problemas que afecta la eficiencia del sistema de transporte es el **tiempo muerto generado durante el**

abastecimiento de combustible. Los sistemas de lazo abierto, que operan sin sensores de retroalimentación para el control del caudal, presentan tasas de flujos bajos variables entre 70 y 90 GPM (galones por minuto), dependiendo del nivel de saturación de los filtros, nivel de combustible en los tanques de los camiones cisterna y tanque del camión minero de acarreo, entre otros, lo cual prolongan los tiempos de abastecimiento, lo que genera retrasos en la producción y un incremento en los costos operativos.

Por lo tanto, se requiere la implementación de un sistema de abastecimiento de combustible a alto caudal que reduzca los tiempos de inactividad, garantice una recarga eficiente y contribuya a la mejora continua de las operaciones mineras.

El presente trabajo se enfoca en la **automatización del sistema de abastecimiento a 300 GPM**, compuesto por un controlador lógico programable (PLC) e instrumentos de medición y control, con el objetivo de garantizar su correcta operación y funcionalidad. La implementación de este sistema permite optimizar las operaciones mineras.

3.3.1 Problema General

¿Cómo automatizar el sistema de abastecimiento de combustible a 300 gpm para camiones de carga en minería?

3.3.2 Problemas Específicos

- ¿Cómo configurar y acondicionar la instrumentación de campo que conforman el sistema de despacho?
- ¿Cómo desarrollar el algoritmo de control mediante la programación del PLC Schneider Electric M580?
- ¿En qué medida influye el sistema de abastecimiento de combustible en el tiempo de despacho?

3.3.3 Justificación e importancia de la investigación

La automatización de sistemas en procesos industriales es crucial para mejorar la eficiencia operativa y reducir costos en sectores como la minería. En particular, el sistema de abastecimiento de combustible para camiones mineros juega un rol fundamental en la optimización de tiempos de operación y en la **reducción de los tiempos muertos**, los cuales representan altos costos operativos. Esta investigación se centra en la implementación de un sistema automatizado de abastecimiento de combustible a 300 GPM, cuyo objetivo es mejorar la productividad de la flota de camiones mineros mediante la reducción de demoras en el abastecimiento y la optimización del consumo de recursos.

El estudio es relevante porque aborda problemas críticos en la industria minera, como la ineficiencia operativa y los costos asociados con los tiempos de inactividad. A través de la integración de tecnologías avanzadas, como los controladores lógicos programables (**PLC**) y los sistemas de control PID, se logra mejorar el flujo del proceso y minimizar el impacto de fallos operativos. Este enfoque no solo optimiza los tiempos de despacho de combustible, sino que también mejora la planificación operativa y la gestión de recursos, resultando en una operación más rentable y eficiente.

A nivel académico, la investigación aporta al conocimiento sobre la automatización en la minería, demostrando cómo estas soluciones pueden **aplicarse a otros sectores industriales con necesidades similares**. En el ámbito práctico, los resultados serán valiosos para empresas mineras, ingenieros de control e instrumentación, así como para la industria minera, ya que proporcionan un modelo efectivo para la optimización de sistemas complejos de abastecimiento y distribución.

En conclusión, **este trabajo de suficiencia profesional es importante porque demuestra cómo la automatización del sistema de abastecimiento de combustible a 300 GPM mejora significativamente la eficiencia operativa en la minería, reduciendo tiempos de inactividad y mejorando la productividad en operaciones mineras.**

Justificación por conveniencia:

Este trabajo radica en la **necesidad de optimizar la operación** de la flota de camiones mineros, cuya ineficiencia en el abastecimiento de combustible a caudal bajo genera demoras que impactan directamente en la productividad y en los costos operativos. Dado que estos equipos representan aproximadamente el 45% del costo total de la mina, minimizar los tiempos muertos es esencial para mejorar la eficiencia del proceso minero. La automatización del sistema de abastecimiento a 300 GPM permite reducir significativamente los periodos de inactividad, optimizando los tiempos de despacho y asegurando una operación más eficiente y rentable.

Justificación económica:

Desde el punto de vista económico, el sector minero constituye un pilar estratégico para la economía peruana, con una participación estimada del 9.5 % en el PBI, impulsada por el dinamismo de la inversión en proyectos extractivos y los elevados precios del cobre (Dominguez Dominguez, 2024). En la minería a cielo abierto el carguío y transporte representan entre un 50% a 60% los costos operacionales del proceso de explotación. (Alarie & Gamache, 2002).

La implementación del sistema de abastecimiento de combustible a 300 GPM representa una optimización significativa en los costos operativos de la mina. La reducción de los tiempos de inactividad de la flota de camiones mineros se traduce directamente en un mayor tiempo productivo, maximizando el aprovechamiento de los equipos y minimizando las pérdidas económicas asociadas a esperas prolongadas. Asimismo, la mejora en la eficiencia del abastecimiento permite una planificación más precisa de los recursos, optimizando el consumo de combustible y reduciendo costos logísticos. La ubicación estratégica del sistema también contribuye a minimizar interrupciones en la operación, generando un impacto positivo en la rentabilidad y sostenibilidad financiera de la empresa minera.

Justificación práctica:

Este trabajo radica en su impacto directo en la eficiencia operativa del abastecimiento de combustible en minería. La automatización del sistema a 300 GPM no solo optimiza los tiempos de despacho y reduce los periodos de inactividad de los camiones de acarreo, sino que también mejora la gestión de recursos y la planificación operativa. Esta solución permite enfrentar problemas críticos como la pérdida de productividad por tiempos muertos, el desperdicio de combustible por procesos ineficientes y la falta de control en el suministro, lo que tiene implicaciones trascendentales para la sostenibilidad y rentabilidad del sector minero. Además, su implementación puede **replicarse en otras operaciones mineras** y sectores industriales con requerimientos similares, consolidando su relevancia práctica a gran escala.

Justificación teórica:

Promover y fomentar la adopción de controladores lógicos programables (PLC) resulta esencial para mejorar la eficiencia y productividad en los procesos industriales. Los PLC's ofrecen una plataforma robusta y confiable para la automatización, permitiendo el monitoreo y control en tiempo real de múltiples variables del sistema. Además, la integración de controladores PID complementa esta funcionalidad al proporcionar un ajuste dinámico y óptimo de los parámetros operativos. Gracias a sus lazos de retroalimentación, los controladores PID tienen la capacidad de autocorregirse ante perturbaciones en el sistema, asegurando estabilidad y precisión en los procesos.

El uso combinado de PLC y control PID no solo minimiza las demoras en la operación, sino que también maximiza la productividad de los equipos, como los utilizados en actividades de acarreo en la industria minera. Esta implementación no solo mejora la eficiencia operativa, sino que optimiza el uso de recursos clave, reduce los tiempos muertos y garantiza un flujo continuo y efectivo en las operaciones. En última instancia, estos avances contribuyen al desarrollo de sistemas más sostenibles, eficientes y confiables. Demostrando además el potencial del país para desarrollar soluciones tecnológicas innovadoras en la industria.

3.4 Metodología

3.4.1 Bases teóricas

Mestanza Alcantara (2021) en su tesis de maestría “La gestión de la demora en el abastecimiento de combustible y su influencia en la producción de equipos de acarreo en una empresa minera de la ciudad de Cajamarca”, para el análisis se llevó a cabo utilizando una población y una muestra de estudio compuesta por 35 camiones de acarreo que tienen muchas paradas por abastecimiento durante el mismo turno de trabajo, para los cuales se recopilaban datos a través del sistema de gestión de flotas (Sistema de Información Vital **VIMS** de Caterpillar) para un enfoque cuantitativo. El objetivo principal fue identificar la relación entre las variables "**demoras en el abastecimiento de combustible**" y "**productividad de los equipos de acarreo**", mediante la aplicación de los métodos estadísticos de Pearson y Spearman, con el apoyo del software **R**, logrando determinar que existe una **correlación negativa moderada** entre ambas variables, lo que indica que a mayores demoras en el abastecimiento de combustible, menor es la productividad de los equipos.

En conclusión, se obtuvieron factores de correlación de $r = -0.37$ para el método de Pearson y $r = -0.36$ para método de Spearman, confirmando que las demoras en el proceso de abastecimiento de combustible impactan de manera adversa (inversa) en el rendimiento operativo de los camiones de acarreo.

Contreras Acuña (2013) en su tesis titulada “Reducción de las demoras operativas en el servicio de grifo a los volquetes”, se llevó a cabo en la Minera Cuajones de Moquegua, con el objetivo de optimizar los tiempos de servicio mediante la reducción de demoras operativas, enfocándose específicamente en el proceso de acarreo que representa el **56% del costo total en minería**. Para ello, se busca reducir el tiempo de servicio promedio en grifo, para ello se cambia el sistema convencional por un sistema que permite un despacho a 300GPM, permitiendo alcanzar un tiempo de servicio menor. El estudio evidenció que, al incorporar un sistema de abastecimiento de combustible de

alta velocidad, se logra reducir los tiempos de espera en el grifo, lo que repercute positivamente en la mejora de la productividad de los camiones de acarreo.

En conclusión, con la reducción de tiempos muertos por el sistema de abastecimiento mejorado, se traduce en un incremento en la productividad.

Hilasaca Gómez (2021) en su trabajo de suficiencia profesional con título “Optimización de tiempos de espera de volquetes en la zona de descarga de mineral, para el incremento de la productividad en la unidad operativa Cuajones”, se realizó el estudio en mina Cuajones de Moquegua, que se observa en el área de chancadora primaria se formaba una aglomeración generando una cola de hasta 4 camiones minero al momento de la descarga en chancadora, por ende, se realiza un análisis de distribución de tiempos, para optimizar el flujo de camiones, lo que genera una reducción de tiempo promedio de espera de los camiones mineros de 4.45 min a 1.22 min, teniendo una repercusión en los costos, considerando que el costo operativo de los volquetes Komatsu 930E tiene **un valor de 304 US\$ por hora**. Se concluye que la reasignación de 3 camiones mineros al acarreo de desmonte permite evitar los traslapes en la zona de chancadora, mejorando la productividad del sistema de carguío y acarreo.

Lopez Condori (2019) en su tesis titulada “Modernización del sistema de supervisión y control del Oleoducto Norperuano mediante la migración al protocolo de comunicación TCP/IP”, se desarrolló en las distintas estaciones del oleoducto, desde Andoas y Saramuro hasta Bayóvar, que consiste en la migración del protocolo **Modbus Plus** (basado en RS485) a **Modbus TCP/IP** (basado en ethernet), para ello, se añade a un módulo de comunicación **NOE-771-01** al controlador PLC Quantum de **Schneider Electric**, posteriormente, dicho controlador es reprogramado utilizando el software Concept para el nuevo direccionamiento que empleará el servidor Scada Intouch. Como resultado, la implementación del nuevo protocolo de comunicación permite el monitoreo en tiempo real de las estaciones desde el servidor SCADA, mejorando la eficiencia operativa y la capacidad de supervisión remota.

Zuñiga Estay (2021) en su trabajo de maestría denominado “Evaluación económica camiones autónomos vs convencionales” aborda la problemática derivada de la disminución de las leyes de cobre, lo cual ha hecho que las operaciones mineras sean más costosas, profundas y riesgosas. Dado que **el transporte de material representa la operación con mayor impacto económico** en la minería, este escenario ha incentivado la adopción de tecnologías como los camiones autónomos, orientadas a reducir costos y mejorar la eficiencia operativa. Actualmente, existen operaciones mineras en **Chile** que ya cuentan con flotas totalmente compuestas por camiones autónomos. En este estudio se recopilieron datos operativos correspondientes a los años 2018 y 2019 para comparar su desempeño frente a flotas convencionales con operador. La ausencia de un operador humano permite a los camiones autónomos operar de forma continua, con una conducción más uniforme y controlada según parámetros del fabricante (evitando momentos de aceleraciones), lo que se traduce en una mayor eficiencia en el consumo de combustible y lubricantes, menor desgaste de los neumáticos, menores intervenciones de mantenimientos correctivos, entre otros. Los resultados evidenciaron que la flota autónoma presentó mejoras significativas en disponibilidad, uso operativo y utilización efectiva de los equipos, logrando reducir el costo de transporte desde **0.57 USD/ton** (en el sistema convencional) a **0.50 USD/ton**.

Nicola Mesias (2015) en su trabajo de investigación denominado “Diseño de una arquitectura de red para la integración de bahías de carga con controlador híbrido programable HC 900 para la Terminal Pascuales de Petroecuador”, cuyo objetivo general es **proponer una arquitectura de red para el despacho de combustible** de la terminal Pascuales **EPPetroecuador** para la integración de las bahías de carga de producto, que permita mejorar el proceso de inventario y reducir la exposición de personal en áreas peligrosas. En su marco teórico expone varias redes empleadas en la industria para ver cuál es la que mejor se ajusta de manera óptima. La arquitectura planteada contempla la interconexión de los sistemas **Accuload** de las bahías, un controlador híbrido **HC-900** de Honeywell (en reemplazo del **ControlLogix de**

Rockwell), el servidor **SCADA Honeywell Experion**, el sistema de **medición de tanques ENRAF**, entre otros elementos, para conformar el sistema TAS (**Terminal Automation System**). Además, se propone la modernización de instrumentos obsoletos para mejorar la precisión y eficiencia operativa, así como la incorporación de variadores de frecuencia (VDF) o arrancadores para optimizar el control de bombas. La investigación concluye que la red más adecuada para esta implementación es la red **FTE** (Fault Tolerant Ethernet), debido a su capacidad de tolerancia a fallos mediante **redundancia en los puertos de red**. Esta característica proporciona una alta confiabilidad, especialmente crítica para el almacenamiento seguro de los registros de transacciones en las bases de datos de los servidores.

Mora Estrada (2015) en su trabajo de investigación titulado “Estudio para mejora del sistema de bio-combustible del Terminal Pascuales de EP Petroecuador”, plantea como objetivo optimizar el **sistema actual de despacho de biocombustible**, con el fin de reducir los tiempos de abastecimiento. Este trabajo fue realizado la metodología descriptiva mediante la investigación de campo, ya que el terminal se encuentra documentado, indicando cual es la configuración actual de los **acculoads y las recetas** que posee para el despacho. Una de las principales propuestas consiste en **colocar 3 bombas en paralelo**, integradas a un sistema de retroalimentación de presión en el **cabezal de etanol**, con el objetivo de mantener una **presión constante de 60 PSI**, lo que permite alcanzar un flujo superior a 500 GPM.

En conclusión, se recomienda realizar modificaciones en el PLC ControlLogix, incorporando secuencias de arranque de bombas controladas por un **transmisor de presión**, con el propósito de mantener la línea presurizada y así **mejorar el flujo de despacho**, reduciendo significativamente los tiempos de operación.

González Gazmuri (2016) en su trabajo de tesis denominada “Optimización de las horas operativas de los CAEX en los procesos de descarga en chancado y abastecimiento de combustible, mediante la utilización de modelamientos compuestos y redes neuronales” aborda la limitación de los

sistemas de **asignación dinámica actuales, como Jigsaw o Modular**, los cuales no contemplan la predicción de variables operativas críticas, tales como el tiempo de proceso de cada carga o el consumo de combustible por camión. La incorporación de estas predicciones permitiría mejorar significativamente la eficiencia del transporte en los procesos de chancado y abastecimiento de combustible. En el caso del proceso de chancado, la red neuronal estima el **tiempo de proceso de cada carga** (minutos) en función de las siguientes variables: modelo de chancador (tph), tonelaje transportado (ton), dureza del material (escala 0–1) y tiempo de excavación de la pala (seg). Para el proceso de abastecimiento de combustible, la red neuronal predice el **consumo del equipo** (litros) considerando variables como la resistencia total del terreno (%), la velocidad máxima del camión (km/h) y el tonelaje transportado (ton).

En conclusión, la aplicación de **modelos predictivos y algoritmos de optimización** en minería puede generar beneficios significativos a costos relativamente bajos, permitiendo el desarrollo de herramientas de gestión que mejoran la productividad y aseguran la continuidad operativa.

3.4.2 Marco conceptual

3.4.2.1 Etapas de la industria de los hidrocarburos

La industria de los hidrocarburos o del petróleo se divide en tres etapas fundamentales, que abarcan desde la búsqueda del recurso hasta su entrega al consumidor final. Estas etapas son comúnmente conocidas como: Upstream, Midstream y Downstream.

- Upstream: Exploración y explotación
- Midstream: Transporte y oleoducto
- Downstream: Refinación, almacenamiento, comercialización y **distribución.**



Figura 1 Etapas de la industria del petróleo. Fuente. OSINERGMIN (2016).

En el presente trabajo, nos situamos en la etapa **Downstream** de la industria petrolera, específicamente en la distribución de combustible desde camiones cisterna hacia camiones mineros. Para optimizar este proceso, utilizamos un módulo de abastecimiento de combustible con una capacidad de 300 galones por minuto (gpm), diseñado para agilizar la entrega de combustible al usuario final: el camión minero. Este sistema de alta capacidad permite reducir significativamente el tiempo de carga de combustible, mejorando la eficiencia operativa en las operaciones mineras.

3.4.2.2 Planta de abastecimiento de combustible líquido

Es una instalación intermedia dentro de la cadena logística de hidrocarburos, que se encarga de **recibir, almacenar y despachar** productos derivados del petróleo obtenidos del proceso de refinación, hacia distribuidores mayoristas y minoristas. Los combustibles líquidos que se comercializan comúnmente en estas plantas son:

Gasoholes: Mezcla compuesta por un 92.2% de gasolina de diferentes octanajes (84, 90, 95 y 97), un 7.8% de alcohol carburante (etanol) y la adición de aditivos. (D.S. N° 021-2007-EM)

Diésel B5 S-50: Compuesto por un 95% de diésel 2 de bajo contenido de azufre (50 ppm), un 5% de biodiésel (B100) y aditivo. (D.S. N° 092-2009-EM)



Figura 2 Bahía o Isla de despacho en Planta de Ventas Conchán. Fuente. Fotografía propia.

En el contexto minero, se implementan estaciones de servicio especializadas equipadas con módulos de **abastecimiento de alto caudal**, capaces de suministrar combustible diésel en rangos que van desde 80 hasta 300 galones por minuto (GPM).



Figura 3 Planta de abastecimiento de combustible en minería. Fuente. Fotografía propia.

Estos módulos están diseñados para realizar la transferencia rápida y segura de combustible desde camiones cisterna hacia equipos de gran tamaño, como camiones mineros, cuyos tanques pueden tener capacidades de **1,000, 1,300** o hasta **1,500 galones**, dependiendo del modelo. Esta capacidad de despacho de alto caudal permite reducir significativamente los tiempos de reabastecimiento, contribuyendo a una mayor disponibilidad operativa de la flota y a la optimización de la eficiencia global del proceso extractivo.

3.4.2.3 Sistema de despacho de combustible

Es el sistema en conjunto que permite **regular, medir, registrar y monitorear** durante todo el proceso de despacho de combustible hacia los camiones.

Estas **bahías o islas de despacho** están equipadas con sistemas electrónicos de control, medición, aditivación y seguridad, y cumplen con regulaciones específicas para garantizar la integridad del producto, la seguridad operativa y la protección del medio ambiente.

En la siguiente figura se presenta un ejemplo de un sistema de despacho con mezcla continua de Diésel B5 y Biodiésel, integrado con un sistema de aditivación, diseñado para la carga directa en camiones cisterna.

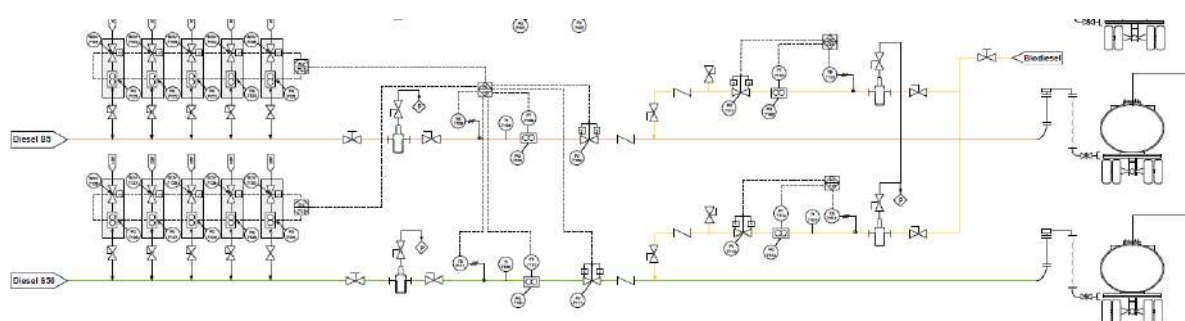


Figura 4 P&ID de sistema de despacho de Diesel B5-S50. Fuente. Accuload Smith Meter.

El controlador electrónico **Smith Meter AccuLoad**, fabricado por **FMC Technologies**, es un sistema avanzado de automatización utilizado para gestionar y supervisar el proceso de carga de combustibles en terminales y plantas de despacho. Este equipo actúa como el controlador central del sistema, con capacidad para operar hasta **seis brazos** de carga simultáneamente, permitiendo configuraciones de mezcla tanto secuenciales como concurrentes, de acuerdo con proporciones de volumen predefinidas.

El AccuLoad puede gestionar hasta **50 recetas de mezcla**, lo que brinda una gran flexibilidad para manejar distintos productos y requisitos de formulación. Además, funciona como **controlador maestro del sistema de aditivación**, permitiendo la integración precisa de aditivos en línea durante la operación de despacho, asegurando la conformidad con las especificaciones del producto final. Gracias a sus capacidades de integración con sistemas SCADA, comunicación Modbus y otras interfaces estándar de la industria, el AccuLoad

garantiza precisión, trazabilidad y seguridad operativa en los procesos de carga de combustibles líquidos.

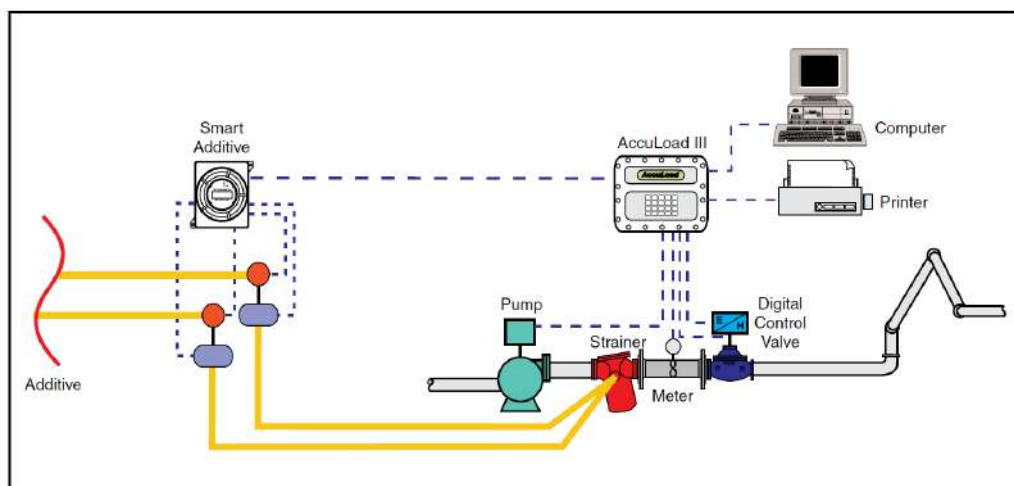


Figura 5 Sistema de despacho de combustible de un solo producto por Accuload. Fuente. Accuload Smith Meter.

De igual manera, se puede observar una notable similitud con los **surtidores** utilizados en estaciones de servicio convencionales, como se muestra en la figura siguiente.

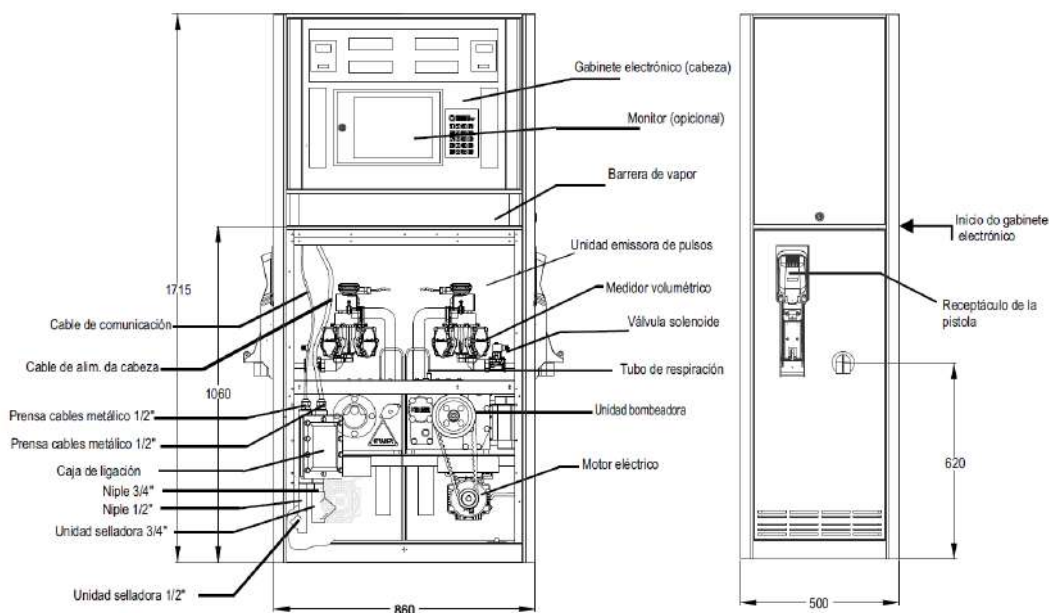


Figura 6 Sistema de despacho de combustible de surtidor electrónico PRIME MH. Fuente. Manual Gilbarco Veeder Root.

Entre los componentes principales de este sistema, que comparte similitudes funcionales con los sistemas de despacho de alto caudal previamente descritos, se encuentran los siguientes elementos: un motor eléctrico

acoplado a una **bomba centrífuga** o de paletas, encargada de generar el caudal requerido para el suministro de combustible; un **medidor volumétrico** de precisión (tipo desplazamiento positivo), conectado a un **transductor de pulsos** que convierte el volumen mecánico en señales eléctricas para su posterior procesamiento y registro; y una **válvula solenoide** de control, la cual regula electrónicamente la apertura y cierre del flujo durante el ciclo de despacho. Todos estos dispositivos están montados e integrados dentro de la carcasa del surtidor electrónico, como se aprecia en la figura, formando un sistema compacto, automatizado y calibrado.

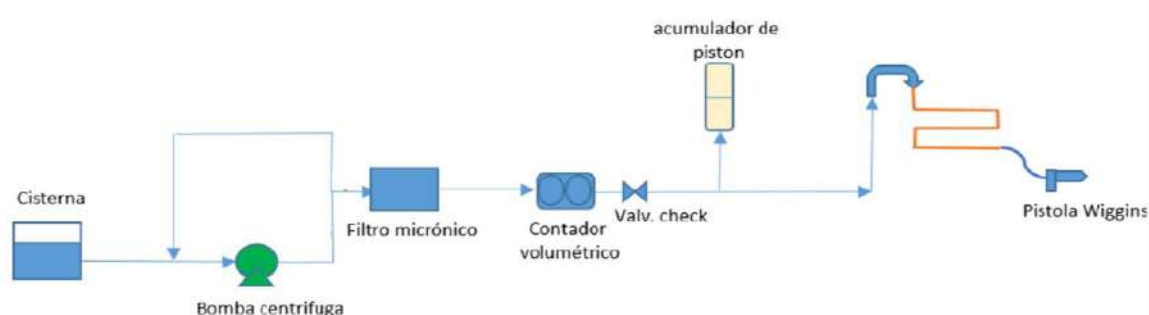


Figura 7 Sistema de despacho de combustible de camiones mineros. Fuente. Elaboración propia.

El sistema de abastecimiento de combustible para camiones de carga en operaciones mineras **presenta una arquitectura muy similar a la utilizada en plantas convencionales de despacho**, compartiendo diversos componentes clave que aseguran un proceso eficiente, seguro y preciso. Entre los principales equipos que conforman este sistema se encuentran: un **controlador de proceso**, que puede ser un **PLC** industrial; un **medidor volumétrico**, que puede ser de tipo turbina, de engranajes u otra tecnología adecuada para medir el volumen despachado; un variador de velocidad, encargado de regular la operación de la **bomba** según la demanda de flujo; un **medidor de flujo**, generalmente basado en diferencial de presión o tecnología electromagnética; un **filtro** micrónico, que retiene impurezas para preservar la calidad del combustible; un amortiguador de pulsaciones, que estabiliza la presión en la línea de despacho; y un **detector de puesta a tierra**, como el sistema Scully, que verifica la correcta conexión del camión antes de habilitar el despacho, garantizando así condiciones operativas seguras.

3.4.2.4 Aspectos generales en minería

Antamina es una minera polimetálica que produce **cobre, zinc, molibdeno, plata y plomo**, fundada en 1996 e inició de operaciones mineras en 1999. La mina se encuentra en el distrito de San Marcos, provincia de Huari, en la región Áncash, a 200 kilómetros de Huaraz y a una altitud promedio de 4,300 a 4,700 metros sobre el nivel del mar. Además, cuenta con el puerto de embarque Punta Lobitos, situado en la provincia costera de Huarmey.



Figura 8 Ubicación en la región. Fuente. Antamina.

Con una inversión histórica de 3,600 millones de dólares, Antamina se posiciona como uno de los mayores productores de concentrados de cobre y zinc en el Perú y una de las diez minas más grandes del mundo por volumen de producción.

Ranking	Nombre	Capacidad de producción anual (toneladas)	Capacidad como % de producción global
1	Escondida	1,400.000	7,0%
2	Collahuasi	610.000	3,1%
3	Buenavista del Cobre	525.000	2,6%
4	Morenci	520.000	2,6%
5	Cerro Verde II	500.000	2,5%
6	Antamina	450.000	2,3%
7	Polar Division	450.000	2,3%
8	Las Bambas	430.000	2,2%
9	Grasberg	400.000	2,0%
10	El Teniente	399.000	2,0%

Figura 9 Capacidad de producción anual de cobre. Fuente. Elements Visual Capitalist (2023).

Los accionistas de Antamina son: BHP Billiton (33.75%), Glencore (33.75%), Teck (22.5%) y Mitsubishi Corporation (10%).



El yacimiento de Antamina es un depósito polimetálico de tipo skarn, con una fuente importante de cobre, zinc, plata, molibdeno y bismuto, formado como resultado desplazamiento del intrusivo y de otros cuerpos intrusivos porfiríticos relacionados a este.

Realizado el estudio geológico del yacimiento, se ha sectorizado en función de la ley de mineral en diferentes fases, lo que permitirá organizar las campañas mineras de acuerdo con las características específicas de cada periodo.

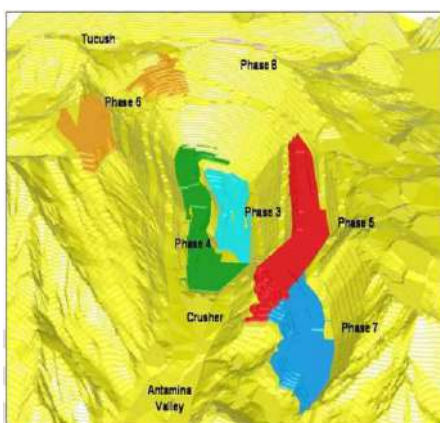


Figura 10 Yacimiento Antamina sectorizado en fases. Fuente. Antamina.



Figura 11 Vista de planta de minera Antamina. Fuente. Antamina.

Como se puede observar en la imagen anterior correspondiente a la vista en planta de la minera, los camiones mineros reciben el material extraído en

el tajo o yacimiento, el cual es cargado por palas eléctricas y/o cargadores frontales. Posteriormente, este material es acarreado según su ley (contenido mineral) hacia la chancadora primaria para su procesamiento, o hacia los depósitos de desmonte, como Tucush o Este, en caso de tratarse de material no aprovechable.



Figura 12 Proceso de extracción y procesamiento. Fuente. Antamina.

Como se puede ver en la figura anterior, el material depositado por los camiones mineros en la **chancadora primaria** es reducido de tamaño mediante una trituradora de grandes dimensiones. Posteriormente, el material triturado es transportado a través de **fajas transportadoras** hacia las zonas de **apilamiento o stockpile**. Desde los apilamientos, el mineral es alimentado al circuito de **molienda**, compuesto por los molinos SAG y de bolas, donde se pulveriza hasta alcanzar granulometría adecuada para el proceso de **flotación** (celdas rougher(alta ley), scavender(baja ley) y cleaner), etapa en la cual se separan los minerales valiosos del material estéril utilizando reactivos químicos(colectores y espumantes) y aire. Los residuos del proceso, denominados **relaves**, son conducidos a una **presa de relaves** para su disposición y manejo ambiental. Paralelamente, el concentrado de minerales obtenido es impulsado a través de un **mineroducto** de largo alcance hacia una planta de **filtrado**, donde se reduce su contenido de humedad. Finalmente, el concentrado de mineral es transportado hacia zonas de **almacenamiento** y preparado para el **embarque**, usualmente mediante sistemas de carga en terminales portuarios, completando así la cadena de producción y exportación del mineral procesado.

3.4.2.5 Ciclo de transporte en sistema de gestión de flotas

El sistema de gestión de flotas de la empresa minera monitorea en tiempo real las actividades de los camiones de acarreo a lo largo de todo su ciclo operativo, desde la carga del material hasta su descarga en la chancadora primaria o en los botaderos de material, registrando automáticamente cada una de las tareas intermedias que conforman el ciclo de producción como muestra la siguiente figura. (HEXAGON, 2017)

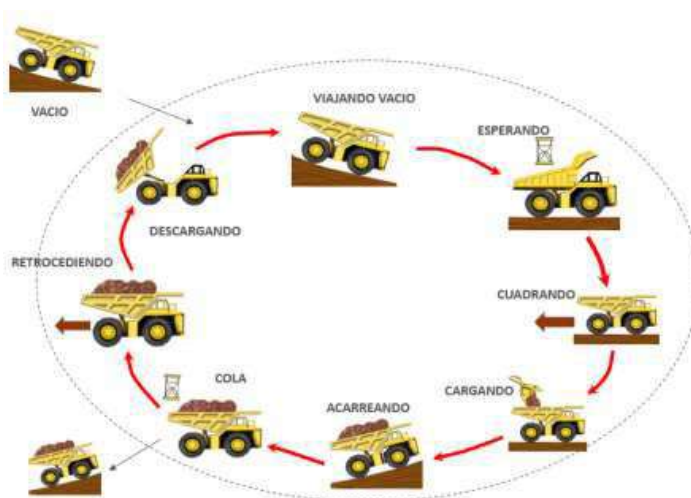


Figura 13 Ciclo de transporte de carguío y acarreo. Fuente. (HEXAGON, 2017)

La actividad representada en la imagen anterior ilustra un **ciclo de transporte regular**, en el cual pueden presentarse demoras como colas y tiempos de esperas, aunque sin interrupciones prolongadas en el trayecto de los equipos de carguío y acarreo.

Observación: El abastecimiento de combustible constituye una **interrupción de parada obligatoria** dentro del ciclo operativo de los camiones de extracción y es fundamental para garantizar la continuidad de la producción. No obstante, una gestión ineficiente de esta actividad (especialmente en la **asignación de equipos** al proceso) puede generar demoras significativas y pérdidas operacionales.

3.4.2.6 Gestión del tiempo

Para realizar un control adecuado, es necesario contar con mediciones que permitan determinar los **KPI** (Indicadores Clave de Desempeño). En el ámbito minero, la norma **ASARCO** (American Smelting & Refining Co.) sirve como

marco de referencia para distribuir los tiempos de operación de los equipos, lo que facilita el cálculo de los índices operativos (Bonzi Ríos, 2016). Esto se ilustra en la siguiente figura:

Nominal				
Disponible				No disponible Mantenición
Operativo			Reserva	
Efectivo	Demora Programada	Demora No Programada	Pérdidas Operacionales	

Figura 14 Escala de tiempos según norma ASARCO. Fuente. (Bonzi Ríos, 2016)

A continuación, se describen las distintas categorías de tiempos, según Bonzi Ríos (2016, pág. 18):

- **Nominal:** Tiempo total de un período durante el cual el equipo se encuentra físicamente en faena. (Bonzi Ríos, 2016)
- **Disponible:** Tiempo en que el equipo está habilitado y en condiciones óptimas para operar. Se le han descontado las mantenciones. El equipo está listo para ser operado. (Bonzi Ríos, 2016)
- **No Disponible (Indisponible):** Este período se encuentran los tiempos destinados tanto para **mantenciones** programadas y/o **reparaciones** electromecánicas de terreno. (Bonzi Ríos, 2016)
- **Operativo:** Corresponde al tiempo en que el equipo se encuentra operando en faena, es decir, **está con operador**. (Bonzi Ríos, 2016)
- **Reserva:** Es aquel tiempo en donde el equipo estando en condiciones mecánicas de operación, no es utilizado en labores productivas, ya sea por **falta de operador** o superávit de equipo en ese momento. (Bonzi Ríos, 2016)
- **Efectivo:** Es el tiempo en que el equipo está siendo utilizado para lo que realmente se invirtió, es decir, está realizando **labores puras** de producción sin colas (ciclo de transporte ideal sin colas). (Bonzi Ríos, 2016)
- **Demoras Programadas:** Tiempos de detención programada. Ejemplo: Cambio de turno y colación (alimentos o descanso). (Bonzi Ríos, 2016)
- **Demoras No Programadas:** Tiempo de detenciones no programadas, donde no se sabe cuánto durarán. Ejemplo: Punto de trabajo obstruido como pistas, evacuación por tronadura, actividades de seguridad,

recarga de combustible, detección de fallas, pausas por necesidades fisiológicas, entre otros. (Bonzi Ríos, 2016)

- **Pérdidas Operacionales:** Es el tiempo donde el equipo se encuentra esperando. Ejemplo: **Espera** de carguío o descarga en chancadora o botadero de materiales. (Bonzi Ríos, 2016)

3.4.2.7 UEBD

La **utilización efectiva en función del tiempo disponible** representa la proporción del tiempo durante el cual un equipo, estando disponible para operar, efectivamente ejecuta las actividades específicas para las cuales fue adquirido por la organización. Esta métrica se expresa como un porcentaje del tiempo total disponible. (Zuñiga Estay, 2021)

$$UEBD(\%) = \frac{\text{Tiempo efectivo}}{\text{Tiempo disponible}} \times 100$$

Figura 15 Fórmula UEBD. Fuente. (Zuñiga Estay, 2021)

3.4.2.8 Productividad de acarreo

La productividad mide la relación entre los **resultados obtenidos** y los **recursos empleados** para alcanzarlos. (Pulido, 2010)

Se puede entender a través de dos aspectos clave: **eficiencia** y **eficacia**. La eficiencia se refiere a cómo se **optimizan** los recursos para lograr un resultado, mientras que la eficacia es la capacidad de **cumplir con los objetivos** planteados. (Pulido, 2010, pág. 21)

$$\text{Productividad} = \text{Eficiencia} \times \text{Eficacia}$$

$$\frac{\text{Unidades producidas}}{\text{Tiempo total}} = \frac{\text{Tiempo útil}}{\text{Tiempo total}} \times \frac{\text{Unidades producidas}}{\text{Tiempo útil}}$$

Figura 16 Fórmula de productividad. Fuente. (Pulido, 2010, pág. 22)

3.4.2.9 Proceso de abastecimiento de combustible

Es una parada obligatoria para los camiones de extracción (CAEX) durante su operación productiva. Una mala coordinación en la asignación de equipos a las estaciones petroleras puede generar demoras y pérdidas operacionales. El principal problema surge cuando un CAEX es enviado a una estación ya

ocupada, provocando tiempos de espera adicionales. Aunque varía según la operación, este proceso sigue una secuencia de etapas. (González Gazmuri, 2016, pág. 8)



Figura 17 Proceso de abastecimiento de combustible. Fuente. (Bonzi Ríos, 2016)

3.4.2.10 Controladores PID

El controlador PID es la herramienta más utilizada en el control de procesos debido a su **simplicidad y efectividad**. Aunque sus principios básicos existen desde la época en que los molinos de vientos y las máquinas de **vapor** eran las tecnologías dominantes, su forma moderna surgió en los años 30 con los controladores **neumáticos**, posteriormente en los años 50 con un simple computador **analógico** basado en amplificadores operaciones y luego con la llegada de los sistemas computarizados **digitales**, se añadieron funciones como autosintonía y diagnóstico, fortaleciendo su aplicación en la industria. Su evolución demuestra cómo la tecnología ha permitido redescubrir y mejorar sus capacidades. (Astrom & Hagglund., 2009, pág. 6)

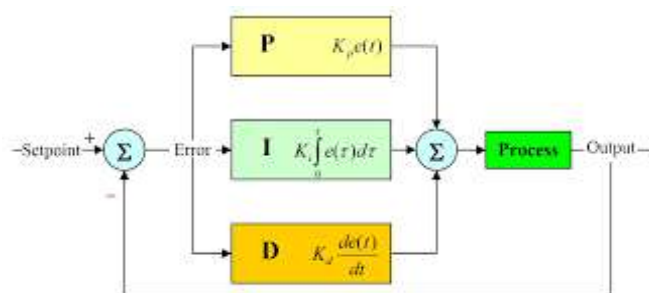


Figura 18 Diagrama de bloques en paralelo del controlador PID. Fuente. Creus (2011)

La cual se expresa en la siguiente ecuación:

$$\text{Señal de salida} = K_c x \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \times \int e(t) dt + T_D x \frac{de(t)}{dt} \right]$$

3.4.2.11 Bloque PID en Control Expert

El bloque utilizado para el lazo de control es el siguiente:

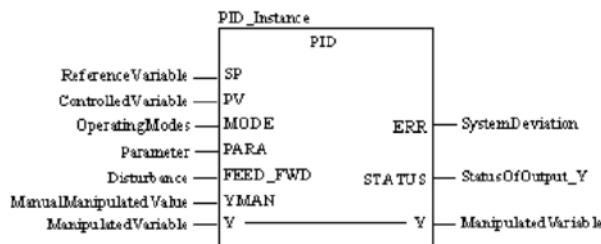


Figura 19 Bloque PID en control Expert. Fuente. Schneider Electric.

Dicho bloque posee los siguientes parámetros mostrados:

Parameter	Data type	Description
SP	REAL	Reference variable
PV	REAL	Controlled variable
MODE	Mode_PID	Operating mode
PARA	Para_PID	Parameter
FEED_FWD	REAL	Disturbance variable
YMAN	REAL	Manually manipulated value

Figura 20 Parámetros del bloque PID. Fuente. Schneider Electric.

Este bloque constituye un componente esencial dentro del esquema de control, y su estructura lógica se representa mediante el diagrama que se muestra a continuación. En él se definen las conexiones de entrada, procesamiento y salida del lazo.

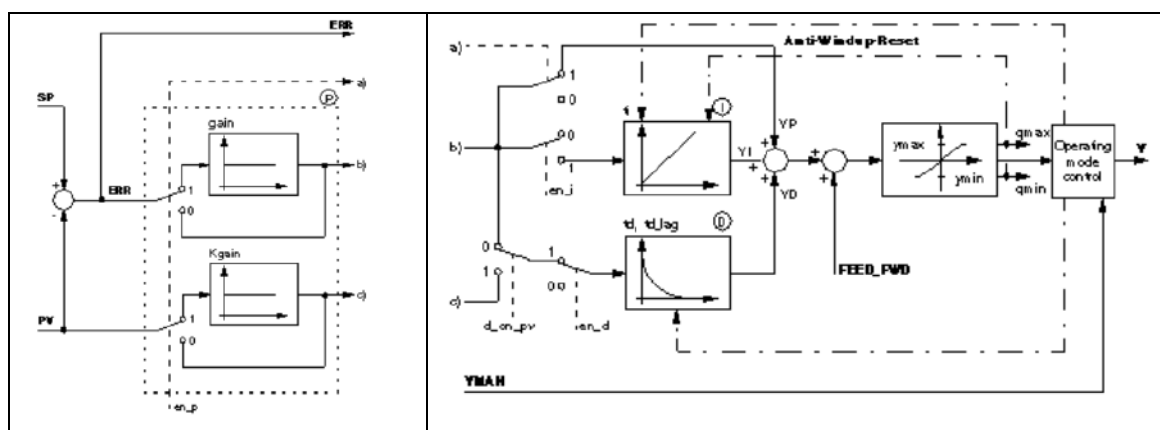


Figura 21 Interior de bloque PID en control Expert. Fuente. Schneider Electric.

Para su configuración interna, se hace uso de los parámetros **MODE** y **PARA**, los cuales determinan el tipo de operación que realiza el bloque, así como sus

características dinámicas específicas (por ejemplo, modo proporcional, integral o derivativo, según sea el caso).

Element	Data type	Description
man	BOOL	"1": Manual mode
halt	BOOL	"1": Halt mode
en_p	BOOL	"1": P component on
en_i ¹	BOOL	"1": I component on
en_d	BOOL	"1": D component on
d_on_pv	BOOL	"1": D component in relation to the controlled variable "0": D component in relation to the system deviation

Figura 22 Parámetro Mode_PID de Bloque PID. Fuente. Schneider Electric.

Element	Data type	Description
gain	REAL	Proportional action coefficient (gain)
ti	TIME	Integral time
td	TIME	Derivative time
td_lag	TIME	Delay of the D component
y _{max}	REAL	Upper limit
y _{min}	REAL	Lower limit

Figura 23 Parámetro Para_PID de Bloque PID. Fuente. Schneider Electric.

Observaciones:

- Se puede lograr un comportamiento inverso del controlador invirtiendo el signo de la ganancia. Un valor positivo de ganancia provoca un aumento del valor de salida para una variable de error positiva. Un valor negativo de ganancia provoca un aumento del valor de salida para una variable de error positiva.
- La salida del controlador se limita y_{max} y y_{min} con anti-windup, para evitar desbordes o un descontrol.
- La salida del controlador se limita mediante valores máximos y mínimos (y_{max} y y_{min}), y se implementa un mecanismo de **anti-windup** para evitar la saturación del integrador, previniendo así desbordes o comportamientos inestables en el sistema.

Este bloque implementa una **función de transferencia** característica, la cual define su comportamiento dinámico en el dominio de Laplace.

$$G(s) = gain \times \left[1 + \frac{1}{ti \times s} + \frac{td \times s}{1 + td_lag \times s} \right]$$

Figura 24 Función de transferencia en el plano s. Fuente. Schneider Electric.

3.4.2.12 Reglas de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID

Las reglas de sintonía de Ziegler-Nichols, han sido ampliamente utilizadas para la sintonización de controladores PID en sistemas de control de procesos donde **la dinámica de la planta no se conoce** con precisión. Durante décadas, estas metodologías han demostrado ser herramientas eficaces y prácticas para lograr un rendimiento aceptable en una amplia variedad de aplicaciones industriales. (Ogata, 2010, pág. 572)

- **Primer método**

En el primer método, la respuesta de la planta ante una entrada escalón unitario se obtiene **experimentalmente**, a partir de una prueba directa sobre el sistema. (Ogata, 2010, pág. 569)

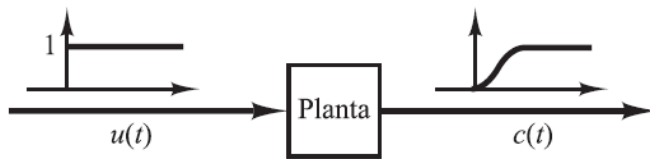


Figura 25 Respuesta a un escalón unitario de una planta. Fuente. (Ogata, 2010, pág. 569)

Si la planta no presenta **integradores ni polos complejos conjugados dominantes**, su respuesta al escalón unitario puede adoptar una forma característica en S. (Ogata, 2010, pág. 569)

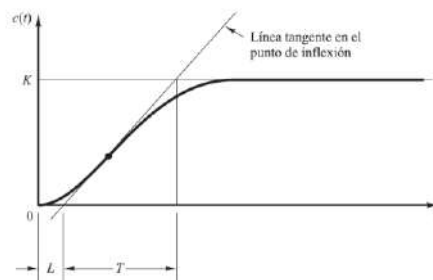


Figura 26 Curva de respuesta en forma de S. Fuente. (Ogata, 2010, pág. 569)

En este caso, la función de transferencia puede aproximarse mediante un modelo de **primer orden con retardo**, de la siguiente forma: (Ogata, 2010, pág. 570)

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$

A partir de este modelo, es posible determinar los parámetros de un controlador PID utilizando criterios de sintonización en la siguiente tabla. (Ogata, 2010, pág. 570)

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Figura 27 Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta (primer método). Fuente. (Ogata, 2010, pág. 570)

• Segundo método

En el segundo método, primero se fija $T_i = \infty$ y $T_d = 0$. Usando sólo la acción de control proporcional, se incrementa K_p desde 0 hasta un valor crítico K_{cr} , en donde la salida presente oscilaciones sostenidas. (Ogata, 2010, pág. 570)

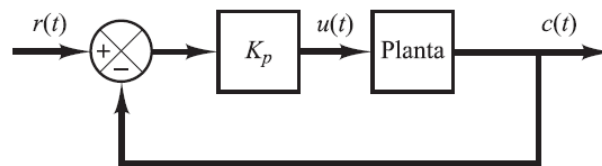


Figura 28 Sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional. Fuente. (Ogata, 2010, pág. 570)

De este modo, la ganancia crítica K_{cr} y el período de oscilación P_{cr} se determinan de forma experimental a partir del comportamiento del sistema en lazo cerrado. (Ogata, 2010, pág. 570)

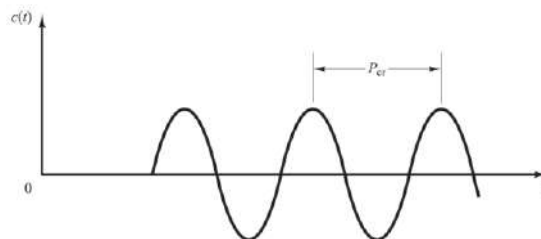


Figura 29 Oscilación sostenida con período P_{cr} . Fuente. (Ogata, 2010, pág. 571)

Los valores asignados son los que se muestran en la siguiente tabla.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45 K_{cr}$	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	0
PID	$0.6 K_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 P_{cr}$

Figura 30 Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica y período crítico (segundo método). Fuente. (Ogata, 2010, pág. 571)

3.5 Procedimiento

3.5.1 Resumen solución

Este trabajo profesional detalla la automatización de un sistema de abastecimiento de combustible a 300 GPM para camiones de acarreo en minería. Su objetivo es optimizar la operación de la flota minera, reduciendo demoras que afectan la eficiencia. Dado que estos equipos representan costos muy significativos en el proceso minero, minimizar los tiempos muertos en el abastecimiento de combustible es crucial para mejorar la productividad y reducir costos operativos.

El informe inicia detallando la configuración y parametrización de los equipos que conforman el sistema. Luego la secuencia operativa que maneja se describe brevemente a continuación: El gabinete de abastecimiento de combustible de alto caudal es un sistema compacto y portátil diseñado para optimizar el despacho de diésel a la flota de camiones mineros. Su operación inicia con la correcta posición del camión, bloqueo de seguridad y conexión a tierra. Luego, el operador registra el camión en el sistema Orpak, activa el contómetro y recibe señales de validación para encender la bomba y abrir la válvula de corte. Durante el despacho, filtros y sensores monitorean la calidad y flujo del combustible, mientras el PLC M580 regula automáticamente el caudal a 300 GPM mediante un variador de velocidad. El sistema usa una pistola Wiggins con cierre automático al llenar el tanque, evitando sobrellenados y asegurando precisión en la medición. Al finalizar, el sistema detiene la bomba, cierra la válvula y confirma la finalización del despacho, permitiendo el desacople y salida del camión, listo para recibir el siguiente vehículo.

Finalmente, se llevaron a cabo pruebas exhaustivas de funcionamiento en taller y mina.

En conclusión, tras su implementación y puesta en marcha, el sistema ha logrado reducir significativamente los tiempos de abastecimiento, minimizando los periodos de inactividad de los camiones y mejorando la productividad del proceso minero.

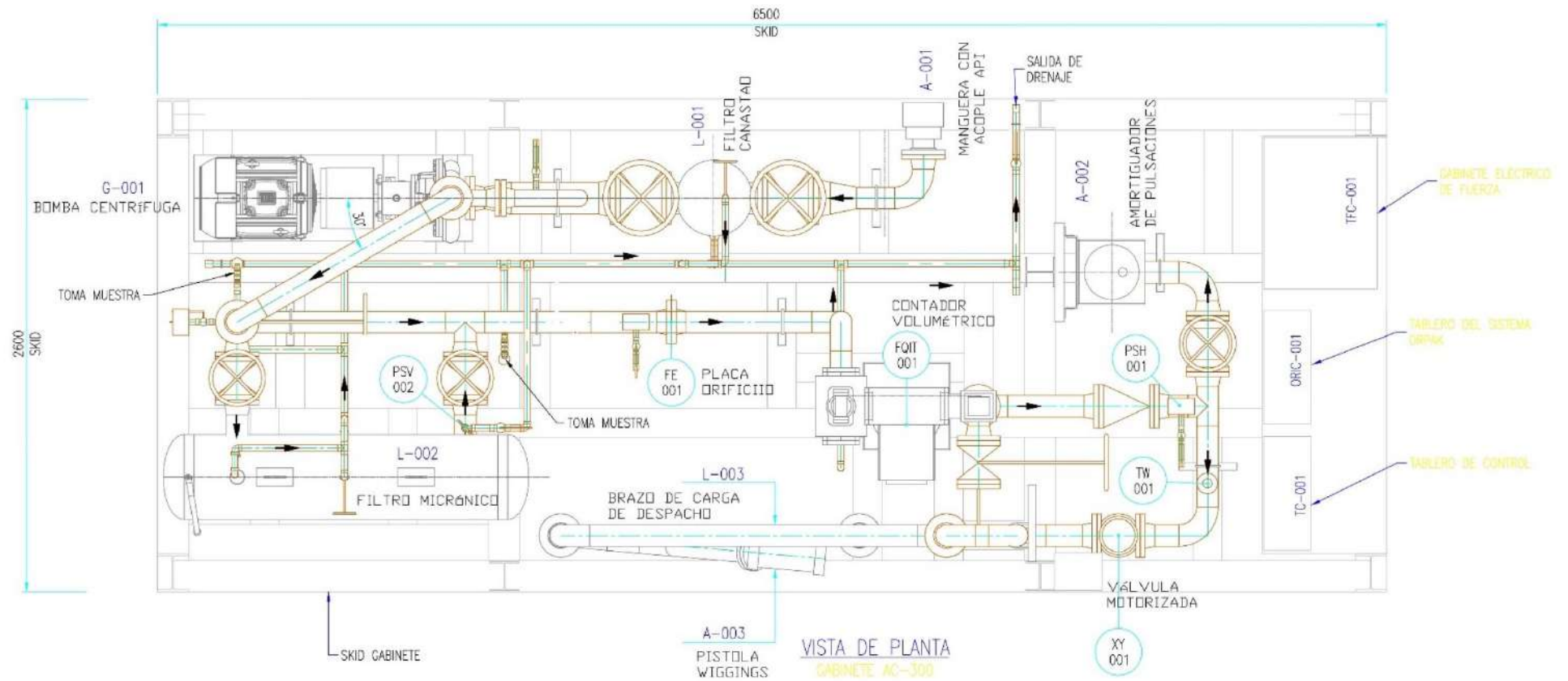


Figura 32 Vista de planta de sistema de abastecimiento. Fuente. Elaboración propia.

3.5.2 Parametrización de equipos partes del sistema

a) Medidor de flujo por placa orificio

Para medir el flujo, se emplea el principio de presión diferencial, que calcula la tasa de flujo basándose en la diferencia de presión antes y después de un plato de restricción en la tubería. El cual, al estar involucrado en un lazo cerrado, permitirá a través del controlador PID regular el flujo de combustible para mantenerlo constante.



Figura 33 Medidor de flujo diferencial instalado en Skid.
Fuente. Fotografía propia.



Figura 34 Medidor de flujo diferencial en operación.
Fuente. Fotografía propia.

Se puede visualizar en la placa del transmisor, puede detectar diferencias de presión de -40 kPa a 40 kPa, lo cual influye en el caudal máximo a detectar.



Figura 35 Placa de Instrumento FIT. Fuente. Fotografía propia.

Antes de instalar el instrumento, se verificaron los parámetros de configuración de fábrica utilizando un módem HART y el software PACTware. Además, se inspeccionaron los accesorios del transmisor de presión diferencial para asegurar su correcta funcionalidad.



Figura 36 Medidor de flujo diferencial. Fuente. Fotografía propia.



Figura 37 Plato orificio junto a manifold. Fuente. Fotografía propia.

En los sistemas de medición de flujo por presión diferencial, el caudal volumétrico es proporcional a la raíz cuadrada de la diferencia de presión medida.

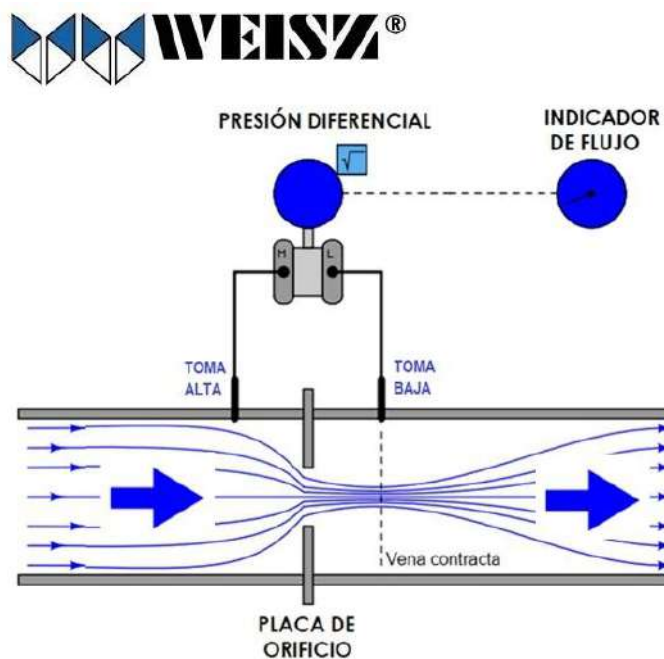


Figura 38 Placa de Instrumento. Fuente. Weisz.

Antes de la configuración, utilizamos el software **Daniel Orifice Flow Calculator** para determinar parámetros clave que solicitará el instrumento. Este programa requiere la entrada de ciertos datos, entre ellos:

- Diferencial máximo de presión: La placa de orificio puede detectar hasta 40 kPa, según se observa en la Figura 14 de la placa del instrumento.
- Densidad del producto: Se emplea al combustible Diesel DB5 S-50 cuya densidad es 850 kg/m³.
- Diámetro de la tubería: 4 pulgadas.
- Relación beta de la placa orificio (β):

$$\beta = \frac{d(\text{diametro de orificio})}{D(\text{Diametro interno tubería 4" sch - 40})} = \frac{2.617"}{(114.3\text{mm} - 2 \times 6.02\text{ mm}) \times \frac{1"}{25.4\text{mm}}} = \frac{2.617"}{4.026"} = 0.65.$$

Introducimos todos estos parámetros al software

Figura 39 Software Daniel Orifice Flow Calculator. Fuente. Emerson.

La cual nos permite determinar el flujo rate máximo de **353.4 gpm**, el cual se genera al tener un diferencial de presión de 40 kPa, el cual es asignado al equipo, como se muestra en la siguiente imagen.



Figura 40 Configuración de flujo máximo.
Fuente. Fotografía propia.



Figura 41 Máximo rango de presión
diferencial a detectar. Fuente. Fotografía
propia.

El cálculo realizado previamente con el software **Daniel Orifice Flow Calculator** también puede derivarse de la aplicación conjunta de la **ecuación de Bernoulli** y la ecuación de **continuidad del flujo**. Estas bases teóricas conducen a la expresión empleada en la norma ISO 5167-2:2013, la cual establece la siguiente ecuación para el cálculo del flujo másico:

$$Q_m = \frac{C}{\sqrt{(1 - \beta^4)}} \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{\pi}{4} d^2\right) \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho} = Q_v \cdot \rho$$

En donde:

Q_m : Flujo másico (Kg/s)

Q_v : Flujo volumétrico (m^3/s)

C : Coeficiente de descarga (adimensional)

ε : Factor de expansión(adimensional)

β : Relación de diámetros (d/D) o relación beta de placa orificio

d : Diámetro interno de la placa(m)

Δp : Diferencial de presión (Pa)

ρ : Densidad del fluido a temperatura de operación. (Kg/m^3)

Observación:

La norma **ISO 5167-1:2003** establece que el factor de expansibilidad (ϵ) = 1 cuando el fluido se considera incompresible, como en el caso de los líquidos. Esto se debe a que los líquidos son generalmente incompresibles y no experimentan cambios significativos de densidad bajo variaciones de presión como si lo hace los gases (aire, gas natural, otros), requiriendo un cálculo específico de ϵ .

El coeficiente de descarga depende del número de Reynolds $Re(D)$ y β , obteniendo un coeficiente de descarga de $C \approx 0.6011$.

Reemplazando los valores anteriormente usados en la expresión:

$$Q_v \cdot \rho = \frac{C}{\sqrt{(1 - \beta^4)}} \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\pi}{4} d^2\right) \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho}$$

$$Q_v \cdot \left[850 \frac{kg}{m^3}\right] = \frac{0.6011}{\sqrt{(1 - 0.65^4)}} * 1 * \left(\frac{\pi}{4} \cdot \left[2.617 pulg \times \frac{25.4 \times 10^{-3} m}{1 pulg}\right]^2\right) * \sqrt{2 * 40 \times 10^3 Pa * \left[850 \frac{kg}{m^3}\right]}$$

$$Q_v = 0.0223277 \frac{m^3}{s} * \frac{264.172 gal}{1 m^3} \times \frac{60 s}{1 min} = 353.9 \frac{gal}{min}$$

Utilizando cualquiera de los dos métodos mencionados anteriormente, podemos proceder con la configuración del equipo.

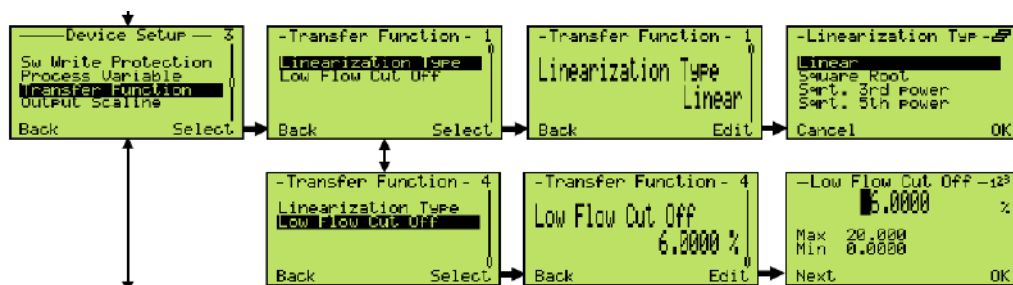


Figura 42 Secuencia de configuración de parámetros en instrumento. Fuente. ABB.

Principales parámetros asignados

Tabla 2 Parámetros configurados en el instrumento para medición de flujo.

Level 1	Level 2	Level 3	Parámetros
Device Setup	Process Variable	Unit	kPa
		Low sensor limit	0 kPa
		High sensor limit	40 kPa
	Transfer Function	Linearization Type	Square Root
		Low Flow Cut Off	6.00 %
	Output Scaling	Damping	1.0 seg
		Unit	Flow – gal/min
		Lower Ranger Value(LRV)	0 gal/min
		Upper Ranger Value(URV)	353.2 gal/min
Display	Language	English	
	Mode	One Line	
	Line 1 View	Scaled Output	

Fuente. Elaboración propia.

Para evitar oscilaciones por pequeñas variaciones alrededor de 0 kPa, cuando el sistema se encuentra no abasteciendo, se ajusta **Low Flow Cut Off** a 6%, mostrando un valor de 0 mientras la presión este por debajo de dicho valor. Para reducir un poco la variación ruidosa parte de la señal de presión, se asigna un valor de **Damping** de 1.0 seg.

Es de utilidad el siguiente cuadro, para el proceso de calibración que muestra el valor de presión requerido para generar en pantalla el valor de flujo correspondiente como el valor de corriente.

Tabla 3 Relación de presión, caudal y corriente correspondiente.

Presión	Caudal	Corriente
$(1)^2 * 40kPa = 40.0kPa$	$(1) * 353.2gpm = 353.2gpm$	20 mA (100%)
$\left(\frac{3}{4}\right)^2 * 40kPa = 22.5kPa$	$\left(\frac{3}{4}\right) * 353.2gpm = 264.9gpm$	16 mA (75 %)
$\left(\frac{1}{2}\right)^2 * 40kPa = 10.0kPa$	$\left(\frac{1}{2}\right) * 353.2gpm = 176.6gpm$	12 mA (50 %)
$\left(\frac{1}{4}\right)^2 * 40kPa = 2.5kPa$	$\left(\frac{1}{4}\right) * 353.2gpm = 88.3gpm$	08 mA (25 %)
$(0)^2 * 40kPa = 0 kPa$	$(0) * 353.2gpm = 0gpm$	04 mA (00 %)

Fuente. Elaboración propia.

b) Diferencial de presión

Para monitorear el grado de obstrucción del filtro micrónico por la suciedad, se utiliza un transmisor de presión diferencial que mide la caída de presión a través del filtro, indicando el nivel de acumulación de contaminantes en los elementos filtrantes. Cuando esta caída de presión alcanza los **40 psi** (psid), se activa una alarma sonora que señala que los elementos filtrantes han llegado a su límite de saturación y requieren ser reemplazados.



Figura 43 Medidor de presión diferencial. Fuente. Fotografía propia.



Figura 44 Filtro micrónico conectado a transmisor de presión diferencial. Fuente. Fotografía propia.

Principales parámetros asignados

Tabla 4 Parámetros configurados en el instrumento para medición de presión diferencial.

Level 1	Level 2	Level 3	Parámetros
Device Setup	Process Variable	PV Type	Differential Press
		Unit	PSI
		Lower Ranger Value(LRV)	0 PSI
		Upper Ranger Value(URV)	50 PSI
	Transfer Function	Linearization Type	Linear
	Output Scaling	Damping	1.0 seg
		Unit	Pressure – PSI
		Lower Ranger Value(LRV)	0 PSI
		Upper Ranger Value(URV)	50 PSI
Display	Language	English	
	Mode	One Line+ Bargraph	
	Line 1 View	Pressure	
	Bar View	Output Percent	

Fuente. Elaboración propia.

El transmisor de presión diferencial está diseñado para detectar variaciones de presión en un rango de -2'400 kPa a 2'400 kPa (equivalente a ± 348.09 psi) como se puede visualizar en la placa. Sin embargo, en esta aplicación específica, utilizaremos únicamente una porción de este rango, estableciendo el intervalo de medición entre 0.0 psi y **50 psi**.



Figura 47 Placa de instrumento DPIT. Fuente. Fotografía propia.

Tener en cuenta el siguiente cuadro para el proceso de calibración, en el cual se muestra la relación entre la presión aplicada y la corriente generada correspondiente. Se puede observar que ambos valores mantienen una relación lineal.

Tabla 5 Relación de presión y corriente correspondiente.

Presión	Corriente
$(1) * 50 \text{ PSI} = 50.0 \text{ PSI}$	20 mA (100%)
$\left(\frac{3}{4}\right) * 50 \text{ PSI} = 37.5 \text{ PSI}$	16 mA (75 %)
$\left(\frac{1}{2}\right) * 50 \text{ PSI} = 25.0 \text{ PSI}$	12 mA (50 %)
$\left(\frac{1}{4}\right) * 50 \text{ PSI} = 12.5 \text{ PSI}$	08 mA (25 %)
$(0) * 50 \text{ PSI} = 0 \text{ PSI}$	04 mA (00 %)

Fuente. Elaboración propia.

La siguiente imagen ilustra el instrumento durante su funcionamiento.



Figura 48 Instrumento DPIT en operación.
Fuente. Fotografía propia



Figura 49 Alarma sonora cuando el filtro micrónico supera 40 psi.
Fuente. Fotografía propia.

c) Transmisor de temperatura

Para medir la temperatura del combustible diésel, se utiliza un transmisor de temperatura que incorpora un sensor RTD Pt-100 de 4 hilos. Este transmisor con el valor de temperatura entregado permite realizar correcciones del volumen de combustible despachado a los camiones mineros, debido a la propiedad de los combustibles de expandirse o contraerse según la temperatura.



Figura 50 Instrumento TIT instalado. Fuente. Fotografía propia.

Haciendo uso del comunicador Hart, se procede con la verificación de los parámetros configurados:

Tabla 6 Parámetros configurados en el instrumento para medición de temperatura.

Level 1	Level 2	Level 3	Parámetros
Device Setup	Process Variable	PV Type	Pt 100
		Unit	Celsius
		Lower Ranger Value(LRV)	0 °C
		Upper Ranger Value(URV)	100 °C
	Transfer Function	Linearization Type	Linear
	Output Scaling	Damping	1.0 seg
		Unit	Temperature – °C
		Lower Ranger Value(LRV)	0 °C
		Upper Ranger Value(URV)	100 °C
Display	Language	English	
	Mode	One Line+ Bargraph	
	Line 1 View	Temperature	
	Bar View	Output Percent	

Fuente. Elaboración propia.

Dicho instrumento de temperatura permite visualizar, en el cuadro siguiente, la relación lineal existente entre la variable medida y la señal de salida. Esta correspondencia indica que el incremento de la temperatura se refleja proporcionalmente en la señal eléctrica generada por el sensor.

Tabla 7 Relación de temperatura y corriente correspondiente.

Temperatura	Corriente
$(1) * 100\text{ }^{\circ}\text{C} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	20 mA (100%)
$\left(\frac{3}{4}\right) * 100\text{ }^{\circ}\text{C} = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$	16 mA (75 %)
$\left(\frac{1}{2}\right) * 100\text{ }^{\circ}\text{C} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	12 mA (50 %)
$\left(\frac{1}{4}\right) * 100\text{ }^{\circ}\text{C} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	08 mA (25 %)
$(0) * 100\text{ }^{\circ}\text{C} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	04 mA (00 %)

Fuente. Elaboración propia.

En la figura se aprecia el instrumento en condiciones de operación.



Figura 51 Instrumento TIT en operación. Fuente. Fotografía propia.

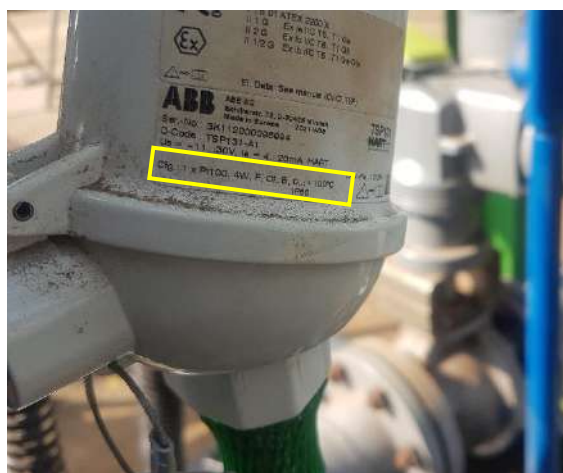


Figura 52 Placa de instrumento TIT. Fuente. Fotografía propia.

d) QFIT- Medidor volumétrico

Para monitorear la cantidad de combustible entregada a los camiones mineros, se utiliza un medidor volumétrico que muestra en su pantalla la cantidad suministrada a cada vehículo. Este dispositivo permite un control preciso del volumen de combustible despachado, asegurando una gestión eficiente del suministro.



Figura 53 Medidor volumétrico QFIT en Skid. Fuente. Fotografía propia.

Además, antes del medidor volumétrico, se ha instalado un eliminador de aire que permite medir únicamente el combustible, excluyendo cualquier presencia de aire. Este dispositivo está diseñado para extraer volúmenes de aire o vapor acumulados en el sistema de dosificación de líquidos, lo que permite una medición más precisa.



Figura 54 Placa de instrumento QFIT. Fuente. Fotografía propia.



Figura 55 Interior de Medidor de desplazamiento positivo (DP). Fuente. TCS meter.

Según las especificaciones del fabricante, el contómetro está diseñado para medir flujos en un rango de 25 a 500 galones por minuto (gpm), con una presión máxima de operación de 150 psi. Es importante asegurarse de que la presión de funcionamiento no exceda este límite para garantizar un rendimiento óptimo y evitar daños al equipo.

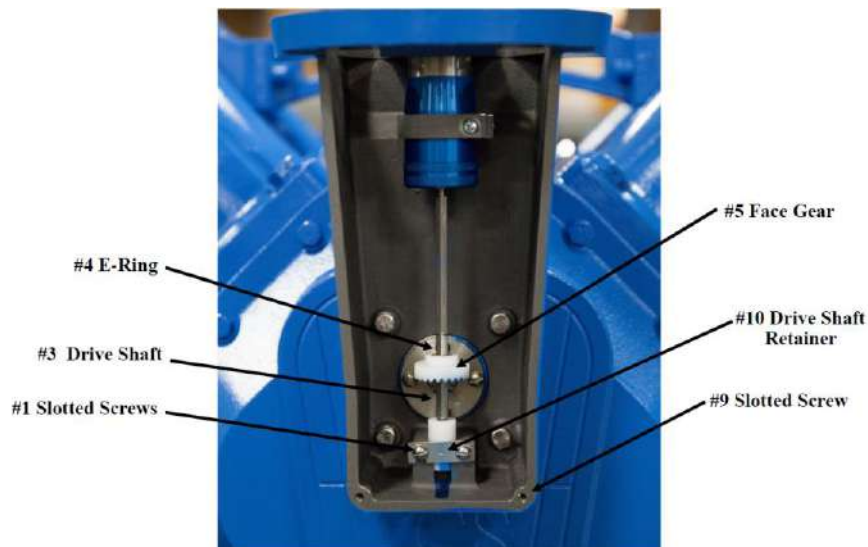


Figura 56 Acople de eje con sensor pulse. Fuente. TCS meter.

En los medidores volumétricos, el cálculo del volumen se basa en la cantidad de pulsos generados por el dispositivo. Cada pulso corresponde a un volumen específico de fluido que ha pasado a través del medidor. Esta relación se conoce como **K factor**, definido como el número de pulsos por unidad de volumen.

$$\text{Volumen} = \text{Meter Factor} * \frac{\text{Pulsos del Medidor}}{\text{K Factor}}$$

El **Meter Factor** es un factor de corrección (desgaste, suciedad, etc.) obtenido durante la **calibración**, que ajusta la lectura del equipo en función de la diferencia entre el volumen real del patrón (Serafín) y el volumen registrado por el medidor en prueba.

De la hoja de datos del sensor pulse 700-40, se tiene un K factor

Tabla 8 Relación de pulsos por unidad de medida.

METER		700-35	700-40	700-45	700-60	700-65
Pulses Per Gallon		205.8	74.2	74.2	37.1	37.1
Pulses Per Litre		54.4	19.6	19.6	9.8	9.8
With TCS 3000 Register	Single Channel Pulses Per Gallon	205.8	74.2	74.2	37.1	37.1
	Single Channel Pulses Per Liter	54.4	19.6	19.6	9.8	9.8
	Dual Channel Pulses Per Gallon	411.6	148.4		74.2	74.2
	Dual Channel Pulses Per Liter	108.8	39.2	39.2	19.6	19.6
	Quadrature Channel Pulses Per Gallon	823.2	296.8	296.8	148.4	148.4
	Quadrature Channel Pulses Per Liter	217.6	78.4	78.4	39.2	39.2
Maximum Output — Hz		1029.0	618.3	742.0	618.3	742.0

Fuente. TCS 700-40.

De dicha tabla, se obtiene el valor de 148.4 pulsos contados por cada galón circulado, logrando conseguir el volumen acumulado por el contómetro FQIT.

$$Volumen = 1.0 * \frac{149'290 \text{ pulsos}}{148.4 \text{ pulso/gal}}$$

$$Volumen = 1006.0 \text{ galones}$$



Figura 57 Volumen abastecido a camión minero. Fuente. Fotografía propia.

Durante el proceso de calibración del medidor volumétrico, contabiliza el número de pulsos acumulados y **los valores proporcionados de volumen por el serafín**, los cuales son introducidos al medidor volumétrico TCS 3000, los cuales permiten calcular el meter factor (MF) requerido para garantizar una medición precisa del volumen.



Figura 58 W&M(Weights & Measure) Pesos y medidas. Fuente. Fotografía propia.

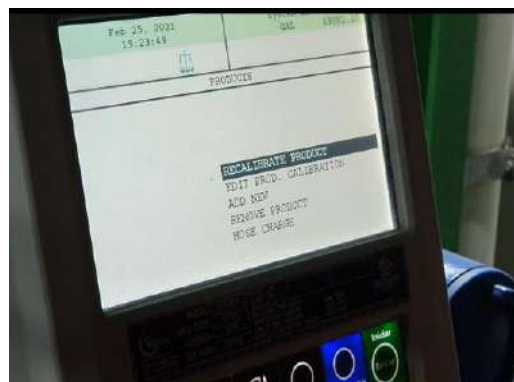


Figura 59 Inicio de calibración de Diesel. Fuente. Elaboración propia.



Figura 60 Proceso de nivelación de Serafín. Fuente. Elaboración propia.



Figura 61 Patrón volumétrico de 560 galones. Fuente. Elaboración propia.



Figura 62 Patrón volumétrico de 320 galones. Fuente. Elaboración propia.



Figura 63 Regleta de patrón volumétrico. Fuente. Elaboración propia.

La calibración del contómetro se considera completa cuando la diferencia entre el volumen registrado por el TCS3000 y el medido por el serafín es menor de **+/-0.15 galones**. Este nivel de precisión garantiza mediciones confiables.

$$Error = Vol\ TCS - Vol\ Serafín$$

$$\% Error = \frac{Vol\ TCS - Vol\ Serafín}{Vol\ Serafín}$$

En la siguiente tabla se detallan los parámetros establecidos para el contómetro volumétrico TCS 3000.

Tabla 9 Parámetros configurados en el contómetro volumétrico FQIT-001.

Level 1	Level 2	Parámetros
Pesos y Medidas Weights & Measure(W&M)	Nombre del Producto	Diesel
	Densidad del producto	850 Kg/m3
	Tipo de Pulsador	Dual
	Pulsos (K-Factor)	148.4 pul/gal
	Unidades del producto	Gal EEUU (3.7854 L)
	Precisión	X.XX(Centésima)
	Tabla de compensación	None

Fuente. Elaboración propia.

Es importante tener en cuenta que la señal de pulso se replica para ser utilizada por el sistema Orpak, el cual monitorea los volúmenes despachados y almacena estos datos en un historial para su posterior descarga y análisis.

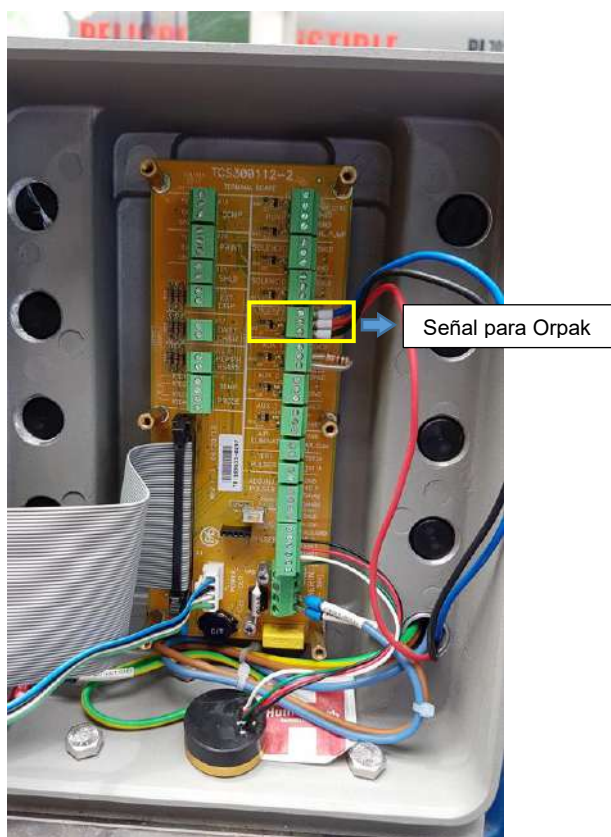


Figura 64 Conexión interior de TCS300. Fuente. Fotografía propia.

El sistema Orpak como también procesará la señal pulse, por ende, también se requiere su calibración e indicación de características del sensor.

The screenshot shows a configuration window titled 'Specific Mechanical Pump - Card'. It contains several settings:

- Nozzle Polarity: Normal
- Pulse Type: Half Cycle Count Pulse
- Single/Dual Valve Mode: Half Cycle Count Pulse
- Additional flow protection timeout (seconds): 0
- Authorization delay: 0
- Pulse Factor: 100
- Virtual In Use: Enable
- Flow Protection timeout (Seconds): 70
- Maximum volume rate per minute (0 for no maximum rate): 100

Figura 65 Configuración de la señal pulse a recepcionar. Fuente. Orpak-Gilbarco.

Al igual que el contómetro TCS3000, el sistema Orpak, conocerá la cantidad suministrada, mostrándolo a través de la siguiente interfaz web.



Figura 66 Web server de monitoreo de cantidad suministrada. Fuente Orpak-Gilbarco.

El sistema Orpak genera una base de datos detallada de todos los despachos de combustible realizados a los camiones mineros, facilitando análisis y monitoreo posteriores. Tanto el sistema Orpak como el contómetro TCS supervisan la cantidad de combustible despachada, asegurando la coherencia y precisión de la información registrada.



Figura 67 Medidor volumétrico en operación, se muestra flujo y acumulado. Fuente. Fotografía propia.

e) Válvula motorizada

Para gestionar el inicio y la detención del suministro, el sistema está equipado con una válvula de bola motorizada de 4 pulgadas. Esta válvula se ajusta automáticamente según las condiciones operativas. Las válvulas de bola motorizadas utilizan un actuador eléctrico para girar una esfera perforada, regulando así el paso del fluido, permitiendo una respuesta rápida (menor a 7 seg) y un sellado hermético.



Figura 68 Válvula motorizada en Skid. Fuente. Fotografía propia.

Según la placa de datos, la alimentación es de 240 VCA, mientras que el control opera a 24 VCC.



Figura 69 Placa de unidad de mando AM de válvula motorizada. Fuente. Fotografía propia.



Figura 70 Placa de actuador SQ válvula motorizada. Fuente. Fotografía propia.

Para el control, está equipado con un selector como se muestra en la imagen, para poder manipular la válvula motorizada de manera manual o automática.



Figura 71 Panel de operación en modo automático. Fuente. Fotografía propia.

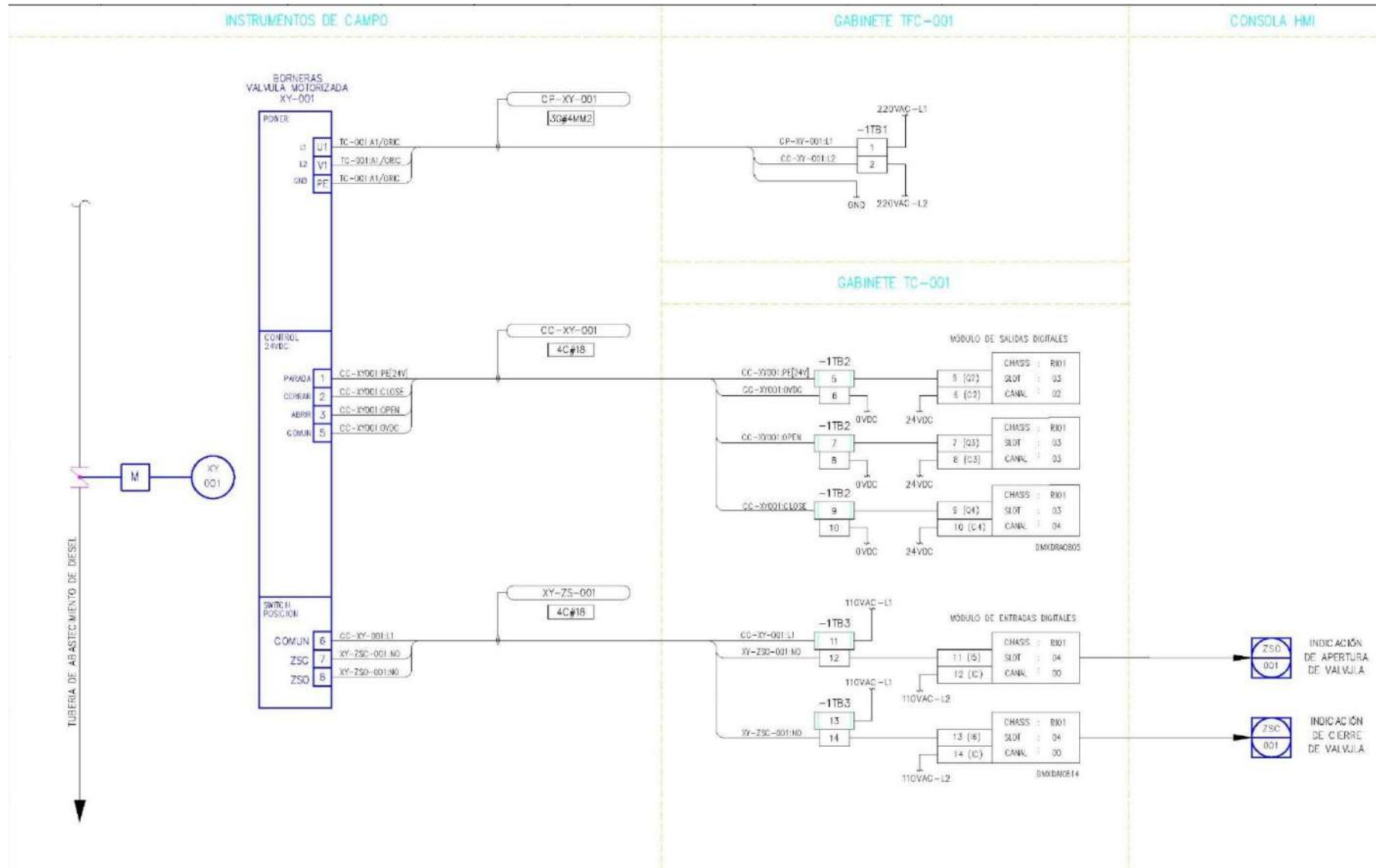


Figura 77 Conexión de válvula motorizada con el plc M580 y gabinete TFC-001. Fuente. Elaboración propia.

g) Bomba centrífuga

Se dispone de una bomba centrífuga que está acoplada a un motor que es controlada por un variador de frecuencia Scheneider AV630, la cual funciona como actuador para regular y mantener estable en 300 GPM bajo un lazo de control controlado por el PLC redundante de Scheneider M580.



Figura 81 Bomba centrífuga acoplada a motor eléctrico. Fuente. Fotografía propia.

El modelo Gould Pumps 3196 de bomba centrífuga puede alcanzar un caudal de hasta 400 GPM cuando opera a una velocidad de 3,550 RPM, como se muestra en su placa de características.

Tabla 10 Características de bomba.

Características	
Marca	Goulds Pumps
Modelo	3196
Tamaño	3"(in) x4"(out)
Flujo GPM	400 gpm
RPM	3550 rpm
Presión de trabajo	250 PSI a 15° C
Altura máx	258 feet (78.63 mts)

Fuente. Elaboración propia.

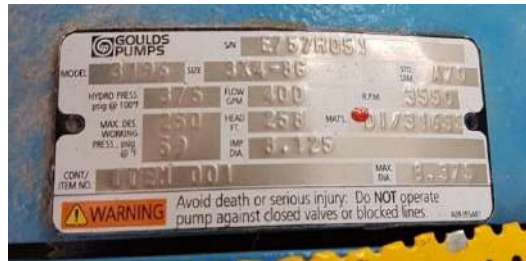


Figura 82 Placa de bomba centrífuga. Fuente. Fotografía propia.

El motor de **40 HP** está diseñado para operar hasta 3,555 RPM, proporcionando la potencia necesaria para la bomba centrífuga utilizada en esta aplicación para poder generar el flujo hasta 400 gpm.

Tabla 11 Características de motor.

Características	
Marca	Weq
Potencia	40 HP
Alimentación eléctrica	380 VCA, 3F, 60Hz
Corriente	54.5 Amp
RPM	3555 RPM

Fuente. Elaboración propia.



Figura 83 Placa de motor. Fuente. Fotografía propia.

Se muestra los valores generados por la bomba en la línea de succión y descarga respectivamente.



Figura 84 Mano-Vacuómetro: Presión de succión antes de la bomba es -7.5 PSI.
Fuente. Fotografía propia.



Figura 85 Manómetro: Presión de descarga después de la bomba es 40 PSI. Fuente. Fotografía propia.

Para evitar incrementos excesivos por obstrucción, se ha empleado de manera preventiva una interconexión entre la línea de succión y descarga a través de un orificio de restricción RO-001 de 27.324 mm, el cual genera:

$$\beta = \frac{d(\text{diametro de orificio})}{D(\text{Diametro interno tubería 3" SCH - 40})} = \frac{27.324 \text{ mm}}{88.9 \text{ mm} - 2 * 5.49 \text{ mm}} = 0.3506$$



Figura 86 Interconexión línea descarga y succión. Fuente. Fotografía propia.



Figura 87 Orificio de restricción con ø=27.324 mm. Fuente. Fotografía propia.

Para los cálculos empleados anteriormente, se hace uso de la siguiente tabla:

Tabla 12 Relaciones métricas de tuberías en acero al carbono.

Diámetro Nominal	Dimen. Exterior	STD			SCH-40			XS			SCH-80			SCH-160		
		Espesor Nominal	Peso		Espesor Nominal	Peso		Espesor Nominal	Peso		Espesor Nominal	Peso		Espesor Nominal	Peso	
Pulg.	mm	mm	kg/m	kg	mm	kg/m	kg	mm	kg/m	kg	mm	kg/m	kg	mm	kg/m	kg
1/4	13.7	2.24	0.63	3.78	2.24	0.63	3.78	3.02	0.80	4.8	3.02	0.80	4.8	-	-	
3/8	17.1	2.31	0.84	5.04	2.31	0.84	5.04	3.20	1.10	6.6	3.20	1.10	6.6	-	-	
1/2	21.3	2.77	1.27	7.62	2.77	1.27	7.62	3.73	1.62	9.72	3.73	1.62	9.72	4.78	1.95	11.7
3/4	26.7	2.87	1.69	10.14	2.87	1.69	10.14	3.91	2.20	13.2	3.91	2.20	13.2	5.56	2.90	17.4
1	33.4	3.38	2.50	15	3.38	2.50	15	4.55	3.24	19.44	4.55	3.24	19.44	6.35	4.24	25.44
1 1/4	42.2	3.56	3.39	20.34	3.56	3.39	20.34	4.85	4.47	26.82	4.85	4.47	26.82	6.35	5.61	33.66
1 1/2	48.3	3.68	4.05	24.3	3.68	4.05	24.3	5.08	5.41	32.46	5.08	5.41	32.46	7.14	7.25	43.5
2	60.3	3.91	5.44	32.64	3.91	5.44	32.64	5.54	7.48	44.88	5.54	7.48	44.88	8.74	11.11	66.66
2 1/2	73.0	5.16	8.63	51.78	5.16	8.63	51.78	7.01	11.41	68.46	7.01	11.41	68.46	9.53	14.92	89.52
3	88.9	5.49	11.29	67.74	5.49	11.29	67.74	7.62	15.27	91.62	7.62	15.27	91.62	11.13	21.35	128.1
4	114.3	6.02	16.07	96.42	6.02	16.07	96.42	8.56	22.32	133.92	8.56	22.32	133.92	13.49	33.54	201.24
5	141.3	6.55	21.77	130.62	6.55	21.77	130.62	9.53	30.97	185.82	9.53	30.97	185.82	15.88	49.12	294.72
6	168.3	7.11	28.26	169.56	7.11	28.26	169.56	10.97	42.56	255.36	10.97	42.56	255.36	18.26	67.57	405.42
8	219.1	8.18	42.55	255.3	8.18	42.55	255.3	12.70	64.64	387.84	12.70	64.64	387.84	23.01	111.27	667.62
10	273.0	9.27	60.29	361.74	9.27	60.29	361.74	12.70	81.55	489.3	15.09	95.98	575.88	28.58	172.27	1033.62
12	323.8	9.53	73.88	443.28	10.31	79.71	478.26	12.70	97.46	584.76	17.48	132.05	792.3	33.32	238.69	1432.14
14	355.6	9.53	81.33	487.98	11.13	94.55	567.3	12.70	107.39	644.34	19.05	158.11	948.66	35.71	281.72	1690.32
16	406.4	9.53	93.27	559.62	12.70	123.31	739.86	12.70	123.30	739.8	21.44	203.54	1221.24	40.49	365.38	2192.28
18	457	9.53	105.16	630.96	14.27	155.81	934.86	12.70	139.15	834.9	23.83	254.57	1527.42	45.24	459.39	2756.34
20	508	9.53	117.15	702.9	15.09	183.43	1100.58	12.70	155.12	930.72	26.19	311.19	1867.14	50.01	564.85	3389.1
22	559	9.53	129.13	774.78	-	-	-	12.70	171.09	1026.54	28.58	373.85	2243.1	53.98	672.30	4033.8
24	610	9.53	141.12	846.72	17.48	255.43	1532.58	12.70	187.06	1122.36	30.96	442.11	2652.66	59.54	808.27	4849.62

Fuente. ASTM A53.

Para asegurar el correcto funcionamiento de la bomba, es esencial verificar que el nivel de aceite sea adecuado, tal como se muestra en la imagen siguiente. Esta práctica forma parte de las inspecciones rutinarias.



Figura 88 Mantener nivel de aceite en bomba. Fuente. Fotografía propia.

Asimismo, dentro del mantenimiento preventivo, se deben verificar la alineación y la fijación mecánica, inspeccionar sellos y empaques para detectar fugas, y medir tanto la vibración como la temperatura de los rodamientos.

h) Pistola Wiggins

La pistola Wiggins de 300 GPM es un dispositivo de llenado de alta velocidad diseñado para abastecer combustible de manera eficiente y segura en camiones mineros y equipos de gran tamaño. Su funcionamiento se basa en un mecanismo de cierre automático que evita sobrellenados y optimiza el proceso de carga de diésel.



Figura 89 **Pistola Wiggins.** Fuente. Fotografía propia.



Figura 90 **Código de pistola Wiggins.** Fuente. Fotografía propia.

Posicionamiento de la pistola Wiggins en la boca de carga del tanque de camión minero.



Figura 91 **Colocación de pistola Wiggins.** Fuente. Fotografía propia.

Sistema instalado en camión minero, para recepción de la pistola wiggins

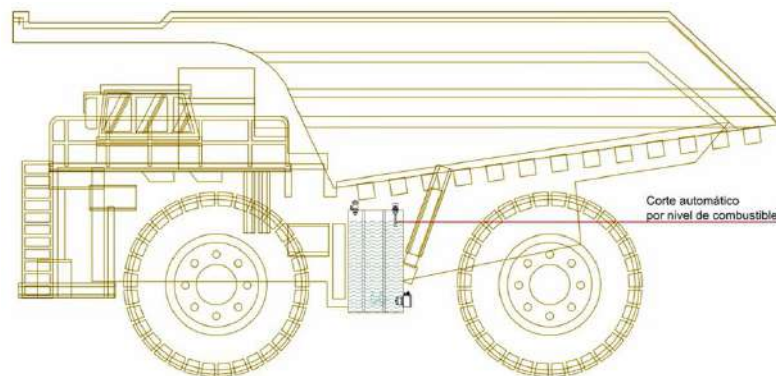


Figura 92 Sistema de recepción wiggins en camión minero. Fuente. Wiggings.

El tanque cuenta con un venteo y un sensor JET, este último, al detectar la presencia de producto, acciona mecánicamente un mecanismo que empuja y cierra la pistola Wiggins.

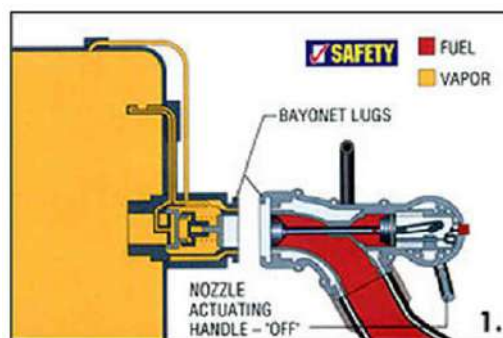


Figura 93 Sistema de recepción wiggins. Fuente. Wiggings.

Imágenes de la boquilla de conexión del tanque utilizada para el acople de la pistola Wiggins.



Figura 94 Ajuste y limpieza de línea de sensado del Sensor JET. Fuente. Fotografía propia.



Figura 95 Complemento de pistola Wiggins. Fuente. Fotografía propia.

i) Filtro tipo canasta

Es fundamental considerar que el sistema de abastecimiento de combustible incorpora un **filtro de línea tipo canasta**, cuya función principal es proteger los componentes del sistema —como el **tren de medición** y la **bomba centrífuga**— frente a la presencia de partículas sólidas de gran tamaño, tales como escombros, lodos u otros residuos que podrían comprometer su correcto funcionamiento. Por este motivo, el filtro se instala en la etapa inicial del sistema, actuando como una barrera de protección.

Este dispositivo está equipado con una **canastilla de acero inoxidable**, construida para retener eficazmente dichas partículas, previniendo daños mecánicos y asegurando un funcionamiento eficiente y continuo del sistema de abastecimiento.



Figura 96 Filtro tipo canasta en interior de Skid. Fuente. Fotografía propia.

La canastilla metálica de acero inoxidable posee un **mesh 40**, que actúa como una primera barrera de protección al permitir únicamente el paso de partículas menores a **420 μm** (0.420 mm)



Figura 97 Limpieza de canastilla de filtro. Fuente. Fotografía propia.



Figura 98 Interior de filtro tipo canasta. Fuente. Fotografía propia.

Asimismo, dentro del mantenimiento preventivo se incluyen la purga periódica de suspensiones, la limpieza regular y, en caso de desgaste, el reemplazo de la canastilla.

j) Filtro micrónico

Los sistemas de abastecimiento de combustible con caudales de 300 galones por minuto (GPM) emplean filtros micrónicos para garantizar la pureza y **calidad del combustible suministrado**. Estos filtros son esenciales para eliminar partículas diminutas que podrían causar daños o desgaste en los componentes críticos en los motores de los camiones mineros (inyectores, bomba de alta presión, etc.)



Figura 99 Filtro micrónico. Fuente. Fotografía propia.

La norma ISO 4406:2017 establece un código para medir la cantidad de partículas sólidas en combustibles y fluidos hidráulicos, y es clave para garantizar la limpieza del diésel en motores modernos. Para cumplir con las especificaciones del fabricante del motor del camión minero, el diésel debe tener un nivel de limpieza de **18/16/13**. (IPU, 2017)



Figura 100 Norma ISO 4406:2017
Fuente. Web (Company, 2025)

Tabla 13 Número de partículas retenidas mayores al tamaño.

Número	Tamaño	Rango # partículas en 1 mL
18	4um +	1300-2500
16	6um +	320-640
13	14um +	40-80

Fuente. Web (IPU, 2017)

Eso significa, la cantidad de partículas por mililitro mayores a 4, 6 y 14 micrones, mediante tres números separados. El primer número representa todas las partículas superiores a 4 micrones (incluyendo las de 6 y 14), el

segundo solo las mayores a 6 micrones, y el tercero únicamente las que superan los 14 micrones. (Company, 2025)

Los tres cartuchos de **fibra sintética** del filtro micrónico utilizados en este proyecto están diseñados para aceptar diésel con un nivel de limpieza **ISO 18/16/13**.

Cuando un filtro micrónico se satura con partículas finas o suciedad, es necesario reemplazar los cartuchos filtrantes para mantener la eficiencia del sistema. A continuación, se presentan imágenes que ilustran el proceso de sustitución de los cartuchos.



Figura 101 Apertura de filtro micrónico.
Fuente. Fotografía propia.



Figura 102 Instalación de cartuchos en filtro de fibra sintética.
Fuente. Fotografía propia.

El filtro en cuestión está diseñado para soportar una presión diferencial máxima de **40 PSI**, a fin de evitar daños internos. Aunque la placa del equipo indica una presión máxima de operación de **1.1 MPa** (aprox159.5 PSI o 11 bar), es importante distinguir entre la presión de trabajo del sistema y la presión diferencial que el filtro puede manejar. La presión diferencial se refiere a la diferencia de presión entre la entrada y la salida del filtro, y exceder el límite especificado puede comprometer la integridad del elemento filtrante. Por lo tanto, es fundamental monitorear y mantener la presión diferencial dentro de los límites recomendados para asegurar el correcto funcionamiento y la

durabilidad del filtro. Esta tarea es realizada por el transmisor de presión diferencial (DPIT-001).



Figura 103 Placa de Filtro micrónico. Fuente. Fotografía propia.

Adicionalmente, el filtro micrónico incorpora en su parte superior un filtro eliminador de aire, cuya función es mantener el producto libre de burbujas, tal como lo indica su denominación. Asimismo, cuenta con una válvula de alivio que protege al sistema en caso de falla del control electrónico frente a una obstrucción.



Figura 104 Placa de eliminador de aire 3-AV para filtro micrónico. Fuente. Fotografía propia.



Figura 105 Placa de válvula de alivio para filtro micrónico. Fuente. Fotografía propia.

k) Detector de puesta tierra - Scully

Es un dispositivo de seguridad diseñado para garantizar que un vehículo, como un camión cisterna o un equipo minero, esté correctamente conectado a tierra antes de iniciar el abastecimiento de combustible. Su función principal es prevenir la acumulación de electricidad estática, reduciendo el riesgo de chispas y posibles incendios o explosiones en áreas donde se manipulan líquidos inflamables.



Figura 106 Detector de puesta tierra-Scully. Fuente. Fotografía propia.



Figura 107 Aterramiento de camión minero. Fuente. Fotografía propia.

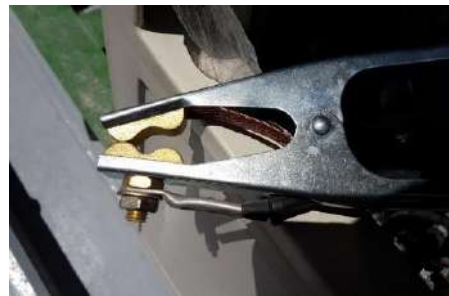


Figura 108 Gancho de aterramiento. Fuente. Fotografía propia.

I) Amortiguador de pulsaciones

Al utilizar un amortiguador de pulsaciones que emplea **nitrógeno** en lugar de un resorte, se mitigan los **golpes de ariete** de mejor manera en el sistema de abastecimiento. Esto protege los equipos involucrados al absorber las variaciones de presión y reducir las pulsaciones en la tubería.



Figura 109 Amortiguador de pulsaciones. Fuente. Fotografía propia.



Figura 110 Placa de amortiguador de pulsaciones. Fuente. Fotografía propia.

3.5.3 Procesos preliminares de construcción de gabinete de abastecimiento

Se llevaron a cabo las siguientes actividades en el proceso:

Fabricación de la estructura metálica del skid, cumpliendo con los estándares de diseño estructural y soldadura aplicables, garantizando la resistencia mecánica y la facilidad de montaje.

Prefabricación y montaje de líneas de tubería, incluyendo corte, biselado, soldadura y pruebas de estanqueidad, asegurando la correcta alineación y hermeticidad para el transporte de combustible dentro del skid de abastecimiento.



Figura 111 Fabricación y montaje de estructuras. Fuente. Fotografía propia.



Figura 112 Fabricación de tuberías. Fuente. Fotografía propia.

Posteriormente a la etapa estructural, se procedió con el tendido e instalación de tuberías Conduit pesado (RMC) para áreas clasificadas **Clase I División 2** según **CNE 070-1002**, empleando accesorios certificados para atmósferas explosivas, como uniones **universales, codos y sellos de seguridad** (sealing fittings) en puntos críticos de transición y en las entradas a los equipos finales

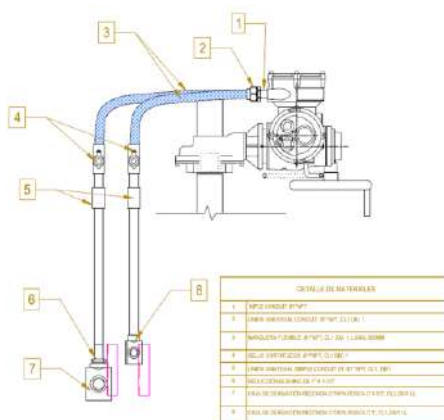


Figura 113 Ejemplo de instalación de tuberías Conduit. Fuente. Elaboración propia.

Tabla 14 Dimensiones en tubería RMC.

Rigid Metal Conduit								
Size	Outside Diameter		Inside Diameter		Wall Thickness		Length	
	inch	mm	inch	mm	inch	mm	feet	mm
1/2"	0.840	21.34	0.632	16.05	0.104	2.64	10	3050
3/4"	1.050	26.67	0.836	21.23	0.107	2.72	10	3050
1"	1.315	33.40	1.063	27.00	0.126	3.20	10	3050
1-1/4"	1.660	42.16	1.394	35.41	0.133	3.38	10	3050
1-1/2"	1.900	48.26	1.624	41.25	0.138	3.51	10	3050
2"	2.375	60.33	2.083	52.91	0.146	3.71	10	3050

Fuente. ANSI C80.1-2020.

Consideraciones para la instalación de tuberías conduit:

Al trabajar con tuberías conduit, es fundamental cumplir con los criterios establecidos por las normativas técnicas aplicables. Según el **CNE 070-1010**, la separación máxima entre **soportes** debe respetar las distancias indicadas en la siguiente tabla:

Tabla 15 Longitud de separación máxima entre soportes.

Diámetro Nominal del tubo metálico	Longitud de separación máxima entre soportes (m)
15 a 20mm (1/2" y 3/4")	1.5 m
25 a 35mm (1" y 1 1/2")	2.0 m
40 a más (2")	3.0 m

Fuente. Elaboración propia.

Adicionalmente, conforme a la **NFPA 70 (NEC), sección 344.30(A)**, se debe instalar un soporte a una distancia no mayor a 1.5 m (5 pies) antes de la entrada al equipo o instrumento.

Siguiendo la **IEEE 518**, se recomienda mantener una separación mínima de 7.5 cm entre conduits para minimizar interferencias electromagnéticas.

En los cruces de estructuras metálicas, se utilizó sellado ignífugo tipo **Firestop** conforme a normativa NFPA, con el objetivo de mantener la integridad del cortafuego y evitar la propagación de gases o llamas a través de pasamuros. Todas las conexiones fueron realizadas siguiendo las prácticas de cableado para áreas peligrosas, asegurando la hermeticidad, continuidad eléctrica y compatibilidad electromagnética del sistema.



Figura 114 **Terraja eléctrica para rosca Conduit.** Fuente. Fotografía propia.



Figura 115 **Tendido de cables para motor.** Fuente. Fotografía propia.

En paralelo, se llevó a cabo la construcción y armado del tablero de control y del gabinete de fuerza, incluyendo el cableado interno, instalación de dispositivos, automatización y señalización. Asimismo, se realizaron pruebas de funcionamiento en taller, verificando la correcta operación de los circuitos, continuidad eléctrica, aislamiento, y respuesta de los componentes, todo ello previo a su montaje en campo.



Figura 116 **Armado de gabinete TFC-001.** Fuente. Fotografía propia.



Figura 117 **Pruebas de continuidad.** Fuente. Fotografía propia.

También se verificó el correcto funcionamiento y estado de los equipos, antes de su instalación en campo, mediante pruebas funcionales y de diagnóstico,

asegurando que cada componente operara conforme a sus especificaciones técnicas.



Figura 118 Verificación estado de DPIT con Modem Hart. Fuente. Fotografía propia.



Figura 119 Comunicador Hart para configuración de transmisor. Fuente. Fotografía propia.

Interconexión eléctrica y de señal de equipos e instrumentos, conforme a planos de lazo y diagramas de cableado.



Figura 120 Conexión de equipos. Fuente. Fotografía propia.



Figura 121 Conexión de equipos. Fuente. Fotografía propia.

Configuración y parametrización de equipos e instrumentos de campo según las especificaciones del sistema de control.



Figura 122 Parámetros de variador VDF. Fuente. Fotografía propia.



Figura 123 Parámetros de FIT. Fuente. Fotografía propia.

3.5.4 Tablero de fuerza TFC-001

Para la alimentación eléctrica del sistema, se emplea un gabinete de distribución, el cual integra los principales componentes eléctricos esenciales para su operación. Entre ellos se encuentran un variador de frecuencia ATV630, un UPS de 3 kVA para respaldo de energía, un transformador de aislamiento de 4 kVA y llaves termomagnéticas de distribución. Este gabinete proporciona una alimentación segura y eficiente a los distintos equipos del sistema de abastecimiento, incluyendo el contómetro FQIT, el tablero de control TC-001, el tablero del sistema Orpak, la válvula motorizada, el calentador, el detector de puesta a tierra Scully, la alarma sonora, el sistema de iluminación, entre otros, garantizando un suministro eléctrico confiable y protegido.



Figura 124 Interior de gabinete de fuerza.
Fuente. Fotografía propia.



Figura 125 Exterior de gabinete de fuerza.
Fuente. Fotografía propia.

A continuación, en el diagrama unifilar representa de manera clara la distribución y conexión de los diferentes equipos del sistema, permitiendo una visualización detallada de la infraestructura eléctrica y su funcionamiento.

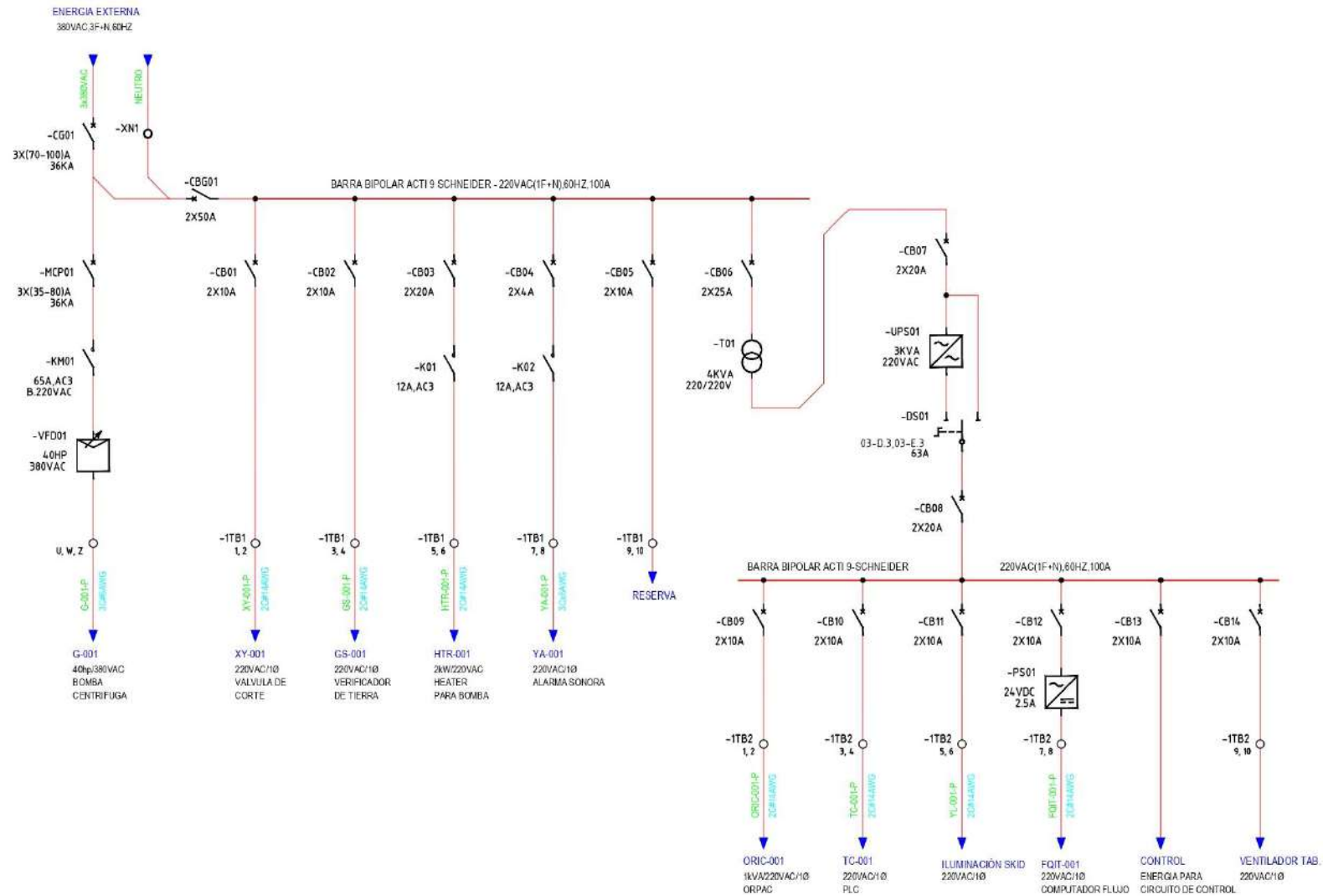


Figura 126 Diagrama Unifilar de TFC-001. Fuente. Elaboración propia.

Adicionalmente, cuenta con una pequeña parte del circuito de control, que se explicará a continuación.

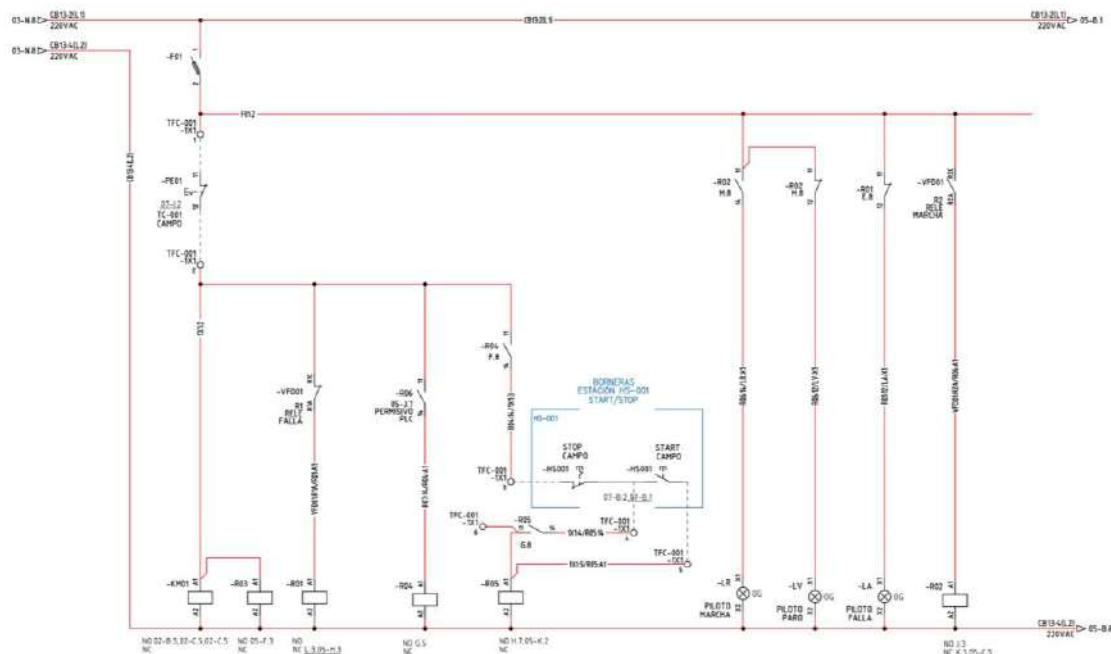


Figura 127 Circuito de control en TFC-001. Fuente. Elaboración propia.

El relé **VF001_R1**, encargado de monitorear las fallas en el variador ATV630, se activa al energizar el equipo, manteniéndose abierto en condiciones normales y cerrándose en caso de detectar una falla. De manera similar, el relé **VF001_R2** supervisa el estado operativo del motor, indicando cuando este se encuentra en marcha. El estado del variador (en marcha, detenido o en falla) se visualiza mediante tres pilotos ubicados en la puerta del gabinete.



Figura 128 Conexionado de control de ATV630. Fuente. Elaboración propia.



Figura 129 Modelo de variador de frecuencia. Fuente. Elaboración propia.

Por otro lado, el relé **R06** monitorea la **autorización** del PLC M580 para el arranque del motor, lo que indica que se han cumplido todas las condiciones necesarias para el despacho de combustible. Esto incluye la correcta apertura de la válvula, confirmada por el switch de posición cerrada, el ingreso de los datos del camión minero en el sistema Orpak, la validación del despacho en el contómetro FQIT, y la adecuada conexión a tierra mediante el Scully. Además, el sistema no debe presentar ninguna falla. Solo cuando todas estas condiciones se cumplen, el PLC M580 activa el relé R06, permitiendo el encendido de la bomba, tal como se muestra en el diagrama anterior.

Una vez otorgada la autorización, al presionar el botón Start, el **relé R05** se activa, cerrando un contacto que habilita el arranque de la bomba a través de la entrada **I1** del variador de frecuencia, permitiendo así el inicio del proceso de despacho de combustible, como se muestra en el diagrama siguiente.

Finalmente, el **relé R03** se emplea para monitorear el estado del sistema de parada de emergencia, asegurando una respuesta rápida ante cualquier eventualidad.

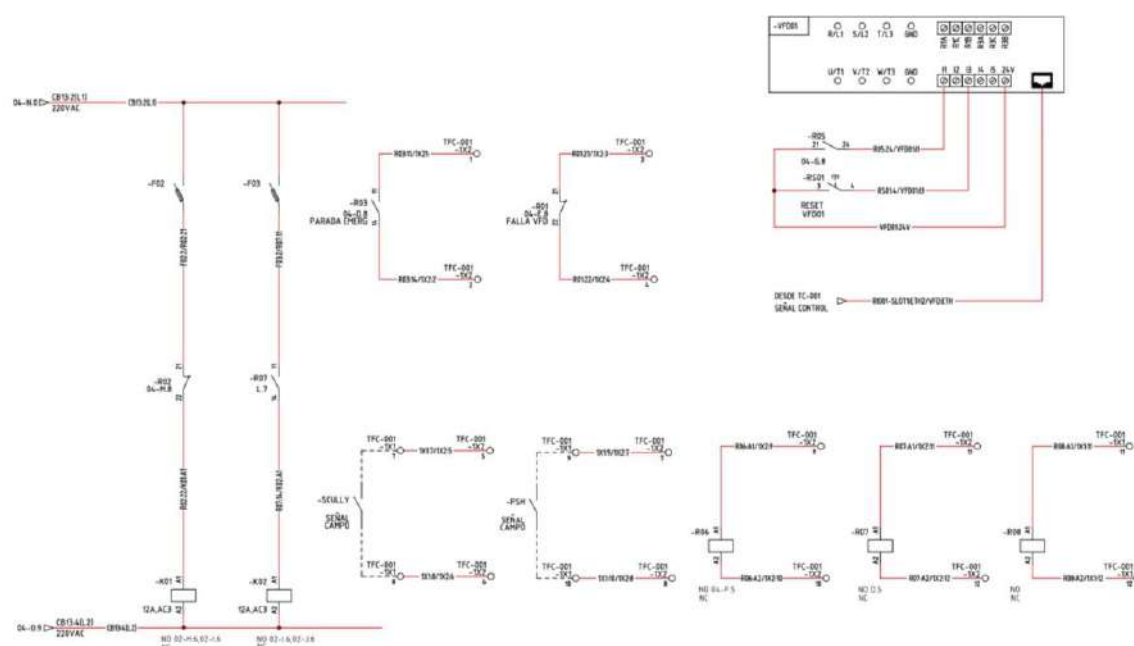


Figura 130 Circuito de control en TFC-001. Fuente. Elaboración propia.

El contactor **K01**, como se muestra en el diagrama unifilar, controla las resistencias calefactoras del motor, las cuales se activan automáticamente cuando el sistema de abastecimiento se encuentra detenido.

El relé **R07** es activado por el PLC cuando se detecta una alarma en el sistema. Al activarse, este relé energiza el contactor K02, el cual a su vez activa la sirena de alarma, alertando sobre la condición anómala.

El relé **R08** es activado por el FQIT cuando se presiona el botón de Start interno del equipo, señalizando que está listo para generar pulsos conforme el contómetro comience a girar durante el despacho de combustible.

Adicionalmente, en el diagrama anterior se pueden observar, ante posibles fallas del sistema, como una obstrucción que genere un sobreconsumo de corriente o una desconexión del cable de comunicación Modbus TCP, entre otros posibles eventos que generen una falla en el variador. Una vez determinado y solucionada la causa de la falla, el **botón de reset** ubicado en la puerta del gabinete permitirá reactivar el variador, asegurando la continuidad operativa del sistema.

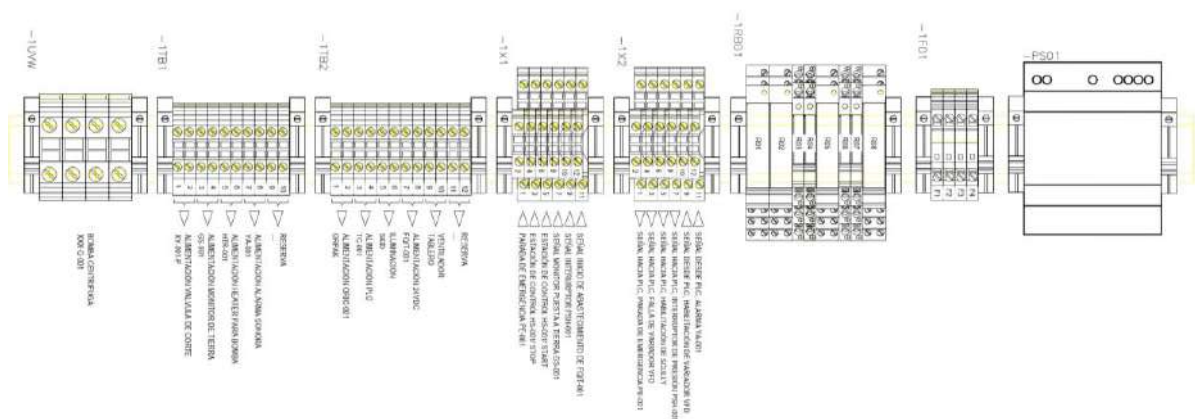


Figura 131 Regleta de bornas del gabinete TFC-001. Fuente. Elaboración propia.

En la figura anterior se muestra la regleta de bornas del gabinete TFC-001, la cual permite la interconexión de los distintos equipos que conforman el sistema de abastecimiento. Esta regleta facilita tanto la alimentación eléctrica de los dispositivos como la transmisión de señales hacia el tablero de control y los equipos asociados, asegurando una comunicación dentro del sistema.



Figura 132 Regleta de borneras del gabinete TFC-001. Fuente. Fotografía propia.



Figura 133 Equipos en gabinete TFC-001. Fuente. Fotografía propia.

3.5.5 Desarrollo de vínculo con variador ATV630

Como cualquier dispositivo esclavo (slave) en una red Modbus TCP, el variador dispone de una tabla de registros Modbus, que permite la lectura y escritura de datos para su control y monitoreo.

En la siguiente tabla se presenta una sección de los registros más relevantes del variador; utilizados para gestionar su operación y supervisar su estado en tiempo real, los registros con capacidad de escritura se resaltan en amarillo, mientras que los de solo lectura aparecen destacados en celeste.

Tabla 16 Tabla Modbus de Variador ATV630.

Code	Name	Logic address	Category	Access	Type	Units	Factory setting	Range	Display
CM0	Extended control word	16#2130 = 8564	Control parameters	R/W	WORD (16 bits)	—	—	—	[Ext. Register] CM0
CM0	Command register	16#2130 = 8564	Control parameters	R/W	WORD (16 bits)	—	—	—	[Command Register] CM0
W00	Control word	16#0000 = 0	Control parameters	R/W	WORD (16 bits)	—	—	—	[Control Register] W00
SP00	Speed reference	16#1340 = 4992	Setpoint parameters	R/W	INT (Signed 16)	rpm	0	0 - 32767 rpm	[Ref. Frequency] (SP00)
SP00	Reference frequency	16#1340 = 4992	Setpoint parameters	R/W	INT (Signed 16)	rpm	0	0 - 32767 rpm	[Ref. Frequency] (SP00)
PI00	PI00 set point	16#1340 = 4992	Setpoint parameters	R/W	INT (Signed 16)	rpm	0	0 - 32767 rpm	[Ref. Frequency] (SP00)
AV01	AV01 image input	16#14A1 = 5281	Setpoint parameters	R/W	INT (Signed 16)	—	0	0 - 10000	[AV01 image input] (AV01)
W00	Multiplying coefficient	16#0037 = 55	Setpoint parameters	R/W	INT (Signed 16)	—	1	0 % - 100 %	[Multiplying coeff.] (W00)
STA	Status Register	16#0000 = 0	Status parameters	R	WORD (16 bits)	—	—	—	[Status Register] (STA)
RM05	Device state	16#0000 = 0	Status parameters	R	WORD (16 bits)	—	—	—	[Device State] (RM05)
ELI	Internal State register	16#0000 = 0	Status parameters	R	WORD (16 bits)	—	—	—	[Internal State] (ELI)
CLIC	Channel for reference frequency	16#2000 = 8192	Status parameters	R	WORD (16 bits)	—	—	—	[Channel for reference frequency] (CLIC)
CLIC	Active command channel	16#2000 = 8192	Status parameters	R	WORD (16 bits)	—	—	—	[Active command channel] (CLIC)
ST00	Tune selection	16#2501 = 9825	Status parameters	R	WORD (16 bits)	—	—	—	[Tune selection] (ST00)
SM07	Status of motor tune in term of subcategory	16#2501 = 9825	Status parameters	R	WORD (16 bits)	—	—	—	[Status of motor tune in term of subcategory] (SM07)
SP00	Speed reference	16#1340 = 4992	Setpoint parameters	R/W	INT (Signed 16)	rpm	0	0 - 32767 rpm	[Ref. Frequency] (SP00)
W00	Multiplying coefficient	16#0037 = 55	Setpoint parameters	R/W	INT (Signed 16)	—	1	0 % - 100 %	[Multiplying coeff.] (W00)

Fuente. Schneider Electric-ATV630.

Seguidamente verificamos la salida de los datos para contrastar que estén a disponibilidad del PLC M580 por comunicación Modbus TCP, para dicho propósito hacemos uso de la herramienta **Modbus Poll**. Este software cuenta con 2 aplicativos en TCP, uno actúa como maestro y otro como esclavo. Para este caso, hacemos uso del aplicativo como maestro, ya que el variador ATV630 está configurado en modo esclavo.

Se indica el tipo de comunicación (en este caso Modbus TCP/IP) y la dirección IP del equipo esclavo a leer los datos de su tabla Modbus.

Luego especificar que parte de la tabla Modbus a leer, en este son **Holding Register**, y finalmente, se define la dirección de inicio junto con la cantidad de registros a leer desde esa posición.

En las siguientes imágenes se muestra lo mencionado.

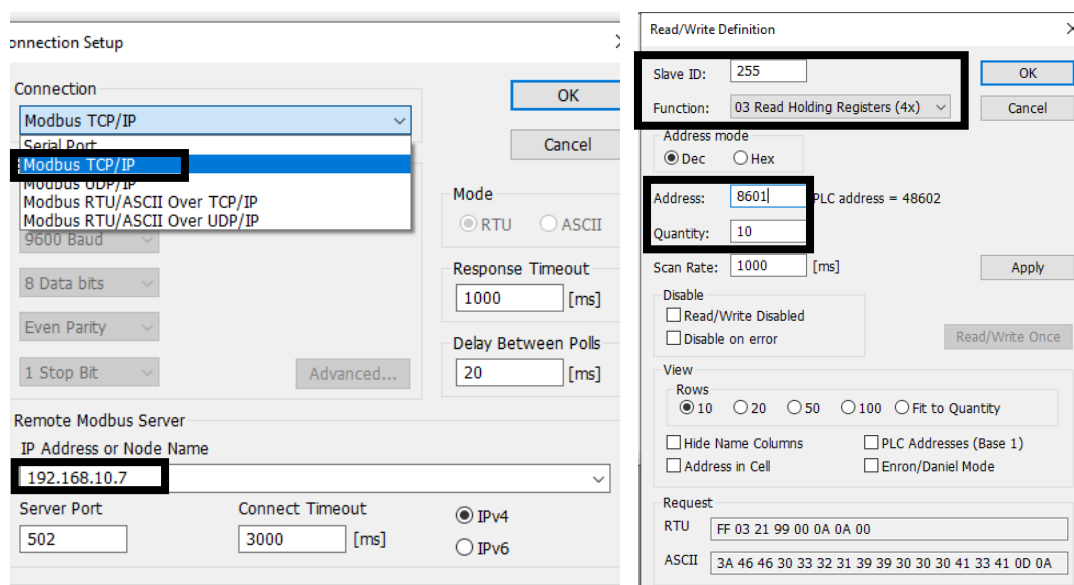


Figura 134 **Modbus Poll-Configuración**. Fuente. MODBUS POLL.

Tras validar la integridad del canal de comunicación y confirmar la estabilidad del enlace entre los dispositivos, se inicia el proceso de mapeo y parametrización de los registros detallados en la tabla previa número 16. Estas direcciones se configuran sistemáticamente dentro del entorno **EcoStruxure Control Expert**, permitiendo la transferencia de datos en tiempo real hacia el controlador **M580 HSBY**. Esta integración garantiza que la lógica de control disponga de las variables críticas necesarias para el monitoreo y la toma de decisiones.

Este proceso mostrado en la siguiente imagen, implica asignar correctamente las direcciones Modbus dentro del entorno de programación del PLC, asegurando así que el variador y el controlador se encuentren debidamente integrados en la comunicación Modbus TCP.

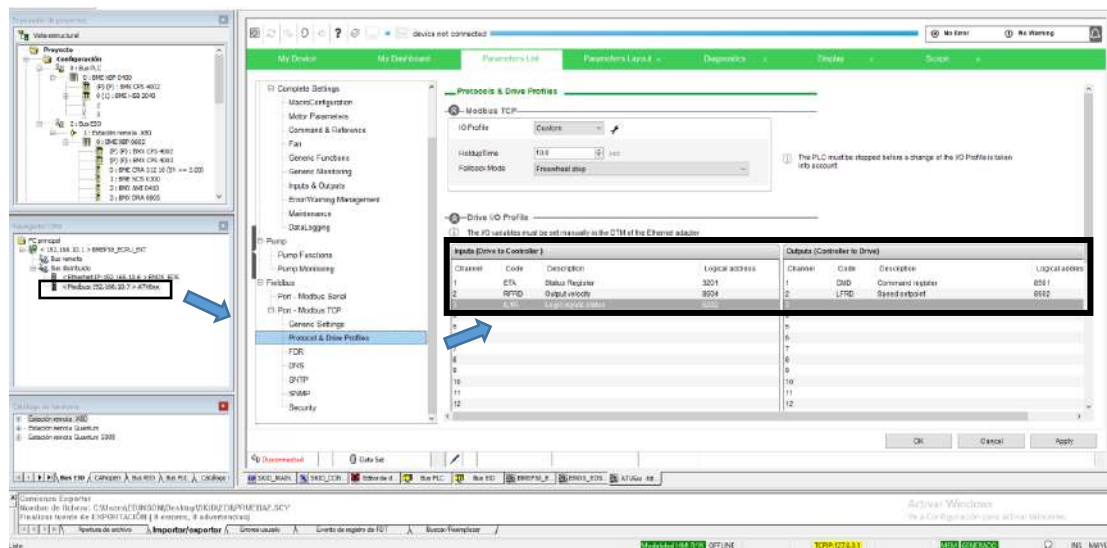


Figura 135 Direccionamiento de variador de registros. Fuente. Elaboración propia.

Los registros Holding Register CMD (8501) y LFRD (8602) son de solo escritura y permiten enviar comandos de control al variador.

CMD (8501): Define la operación que debe ejecutar el variador (arranque, parada, cambio de modo, etc.).

LFRD (8602): Establece el setpoint de velocidad que debe alcanzar el variador en RPM

Por otro lado, los registros ETA (3201), RFRD (8504) e IL1R (5202) son de solo lectura y proporcionan datos en tiempo real sobre el estado del variador:

ETA (3201): Informa el estado operativo del variador (activo, en falla, en espera, etc.).

RFRD (8504): Indica la velocidad actual del motor en RPM

IL1R (5202): Muestra el estado de las entradas digitales del variador, permitiendo monitorear señales externas de control.

Una vez completada la configuración anterior, se procede a establecer la petición de lectura y escritura continua. Se definen las direcciones iniciales en 0, ya que el offset fue ajustado en el paso previo, como se muestra en la imagen anterior.

Por ejemplo, para gestionar la velocidad del variador, se utilizan las siguientes variables internas en el PLC que cuentan con el vínculo de comunicación Modbus:

LFRD: Establece el setpoint de velocidad para el control.

RFRD: Permite monitorear la velocidad actual, proporcionando retroalimentación y confirmación en tiempo real.

Este proceso se puede visualizar en la siguiente imagen.

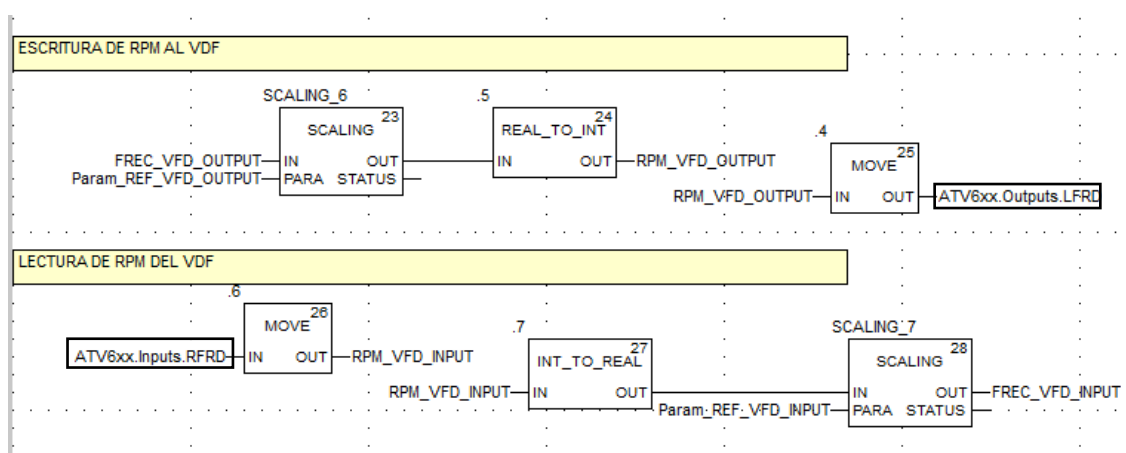


Figura 140 Control y monitoreo de velocidad en ATV630 desde M580HSBY. Fuente. Elaboración propia.

Se muestra a continuación el contenido del registro **ETA** (dirección Modbus 3201), un **registro de solo lectura** que permite conocer el estado operativo del variador, incluyendo condiciones como: el estado de falla y el estado que el motor se encuentra en movimiento.

Este estado se representa mediante una palabra de estado (status word), donde cada bit corresponde a una condición específica del variador según el estándar CiA 402 y el protocolo DriveCom.

Tabla 17 Registro word ETA del Variador de frecuencia.

Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
Warning	Switch on disabled	Quick stop	Voltage enabled	Fault	Operation enabled	Switched on	Ready to switch on
A warning is active	Power stage supply disabled	0 = Quick stop is active	Power stage supply present	Error detected	Running	Ready	1 = Awaiting power Stage supply

Bit 15	Bit 14	Bit 13	Bit 12	Bit 11	Bit 10	Bit 9	Bit 8
Manufacturer-specific Direction of rotation	Manufacturer-specific Stop via STOP key	Reserved (=0)	Reserved (=0)	Internal limit active	Target reached	Remote	Reserved (=0)
				Reference value outside limits	Reference value reached	Command or reference value via fieldbus	

Fuente. Schneider Electric-ATV630.

A continuación, se configura el variador AV630 para definir la fuente de control del **comando de operación** y la **referencia de velocidad (setpoint)**, determinando si estos parámetros serán gestionados de forma local, remota o a través de un sistema de automatización.

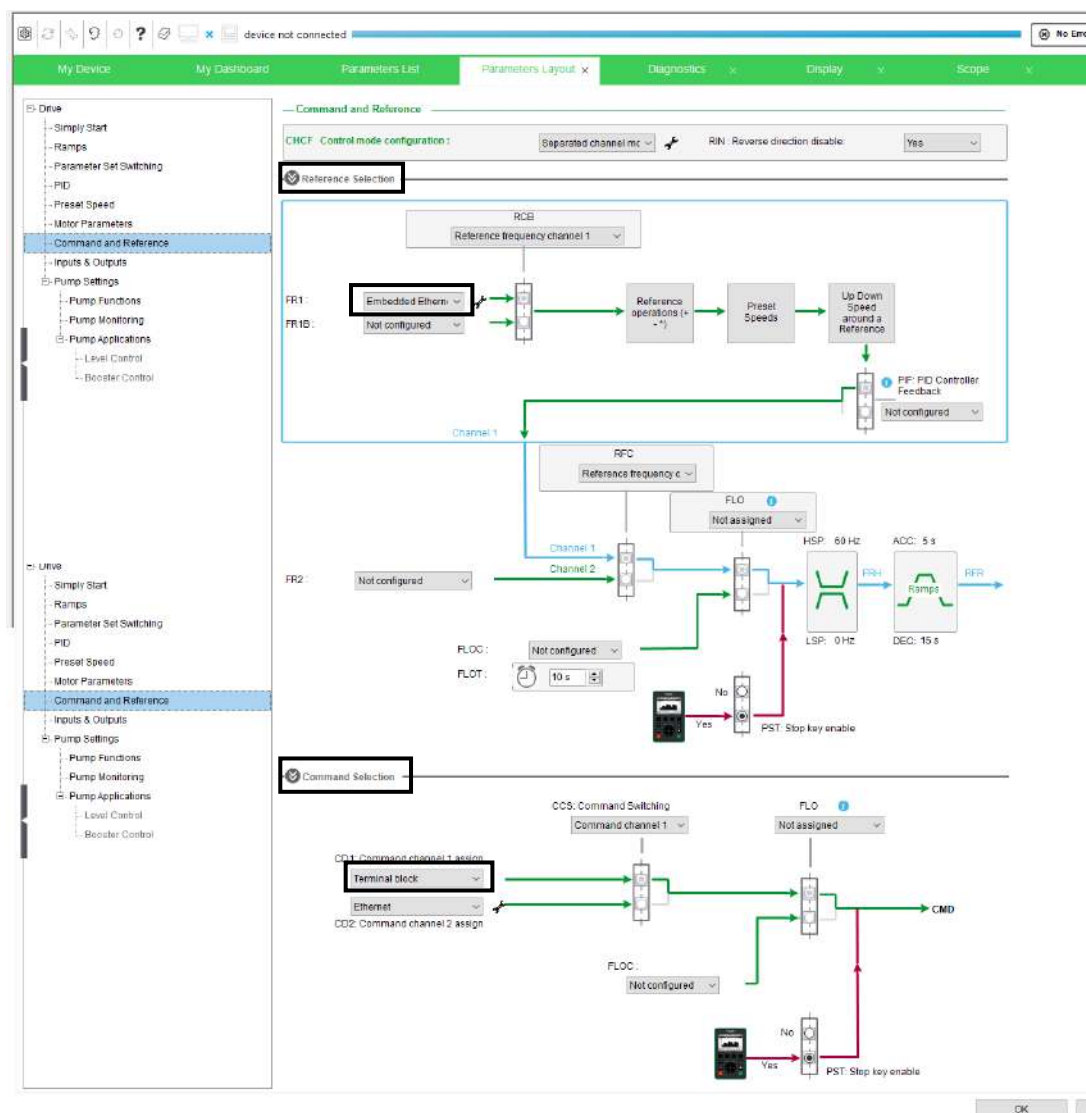


Figura 141 Configuración en AV630 para fuente de control del **comando de operación** y **referencia de velocidad**. Fuente. Elaboración propia.

Se puede observar en la figura anterior que el **comando de operación** del variador será gestionado a través de sus terminales de control (entradas digitales del ATV630), mientras que la **referencia de velocidad (setpoint)** será recibida mediante el puerto Ethernet, utilizando el protocolo de comunicación Modbus TCP.

3.5.7 Tablero de control TC-001

El tablero de control desempeña un papel fundamental en el sistema de abastecimiento, ya que alberga el controlador redundante M580 de Schneider Electric, encargado de gestionar la lógica de control y coordinar la secuencia operativa para el correcto funcionamiento del sistema.



Figura 145 Interior de tablero control TC-001. Fuente. Fotografía propia.



Figura 146 Programación de PLC. Fuente. Fotografía propia.

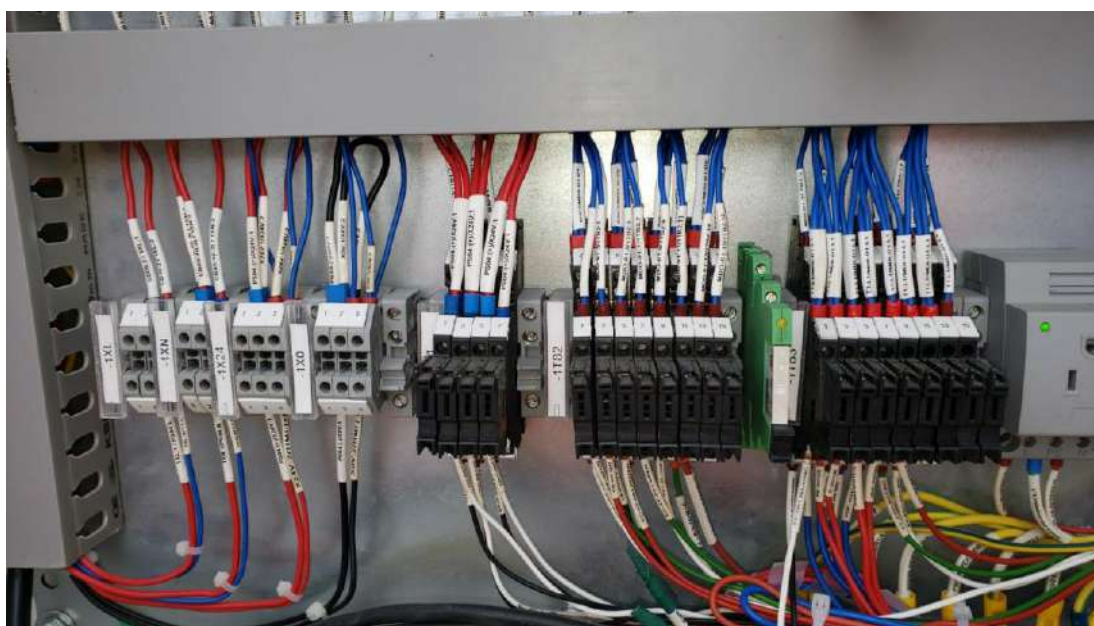


Figura 147 Conexión de campo a tablero de control TC-001. Fuente. Fotografía propia.

En esta sección se detalla el esquema de conexión de la alimentación del controlador redundante M580, abarcando la distribución de voltajes, las protecciones eléctricas y las fuentes de energía que aseguran su correcto funcionamiento dentro del sistema de abastecimiento.

Los interruptores termomagnéticos CB05 y CB07 protegen las fuentes de alimentación de cada controlador redundante, mientras que los CB06 y CB08 están destinados a las dos fuentes de energía que alimentan el backplane de los módulos de E/S (I/O).

Asimismo, el interruptor termomagnético CB09 para la fuente de alimentación DC de 24V, 2.5A, utilizada para la alimentación de los instrumentos y módulos de control, mientras que el CB10 para el transformador de 220/110Vac, empleado para los circuitos de entrada a 110V del sistema.

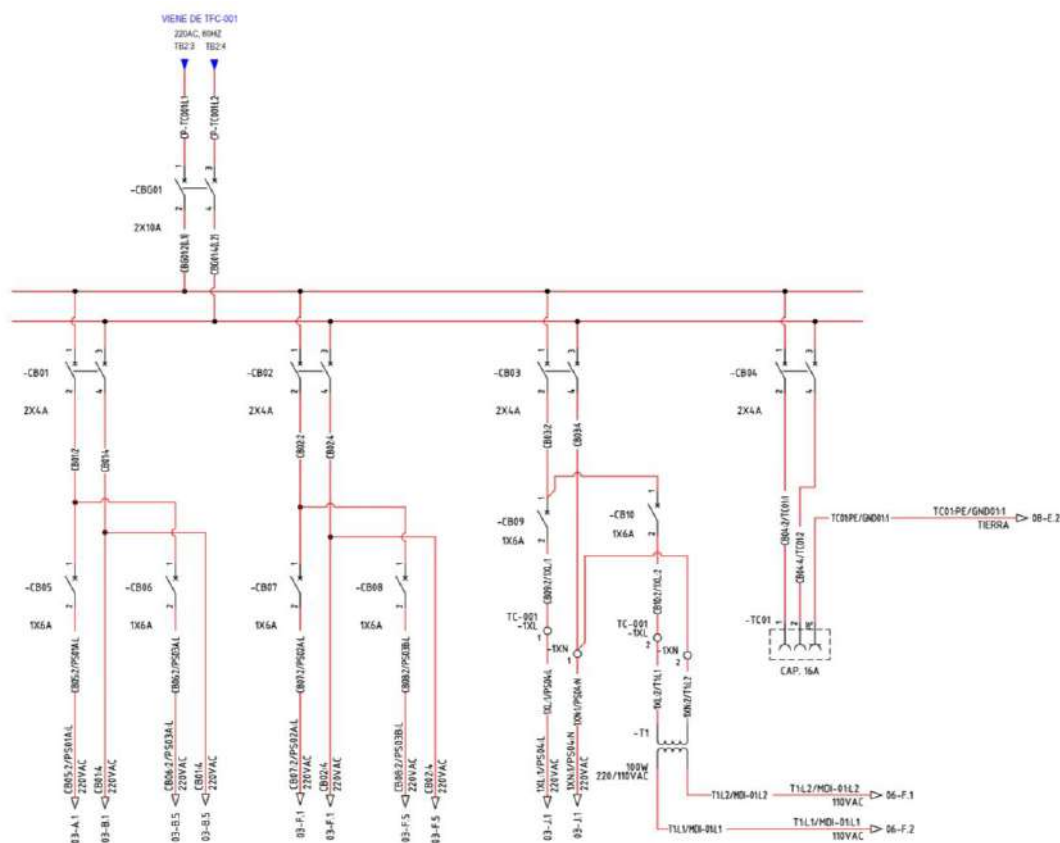


Figura 148 Conexión de alimentación de los equipos internos en TC-001. Fuente. Elaboración propia.

La distribución de los componentes dentro del tablero TC-001 se presenta en la siguiente sección, donde se detalla la disposición de los dispositivos que conforman el sistema de control.

En el interior del tablero TC-001, se utiliza **una fuente de alimentación DC de 24V, 2.5A** para energizar la pantalla **HMI**, proporcionar alimentación a los instrumentos con señal de **4-20mA** y acondicionar las salidas digitales en 24VDC mediante el módulo DRA 0805.

Adicionalmente, se emplea un **transformador de 220V/110V AC, 100W**, destinado a la alimentación de las entradas digitales en 110V AC del módulo DAU 0814.

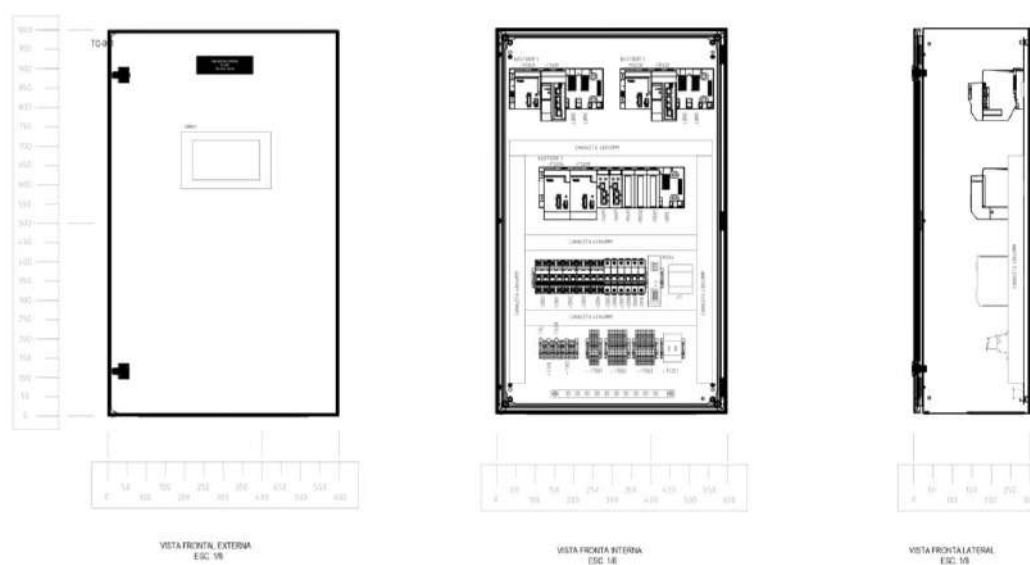


Figura 149 Distribución física de los componentes internos en TC-001. Fuente. Elaboración propia.

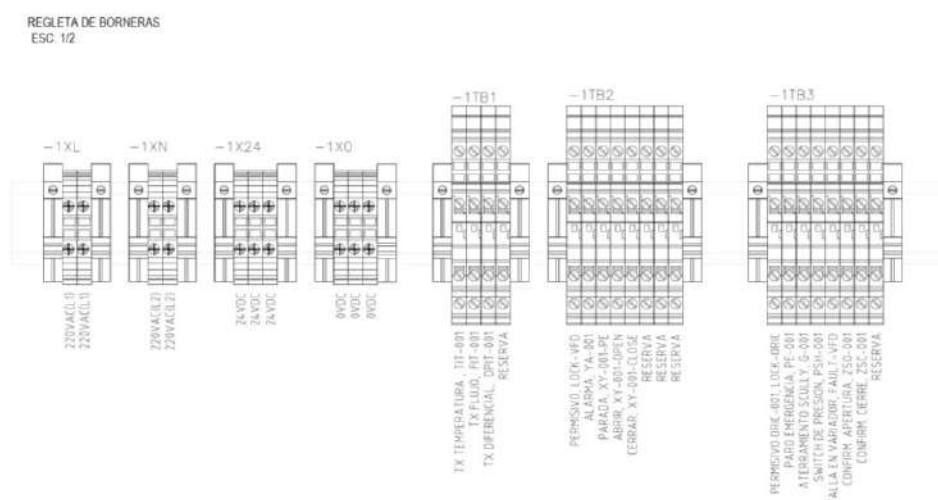


Figura 150 Borneras de campo en TC-001. Fuente. Elaboración propia.

3.5.8 Controlador

Existen diversas marcas en el mercado, como Siemens, Schneider y Rockwell, entre otras. Dado que se requería un sistema redundante, se solicitaron cotizaciones a diferentes proveedores de marcas reconocidas para evaluar las mejores opciones.

PRECISION				
MP (Oportunidad) 014-85543000 E/S de oportunidad 0224751 Asesor: PRECISION ENGINEERING PROCUREMENT AND CONSTRUCTION S.A.C. PROYECTO CINE Fecha de emisión: 18-05-2008				
Información del cliente: Razón Social: PRECISION ENGINEERING PROCUREMENT AND CONSTRUCTION S.A.C. Razón del negocio: Sistema de control Correo electrónico: admin@precision.com Teléfono Oficina: 041200357 (RUC)				
Oferta Comercial				
Descripción de artículo	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Importe total
PILA REDUNDANTE		1,00	USD 0,00	USD 0,00
CHASSIS CONTROL BOX 4 SLOT	1750A4	2,00	USD 311,47	USD 622,94
SIST. ALIMENTACION REDUNDANTE 15-250 VCA	1750A75	2,00	USD 2.600,10	USD 5.200,20
CONTROL LOGIC 5571 CONTROLLER WITH 12 MONITOR MONITOR	1750B171	2,00	USD 4.500,25	USD 9.000,50
ETHERNET 10-100M BRIDGE MODULE	1750B32T	2,00	USD 2.750,00	USD 5.500,00
EMPTY SLOT FILLER CARD (1 FILL)	1750B62	2,00	USD 25,88	USD 51,76
CONTROL LOGIC REDUNDANCY MODULE	1750B62	2,00	USD 4.500,25	USD 9.000,50
1 METER FIBER CABLE	1750B62	2,00	USD 171,50	USD 343,00
RIO		1,00	USD 0,00	USD 0,00
CHASSIS CONTROL BOX 4 SLOT	1750A4	1,00	USD 311,47	USD 311,47
CABLE DE ALIMENTACION PARA FUENTES REDUNDANTE	1750A75	2,00	USD 80,75	USD 161,50
FUENTE DE ALIMENTACION REDUNDANTE 15-250VAC	1750A75	2,00	USD 1.150,30	USD 2.300,60
ADAPTADOR PARA CHASSIS PARA FUENTES REDUNDANTES	1750B62	1,00	USD 181,57	USD 181,57
ETHERNET 10-100M BRIDGE MODULE	1750B32T	1,00	USD 2.750,00	USD 2.750,00
			USD 1,00	USD 1,00

DEVICENET BRIDGE/SCANNER MODULE, SERIES E	1750B62	1,00	USD 1.270,00	USD 1.270,00
MODBUS MASTER SLAVE SERIAL CHASSIS COMMUNICATION	1750B62	1,00	USD 2.940,00	USD 2.940,00
EMPTY SLOT FILLER CARD (1 FILL)	1750B62	1,00	USD 25,88	USD 25,88
FUENTE ALIMENTACION 110/220VAC 25VDC 1.8A	1750B62	1,00	USD 197,23	USD 197,23
ADAPTADOR ETHERNET 24VDC	1750B62	1,00	USD 487,81	USD 487,81
24VDC 4 CHANNEL HIGH DENSITY ANALOG CURRENT INPUT	1750B62	1,00	USD 430,80	USD 430,80
TERMINAL ONE PIECE BASE WITH SCREW CLAMP	1750B62	2,00	USD 15,84	USD 31,68
2-POINT ANALOG CURRENT OUTPUT MODULE	1750B62	1,00	USD 280,00	USD 280,00
FIELD POTENTIAL DISTRIBUTION	1750B62	1,00	USD 85,50	USD 85,50
MODULO POINT I/O 30 I/O BAS TPO RELIE	1750B62	1,00	USD 90,00	USD 90,00
STRATIX 2600 SWITCH UNMANAGED 6 COMPORT PORTS	1750B62	1,00	USD 114,25	USD 114,25

Unidad de la oferta	USD	Total Cotización	USD 43.153,28
---------------------	-----	------------------	---------------

Condiciones y Forma de Pago:

Condiciones de Venta: CASH - CONTADO

Comentarios y Condiciones Especiales de la Cotización:

Lugar de Entrega: Amoyan Chino (Lima Metropolitana) o cualquier otro lugar (por escrito)

Impuesto: No aplica

Valor de Oferta: 15 días

Observaciones:

Tiempo de entrega sujeto a confirmación según montes previos (antes) o confirmación de Montes (reportes) y una vez recibida la OC. Por favor de tener en consideración el punto 7.7 de nuestros términos y condiciones de venta (anexo 1) en caso de duda.

Emisión y envío de Orden de Compra:

EMITIR ORDEN DE COMPRA A PRECISION PERU S.A. RUC: 1001037000

Para Consultar Contactar a:

Vendedor Interno: JOSE ROQUE RAMIREZ
 Correo Vendedor: jose.roque@precision.pe
 Interno: jose.roque@precision.pe

Vendedor Externo: PRECISION MOLEMBEZE
 País: Perú
 Correo Vendedor: precision@precision.pe
 Edición: precision@precision.pe

Figura 151 Cotización de sistema redundante Rockwell con Logix5571. Fuente. PRECISIÓN.

La siguiente figura muestra la arquitectura redundante de Rockwell, donde se observa que el anillo de redundancia y el cableado de sincronización del programa están separados, lo que proporciona un alto grado de robustez.

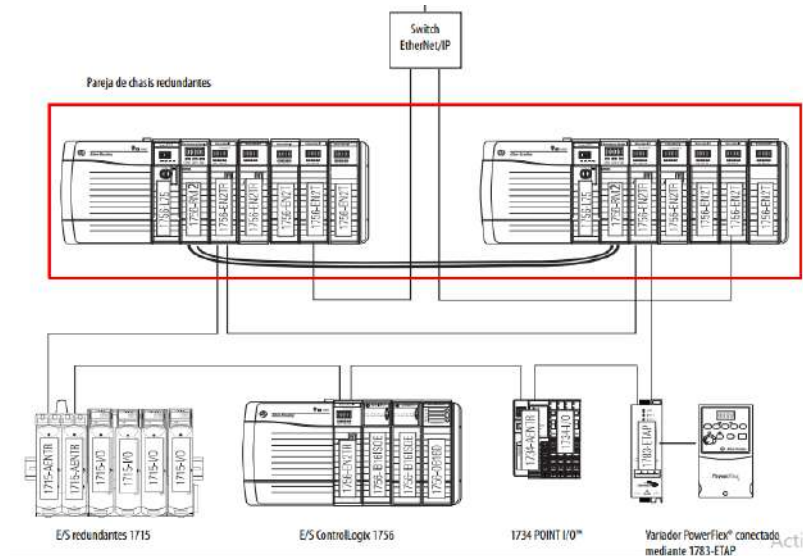


Figura 152 Arquitectura referencial de sistema redundante Rockwell. Fuente. Rockwell.

Se detalla la propuesta técnica de **CEYESA** basada en hardware de **Schneider Electric** para un sistema de alta disponibilidad. La configuración propuesta emplea controladores de la serie M580 con capacidades de redundancia nativa.



Av. Enrique Meiggs 297 - Parque Internacional de Industria y Comercio - Callao
Teléfono : +51 1 628 8585
Correo Lima: ventas@ceyesa.com.pe Anáhuay: ventas@ceyesa.com.pe



COTIZACIÓN
2021062028

Cliente : 20557954016 PHOENIX ENGINEERING PROCUREMENT AND CONSTRUCTION S.A.C.
Dirección : MZA. E LOTE. 29 A.H. HEROES DEL CENEPILLA EL SALVADOR
Contacto :
Referencia : Teléfono :

Fecha : 18/06/2021
Válido Hasta : 03/07/2021
Moneda : SOL
Forma de Pago : Letra a 30 Días

N°	Cód. Ceyesá	Descripción	Producto	Unidad	Cantidad	Precio	Total	Tiempo de Entrega
1	6809000050	Gabinete 100X500X300 NSYCRN106300 - SCHNEIDER ELECTRIC		NIU	1.00	764.67	764.67	4 DIAS
2	6806000140	Placa de montaje CRN NSYMM106 - SCHNEIDER ELECTRIC		NIU	1.00	191.17	191.17	4 DIAS
3	6805000155	Accesorio, Conjunto de Fijación Mural Pispasda CRN NSYFFCR - SCHNEIDER ELECTRIC		NIU	1.00	24.82	24.82	4 DIAS
4	6809900350	M580 HSBY CPU LEVEL 2 FOR R.I.O. BMH582040 - SCHNEIDER ELECTRIC		NIU	2.00	14,542.76	29,085.52	5 SEMANAS
5	6806495100	M580 HSBY RJ45 SFP 492NAC0100 - M. SCHNEIDER		NIU	2.00	492.44	984.87	5 SEMANAS
6	6809900400	4 SLOTS ETHERNET BACKPLANE BMXEP0400 - SCHNEIDER ELECTRIC		NIU	2.00	663.14	1,326.28	5 SEMANAS
7	6809902000	M340 FA 100/240VAC 20W BMXCP52000 - SCHNEIDER ELECTRIC		NIU	2.00	575.20	1,150.40	5 SEMANAS
8	6809900381	M580, Com.Embedded Switch BMEN060300 - SCHNEIDER ELECTRIC		NIU	1.00	2,138.05	2,138.05	5 SEMANAS
9	6809900350	RIO DROP E/UP PERFORATION ETHERNET BMXCR31210 - SCHNEIDER ELECTRIC		NIU	1.00	1,822.85	1,822.85	5 SEMANAS
10	6809900410	M340 04 EA 16x AISI 10V 20mA BMXAM0410 - SCHNEIDER ELECTRIC		NIU	1.00	1,349.38	1,349.38	5 SEMANAS
11	6809900310	M340 06 SO Rack 24VDC 3A (20P) BMXDRM05 - SCHNEIDER ELECTRIC		NIU	1.00	749.00	749.00	5 SEMANAS
12	6809900324	M340 06 ED 115VAC BMXDA0814 - SCHNEIDER ELECTRIC		NIU	1.00	1,246.61	1,246.61	5 SEMANAS
13	6809902012	M340 06emero 20P Terminal-Exhibo BMXTB2010 - SCHNEIDER ELECTRIC		NIU	4.00	55.52	222.09	5 SEMANAS

Página 1 de 2



Av. Enrique Meiggs 297 - Parque Internacional de Industria y Comercio - Callao
Teléfono : +51 1 628 8585
Correo Lima: ventas@ceyesa.com.pe Anáhuay: ventas@ceyesa.com.pe



COTIZACIÓN
2021062028

Cliente : 20557954016 PHOENIX ENGINEERING PROCUREMENT AND CONSTRUCTION S.A.C.
Dirección : MZA. E LOTE. 29 A.H. HEROES DEL CENEPILLA EL SALVADOR
Contacto :
Referencia : Teléfono :

Fecha : 18/06/2021
Válido Hasta : 03/07/2021
Moneda : SOL
Forma de Pago : Letra a 30 Días

N°	Cód. Ceyesá	Descripción	Producto	Unidad	Cantidad	Precio	Total	Tiempo de Entrega
14	6809900602	M580 Rack E/it 06 Pos FA Dual BMXEP0602 - SCHNEIDER ELECTRIC		NIU	1.00	1,179.37	1,179.37	5 SEMANAS
15	6809904002	M580 FA 100-240 vCA Redund BMXCP64002 - SCHNEIDER ELECTRIC		NIU	2.00	1,471.11	2,942.21	5 SEMANAS
16	680504011	Paralela 5.7" QVGA/TFT 65K col 24VDC HMGT0210 - SCHNEIDER ELECTRIC		NIU	1.00	2,806.89	2,806.89	5 SEMANAS

Valor Venta	IGV 18%	Total
47,784.16	8,601.15	56,385.31

Ejecutivo de Ventas: Alexander Cayetano Teléfono: +51 1 628 8585 Ext. 312 Móvil: +51 981 479 479 Correo: acayetano@ceyesa.com.pe
Asistente de Ventas: Diego Cabrera Teléfono: +51 1 628 8585 Ext. 349 Móvil: - Correo: dcabrera@ceyesa.com.pe

Consideraciones importantes:

- La presente oferta está sujeta a variaciones de stock.
- Para importaciones, consulte las condiciones comerciales con su ejecutivo de ventas. No se acepta cambios ni devoluciones.
- Los despachos serán efectuados de acuerdo a las disposiciones del gobierno para industrias autorizadas y siguiendo los protocolos sanitarios. Para mayor información, consulte con su ejecutivo de ventas asignado.
- La emisión y entrega de facturas se realizan de manera electrónica.
- Horario de Atención remota:
- Clientes: Lunes a Viernes 8:00 a.m. - 6:00 p.m.

Cuentas Corrientes:

Banco	Cuenta	Código	Clave	Clave	Clave
Banco Continental	Banco BCP	Banco Interbank	Banco Scotiabank	Banco de la Nación	
0011-0280-01-00002632	0011-0280-01-00002632	0011-0280-01-00002632	0011-0280-01-00002632	0011-0280-01-00002632	0011-0280-01-00002632
0011-0280-01-00002632	0011-0280-01-00002632	0011-0280-01-00002632	0011-0280-01-00002632	0011-0280-01-00002632	0011-0280-01-00002632

Página 2 de 2

Figura 155 Cotización de sistema redundante Schneider Electric con CPU M580 HSBY.
Fuente: DINAUT.

Tras analizar las tres propuestas mencionadas anteriormente, se descartó la opción de **Precisión-Rockwell** debido a su alto costo en comparación con las otras alternativas, decisión que fue tomada luego de su presentación al área de jefatura.

Respecto a las propuestas de **Din Automation** y **Ceyesa**, cuyos costos son muy similares (S/ 55,486.11 y S/ 56,385.31, respectivamente), se elaboró un cuadro comparativo de características técnicas con el fin de evaluar ambas opciones de manera más detallada.

Tabla 18 Cuadro comparativa entre Siemens y Schneider Electric.

Característica	Siemens S7-1515R-2 PN	Schneider Electric BMEH582040 (M580 HSBY)
Arquitectura	Redundancia de CPU (R: Redundant)	Redundancia Hot Standby (HSBY)
Memoria de programa	0.5 MB	9 MB
Interfaces de comunicación	2x PROFINET, 1x MPI/DP	4x Ethernet, 1x USB
Soporte de protocolos	Modbus TCP/IP, PROFINET, OPC UA,	Modbus TCP/IP, Ethernet/IP, OPC UA
Capacidad de redundancia	Sincronización automática entre CPUs en el anillo	Cambio automático entre CPU primaria y secundaria
Tiempo de conmutación	≤ 100 ms	≤ 50 ms
Tiempo de ciclo	48 ns por instrucción booleana	10 ns por instrucción booleana
Tipo de redundancia	Redundancia de CPU y comunicación PROFINET	Hot Standby con detección automática de fallo
Equipos requeridos para formar el anillo	2x CPU 1515R-2 PN 1x Switch PROFINET con soporte a Redundancia MRP	2x CPU BMH582040 1x Módulo eCRA (Control Redundancy Adapter)
Cable de sincronismo de programa	No requiere cable especial , la sincronización se realiza a través de PROFINET	Cable de fibra óptica o Ethernet , conectado entre las CPUs para sincronización del programa
Entorno de programación	TIA Portal	EcoStruxure Control Expert

Fuente. Elaboración propia.

Ambos sistemas ofrecen redundancia confiable, pero el **M580 HSBY** tiene mayor rapidez de conmutación y flexibilidad en redes críticas, mientras que el **1515R es una opción más simple basada en PROFINET**.

Además, la CPU **M580 HSBY** cuenta con un procesador más potente, reflejado en su menor tiempo de ciclo por instrucción, lo que optimiza el procesamiento de lógica de control en aplicaciones exigentes. También dispone de una mayor capacidad de memoria de programa, lo que permite desarrollar algoritmos más estructurados y eficientes sin limitaciones de almacenamiento.

Tras analizar las características técnicas de la tabla comparativa, se eligió la propuesta de **Ceyesa** con productos **de Schneider Electric**, ya que ofrece un sistema con redundancia completa, incluyendo fuentes de alimentación redundantes, un cableado exclusivo para la arquitectura en anillo y un canal de sincronización independiente. Esta última característica, ausente en la CPU 1515R de Siemens, otorga al M580 HSBY una mayor robustez y confiabilidad, similar a la arquitectura redundante de Rockwell.

Adicionalmente, el M580 HSBY ofrece ventajas significativas en capacidad de procesamiento y almacenamiento, superando al PLC de Siemens CPU 1515R en términos de eficiencia y escalabilidad, lo que lo convierte en la opción más adecuada para la implementación del sistema.

En función de esta evaluación, se implementará la siguiente arquitectura basada en el M580 HSBY de Schneider Electric, según la propuesta seleccionada.

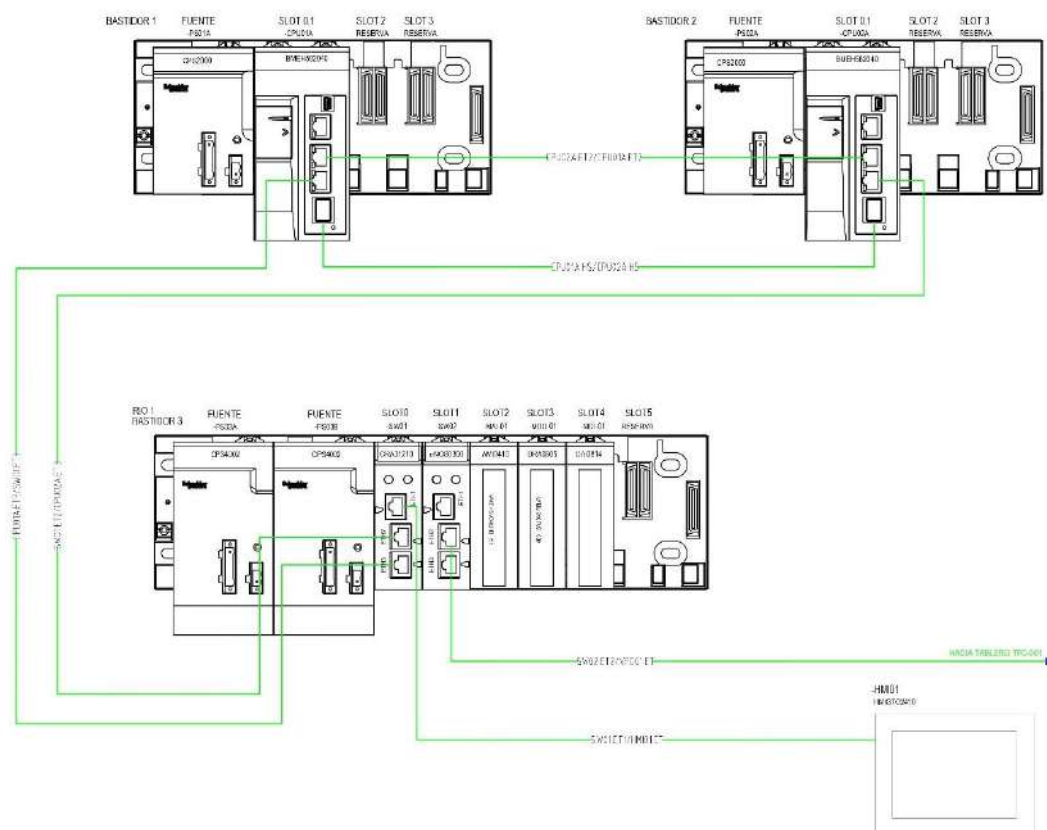


Figura 156 Sistema redundante completo Schneider Electric con M580 HSBY. Fuente: Elaboración propia.

Como observación, para la validación de la arquitectura, Schneider Electric dispone del software **EcoStruxure Plant Builder 5.0 Basic**, una herramienta que permite verificar la correcta selección y compatibilidad de los equipos.

La CPU **M580 H58 2040** es el modelo seleccionado para esta aplicación, destacando por sus capacidades avanzadas en **procesamiento, comunicación y redundancia**. Sus características técnicas detalladas se presentan en las siguientes imágenes.

canales de control	Lazos programables
tipo de conexión integrada	1 Ethernet TCP/IP para Puerto de servicio 2 Ethernet TCP/IP para red del dispositivo USB tipo mini B 1 Ethernet para Puerto HSBY
número de estaciones E/S remotas	8 - 2 rack(s) por X80 remote drop
número de equipos distribuidos	64
procesador de módulo de comunicación	2 Módulo de comunicación Ethernet 16 Módulo AS-Interface

Figura 157 Características técnicas de H58 2040. Fuente. Ficha técnica H58 2040.

	STAND ALONE									HSBY		
Procesadores	BMPS581020	BMPS582020	BMPS582040	BMPS583020	BMPS583040	BMPS584020	BMPS584040	BMPS585040	BMPS586040	BMPS582040H	BMPS584040H	BMPS586040H
Memoria interna												
Tamaño de memoria interna	4 MB	9 MB	9 MB	13 MB	13 MB	18 MB	18 MB	29 MB	65 MB	9 MB	18 MB	65 MB
Entradas/Salidas												
Número máximo de canales de E/S binarios	1024	2048	2048	3072	3072	4096	4096	5120	6144	-	-	-
Número máximo de canales de E/S analógicos	256	512	512	768	768	1024	1024	1280	1536	-	-	-
Número máximo de funciones locales												
(basitador principal + basitador de ampliación)	4	4	4	8	8	8	8	8	8	1	1	1
Número máximo de estaciones RIO (dos basitadores por estación como máximo)	-	-	8	-	16	-	16	31	31	8	16	31
(basitador principal + basitador de ampliación)												
Tarjeta de Memoria SD - 4 GB												
Comunicación												
Estaciones Remotas RIO	-	-	8 (2)	-	16 (2)	-	16 (2)	31 (2)	31 (2)	8 (2)	16 (2)	31 (3)
Dispositivos distribuidos	64	128	64	128	64	128	64	64	64	64	64	64
Puertos de comunicación												

Figura 158 Características técnicas de PLC M580. Fuente. Catálogo Schneider Electric.

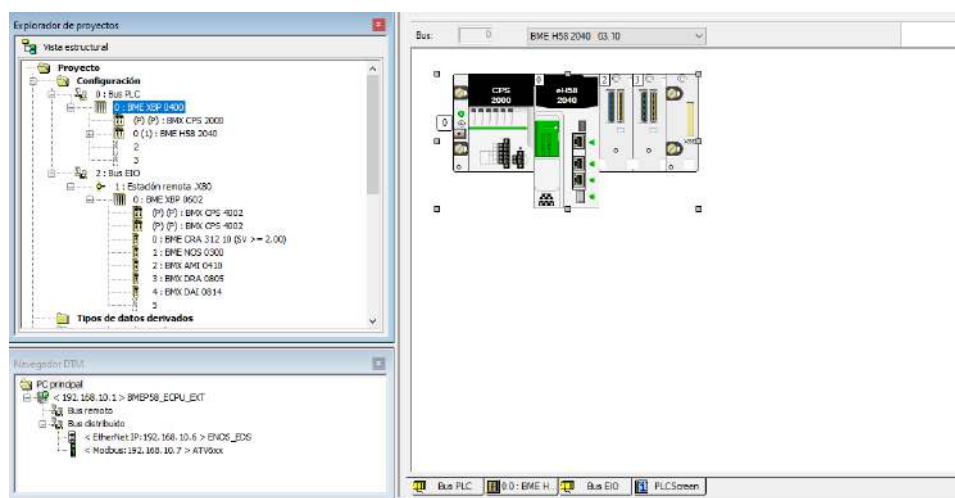


Figura 159 Sistema con módulos empleados con H58 2040. Fuente. Elaboración propia.

El modelo **H58 2040** ofrece mejores especificaciones técnicas en comparación con la serie M340, proporcionando mayor capacidad de procesamiento, comunicación y escalabilidad, como se muestra en la siguiente tabla. Es importante señalar que los controladores M340 no cuentan con un sistema de redundancia, lo que los hace menos adecuados para aplicaciones que requieren alta disponibilidad y continuidad operativa.

	Procesador estándar BMX P34 1000	Procesadores Avanzados			
		BMX P34 2000	BMX P34 20102	BMX P34 2020	BMX P34 20302
Memoria interna					
Memoria RAM de usuario	2,048 kB	4,096 kB	4,096 kB	4,096 kB	4,096 kB
Entradas y Salidas					
Número de E/S TON en rack	612	1024/704	1024/704	1024/704	1024/704
Número de E/S Analógicas en rack	128/66	256/66	256/66	256/66	256/66
Número Max Vías (Contaje y enlace Serie)	20	36	36	36	36
Comunicación					
Puerto USB integrado	1	1	1	1	1
Ethernet TCP/IP integrado	-	-	-	1	1
CANopen integrado	-	-	1	-	1
Modbus integrado	1	1	1	1	-
Experiencia en aplicaciones					
Contador	si	si	si	si	si
Posicionamiento	-	-	si	-	si
Lazos de control	si	si	si	si	si

Figura 160 Características técnicas de PLC M340. Fuente. Catálogo Schneider Electric.

La serie **M340** permite la implementación de diversas arquitecturas de control, como se muestra en la siguiente imagen, utilizando la **CPU P34 2020**. Esta configuración proporciona una solución flexible y eficiente para aplicaciones de automatización de tamaño mediano, aunque sin soporte para redundancia.

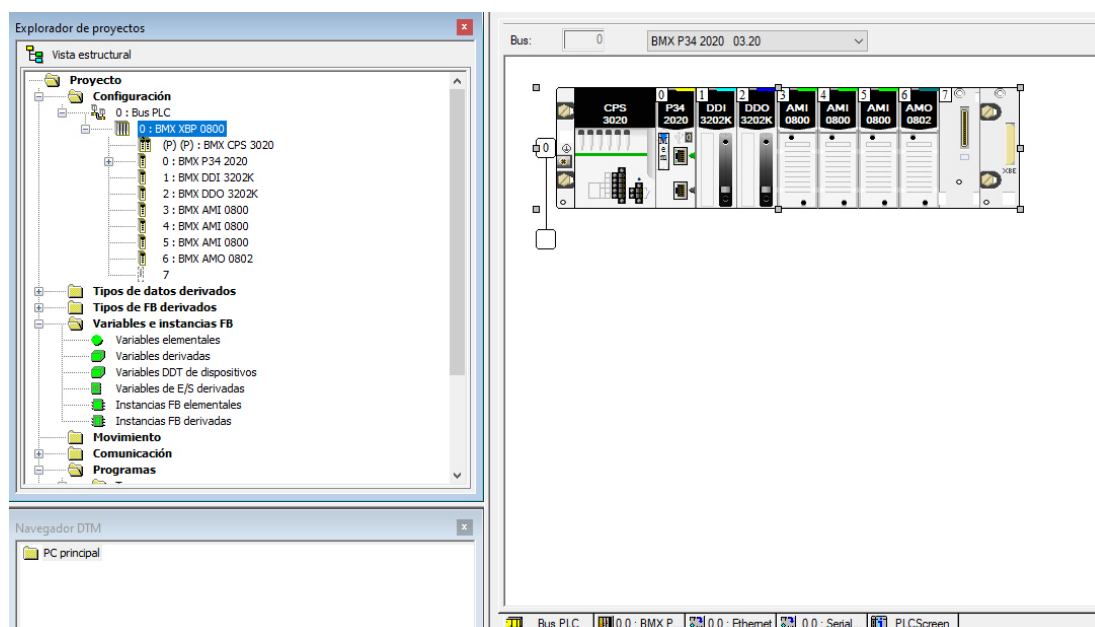


Figura 161 Arquitectura con CPU 340 modelo P34 2020. Fuente. Elaboración propia.

Asimismo, **Schneider Electric** ofrece CPUs diseñadas para sistemas instrumentados de seguridad (SIS), como la serie **M580 Safety**. En la siguiente imagen se presenta el modelo **P58**, que actúa como procesador principal encargado de la lógica de procesos, y **P58 CPRO**, que funciona como coprocesador para la gestión de la lógica SIL3. Está diseñado para cumplir con altos estándares de seguridad y confiabilidad en aplicaciones críticas. Cabe destacar que el rack inferior no corresponde a un módulo remoto, sino a una extensión del backplane del rack principal.

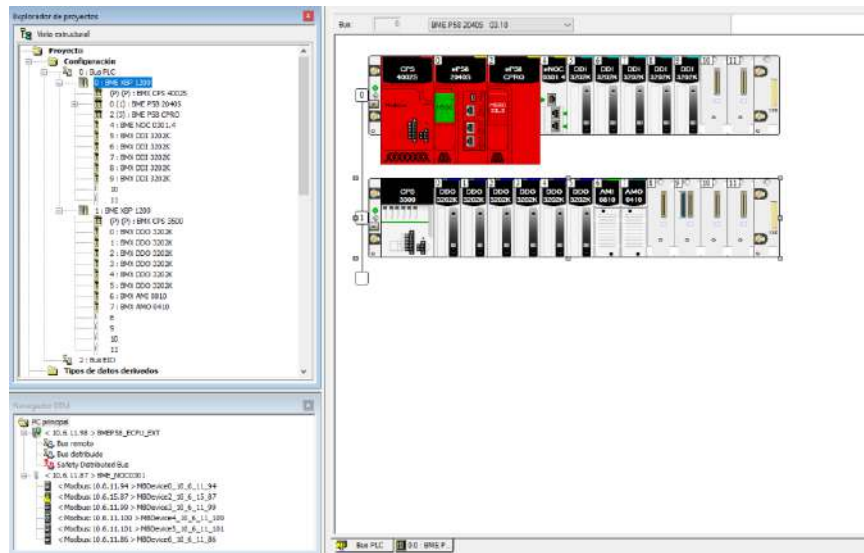


Figura 162 Arquitectura con CPU 580 Safety modelo P58 2040S. Fuente. Elaboración propia.

Como parte de la arquitectura implementada de la propuesta seleccionada, se incluye una estación remota, la cual está equipada con los siguientes dispositivos como muestra la imagen siguiente.

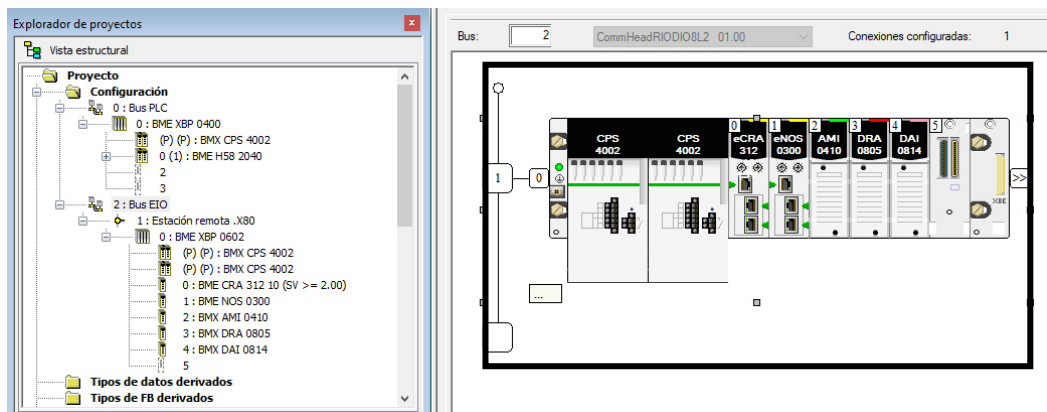


Figura 163 Unidad de estación remota de M580. Fuente. Elaboración propia.

La unidad remota está compuesta por los siguientes módulos:

- **CRA 312 10**: Módulo para continuidad de la redundancia.
- **NOS 0300**: Módulo **switch Ethernet** para comunicación en red.
- **AMI 0410**: Módulo de entradas analógicas, con 4 canales
- **DRA 0805**: Módulo de entradas digitales, con 8 canales.
- **DAI 0814**: Módulo de salidas a relé, con 8 canales.

A continuación, se muestra el conexionado realizado en cada módulo empleado con sus respectivas señales:

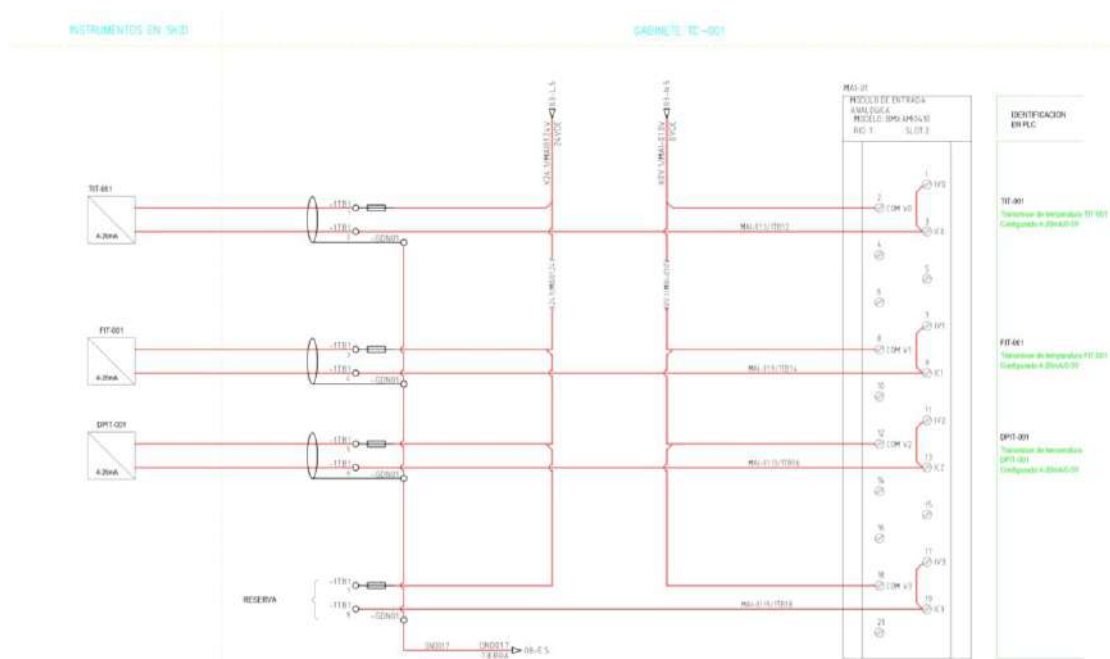


Figura 164 Conexionado de módulo de entrada analógica AMI 0410. Fuente. Elaboración propia.

Tener en cuenta que es importante indicar al controlador que tipo de señal será la que recibirá para evitar dañar el módulo, en este caso en específico es de 4 a 20 mA, como se muestra en la imagen.

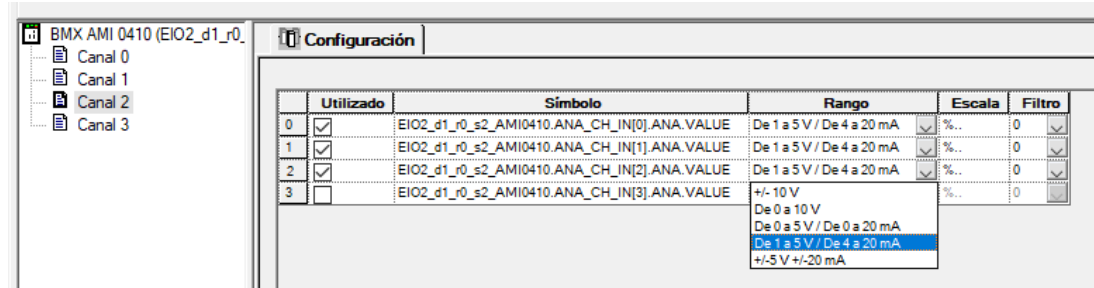


Figura 165 Conexionado de módulo de entrada analógica AMI 0410. Fuente. Elaboración propia.

La salida del relé actúa como elemento de conmutación para habilitar la alimentación de 24 Vdc, conforme se aprecia en la imagen siguiente.

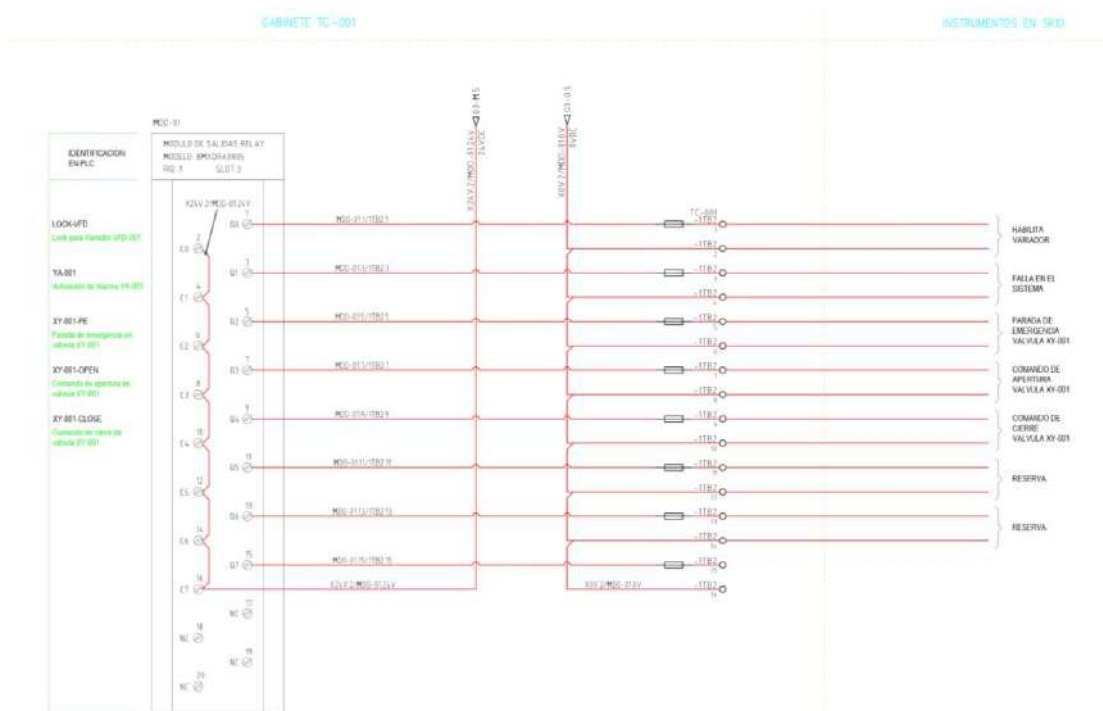


Figura 166 Conexionado de módulo de salida relay DRA 0805. Fuente. Elaboración propia.

Las entradas digitales se acondicionan mediante contactos, permitiendo que el módulo reciba señales de 110 V AC.

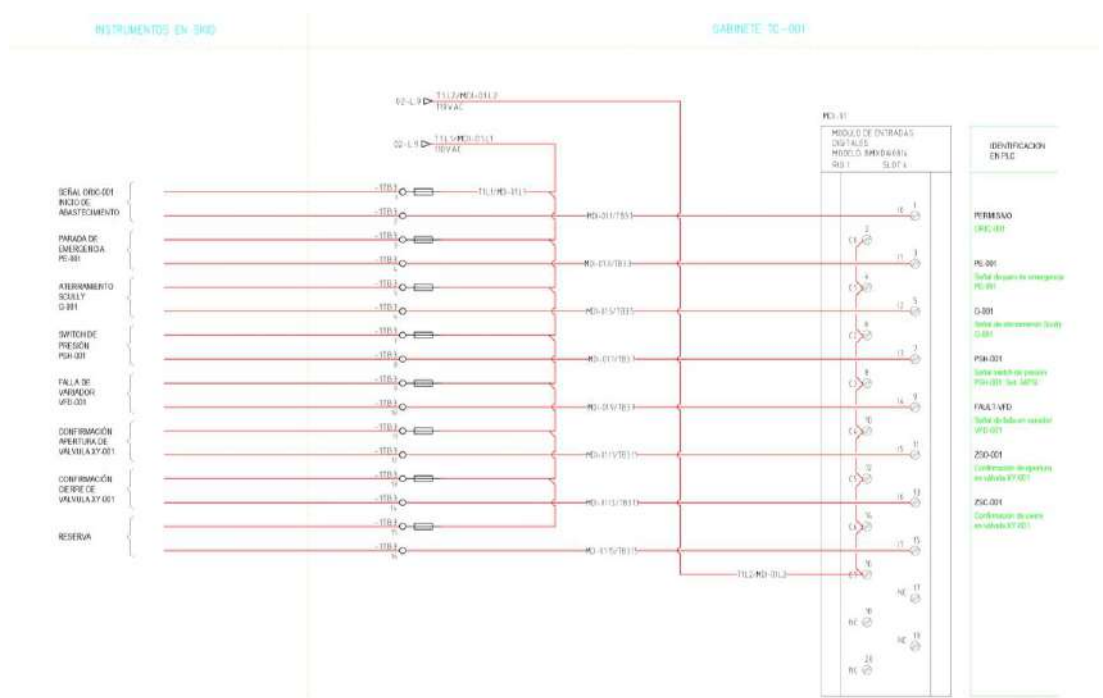


Figura 167 Conexionado de módulo de entrada 110Vac tipo contacto DAU 0814. Fuente: Elaboración propia.

3.5.9 Lógica de control de funcionamiento

El **abastecimiento de combustible** representa una parada operativa indispensable dentro del **ciclo de trabajo** de los camiones mineros, siendo un proceso crítico para asegurar la continuidad de las operaciones mineras.

A continuación, se detalla el lineamiento del sistema de control implementado en el gabinete de abastecimiento de combustible de alto caudal, el cual regula y supervisa las distintas etapas del proceso de despacho.

Acople al sistema.

Una vez que el camión minero ha sido correctamente estacionado cerca del brazo de carga (L-003), bajo la guía del operador, y tras haber disipado las posibles cargas remanentes mediante el desplazamiento controlado de las llantas, se procede a bloquear los mecanismos del vehículo haciendo uso de un candado de seguridad eléctrico, esta acción tiene como finalidad prevenir movimientos no deseados que pudieran comprometer la seguridad de la operación. Luego conectar la puesta a tierra (GS-001) para minimizando riesgos asociados a la acumulación de electricidad estática, seguidamente, se debe alinear el brazo de carga y acoplar la boquilla Wiggins (A-003) al tanque de combustible del camión. Adicionalmente, antes de iniciar el despacho, se debe verificar que no existan alarmas activas en la pantalla HMI, ni que el botón de Parada de Emergencia (PE) esté accionado.

Preliminar al despacho.

Para comenzar la transacción de despacho, el operador debe autenticarse con su llavero e ingresar la información del camión minero en el Sistema de Registro a través del panel del controlador Orpak como también presionar "*Start*" en el contómetro (FQIT-001) para preparar la medición del combustible. Una vez completadas estas dos acciones, el sistema Orpak y el contómetro FQIT-001 envían una señal de permiso ABASTEC para permitir el encendido de la bomba y una señal de apertura a la válvula de corte (XY-001).

En consecuencia, la válvula motorizada XY-001 iniciará su proceso de apertura, lo que implicará la desactivación de la señal de posición cerrada (ZSC-001). Durante el trayecto de apertura, ambas señales de posición (ZSC-

001 y ZSO-001) permanecerán inactivas. Aproximadamente después de 5 segundos, se espera que la señal de posición abierta (ZSO-001) se active, confirmando que la válvula ha alcanzado completamente su posición de apertura. Si transcurren más de 10 segundos sin recibir dicha confirmación, el sistema generará una alarma indicando una falla en el accionamiento de la válvula motorizada y procederá automáticamente a finalizar el proceso de despacho.

Para completar la secuencia, el operador debe pulsar el botón de “*start*” de la botonera HS-001 para iniciar el arranque de la bomba, de no cumplirse todos los pasos anteriormente mencionados, la bomba no encenderá.

Proceso de despacho (bombeo).

La línea de succión está equipada con un filtro tipo canasta (L-001), el cual incorpora una canastilla de acero inoxidable con una malla tipo mesh 40, equivalente a una filtración del orden de 420 micrones, que protegerá de partículas o suciedad a la bomba centrífuga para evitar daños, adicionalmente entre la línea de succión y descarga contará con una línea de recirculación para asegurar el caudal mínimo de operación ante un posible bloqueo de la línea de descarga, para ello contará con un orificio de restricción (RO-001) permitiendo limitar el caudal.

En la línea de descarga, se emplea un filtro micrónico (L-002) diseñado para la remoción de material particulado fino presente en el combustible diésel. Este filtro utiliza cartuchos de fibra sintética con una capacidad de retención de partículas en el rango de 4 a 6 micrones. Su operación está limitada por una presión diferencial máxima de 40 psi, superada la cual se requiere su reemplazo o salida de servicio. La presión diferencial es monitoreada en tiempo real mediante un transmisor de presión diferencial (PDIT-001) instalado adyacente al filtro. Durante la operación del gabinete, es fundamental realizar registros periódicos de este parámetro para estimar adecuadamente los intervalos de mantenimiento. No obstante, si la presión diferencial excede el límite establecido, el sistema generará una alarma y notificará al operador a través de la interfaz HMI.

Aguas arriba del filtro micrónico se cuenta con un transmisor de caudal (FIT-001) con su correspondiente placa orificio (FE-001), el cual envía señal al controlador lógico programable (PLC) M580 para regular el caudal de abastecimiento a 300 gpm mediante un lazo de control cerrado con retroalimentación negativa, que emplea como actuador a un variador de velocidad Schneider ATV630. El sistema ajusta automáticamente la velocidad de la bomba en función de las variaciones detectadas, como el incremento en la caída de presión a través del filtro micrónico o del filtro tipo canastilla, la disminución del nivel de combustible en el camión cisterna, entre otros aspectos. Esta estrategia de control asegura una regulación estable del caudal objetivo durante todo el proceso de despacho.

Al circular el fluido, el contómetro volumétrico electrónico (FQIT-001) inicia con el conteo de los galones suministrados y simultáneamente envía señales de pulso hacia el sistema Orpak, para también generar su registro de abastecimientos en los despachos realizados.

La temperatura del fluido de despacho en tiempo real será medida por el transmisor de temperatura (TIT-001) con su correspondiente sensor Pt-100, el cual contará con una pantalla local y al enviar la señal al PLC M580, también será visualizada en la pantalla HMI, para ser visualizado por el operador.

El despacho de combustible se realiza mediante una pistola Wiggins conectada a un brazo de carga tipo Bottom Loading (A-003), especialmente diseñado para operar con camiones mineros que cuentan con boquillas compatibles (complemento de pistola). Este sistema incorpora un mecanismo de cierre automático que detiene el flujo de combustible al alcanzar la capacidad máxima del tanque, eliminando la necesidad de calcular volúmenes parciales, ya que el objetivo es realizar un llenado completo. El cierre súbito de la boquilla genera un aumento transitorio de presión en la línea, el cual es mitigado mediante un amortiguador de pulsaciones (A-002), protegiendo así la integridad del sistema hidráulico. Adicionalmente, se ha instalado una válvula check (antirretorno) aguas arriba del medidor volumétrico, con el fin de evitar que el pico de presión de cierre afecte su funcionamiento. Esto garantiza la precisión de la medición del volumen despachado y contribuye a la conservación del instrumento a lo largo del tiempo.

Termino de despacho.

El interruptor de presión (PSH-001) detectará el pico de presión de la línea de descarga, generado por el cierre automático de la boquilla Wiggins, iniciando así la secuencia de finalización del despacho. Esta secuencia contempla la detención del motor mediante el variador de frecuencia, una vez que este reduce su velocidad por debajo del umbral de 30 Hz. De manera simultánea, se envía la orden de cierre a la válvula motorizada XY-001. Durante el proceso de cierre, la señal del sensor de apertura (ZSO-001) se desactiva, indicando que la válvula ha abandonado su posición completamente abierta. En esta etapa de transición, ambas señales de posición (ZSO-001 y ZSC-001) permanecen inactivas. Transcurridos aproximadamente 5 segundos, el sensor de posición de cierre (ZSC-001) debe activarse, enviando la señal de confirmación de cierre completo. Esta señal es transmitida al sistema Orpak como indicativo del término del proceso de abastecimiento. Si la señal de confirmación de cierre (ZSC-001) no se recibe dentro de los 10 segundos establecidos, el sistema interpretará una falla en el actuador motorizado, activará la alarma correspondiente y mostrará una advertencia en la interfaz HMI, notificando al operador la condición anómala para su pronta intervención. La secuencia de finalización también se activa en caso de que se genere una alarma durante el proceso de despacho, o si el sistema Orpak deja de transmitir la señal permisiva (ABASTEC), lo cual es interpretado como una interrupción o cancelación del proceso por parte del sistema supervisor.

Desacople del sistema

Una vez finalizado el abastecimiento de combustible al camión minero, se procede con el desacople de la pistola Wiggins y el reposicionamiento del brazo de carga tipo Bottom Loading (A-003) en su soporte de seguridad dentro del skid. Seguidamente, se desconecta la puesta a tierra del sistema Scully y se libera el candado de seguridad que bloqueaba el vehículo, devolviendo así el control al conductor. Finalmente, el operador asiste en la maniobra de salida del camión del área de despacho, dejando el espacio disponible para recepcionar al siguiente vehículo y continuar con el proceso de abastecimiento.

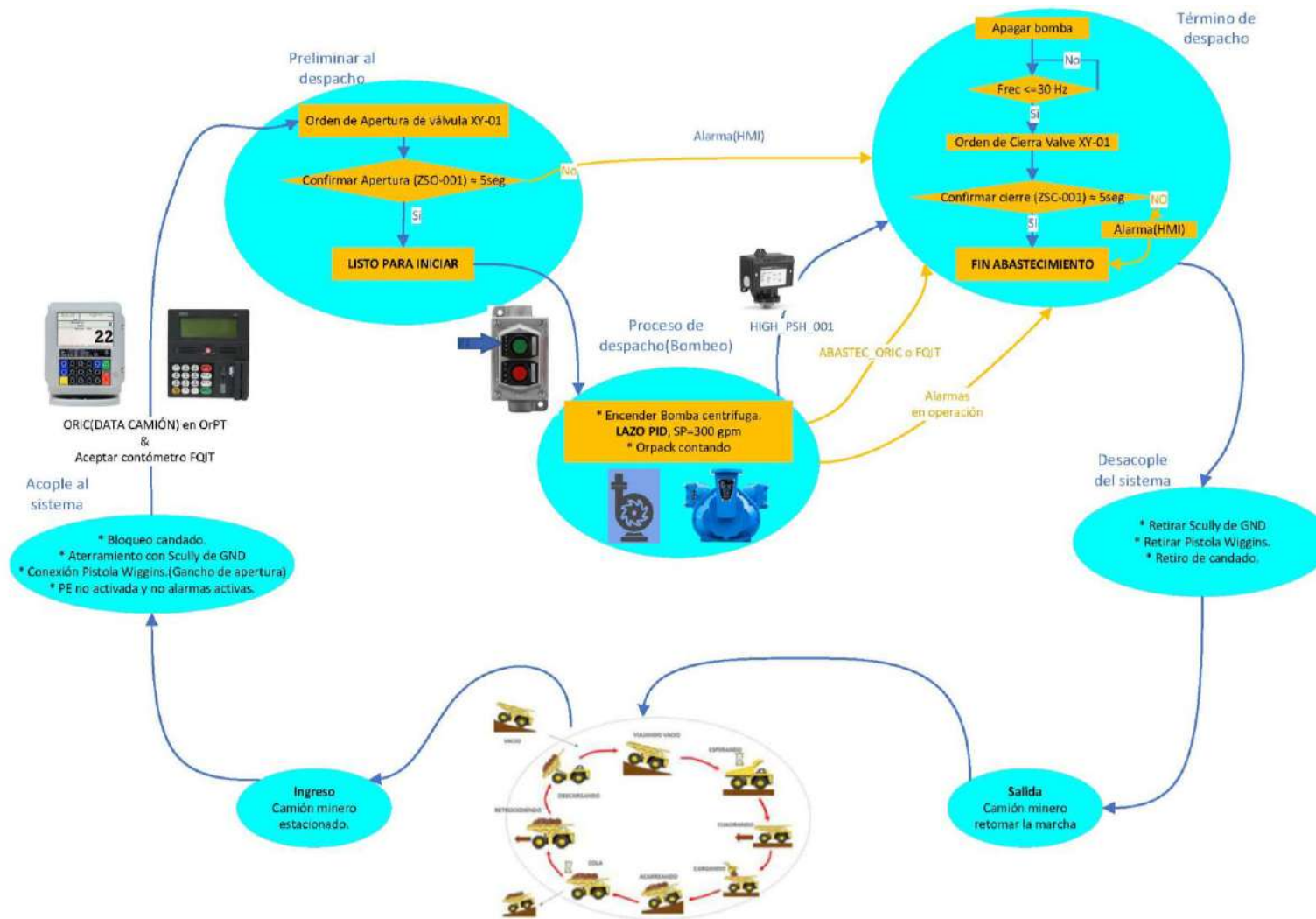


Figura 168 Diagrama de estados del sistema de abastecimiento de combustible. Fuente. Elaboración propia.

3.5.10 Programación de PLC

Para la configuración del controlador lógico programable (PLC), se emplea el software **EcoStruxure Control Expert**, una herramienta de programación desarrollada por Schneider Electric que cumple con el estándar internacional **IEC 61131-3**. Este entorno permite desarrollar aplicaciones utilizando distintos lenguajes de programación, adaptándose a los requerimientos funcionales del sistema. Los lenguajes disponibles son:

- Diagrama de contactos (Ladder)
- Diagrama de bloques (FBD)
- Texto estructurado (ST)
- Lista de instrucciones (IL)
- Bloques de funciones secuenciales (Grafcet)



Figura 169 Software EcoStruxure Control Expert V14.1. Fuente. Schneider Electric.

Adicionalmente, para la interacción con el sistema, se emplea una pantalla HMI modelo GTO2310 de 5.7" del mismo fabricante. Su configuración se realiza mediante el software Vijeo Designer, requerido para la programación de interfaces gráficas y comunicación con el controlador.



Figura 170 Software Vijeo Designer V6.2 ServiPack10. Fuente. Schneider Electric.

La HMI permite una supervisión y control del sistema mediante una interfaz, y se comunica directamente con el controlador M580, como se muestra en las figuras siguientes.



Figura 171 Pantalla Home de HMI. Fuente. Elaboración propia.

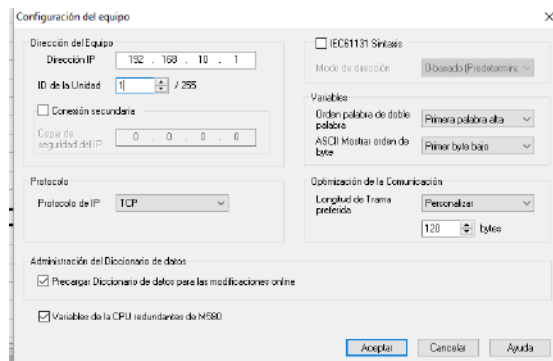


Figura 172 Vínculo de HMI con M580. Fuente. Elaboración propia.

En esta aplicación específica, se implementan tres secuencias de programación que aprovechan la versatilidad del estándar IEC 61131-3, el cual permite utilizar múltiples lenguajes en un mismo proyecto de control. Las secuencias han sido desarrolladas utilizando Diagrama de Contactos (**Ladder**), Texto Estructurado (**ST**) y Diagrama de Bloques Funcionales (**FBD**), seleccionando cada uno en función de su adecuación al tipo de lógica a implementar, su claridad en la representación funcional y su eficiencia en la ejecución dentro del ciclo de escaneo del PLC.

Esta estrategia modular y multilenguaje permite optimizar el desempeño del sistema, facilitar el mantenimiento y la legibilidad del código de control.

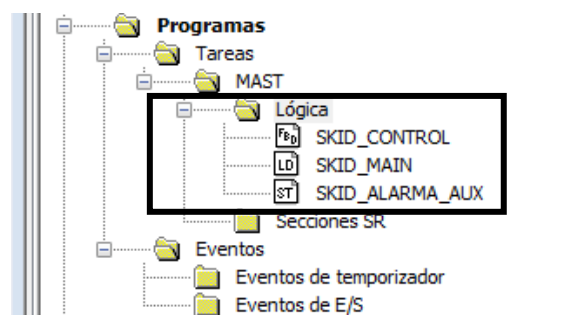


Figura 173 Programas bajo estándar IEC 61131-3. Fuente. Elaboración propia.

Se implementan tres secuencias de control diferenciadas, cada una desarrollada en el lenguaje más adecuado según su función específica:

- **SKID_MAIN** programada en Ladder (**LD**), orientada al control secuencial principal, gestión lógica de estados y gestión de alarmas
- **SKID_CONTROL** desarrollada en Diagrama de Bloques Funcionales (**FBD**), enfocada en el procesamiento de señales analógicas y control en lazo cerrado (PID).
- **SKID_ALARMA_AUX** codificada en Texto Estructurado (**ST**), utilizada para el tratamiento de condiciones auxiliares y secuencia de alarma.

SKID_MAIN

La primera secuencia, denominada **SKID_MAIN**, constituye el núcleo del sistema de control y está programada en lenguaje Ladder (LD). Su función es controlar tanto la secuencia de encendido como la de finalización del despacho, además de supervisar continuamente el estado operativo durante el abastecimiento para detectar y mitigar posibles fallas en tiempo real.

El proceso de preliminar al arranque iniciará cuando se cumplan las siguientes condiciones que se visualizan en la figura siguiente.

- **Botón de parada de emergencia inactivo:** La señal **PE_001** debe indicar que el botón de emergencia no está presionado.
- **Presión en línea dentro de los valores permitidos:** El switch de presión **HIGH_PSH_001** confirma que no hay sobrepresión en la línea de proceso.
- **Sistema sin alarmas activas:** La variable **ALARM_OCURRED** debe indicar que no existen fallas en el sistema.
- **Validación del sistema Orpak y contómetro FQIT:** Se debe verificar que los datos del camión minero han sido ingresados correctamente y que el despacho ha sido aceptado en el contómetro FQIT, habilitando la señal **ABASTEC**.

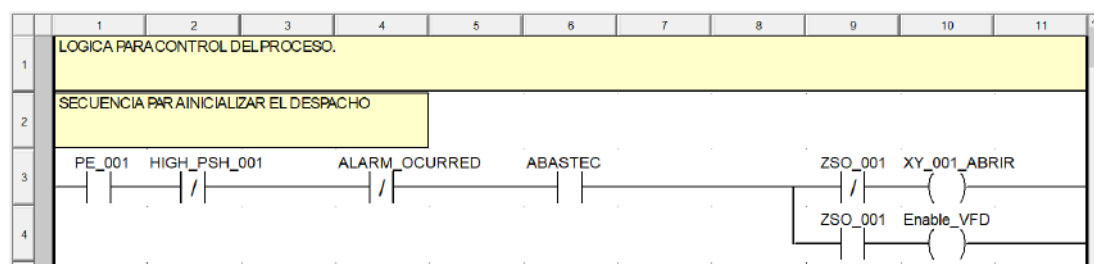


Figura 174 Ladder para habilitar el permisivo de encendido de bomba. Fuente. Elaboración propia.

Una vez verificadas todas las condiciones previas, se activa la orden de apertura de la válvula motorizada mediante la señal **XY_001_ABRIR**, la cual se mantendrá activa hasta que el sensor de posición ZSO_001 confirme que la válvula ha alcanzado su posición completamente abierta. Al recibir esta confirmación, el variador de frecuencia queda habilitado mediante la señal **Enable_VFD**, quedando en condición de espera para recibir la señal de arranque (**Start**) desde la botonera **HS-001**, lo que permitirá el encendido controlado de la bomba.

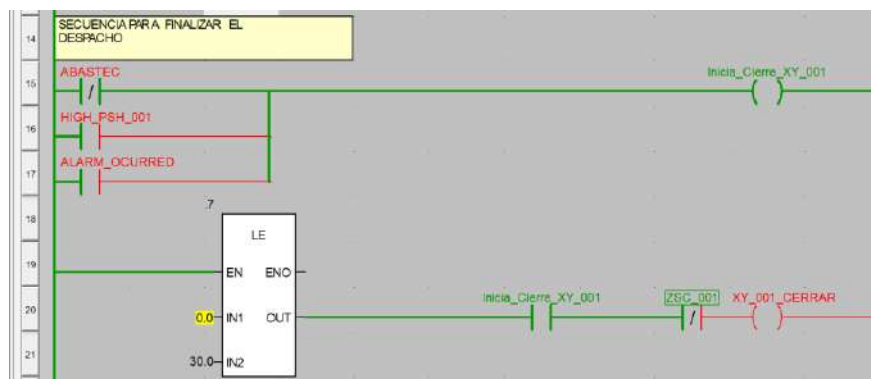


Figura 175 Ladder de la señal de cierre previo al despacho. Fuente. Elaboración propia.

Como observación, en las condiciones iniciales previas al inicio del despacho, la válvula motorizada debe encontrarse en posición de cierre, lo cual es confirmado por la señal del sensor de posición **ZSC_001** enviando una señal lógica alta (**valor 1**), interrumpiendo la secuencia serie. En consecuencia, la orden de cierre no se activa, tal como se muestra en la figura anterior.

Cuando se habilita la señal **ABASTEC**, es decir **Inicia_Cierre_XY** permanece desactivada, incluso si **ZSC_001** recibe una señal en estado 0. En consecuencia, la orden **XY_001_CIERRE** no es emitida.

Por ende, durante todo este proceso no se envía la señal de cierre a la válvula.

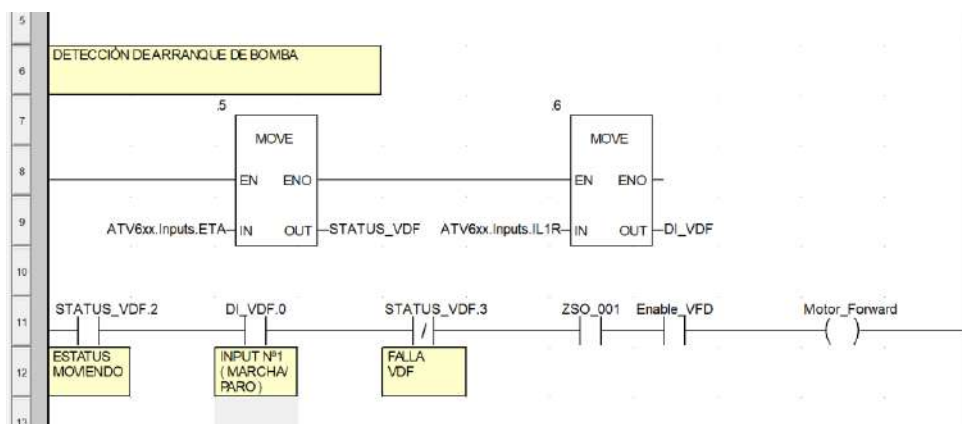


Figura 176 Ladder, monitoreo de estado de variador. Fuente. Elaboración propia.

Se realiza la lectura del **registro ETA** utilizando la función MOVE, con el objetivo de monitorear el estado operativo del variador de frecuencia. Dado que este registro es de 16 bits, se evalúa específicamente el **bit 2**, el cual indica que el **motor está en marcha (Motor Running)**, confirmando que se ha presionado el botón Start en la botonera HS-001. Paralelamente, se verifica el **bit 3**, correspondiente a una posible **falla del variador**, con el fin de asegurar que no exista ningún error activo en el equipo.

Asimismo, se efectúa la lectura del **registro IL1R** también mediante un bloque MOVE, el cual permite supervisar el estado de las entradas digitales del variador. En este caso, se monitorea el **bit 0**, asociado a la **entrada digital 1**, que corresponde a la señal externa de **Marcha/Paro** del variador.

Como se observa en la imagen anterior, la activación del **bit 2 del registro ETA (motor en marcha)** y del **bit 0 del registro IL1R (entrada digital de Marcha/Paro)** indica que se ha presionado correctamente el botón Start desde la botonera **HS-001**. Adicionalmente, se verifica que el **bit 3 de ETA (falla del variador)** permanezca inactivo, confirmando la ausencia de fallas en el variador de frecuencia. Por otro lado, la señal **ZSO_001** confirma que la válvula motorizada se encuentra en posición completamente abierta, y la señal **ENABLE_VFD** indica que el variador está habilitado para operación. Cuando todas estas condiciones lógicas son verdaderas, se activa la bobina **Motor_Forward**, la cual representa que el motor ha iniciado su marcha efectiva. Esta señal de confirmación permite continuar con la secuencia de arranque del sistema de control, habilitando la regulación automática de velocidad del variador hasta alcanzar el caudal objetivo de 300 GPM.

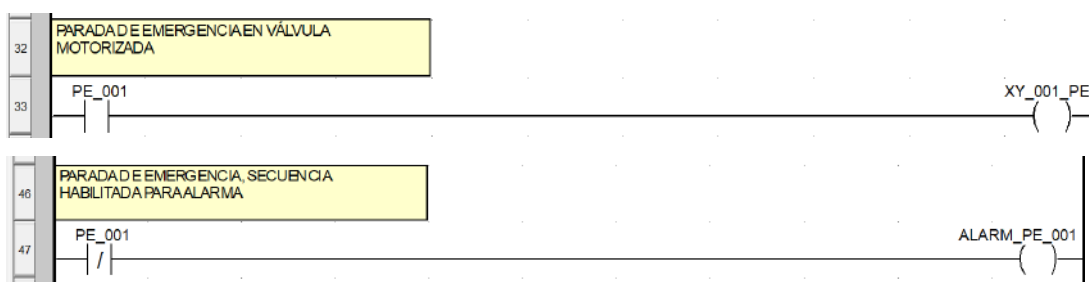


Figura 177 Ladder, Parada de emergencia. Fuente. Elaboración propia.

Ante condiciones anómalas durante la operación (incendios en el entorno, fugas, funcionamiento sin fluido u otras situaciones de riesgo) el operador

podrá interrumpir inmediatamente el proceso pulsando el botón de parada de emergencia (**ESD-001**). Esta acción principalmente **detiene el motor de la bomba** y activa el **cierre de la válvula motorizada de corte (XY-001)**.

Al activarse el botón de emergencia (**PE**), se genera directamente la señal **XY_001_PE**, cableada de forma independiente al actuador de la válvula. Esta señal tiene prioridad sobre cualquier otra orden de control en ese instante, garantizando una respuesta rápida y autónoma respecto al PLC ante situaciones críticas. Asimismo, la pérdida de la señal **ABASTEC** provocada por la activación del PE obliga al sistema a detener el funcionamiento de la bomba de forma inmediata.

Simultáneamente, se activa la secuencia de alarma correspondiente mediante la señal **ALARM_PE_001**, la cual notifica la condición de emergencia al sistema de control, como se muestra en la figura anterior, activando la sirena de emergencia con una señal intermitente.

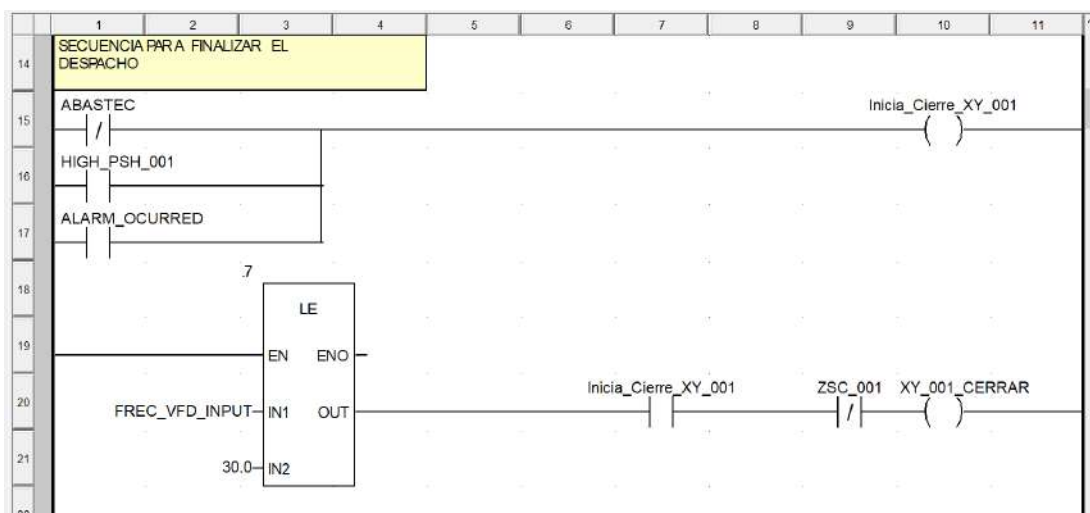


Figura 178 Ladder, termino de despacho. Fuente. Elaboración propia.

Una vez que el proceso de despacho se encuentra estabilizado, la secuencia de finalización se activa a partir de la señal del interruptor de presión **HIGH_PSH_001**, la cual indica que se ha producido un pico de presión en la línea, consecuencia directa del cierre automático de la **pistola Wiggins** al detectarse el llenado completo del tanque.

Adicionalmente, la secuencia de termino puede activarse por otras condiciones, como la pérdida de la señal permisiva **ABASTEC** (proporcionada

por el sistema Orpak, que indica la cancelación o cierre de la transacción), o la detección de una falla general del sistema, reflejada en la señal **ALARM_OCURRED**. Estos eventos están integrados en la lógica en paralelo, tal como se muestra en la figura anterior.

Durante esta secuencia, el variador de frecuencia inicia la desaceleración de la bomba, y al descender la frecuencia por debajo de 30 Hz, se envía la orden de cierre a la válvula motorizada **XY-001**, aligerando el golpe de ariete. Esta orden se mantiene activa hasta que el **sensor de posición de cierre (ZSC_001)** confirma que la válvula ha alcanzado su posición completamente cerrada. En ese momento, la señal de cierre se desactiva automáticamente, completando de forma segura y controlada el proceso de parada.

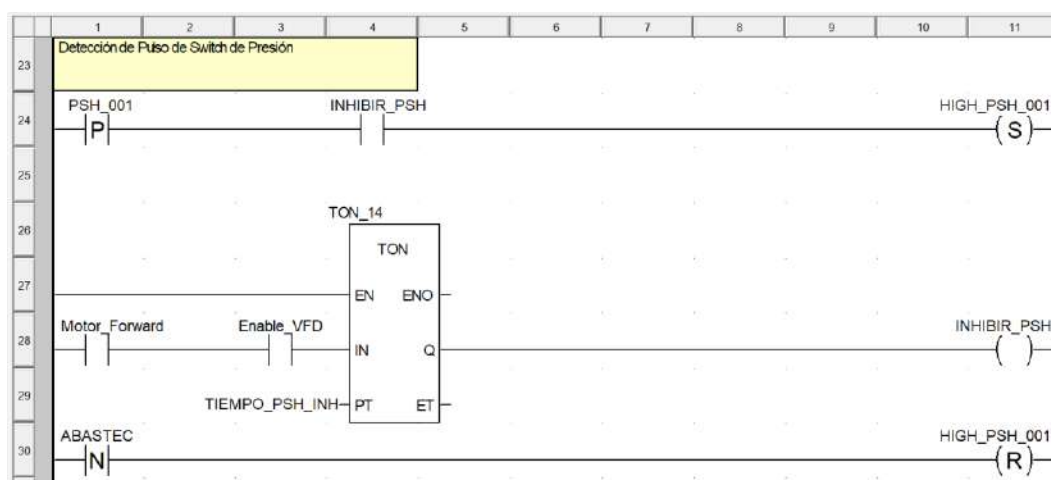


Figura 179 Ladder, inhibir la señal switch de presión en el arranque. Fuente. Elaboración propia.

Consideraciones adicionales: Dado que la señal de aumento de presión detectada por el switch es de carácter transitorio, se implementa un latch para mantenerla activa durante un periodo definido en la señal **HIGH_PSH_001**, como se ilustra en la figura anterior.

Por otro lado, al inicio del despacho, pueden generarse picos de presión momentáneos producto de la entrada en operación de la bomba, los cuales podrían activar erróneamente el switch de presión y generar una detención prematura del proceso. Para evitar estas falsas activaciones, se ha incorporado una inhibición temporal de 10 segundos (TIEMPO_PSH_INH), durante la cual la señal del switch de presión es ignorada. Esta función se implementa mediante un temporizador, tal como se muestra en la figura anterior.

Gestión de alarmas:

En caso de producirse una condición de alarma, el sistema cuenta con un conjunto definido de eventos críticos, los cuales están debidamente registrados en el listado de alarmas mostrado en el diagrama Ladder. Ante la activación de cualquiera de estas alarmas, se ejecuta automáticamente la secuencia de apagado del sistema, **deteniendo el funcionamiento del motor y cerrando la válvula motorizada**, a fin de preservar la seguridad operativa y evitar posibles daños a los equipos o al personal.

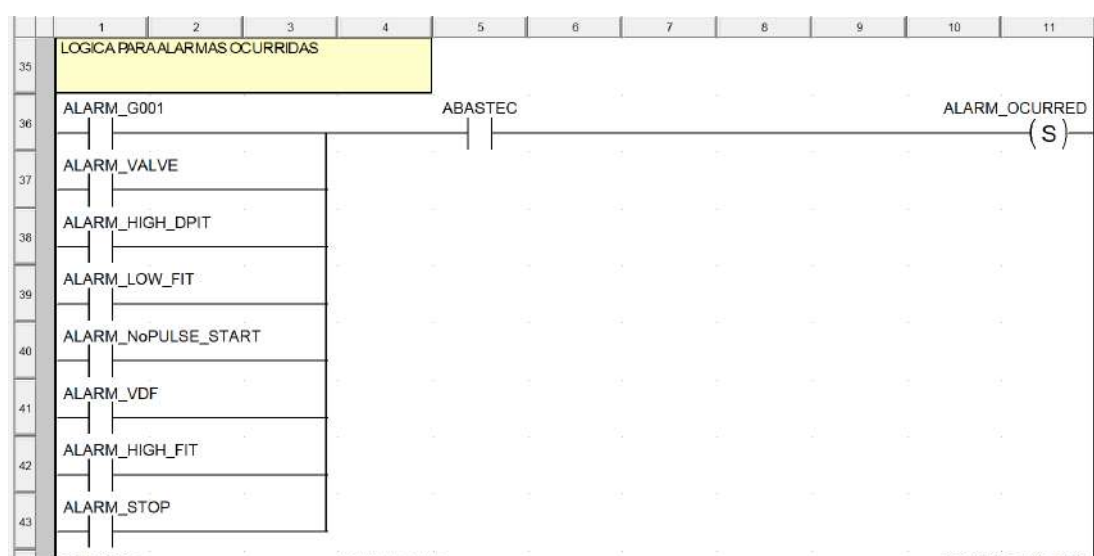


Figura 180 Ladder, listado de alarmas. Fuente. Elaboración propia.

En caso de que ocurra una falla durante el proceso de abastecimiento, para retomar el despacho, es necesario reiniciar todo el procedimiento como una nueva transacción, lo cual implica volver a autenticar el operador, ingresar nuevamente los datos del camión minero en el sistema Orpak y presionar el botón de inicio en el contómetro (FQIT-001). En este reinicio, se vuelve a habilitar la señal ABASTEC, la cual es esencial para autorizar el encendido de la bomba y la apertura de la válvula motorizada.

Las alarmas mencionadas son registradas en el software **Vijeo Designer**, lo que permite su visualización en la pantalla del HMI para facilitar el monitoreo y diagnóstico por parte del operador.

	Variable	Grupo de alarmas	Origen de datos	Dirección de dispositivo	Mensaje
1	PLC_EquipoModbus01.ALARM_G001	GrupoDeAlarmas1	Externo	%UV46.241.8.255.BOOL.1542822048	Se desconecto Scully
2	PLC_EquipoModbus01.ALARM_HIGH_DPIT	GrupoDeAlarmas1	Externo	%UV46.202.8.255.BOOL.1542822048	Filtro en el limite de saturación
3	PLC_EquipoModbus01.ALARM_HIGH_FIT	GrupoDeAlarmas1	Externo	%UV46.211.8.255.BOOL.1542822048	Alto caudal en línea
4	PLC_EquipoModbus01.ALARM_LOW_FIT	GrupoDeAlarmas1	Externo	%UV46.203.8.255.BOOL.1542822048	Bajo caudal en línea
5	PLC_EquipoModbus01.ALARM_NoPULSE_START	GrupoDeAlarmas1	Externo	%UV46.206.8.255.BOOL.1542822048	No se presiono Start
6	PLC_EquipoModbus01.ALARM_PE_001	GrupoDeAlarmas1	Externo	%UV46.200.8.255.BOOL.1542822048	Parada de Emergencia activada
7	PLC_EquipoModbus01.ALARM_STOP	GrupoDeAlarmas1	Externo	%UV46.234.8.255.BOOL.1542822048	Presionar Stop
8	PLC_EquipoModbus01.ALARM_VALVE	GrupoDeAlarmas1	Externo	%UV46.207.8.255.BOOL.1542822048	Falla en Valvula Motorizada
9	PLC_EquipoModbus01.ALARM_VDF	GrupoDeAlarmas1	Externo	%UV67.85.8.255.EBOOL.1542822048	Falla en Variador

Figura 181 Programa Vijeo, Grupo de alarmas. Fuente. Elaboración propia.

Estas alarmas se visualizarán en la pantalla HMI mediante un **resumen de alarmas**, como se muestra en la figura siguiente.



Figura 182 Resumen de alarmas de software Vijeo Designer. Fuente. Elaboración propia.

Alarma de válvula:

El sistema monitorea el correcto desplazamiento de la válvula motorizada tras recibir una orden de apertura o cierre. La alarma **ALARM_VALVE** se activa bajo cualquiera de los siguientes tres escenarios, con un tiempo máximo de tolerancia de 10 segundos:

- Falla por atascamiento durante el recorrido:

Si al ejecutar el comando de apertura o cierre no se recibe señal ni del interruptor de posición cerrada (ZSC_001) ni del interruptor de posición abierta (ZSO_001), el sistema interpreta que la válvula se ha quedado atascada en una posición intermedia. Si esta condición persiste por más de 10 segundos, se genera la alarma de falla de actuación en la pantalla HMI.

- Falla al abrir la válvula:

Si la válvula se encuentra cerrada (confirmado por ZSC_001) y se emite el comando de apertura, el sistema espera que la señal de posición abierta (ZSO_001) se active en un tiempo máximo de 10 segundos. De no ocurrir, se considera una falla en el proceso de apertura, activando la alarma en la pantalla HMI.

- Falla al cerrar la válvula:

Si la válvula se encuentra abierta (confirmado por ZSO_001) y se emite el comando de cierre, el sistema espera que la señal de posición cerrada (ZSC_001) se active dentro del mismo intervalo de 10 segundos. De no cumplirse, se activa la alarma por falla en el cierre en la pantalla HMI.

Tal como se muestra en la figura siguiente, la lógica del **temporizador se interrumpe** si la válvula alcanza su posición final dentro del tiempo establecido. En caso contrario, se activa la alarma **ALARM_VALVE** para alertar al operador sobre el mal funcionamiento del actuador motorizado.

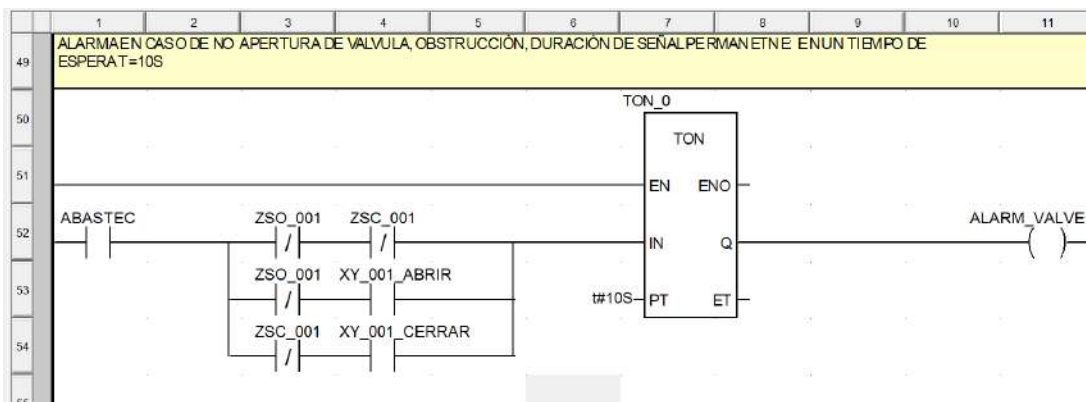


Figura 183 Ladder, alarma de válvula. Fuente. Elaboración propia.

Alarma de saturación de filtro micrónico:

Entre los extremos del filtro micrónico se encuentra instalado un transmisor de presión diferencial (DPIT), encargado de monitorear la pérdida de carga a través del filtro en un rango de 0 a 50 psi. Tal como se muestra en la figura siguiente, se ha implementado un bloque comparador que evalúa continuamente el valor de presión diferencial.

Cuando esta presión supera el umbral configurado como Minima_DPIT (establecido en **40.0 psi**), se activa el bit **ALARM_HIGH_DPIT**, lo que indica que el filtro ha alcanzado un nivel crítico de saturación por acumulación de

partículas. Este incremento de presión diferencial refleja una obstrucción progresiva en el medio filtrante y genera la alarma correspondiente en el sistema, mostrándose en la pantalla HMI.

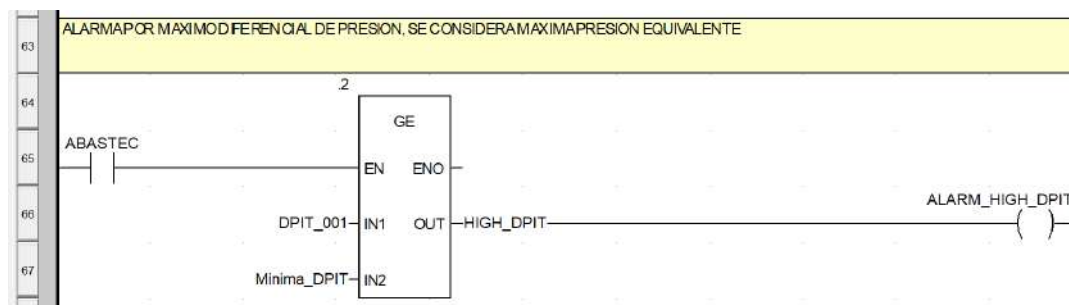


Figura 184 Ladder, alarma de saturación de filtro micrónico. Fuente. Elaboración propia.

Durante cada operación de despacho, es obligatorio verificar el nivel de saturación del filtro para anticipar el reemplazo programado de los cartuchos. Al alcanzarse el umbral de 40.0 psi, el PLC activará la alarma sonora YA-001, alertando al operador sobre la condición de alta presión diferencial.

En caso se requiera continuar con el abastecimiento a pesar de la saturación del filtro, el operador podrá habilitar la línea de bypass correspondiente, según lo establecido en los procedimientos operativos.

Alarma de bajo caudal:

Para garantizar el correcto funcionamiento del gabinete y evitar que la bomba opere sin fluido o bajo nivel de flujo, se ha implementado una lógica de supervisión en el código de control.

En esta sección, se evalúan las condiciones operativas de la bomba. Si la frecuencia de operación supera los 55.0 Hz (activando la señal Motor_High_RPM) y el caudal se mantiene por debajo de 150 GPM (activando la señal Low_FIT), el sistema verifica además como condición adicional, que el motor esté efectivamente en marcha mediante la señal Motor_Forward.

Si estas tres condiciones se cumplen simultáneamente, como se muestra en la figura siguiente, se activa un temporizador de 30 segundos. Al finalizar este intervalo, si las condiciones persisten, el sistema interpreta que existe una posible obstrucción en la línea o ausencia de fluido en la succión, ya que el variador intenta compensar el bajo flujo incrementando la velocidad del motor (según la acción del algoritmo PID). Como consecuencia, se activa el bit

ALARM_LOW_FIT, notificando una condición anómala de caudal insuficiente pese a la alta demanda del sistema.

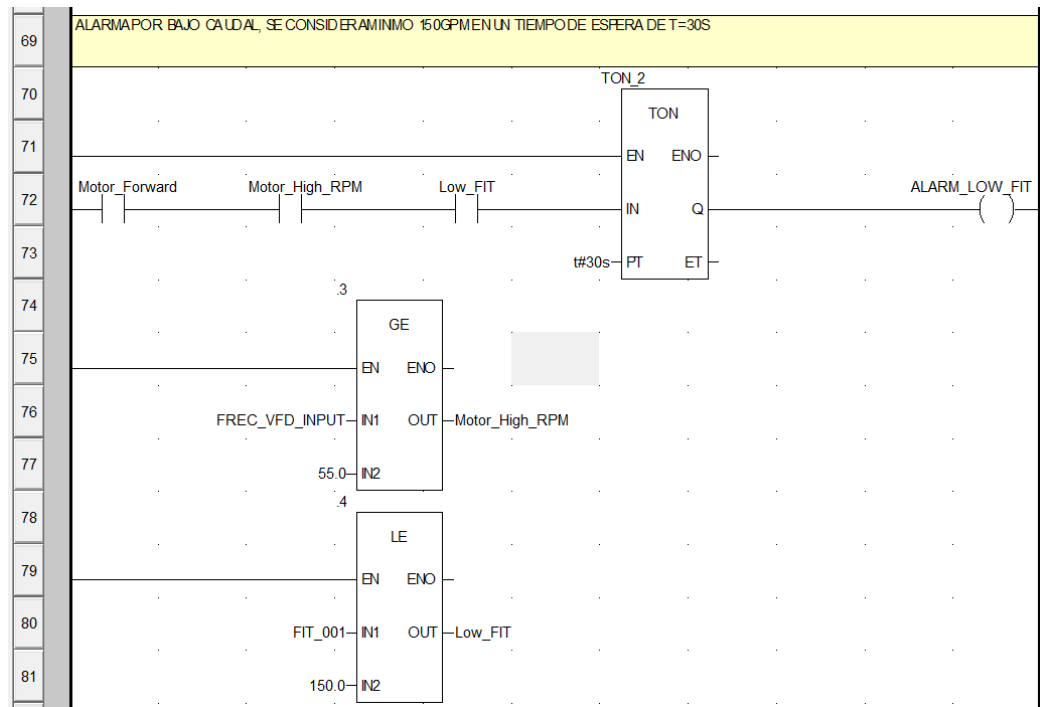


Figura 185 Ladder, alarma de bajo caudal. Fuente. Elaboración propia.

Alarma de no presionar Start:

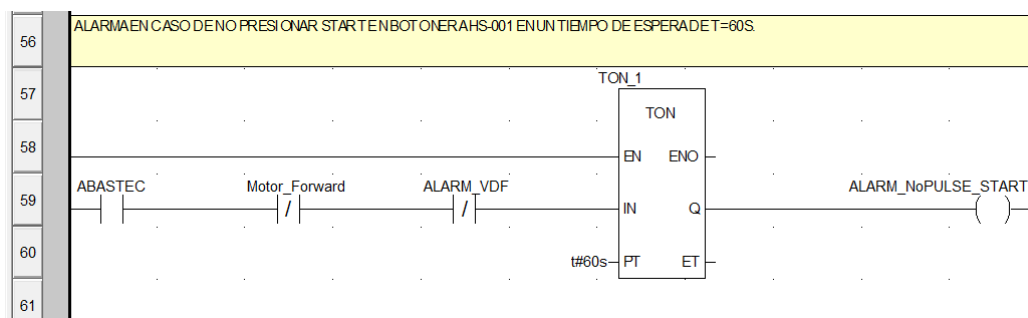


Figura 186 Ladder, alarma de no presionar Start. Fuente. Elaboración propia.

Requerimiento del sistema Orpak: si este sistema no recibe pulsos del contómetro durante aproximadamente 1 minuto, interpreta que el despacho no se llevará a cabo y deja de enviar la señal ABASTEC. Para gestionar esta condición, se implementó la siguiente secuencia, que también permite al PLC monitorear el proceso. Si, luego de ingresar los datos del camión, transcurre 1 minuto sin que se presione el botón Start de la botonera HS-001, el sistema asumirá que el despacho no se realizará, activando la bobina

ALARM_NoPULSE_START. Esta información será detectada por el PLC, permitiendo su visualización en el HMI.

Alarma de exceso de flujo:

Para proteger la pistola Wiggins y preservar su integridad funcional, se ha establecido un límite de flujo de 320 GPM, evitando así superar su capacidad máxima de 350 GPM y prevenir posibles daños mecánicos.

Como se muestra en la figura anterior, esta limitación se implementa mediante un comparador que activa el bit High_FIT cuando el flujo excede el umbral establecido. Además, como redundancia, se verifica que el motor esté en funcionamiento a través de la señal Motor_Forward. Si el flujo elevado se mantiene por más de 10 segundos, se activará la bobina **ALARM_HIGH_FIT**, indicando una condición de exceso de flujo en el sistema.

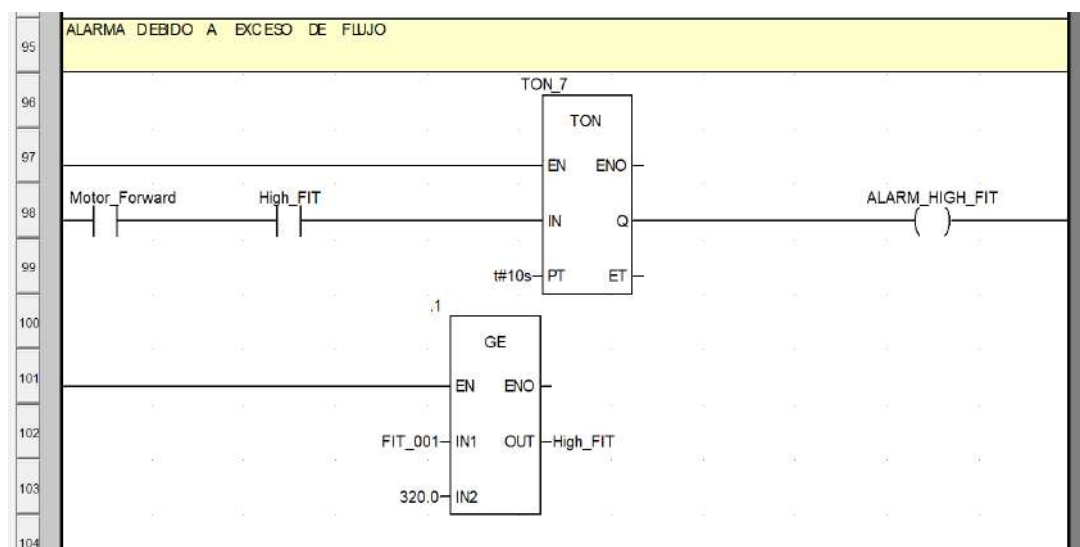


Figura 187 Ladder, alarma de exceso de flujo. Fuente. Elaboración propia.

Alarma por Stop

Ante la pulsación del botón Stop, el sistema finaliza automáticamente el proceso de despacho, ejecutando el apagado de la bomba y el cierre de la válvula motorizada XY-001.

Cuando el motor se ordena detener a través del botón Stop, la señal Motor_Forward se desactiva de inmediato; sin embargo, la señal Enable_VFD permanece activa por un breve instante. Esta condición transitoria es utilizada para identificar que la detención del motor ha sido provocada específicamente por el botón Stop.

En la lógica, primero se detectan todas las paradas del motor a través de la señal `Detector_Parada`, la cual se activa cuando se apaga `Motor_Forward` (detector de la flanco de bajada). Luego, dentro de ese conjunto de eventos, se discrimina el caso particular asociado al botón `Stop` mediante una lógica AND que evalúa tres condiciones simultáneas indicado en la figura siguiente, señal `Detector_Parada` activa, `Motor_Forward` desactivada y `Enable_VFD` por un instante, la coincidencia de estas condiciones indica que la parada ha sido provocada manualmente a través del botón `Stop`. Haciendo uso del Temporizador Impulso, para ampliar ligeramente el pulso. Luego indicarlo en la pantalla HMI.

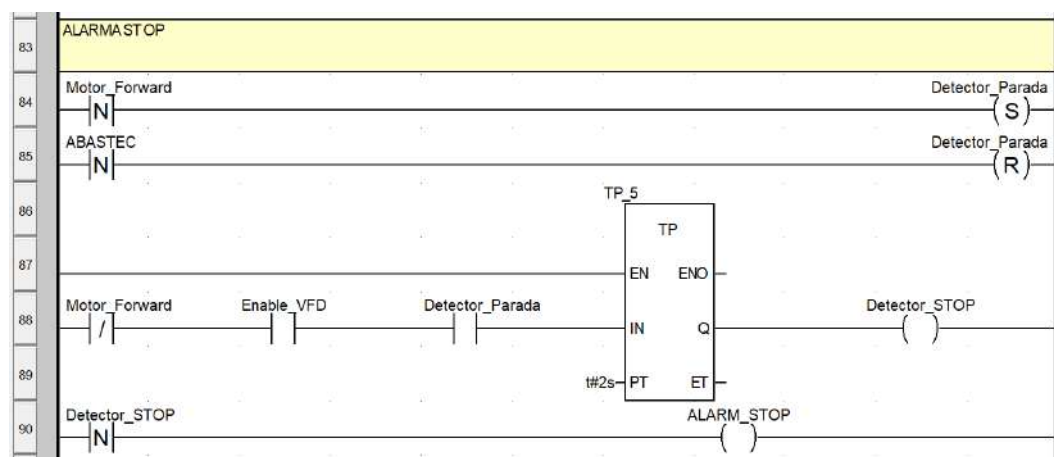


Figura 188 Ladder, alarma por presionar Stop. Fuente. Elaboración propia.

Alarma de desconexión de Scully:

Si el sistema `Scully`, encargado de la detección de puesta a tierra para protección, está desconectado, no se permitirá el encendido del sistema. En caso de que la desconexión ocurra durante la operación, se activará automáticamente la secuencia de apagado para garantizar la seguridad del proceso, adiciona un contacto en serie de la señal `ABAST`, para que el monitoreo se realice al empezar un despacho.

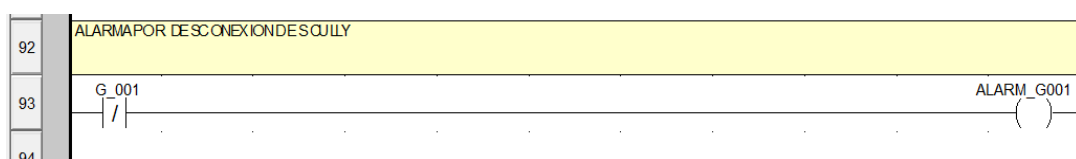


Figura 189 Ladder, alarma desconexión de Scully. Fuente. Elaboración propia.

SKID_ALARMA_AUX

La siguiente secuencia, SKID_ALARMA_AUX, está programada en Texto Estructurado (ST) y se encarga del procesamiento de condiciones auxiliares, así como de la lógica asociada a la activación de la sirena de alarma.

```
(*Secuencia Alarma*)
TON_16 (IN := NOT AUX1,
        PT := 2*TIME_PULSE,
        Q => AUX1);

TOF_0 (IN := AUX1,
        PT := TIME_PULSE,
        Q => AUX2);

YA_001 := AUX2 AND (ALARM_PE_001 OR ALARM_HIGH_DPIT);
```

Figura 190 Secuencia para Sirena alarma. Fuente. Elaboración propia.

Como se muestra en la figura anterior, se emplean dos temporizadores: TON y TOFF. El primer temporizador (TON) se retroalimenta con el negado de su propia salida, generando un pulso transitorio de corta duración cada ciclo de $2 \times \text{TIME_PULSE}$, es decir, cada 6 segundos. Este pulso periódico se utiliza como entrada para el segundo temporizador (TOFF), el cual aplica un retardo a la desconexión con una duración igual a TIME_PULSE (3 segundos). Como resultado, se obtiene una señal oscilante en AUX2, con un ciclo activo de 3 segundos encendido y 3 segundos apagado. Esta señal pulsante es utilizada para activar la alarma sonora YA_001, en caso de que se detecte alguna de las siguientes condiciones críticas: ALARM_PE: activación del botón de parada de emergencia o ALARM_HIGH_DPIT: presión diferencial en el filtro micrónico igual o superior a 40 PSI, indicando saturación.

Esta lógica de parpadeo intermitente se visualiza en la secuencia mostrada en la figura anterior y permite alertar al operador de manera clara.

```
(* Conversión de temperatura *)
TIT_001_F := TIT_001 * 9.0 / 5.0 + 32.0;
```

Figura 191 Conversión Celsius a Fahrenheit. Fuente. Elaboración propia.

Adicionalmente, se implementa una conversión auxiliar de temperatura, transformando el valor en grados Celsius a grados Fahrenheit, con el fin de facilitar su visualización en ambas unidades dentro de la interfaz HMI o para reportes específicos.

SKID_CONTROL

La segunda secuencia, denominada **SKID_CONTROL**, está programada en diagrama de bloques (FBD). Su función es controlar la recepción de señales de los sensores analógicos, regular el lazo de control cerrado PID durante el despacho y manejar la lectura y escritura del registro de velocidad del variador de frecuencia ATV630.

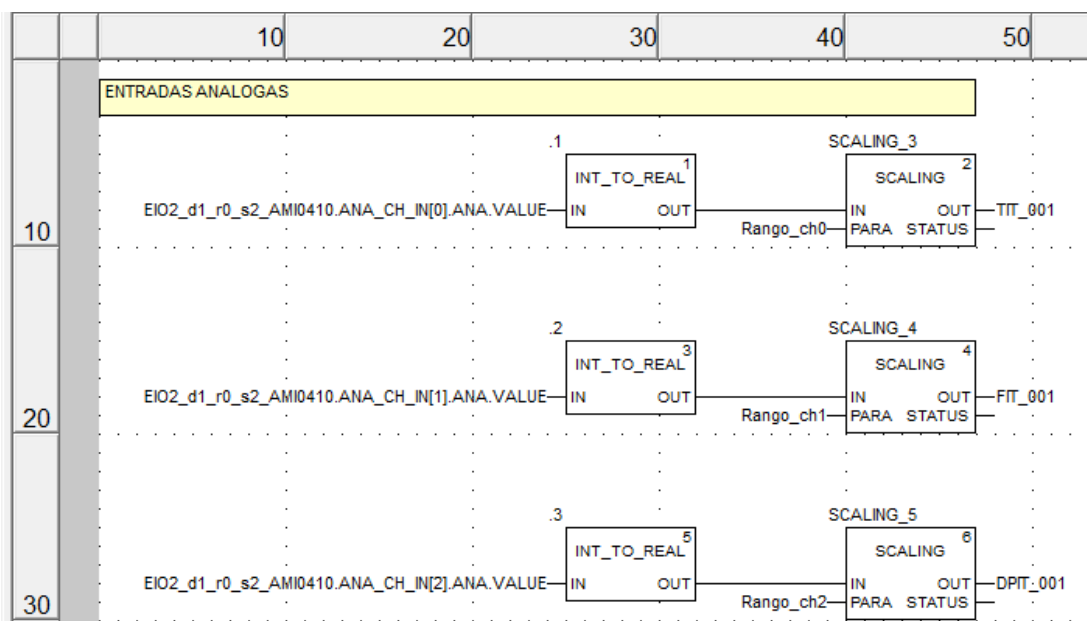


Figura 192 FBD, lectura de sensores analógicos de 4-20mA. Fuente. Elaboración propia.

Como se muestra en la figura anterior, se utiliza el bloque INT_TO_REAL para convertir un dato entero de 16 bits a un dato de punto flotante de 32 bits. Esta conversión permite un manejo más preciso de la señal, facilitando su procesamiento en operaciones matemáticas y de control. Posteriormente, la señal convertida es escalada en el siguiente bloque, donde se definen las variables de rango de operación, como se ilustra en la siguiente imagen.

Rango_ch0	Para_SCALING		Rango de entrada salida para canal 0
in_min	REAL	0.0	
in_max	REAL	10000.0	
out_min	REAL	0.0	
out_max	REAL	100.0	
clip	BOOL	FALSE	
Rango_ch1	Para_SCALING		Rango de entrada salida para canal 1
in_min	REAL	0.0	
in_max	REAL	10000.0	
out_min	REAL	0.0	
out_max	REAL	353.2	
clip	BOOL	FALSE	
Rango_ch2	Para_SCALING		Rango de entrada salida para canal 2
in_min	REAL	0.0	
in_max	REAL	10000.0	
out_min	REAL	0.0	
out_max	REAL	50.0	
clip	BOOL	FALSE	

Figura 193 Rango de operación de sensores analógicos de 4-20mA. Fuente. Elaboración propia.

La secuencia de control del regulador de velocidad entrará en operación únicamente cuando se active la señal **Motor_Forward**, la cual debe cumplir varias condiciones previamente mencionadas para su activación. En caso contrario, la secuencia no se ejecutará y, mientras permanezca inactiva, la variable **FREC_VFD_OUT**, encargada de indicar la velocidad al variador de frecuencia, se mantendrá en cero, como se muestra en la siguiente figura.

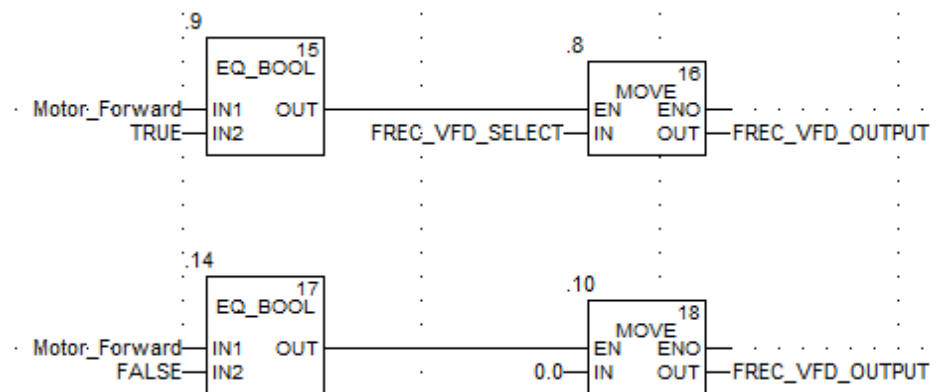


Figura 194 Secuencia asignación FREC_VFD_OUTPUT. Fuente. Elaboración propia.

Esa última línea actúa como una redundancia de seguridad, ya que, durante todo el proceso complementario al despacho (es decir, durante la habilitación y la culminación del despacho) la variable que controla la velocidad del motor se mantendrá en cero, ya que también el bloque PID, hasta no ser habilitado, también mantiene su **salida en 0**. Sin embargo, como buena práctica, se implementa esta redundancia para evitar posibles inconvenientes en la operación del sistema.

En caso de que la señal Motor_Forward se active, se iniciará la secuencia de regulación mediante un bloque PID, como se muestra en la siguiente figura. Este bloque es ampliamente utilizado en la industria debido a su eficiente desempeño en la retroalimentación de sensores en lazo cerrado, proporcionando múltiples beneficios para el control del sistema.



Figura 195 Bloque PID. Fuente. Elaboración propia.

El bloque **PID** requiere de varios parámetros para su configuración y correcto funcionamiento.

- **Set Point (SP):** Se asigna la variable SP_Caudal, que representa el valor de referencia del flujo deseado para el abastecimiento, fijado en **300 GPM**.
- **Variable de Proceso (PV):** Recibe la retroalimentación del sistema a través de la variable **FIT_001**, la cual proviene del transmisor de flujo diferencial por placa de orificio. Esta señal representa la medición en tiempo real del caudal en la línea de abastecimiento.
- **Modo de Operación (MODE):** Determina el tipo de control a aplicar. En este caso, debido a que la señal de flujo basada en presión es inherentemente ruidosa, la componente derivativa (D) del controlador PID introduce oscilaciones no deseadas en el lazo de control. Esto ocurre porque el término derivativo amplifica pequeñas variaciones en la señal, generando respuestas abruptas que desestabilizan el sistema.

Por esta razón, para este proceso se emplea un **control PI** (Proporcional-Integral), eliminando la componente derivativa y asegurando una regulación más estable del caudal.

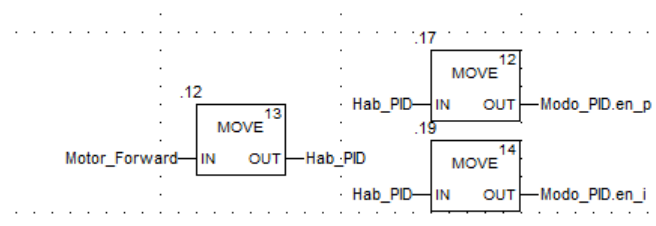


Figura 196 Habilidad del bloque PID. Fuente. Elaboración propia.

- **Parámetros de Control (PARA):** Se asignan los parámetros de control del PID, tales como la ganancia proporcional (Gain), el tiempo integral (Ti) y el tiempo derivativo (Td), los cuales determinan el comportamiento de la respuesta del sistema. Adicionalmente, se configuran los límites de anti-windup, que definen los valores mínimo y máximo de la salida del controlador, evitando la acumulación excesiva del término integral cuando el actuador alcanza sus límites operativos.

Param_PID		Para_PID	
gain	REAL	0.49	←
ti	TIME	t#8s	
td	TIME	t#0s	
td_lag	TIME		
ymax	REAL	60.0	
ymin	REAL	0.0	

Figura 197 Valores del bloque PID. Fuente. Elaboración propia.

Nota: Los parámetros PID presentados en la figura anterior, se mostrará a continuación la manera que se obtuvieron.

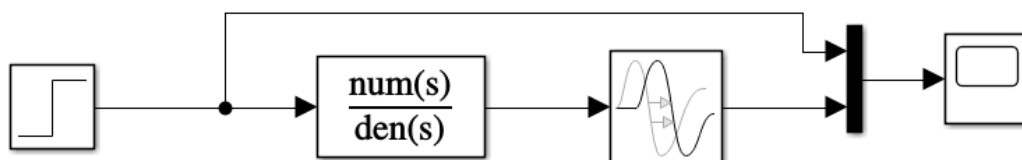


Figura 198 Simulación del sistema ante una señal escalón. Fuente. Elaboración propia.

Tal como se explicó en el marco teórico, al no contar con un modelo matemático preciso del sistema de abastecimiento, se recurre al método empírico propuesto por Ziegler y Nichols. Para ello, se aplicó manualmente una señal escalón de 15 Hz al variador de frecuencia, registrándose la respuesta dinámica del sistema, tal como se muestra en la figura siguiente:

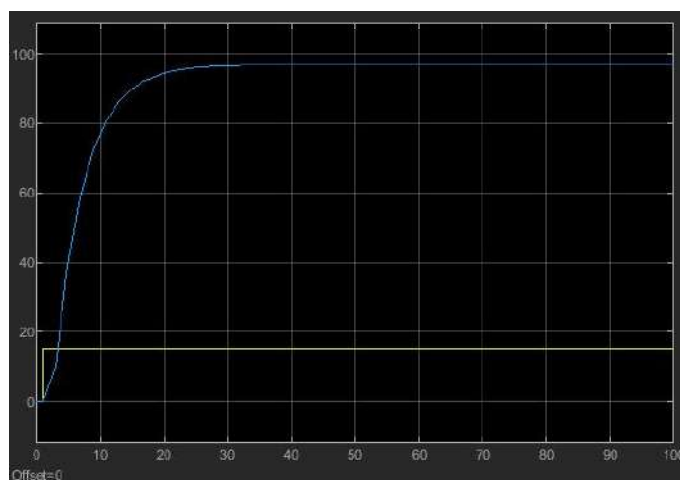


Figura 199 Respuesta escalón ante entrada de 15 Hz. Fuente. Elaboración propia.

La salida alcanzó un valor estacionario de aproximadamente **97 GPM**, lo que permite aproximar el comportamiento del sistema a un modelo de primer orden. Esta aproximación servirá como base para la estimación de los parámetros necesarios para la sintonización del controlador PID.

El modelo simplificado se expresa como:

$$G_{P(s)} = \frac{K * e^{-Ls}}{\tau * s + 1}$$

Donde:

- *K es la ganancia del proceso.*
- *τ es la constante de tiempo.*
- *L es el tiempo muerto (retardo) del sistema.*

A partir de la respuesta escalón de 15 Hz y la medición de la salida (97 GPM), se calcula la ganancia, y se estima los parámetros de tiempo a partir de la curva de respuesta.

$$K = \frac{97\text{GPM} - 0\text{GPM}}{15\text{Hz} - 0\text{Hz}} \quad 5\tau = 24\text{seg}$$

$$K \approx 6.46 \quad \tau = 4.8\text{seg} \quad L = 1\text{seg}$$

Por lo tanto, el modelo dinámico simplificado de primer orden queda definido como:

$$G_{P(s)} = \frac{6.46 * e^{-1s}}{4.8 * s + 1}$$

Dado que se trata de un sistema de lazo cerrado para el control de **flujo**, se ha optado por emplear una sintonización **tipo PI** utilizando el método empírico de Ziegler y Nichols. Esta elección se justifica debido a que la incorporación del término derivativo puede generar inestabilidad o amplificación de ruido en presencia de pequeñas fluctuaciones en la señal de medición, lo cual no es deseable en aplicaciones de caudal. Por ende, empleamos las siguientes fórmulas:

$$K_p = 0.9 * \frac{\tau}{K * L} = 0.9 * \frac{4.8}{6.46 * 1} \quad \tau_i = \frac{L}{0.3} = \frac{1}{0.3}$$

$$K_p \approx 0.66 \quad \tau_i \approx 3.33$$

Para implementar estos valores en el simulador, se utilizan:

$$K_p \approx 0.66 \quad K_i = \frac{K_p}{\tau_i} = \frac{0.66}{3.33}$$

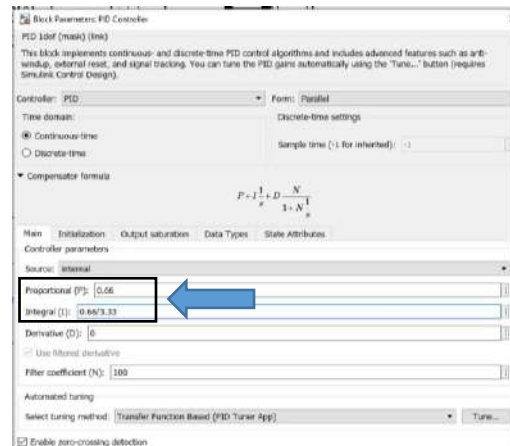


Figura 200 Parámetros de Bloque PID. Fuente. Elaboración propia.

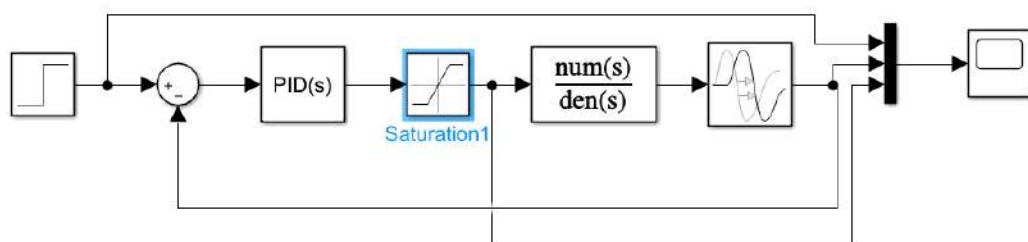


Figura 201 Simulación de sistema de abastecimiento. Fuente. Elaboración propia.

Aplicando los parámetros obtenidos mediante el método de Ziegler y Nichols en nuestra simulación desarrollada en **Simulink**, se obtiene la siguiente: respuesta del sistema.

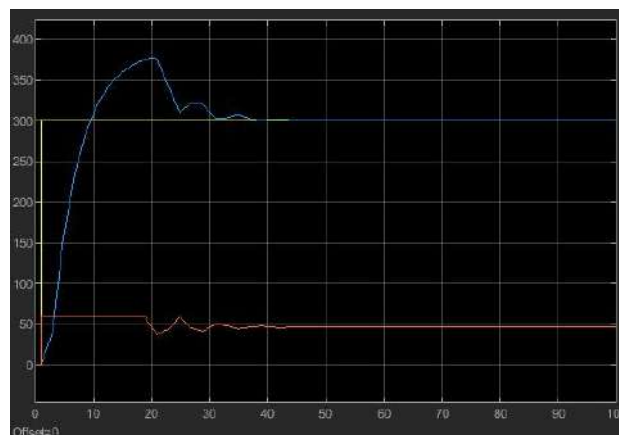


Figura 202 Respuesta del sistema con controlador PID
(Fuente propia)

Es importante señalar que el modelo utilizado en la simulación representa una versión simplificada del sistema real, por lo que solo conserva una similitud aproximada con su comportamiento dinámico. En ese sentido, los valores

iniciales estimados mediante el método de Ziegler y Nichols ($K_p \approx 0.66$ y $\tau_i \approx 3.33$) deben considerarse como referenciales.

En campo, el ajuste del controlador se realiza de forma progresiva, iniciando con el incremento del valor de proporcional K_p desde cero, tomando como referencia el valor estimado en el método de Ziegler y Nichols. Durante este proceso, se evalúa la intensidad de la acción proporcional para acercar la variable de proceso al valor deseado.

Una vez alcanzada una respuesta razonable, aunque aún con un error estacionario (offset) característico del control proporcional, se procede a introducir el término integral K_i . Este componente tiene como finalidad eliminar dicho offset y afinar la respuesta del sistema.

$$K_p \approx 0.49 \quad \text{y} \quad \tau_i \approx 8$$

Este ajuste se llevó a cabo con el propósito de mejorar ligeramente la respuesta del sistema.

Usando dichos parámetros en el modelo de Simulink, se simuló la respuesta para validar su desempeño del control. La respuesta obtenida permite comparar el comportamiento del lazo de control bajo condiciones ideales con los valores ajustados en campo, visualizando la dinámica general del sistema.

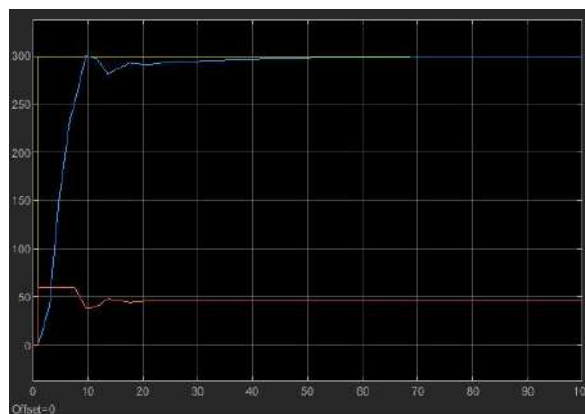


Figura 203 **Respuesta del sistema con controlador PID con parámetros introducidos en el M580.**
Fuente. Elaboración propia.

Estos valores son los que finalmente se asignan al bloque PID del controlador M580 del sistema.

Una vez configurados los parámetros del PID, el sistema queda habilitado para funcionar en lazo cerrado, ajustando la frecuencia del variador según el caudal medido de manera automática. No obstante, también se contempló la posibilidad de operar en lazo abierto desde la pantalla HMI.



Figura 204 Selección de tipo de control automático o manual. Fuente. Elaboración propia.

Para los casos en los que se desee deshabilitar la autorregulación del bloque PID y operar en lazo abierto, es decir, asignar directamente un porcentaje fijo de la potencia de salida, se utiliza la variable `FREC_MANUAL`. Esta variable es enviada desde la pantalla HMI, donde se dispone de un selector que permite al operador elegir el tipo de control a emplear mediante la variable `VARIABLE_SELECTOR`.

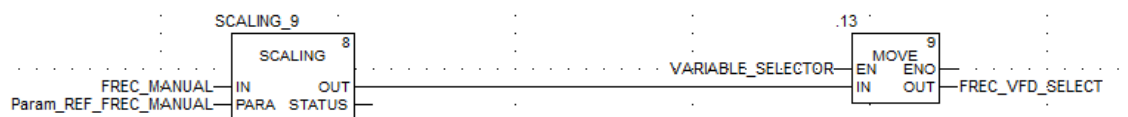


Figura 205 Control en lazo abierto. Fuente. Elaboración propia.

En modo manual, el operador ingresa un valor porcentual a través de la HMI, el cual es escalado internamente en un rango de 0 a 60 Hz, asignándose, así como señal de control directa al variador de frecuencia.

Param_REF_FREC_MANUAL	Para_SCA...		
in_min	REAL	0.0	
in_max	REAL	100.0	
out_min	REAL	0.0	
out_max	REAL	60.0	
clip	BOOL		

Figura 206 Variable `Param_REF_FREC_MANUAL`. Fuente. Elaboración propia.

Una vez calculado en el código el valor de consigna de frecuencia que será enviado al variador de velocidad para controlar la bomba, se realiza la lectura de la frecuencia real de salida como señal de retroalimentación. Esta variable es fundamental para monitorear en tiempo real el estado operativo del variador y validar que la frecuencia aplicada corresponde al valor solicitado por el sistema de control, tal como se muestra en la figura siguiente.

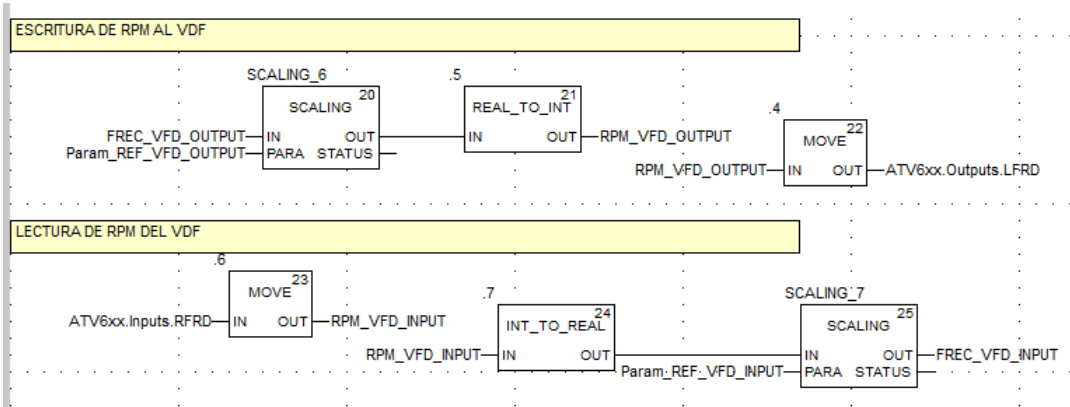


Figura 207 Selección de tipo de control automático o manual. Fuente. Elaboración propia.

Adicionalmente, se implementaron las siguientes pantallas en el HMI para facilitar el monitoreo del comportamiento del sistema de abastecimiento durante su operación.



Figura 208 Pantallas de HMI en software Vijeo Designer. Fuente. Elaboración propia.

3.6 Resultado de la actividad

En este trabajo se buscó la automatización del sistema de abastecimiento de combustible a alto caudal para camiones de carga en minería que ha permitido optimizar el proceso de despacho, reduciendo significativamente los tiempos de abastecimiento y mejorando la productividad de los equipos.

La implementación del nuevo sistema de abastecimiento, con un flujo regulado de 300 GPM, ha permitido reducir significativamente los tiempos de despacho de combustible. Con una correcta coordinación del operador, los tiempos de carga pueden disminuir a **16 minutos, e incluso llegar a 9 minutos en condiciones óptimas**, representando una mejora considerable en la productividad. Además, este sistema ha permitido abordar una de las principales limitaciones operativas en el proceso de carga de combustible de los camiones mineros. En los sistemas anteriores, la falta de un control preciso en el flujo generaba caudales variables entre 70 y 90 GPM, lo que resultaba en tiempos de despacho prolongados, con un promedio de **30 minutos** e incluso mayores en algunos casos. Esta variabilidad en el proceso no solo afectaba la eficiencia operativa, sino que también impactaba negativamente en la productividad general de la mina, incrementando los tiempos muertos y los costos asociados a la inactividad de los equipos. Con la optimización del sistema, se ha logrado estabilizar el flujo de abastecimiento, reduciendo significativamente los tiempos de carga y mejorando la disponibilidad de los camiones para las operaciones mineras.

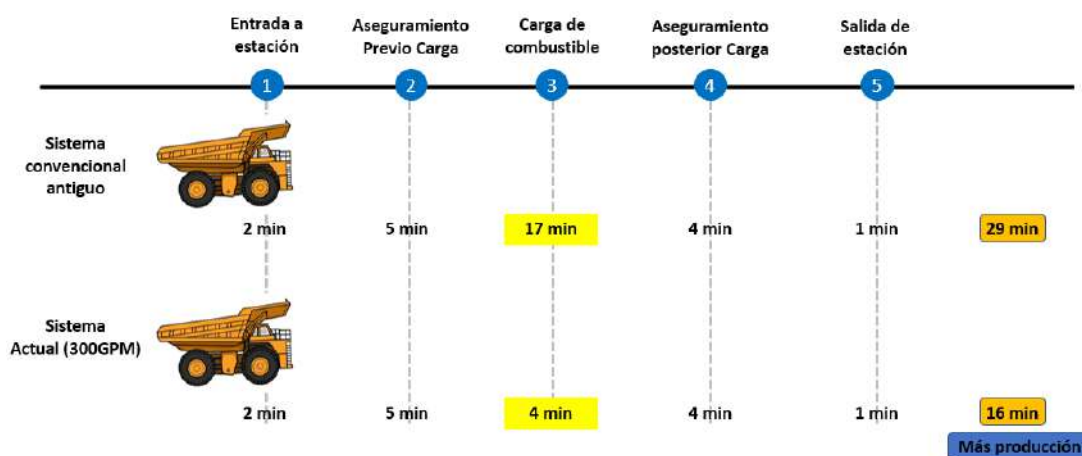


Figura 209 Tiempo de abastecimiento promedios de datos registrados. Fuente. Elaboración propia.

3.6.1 Resultados Técnicos de la Calibración, Parametrización e Integración de Equipos de Instrumentación

Otro resultado alcanzado, se logró la correcta **configuración y parametrización de los instrumentos** instalados en el skid, garantizando su integración con el controlador M580, para ello se realizaron pruebas de precomisionado y comisionado (**calibración y ajuste**). Se estableció la adecuada interacción entre el transmisor de flujo, el transmisor de presión diferencial, el transmisor de temperatura y el contómetro volumétrico, asegurando mediciones precisas y confiables para el monitoreo y control del sistema.

Con este propósito, se desarrolló un checklist de inspección para evaluar el estado físico de cada equipo, como se ejemplifica a continuación con el transmisor de presión diferencial.

Tabla 19 Check list de equipos.

ITEM	DESCRIPCIÓN	SI	NO	N.A	OBSERVACIÓN
1	Cuenta con identificación (TAG) y se encuentra correctamente ubicado.	✓			Ok
2	El instrumento se encuentra libre de polvo y grasa.	✓			Ok
3	Presenta daños mecánicos interna y externamente.		✓		Ok
4	El display de transmisor se encuentra correctamente (visible).	✓			Ok
5	Presenta voltaje la fuente de alimentación.	✓			Tensión 24.0 V
6	El instrumento y accesorios de soporte presentan indicios de corrosión.		✓		Ok
7	Presenta pernos, soportes, accesorios de montaje completos y debidamente ajustados.	✓			Ok
8	Presenta desprendimiento de pintura la carcasa del transmisor.		✓		Ok
9	El instrumento cuenta con las características para la zona en la cual se encuentra instalado (grado de protección y clasificación de equipo, EEx).	✓			Ok
10	El instrumento instalado es el que corresponde y se encuentra conforme según el proceso a medir.	✓			Ok
11	Las conexiones de accesorios (niple, unión universal, tee, codo, válvula de bloqueo), se encuentran con facilidad de acceso para bloqueo y llenado de sello líquido.	✓			Ok
12	Las tomas de presión se encuentra instaladas correctamente en la línea según corresponde.	✓			Ok
13	El acceso para el mantenimiento y operación son posibles y seguros.	✓			Ok

Fuente. Elaboración propia.

a) Transmisor de presión diferencial

Posteriormente, en un banco de prueba y utilizando un calibrador de procesos **Fluke 789**, un medidor de presión **Fluke 717 1000G** junto con una bomba de presión manual, se procedió con la calibración del instrumento.

El proceso de calibración se realizó aplicando presiones conocidas mediante un patrón de referencia confiable, con el objetivo de verificar la exactitud del transmisor en todo su rango operativo.

Registrando los datos que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 20 Registro de datos del proceso de calibración del transmisor de presión diferencial.

Lectura patrón en ascenso (PSI)	Lectura Unidad de prueba en ascenso (PSI)	Lectura de Corriente transmisor medida (mA)	Corriente teórica (mA)	Error ascenso (PSI)	Lectura patrón en descenso (PSI)	Lectura Unidad de prueba en descenso (PSI)	Lectura de Corriente transmisor medida (mA)	Corriente teórica (mA)	Error descenso (PSI)
0.000	0.004	4.001	4.000	0.004	50.000	50.012	20.004	20.000	0.012
12.500	12.512	8.004	8.000	0.012	37.500	37.511	16.004	16.000	0.011
25.000	25.013	12.004	12.000	0.013	25.000	25.015	12.005	12.000	0.015
37.500	37.508	16.003	16.000	0.008	12.500	12.514	8.004	8.000	0.014
50.000	50.012	20.004	20.000	0.012	0.000	0.009	4.003	4.000	0.009

Fuente. Elaboración propia.

En el argot de la instrumentación, se considera como estándar industrial un margen de exactitud comprendido entre **$\pm 0.1\%$ y $\pm 0.25\%$ del span**.

Según Creus (2011, pág. 648), la exactitud general de medida para transmisores de presión se establece en **$\pm 0.1\%$ del span**.

En la tabla previamente presentada, se observa que durante la calibración el mayor error registrado fue de 0.015 PSI (equivalente al 0.03 % del span), valor significativamente inferior al límite establecido por dicho estándar. Además, todos los errores se mantuvieron por debajo del **$\pm 0.05\%$ del span** (equivalente a 0.025 PSI), lo que refleja un instrumento con un alto grado de precisión.

En el caso del transmisor ABB 266DSH, aunque los documentos públicos no especifican directamente su **resolución**, se puede inferir un alto nivel de precisión en función de sus datos de rendimiento, los cuales son altamente confiables. Este comportamiento se aprecia con mayor claridad en la gráfica, donde se muestra que los errores no superan los 0.05 PSI (equivalente al 0.1 % del span).

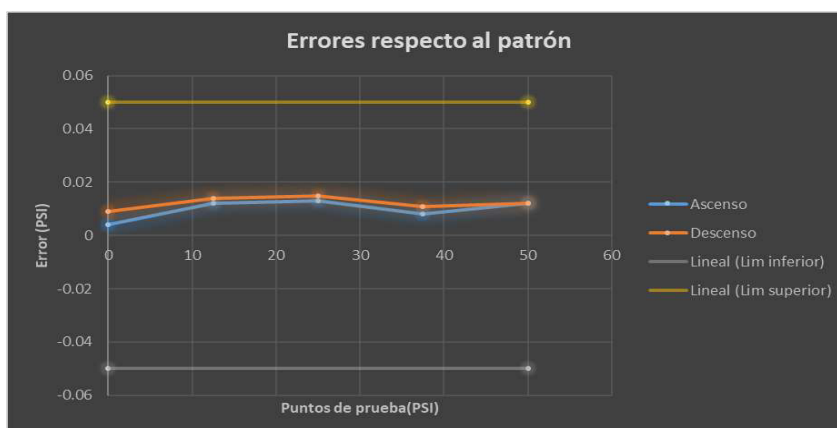


Figura 210 Margen de error del proceso de calibración de DPIT-001. Fuente. Elaboración propia.

A continuación, se detalla el diagrama de conexión implementado para la ejecución del procedimiento de calibración del transmisor de presión.

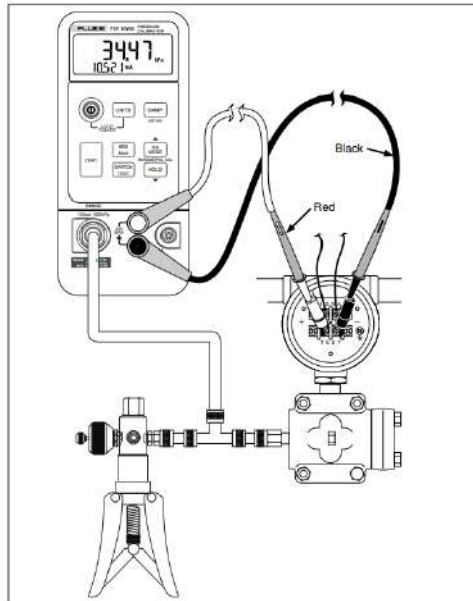


Figura 211 Proceso de calibración de transmisor de presión diferencial.
Fuente. Fluke.



Figura 212 Proceso de calibración de transmisor.
Fuente. Fotografía propia.

Dicho esquema muestra la disposición de los equipos utilizados, incluyendo la fuente de presión neumática, el patrón de referencia (patrón digital) y el propio transmisor bajo prueba.



Figura 213 Funcionamiento de DPIT-001. Fuente. Fotografía propia.

b) Transmisor de flujo por placa orificio

Para el transmisor de flujo, se continuó con el mismo procedimiento de calibración descrito previamente, obteniéndose los siguientes datos registrados:

Tabla 21 Registro de datos del proceso de calibración del transmisor de presión diferencial para flujo.

Lectura patrón en ascenso (kPa)	Lectura Unid de prueba en ascenso (kPa)	Lectura de Corriente transmisor medida (mA)	Corriente teórica (mA)	Error ascenso (kPa)	Lectura patrón en descenso (kPa)	Lectura Unid de prueba en descenso (kPa)	Lectura de Corriente transmisor medida (mA)	Corriente teórica (mA)	Error descenso (kPa)
0.00	0.004	4.004	4.000	0.004	40.00	40.022	20.004	20.000	0.022
2.50	2.512	8.010	8.000	0.012	22.50	22.527	16.007	16.000	0.027
10.00	10.031	12.012	12.000	0.031	10.00	10.033	12.013	12.000	0.033
22.50	22.523	16.006	16.000	0.023	2.50	2.517	8.014	8.000	0.017
40.00	40.022	20.004	20.000	0.022	0.00	0.007	4.003	4.000	0.007

Fuente. Elaboración propia.

En la tabla previamente presentada para el transmisor de presión diferencial ABB 266DSH, la cual será empleado para la medición de flujo, se observa que durante el proceso de calibración el mayor error registrado fue de 0.033 kPa, (equivalente al 0.0825 % del span). Este valor se encuentra notablemente por debajo del límite establecido por el estándar correspondiente. Conforme a lo indicado por Creus (2011, pág. 648), la exactitud general de medición para transmisores de presión se define en **$\pm 0.1\%$ del span**, por lo que los resultados obtenidos se mantienen dentro de los márgenes aceptables. Este comportamiento se aprecia con mayor claridad en la gráfica, donde se muestra que los errores no superan los 0.04 kPa (equivalente al 0.1 % del span).

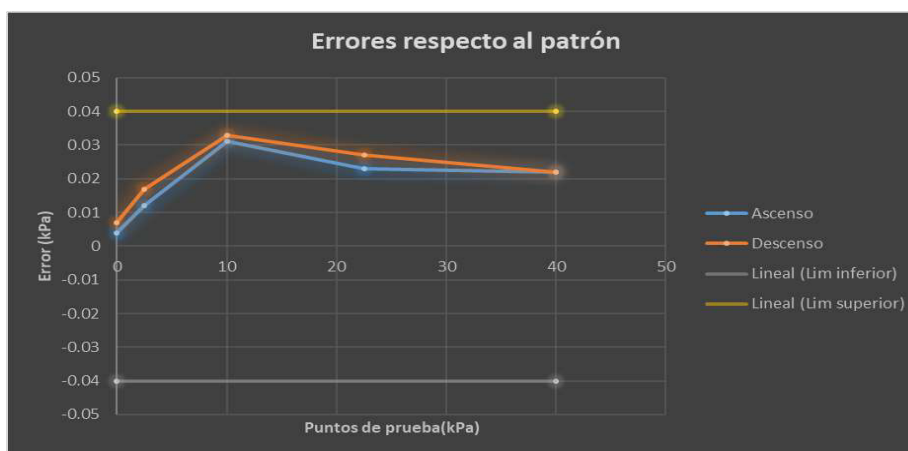


Figura 214 Margen de error del proceso de calibración de FIT-001. Fuente. Elaboración propia.

A continuación, se presentan la figura que muestran el instrumento operando en condiciones reales de funcionamiento.



Figura 215 **Funcionamiento de FIT-001.** Fuente. Elaboración propia.

c) Transmisor de temperatura

Para la calibración del transmisor de temperatura, se empleó como patrón el calibrador de temperatura de **horno de pozo seco modelo RTC-700B** de la marca AMETEK Jofra, el cual proporciona una fuente térmica estable en un rango comprendido entre 33 °C y 700 °C. Este equipo permite verificar y ajustar la exactitud de la señal de salida del transmisor, asegurando su correcta linealidad y respuesta ante variaciones térmicas controladas.



Figura 216 **Horno de pozo seco RTC-700B.** Fuente. AMETEK Jofra.

A continuación, se presentan los datos obtenidos durante el proceso de calibración:

Tabla 22 Registro de datos del proceso de calibración del transmisor de temperatura.

Lectura patrón en ascenso (C°)	Lectura Unidad de prueba en ascenso (C°)	Lectura de Corriente transmisor medida (mA)	Corriente teórica (mA)	Error ascenso (C°)	Lectura patrón en descenso (C°)	Lectura Unidad de prueba en descenso (C°)	Lectura de Corriente transmisor medida (mA)	Corriente teórica (mA)	Error ascenso (C°)
35.000	35.03	9.605	9.600	0.030	100.000	100.07	20.011	20.000	0.070
45.000	45.06	11.210	11.200	0.060	75.000	75.06	16.010	16.000	0.060
50.000	49.94	11.990	12.000	-0.060	50.000	49.96	11.994	12.000	-0.040
75.000	75.08	16.013	16.000	0.080	45.000	45.08	11.213	11.200	0.080
100.000	100.07	20.011	20.000	0.070	35.000	35.02	9.603	9.600	0.016

Fuente. Elaboración propia.

Asimismo, se representa gráficamente la variación del error de exactitud, lo cual permite evidenciar que el margen de error se mantiene por debajo de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ (equivalente 0.1% del span).



Figura 217 Margen de error del proceso de calibración de TIT-001. Fuente. Elaboración propia.

d) Contómetro volumétrico

Para la calibración del medidor de desplazamiento positivo modelo TCS 700-40SP4E, se utilizó un serafín con capacidad de **560 galones**.



Figura 218 Nivelación de serafín 560 gal. Fuente. Fotografía propia.



Figura 219 Registro de medida del serafín. Fuente. Fotografía propia.

Se realizaron varias corridas para registrar los datos correspondientes, los cuales se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 23 Registro de datos del proceso de calibración del medidor volumétrico FQIT-001.

Corrida N°	Caudal (GPM)	Temperatura		Meter Factor Inicial o Promedio	Volumen Registrado FQIT	Volumen Registrado en Serafin	Error	Meter Factor Calculado	Nuevo Meter Factor	Prueba de calibración	Trasgado serafín	Observaciones
		Serafin (°C) - Promedio	FQIT (°F)									
0	70	---	---	---	---	---	---	---	---	---	8.0 min	MOJADO
1	300	28.1	82.5	---	559.83	558.50	1.33	0.99762	0.99762	1.8 min	7.8 min	Inicio de la calibración a 300 GPM
2	300	27.9	82.2	0.99762	559.78	559.50	0.28	0.99950	0.99713	1.8 min	8.0 min	Corrección del Meter Factor
3	300	28.0	82.4	0.99713	560.08	560.00	0.08	0.99986	0.99713	1.8 min	7.9 min	Corroboración del Meter Factor
4	300	28.1	82.6	0.99713	559.94	559.87	0.07	0.99987	0.99713	1.8 min	8.0 min	Corroboración del Meter Factor
5	300	28.0	82.4	0.99713	559.94	560.00	-0.06	1.00011	0.99713	1.8 min	8.2 min	Fin de la calibración a 300 GPM
6												
7												
8												
9												

Fuente. Elaboración propia.

En la primera corrida se observó un error de -1.33 galones (equivalente a un 0.2375%), por lo que se procedió a realizar el ajuste correspondiente, asignando al FQIT el valor leído en el Serafín de 558.50 galones. En la segunda corrida, el error se redujo a -0.28 galones (0.05%), lo que motivó un nuevo ajuste, esta vez asignando el valor de 559.50 galones. En la tercera corrida se obtuvo nuevamente un error de -0.28 galones, considerado aceptable, ya que en términos de calibración se permite un margen de error menor a **±0.15 galones** (equivalente a una línea y media del Serafín). Finalmente, se realizaron tres corridas adicionales para verificar la estabilidad de la calibración, confirmando que el error se mantuvo dentro del rango permitido de ± 0.15 galones (equivalente al 0.027%)

A continuación, se presenta un gráfico que permite visualizar con mayor claridad luego de la tercera corrida, se mantiene dentro del margen aceptable.



Figura 220 Margen de error del proceso de calibración de FQIT-001. Fuente. Elaboración propia.

3.6.2 Validación del Algoritmo para Abastecimiento a 300 GPM en el M580

Como resultado, se logró la **implementación de una lógica de control** optimizada en el controlador M580, estableciendo una **secuencia operativa** que simplifica la interacción con el sistema y mejora su desempeño. Esta programación permitió la operación de **un lazo de control retroalimentado** en el sistema de abastecimiento, permitiendo mantener un flujo constante de 300 GPM y una compensación automática ante cualquier perturbación que pudiera afectar la operación, como el bajo nivel de los tanques de los camiones cisterna, la obstrucción progresiva de los filtros micrónico y/o canasta entre otros.

A diferencia de los sistemas convencionales de lazo abierto, donde la ausencia de realimentación provocaba fluctuaciones en el caudal de suministro, variando entre 70 y 90 GPM en función del nivel de saturación de los filtros, este diseño optimizado garantiza una regulación precisa del flujo. Como resultado, se reduce significativamente el tiempo de abastecimiento, minimizando los retrasos operativos y optimizando la eficiencia del proceso.



Figura 221 Medidor volumétrico iniciando operación, muestra flujo y acumulado.
Fuente. Fotografía propia.



Figura 222 Medidor volumétrico terminando operación, muestra flujo y acumulado.
Fuente. Fotografía propia.

La implementación de esta programación no solo optimizó la operatividad del sistema, sino que también mejoró significativamente la eficiencia y confiabilidad del proceso de abastecimiento. Gracias a la integración de un **sistema de alarmas y detección de fallas**, se logró un monitoreo continuo

de las condiciones operativas, permitiendo una identificación temprana de posibles anomalías. Esto facilita la toma de decisiones oportunas para la corrección de fallos, minimizando el riesgo de interrupciones en la operación. Además, este sistema de supervisión contribuye a la conservación y mantenimiento preventivo de los equipos, asegurando su funcionamiento óptimo a lo largo del tiempo y reduciendo costos asociados a paradas no programadas o averías imprevistas.

Asimismo, se implementó con éxito la comunicación mediante el protocolo **Modbus TCP** entre el variador de velocidad ATV630 y el controlador M580, permitiendo un ajuste dinámico del flujo en respuesta a las condiciones operativas. Además, se configuró la interfaz HMI para la supervisión y control en tiempo real del proceso. Durante las pruebas de precomisionado y comisionado se verificó la correcta interoperabilidad de los equipos, sin presentar inconvenientes en la transmisión de datos ni en la estabilidad del sistema.

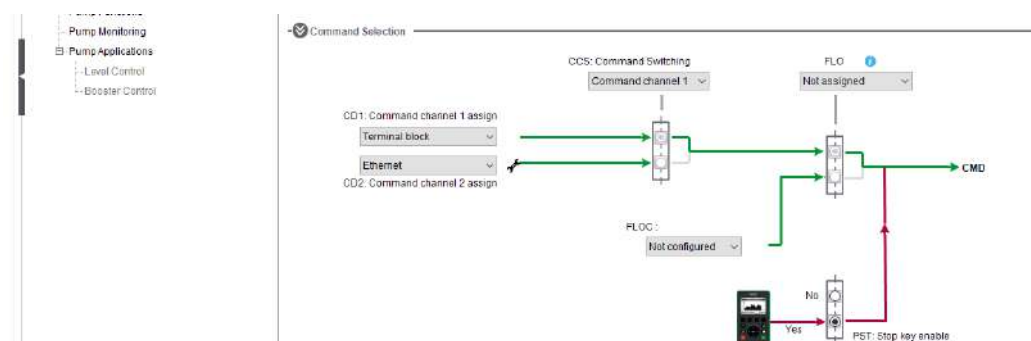


Figura 223 Enlace con variador ATV630. Fuente. Elaboración propia.

Como resultado de las pruebas **FAT** (Factory Acceptance Test) de operación exhaustivas realizadas, se confirmó la operatividad y eficiencia del sistema de abastecimiento a 300 gpm. Inicialmente, las evaluaciones **en taller**, utilizando **2 camiones cisterna** en ambos extremos del Skid, permitieron validar la correcta configuración de los instrumentos de medición, la estabilidad del flujo y la respuesta del sistema ante diferentes escenarios de operación.



Figura 224 Pruebas de funcionamiento en taller. Fuente. Fotografía propia.

Posteriormente, las pruebas **SAT** (Site Acceptance Test) fueron replicadas en el entorno operativo real de la mina, utilizando camiones mineros en servicio de las marcas **Komatsu**, **Caterpillar (CAT)** y **Liebherr**, todos ellos equipados con el sistema de acople tipo Wiggins. Se evaluó el desempeño del sistema bajo las condiciones de trabajo propias del sitio, incluyendo la interacción con los camiones de acarreo, la estabilidad del flujo de abastecimiento y la eficacia del sistema de control.

Como resultado, se confirmó que todos los componentes interactúan correctamente, y se verificó que el controlador M580 es capaz autorregularse para mantener el flujo de abastecimiento, así como de gestionar situaciones de fallo y condiciones de seguridad del proceso.



Figura 225 Pruebas de funcionamiento en mina. Fuente. Fotografía propia.

Los resultados obtenidos permitieron validar la funcionalidad, confiabilidad y eficiencia del sistema automatizado, demostrando su capacidad para optimizar los tiempos de carga y contribuir a una mayor productividad en la operación minera.

3.6.3 Optimización del tiempo de despacho

Se realizará la estimación de los costos asociados al tiempo de espera de los camiones mineros en la zona de abastecimiento de combustible, según se detalla a continuación.

Es importante considerar que estos valores corresponden a promedios referenciales, ya que pueden fluctuar considerablemente en función de diversos factores operativos. Por ejemplo, el consumo de combustible representa también un factor relevante, con una variación estimada entre **40 y 80 galones por hora** (Komatsu), dependiendo de las condiciones topográficas del terreno (superficie plana o con pendiente), el modelo específico del equipo y la carga que transporte que puede oscilar entre 280 a 450 toneladas, este rango de consumo representa un impacto económico directo, generando costo operativo estimado entre 160 y 360 USD por hora.

También los neumáticos **OTR 53/80 R63**, utilizados por este tipo de camiones, tienen un costo aproximado de **40'000 USD** por unidad y una vida útil promedio de 4'500 horas operativas, y considerando que cada unidad opera con seis neumáticos, el costo total por juego asciende a **240'000 USD**. (Cahuana Cuba, 2019, pág. 14)

Adicionalmente, el costo de adquisición del equipo varía entre 2.5 y 3 millones de USD, pudiendo alcanzar montos superiores a 7 millones de USD en modelos de gama avanzada.

Asimismo, se deben incorporar otros costos relevantes como los mantenimientos programados y correctivos, seguros, depreciación del equipo, lubricantes y el costo del operador, entre otros aspectos que forman parte del costo total.

Tabla 24 Especificaciones técnicas de camión minero 930E.

Peso	231.33 t	Neumáticos estándar	53/80 R63
Capacidad de la cuchara bivalva	202 m³	Carga útil	290 t
Longitud de transporte	15 m	Anchura transporte	9.15 m
Altura de transporte	7.45 m	Velocidad	64.5 km/h
Radio de torneado exterior	15.8 m	Altura de carga	6.65 m
Fabr. del motor	Komatsu	Modelo de motor	SSDA16V160
Rendimiento de motor	1930 kW	N° de cilindros	16

Fuente. Komatsu.

En muchas operaciones mineras de gran escala, se reporta un costo operativo promedio de **304 USD/hora** por volquete Komatsu 930E, valor que se usa como estándar en estudios de productividad y optimización. (Hilasaca Gómez, 2021, pág. 42).

Análisis comparativo de los datos obtenidos registrados respecto a los tiempos de espera y ahorro operativo

- Promedio de despachos por turno de 12 horas: 40 camiones
- **Tiempo promedio de abastecimiento en el sistema convencional:** 29 minutos por camión. En muchas ocasiones es mayor.
- **Tiempo promedio de abastecimiento en el sistema actual (caudal de 300 GPM):** 16 minutos por camión

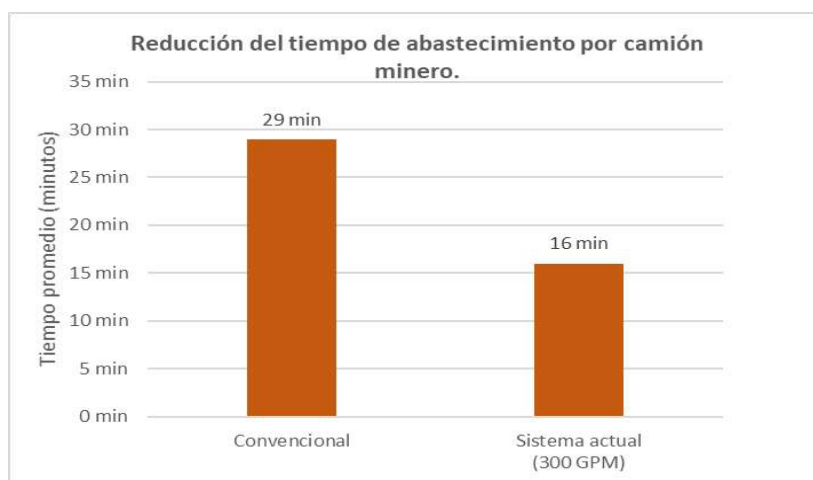


Figura 226 Gráfica de reducción de tiempo de abastecimiento de combustible. Fuente. Elaboración propia.

Esto representa una **reducción de 13 minutos** por camión. Considerando un flujo diario de 80 camiones, **se obtiene un ahorro total de 1040 minutos diarios**, equivalente a aproximadamente **17.3 horas por día**.

A lo largo de un año operativo continuo:

Tiempo total ahorrado: $17.3 \text{ horas/día} \times 365 \text{ días} = 6'326.6 \text{ horas/año}$

Costo operativo evitado: $6,326.6 \text{ horas} \times 304 \text{ USD/hora} = 1.923 \text{ millones de USD/año}$

Este ahorro se atribuye directamente a la implementación del nuevo sistema de abastecimiento de combustible, el cual opera con una mayor capacidad de

caudal, optimizando significativamente los tiempos de atención por unidad. Si bien el cálculo presentado corresponde a una estimación simplificada, en condiciones reales el ahorro generado podría ser considerablemente mayor.

Adicionalmente el sistema presenta un **alto grado de robustez**, tanto en su alimentación como en su capacidad de control, garantizando una operación confiable y segura en condiciones exigentes:

En alimentación: Dispone de dos motogeneradores de 100 kW conectados a un tablero de transferencia automática (ATS), lo que permite una conmutación inmediata en caso de falla de la fuente principal de energía. Además, el tablero de fuerza está equipado con un Sistema de Alimentación Ininterrumpida (UPS), asegurando el suministro continuo a los sistemas de control y evitando interrupciones en la operación. Para mayor confiabilidad, cada CPU del sistema redundante M580 cuenta con fuentes de alimentación independientes, lo que minimiza el riesgo de fallos por pérdida de energía.

En control: El sistema implementa un esquema de redundancia en el controlador, mediante dos CPU M580 configuradas en un modo Hot Standby (HSBY), lo que permite que una CPU opere como principal mientras la segunda actúa como respaldo en espera. Ambas unidades están interconectadas a través de un cable de sincronismo dedicado, asegurando una transición instantánea en caso de falla de la unidad activa. Este diseño garantiza una alta disponibilidad del sistema de control, permitiendo la continuidad operativa sin afectar la estabilidad del proceso.



Figura 227 Sistema redundante M580 en modo Hot Standby. Fuente. Fotografía propia.

3.6.4 Reporte fotográfico

A continuación, se muestra algunas fotos del sistema de abastecimiento.



Figura 228 **Panel frontal lateral derecho.** Fuente. Fotografía propia.



Figura 229 **Panel frontal lateral izquierdo.** Fuente. Fotografía propia.



Figura 230 **Zona de tableros de Skid.** Fuente. Fotografía propia.



Figura 231 **Interior de Skid.** Fuente. Fotografía propia.



Figura 232 **Zona lateral de Skid.** Fuente. Fotografía propia.



Figura 233 **Zona trasera de Skid.** Fuente. Fotografía propia.



Figura 234 Interconexión de camiones cisterna a Skid. Fuente. Fotografía propia.



Figura 235 Patio de motogeneradores Cummins de 100 kW (134.1 HP). Fuente. Fotografía propia.



Figura 236 Bloqueo de seguridad de camión. Fuente. Fotografía propia.



Figura 237 Estación de abastecimiento de Baja Ley. Fuente. Fotografía propia.

El diseño compacto y portátil del gabinete facilita su transporte dentro de las instalaciones, permitiendo su uso eficiente como sistema de despacho de diésel bajo custodia hacia los camiones mineros.

Adicionalmente, la exitosa operatividad del sistema, que permite el abastecimiento de diésel a un flujo regulado de 300 GPM, **demuestra que el Perú dispone de los recursos y la capacidad técnica** necesarios para desarrollar proyectos de automatización a gran escala. Esta implementación no solo impulsa la innovación en la industria, sino que también genera beneficios tangibles para las empresas del sector, optimizando sus procesos y reduciendo costos operativos. Asimismo, fomenta el crecimiento y la especialización de profesionales en tecnologías avanzadas, fortaleciendo la competitividad del país en el ámbito de la automatización industrial.

CAPITULO IV: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Descripción de la implementación

La implementación del sistema automatizado de abastecimiento de combustible a 300 gpm ha demostrado un impacto operativo significativo en el proceso de despacho para camiones de acarreo en minería. Los resultados evidencian que la automatización y el control preciso del alto caudal han permitido superar las limitaciones presentes en los sistemas tradicionales, donde la ausencia de regulación generaba ineficiencias y altos tiempos de inactividad.

Con la puesta en marcha del nuevo sistema, el flujo de abastecimiento se estabilizó en 300 GPM mediante la integración de instrumentación de medición y un algoritmo de control implementado en el PLC M580, lo que permitió reducir de manera considerable los tiempos de carga. Con una adecuada coordinación del operador, el proceso puede completarse en 16 minutos, y en escenarios óptimos incluso descender hasta 9 minutos. Esta mejora contrasta significativamente con el sistema anterior, prolongando los tiempos de abastecimiento a aproximadamente 30 minutos o más. Tales variaciones generaban cuellos de botella operativos que afectaban directamente la productividad de la flota de acarreo.

Durante la implementación, se realizó la calibración y configuración de todos los instrumentos involucrados en el proceso, incluyendo transmisores de presión diferencial, flujo, temperatura y el medidor volumétrico. Las pruebas de precomisionado y comisionado confirmaron que cada dispositivo operaba con alta precisión: el transmisor de presión diferencial presentó un error máximo de 0.03 % del span, el transmisor de flujo alcanzó 0.0825 %, el sensor

de temperatura registró un margen de ± 0.1 °C y el medidor volumétrico logró un error dentro de ± 0.15 galones. Estos valores, muy por debajo de los límites recomendados, demostraron la confiabilidad de la instrumentación instalada y aseguraron la integridad de los datos utilizados por el sistema de control.

El algoritmo de control desarrollado permitió mantener el caudal establecido compensando perturbaciones propias de la operación, como obstrucción de filtros o variaciones de presión en la línea. La comunicación con el variador de frecuencia ATV630 mediante Modbus-TCP garantizó una regulación dinámica y estable que no era posible con los sistemas abiertos anteriores. Asimismo, la interfaz HMI proporcionó monitoreo en tiempo real, alarmas, diagnóstico de fallas y mejores facilidades operativas para el usuario.

Las pruebas FAT y SAT validaron la integración entre los diferentes componentes, confirmando la estabilidad del flujo, la respuesta del sistema ante variaciones externas y la compatibilidad con diversos modelos de camiones mineros equipados con acoples Wiggins. La arquitectura implementada aseguró la continuidad operativa incluso en condiciones adversas, reduciendo la probabilidad de fallas críticas y fortaleciendo la confiabilidad del proceso.

Los resultados operativos obtenidos tras la puesta en marcha demuestran el impacto directo de la automatización en la productividad de la mina, lo que se traduce en un impacto económico aproximado de 1.9 millones de dólares por año, superando ampliamente la inversión realizada en los tableros y componentes de control.

En conjunto, la implementación del sistema de abastecimiento de combustible a 300 GPM no solo incrementó la eficiencia del proceso, sino que también mejoró la estabilidad operativa, la confiabilidad de las mediciones y la continuidad de la operación minera, constituyéndose como una solución técnica de alto impacto para aumentar la productividad y la eficiencia global del proceso.

4.2 Evaluación Económica

Para la evaluación económica del sistema de abastecimiento de combustible a 300 GPM, se consideran los costos asociados al tablero de control (TC-001) y al gabinete de fuerza y control (TFC-001). Estos equipos constituyen los elementos principales del sistema de automatización, responsables tanto del procesamiento lógico como de la gestión eléctrica de potencia. A continuación, se presentan los costos detallados de los componentes más relevantes del tablero de control.

Tabla 25 Costo de equipos en Tablero de control(TC-001).

Item	Descripción	Cant	Precio	Total
1	Tablero 1000x600x300, NSYCRN106300. SE	1	902.31	902.31
2	Placa de montaje, CRN NSYMM106. SE	1	225.58	225.58
3	Accesorio, Conjunto de Fijación Mural, NSYPFCR. SE	1	29.29	29.29
4	M580 HSBY CPU LEVEL 2 FOR R IO BMEH582040	2	17,160.46	34,320.91
5	Zócalo SFP con conexión HSBY- RJ45, 490NAC0100	2	581.08	1,162.16
6	BACKPLANE de CPU, 4 SLOTS ETHERNET, BMEXBP0400	2	782.51	1,565.01
7	Fuente Alimentación 100-240Vac 20W, M340, BMXCPS2000	2	678.74	1,357.47
8	Switch Embedded, BMENOS0300	1	2,522.88	2,522.88
9	RIO DROP E/IP PERF ON ETHERNET, BMECRA31210 -	1	2,150.96	2,150.96
10	04 EA 16b, Aisl,10V, 20mA, M340, BMXAMI0410	1	1,592.27	1,592.27
11	08 SD, Rele,24Vdc,3A (20P), M340, BMXDRA0805	1	883.82	883.82
12	08 ED,115vAC, M340, BMXDAI0814	1	1,471.00	1,471.00
13	Bornero 20P Tornillo-Estribó, M340, BMXFTB2010	4	65.51	262.05
14	Rack Eth 06 Pos,FA Dual, M580, BMEXBP0602	1	1,391.66	1,391.66
15	Fuente Alimentación, 100-240Vac Redund BMXCPS4002	2	1,735.91	3,471.82
16	Pantalla 5.7" QVGA/TFT 24VDC HMIGTO2310	1	3,076.13	3,076.13
			Total:	56,385.32

Fuente. Elaboración propia.

Del mismo modo, se muestran los costos correspondientes al gabinete de fuerza y control, el cual integra el variador de velocidad, protecciones eléctricas, elementos de maniobra y accesorios de montaje necesarios para garantizar la operatividad del sistema.

Tabla 26 Costo de equipos en Tablero de Fuerza y control (TFC-001).

#	Descripción	Cant	Precio	Total
1	Altivar 630 30 Kw 400/480V TRI ATV630D30N4 - SCHNEIDER ELECTRIC	1	9,363.68	9,363.68
2	VX25 NEMA 12 IP55, 800x2000x800mm (AnxAlxPr), RAL7035 - RITTAL	1	3,182.57	3,182.57
3	Tapas laterales VX25 IP55 2000x800mm (ALxPr), RAL7035 (2pzas) - RITTAL	1	750.40	750.40
4	VX Zócalo Frontal y Posterior Alt:100mm Ancho:800mm RAL9005 - RITTAL	1	152.01	152.01
5	VX Zócalo Pantallas laterales Alt:100mm Prof:800mm RAL9005 - RITTAL	1	130.30	130.30
6	Guías Perfil , ancho=19" P/Altura 42 RU 2000mm - RITTAL	2	255.19	510.37
7	Ángulos Horizontales para Montaje Guia Perfil 19", ancho=800mm - RITTAL	2	194.46	388.93
8	Chasis de montaje VX 23x64 mm, para montaje interior de 800 mm (4 pzas) - RITTAL.	2	268.64	537.28
8	Interruptor de Caja Moldeada NSX100F TM100D, 3x100A , 440VAC, IM:800A,IR35KA; LV429630 - SE	1	622.36	622.36
9	Interruptor de Caja Moldeada NSX100F TM80D, 3x80A , 440VAC, IM:650A,IR35KA; LV429631 - SE	1	622.36	622.36
10	Interruptor Termomagnetico RIEL DIN iC60N, 2x50A , 220VAC, IR 20KA, CURVA C; A9F74250 - SE	1	114.35	114.35
11	Interruptor Termomagnetico RIEL DIN iC60N, 2x25A , 220VAC, IR 20KA, CURVA C; A9F74225 - SE	1	84.16	84.16
12	Interruptor Termomagnetico RIEL DIN iC60N, 2x20A , 220VAC,IR 20KA, CURVA C; A9F74220 - SE	1	83.34	83.34
13	Interruptor Termomagnetico RIEL DIN iC60N, 2x10A , 220VAC, IR 20KA, CURVA C; A9F74210 - SE	9	87.70	789.28
14	Interruptor Termomagnetico RIEL DIN iC60N, 2x4A , 220VAC, IR 50KA, CURVA C; A9F74204 - SE	1	115.82	115.82
15	Contacto de Fuerza TeSys D, 3P, 65A AC-3, 80A AC-1, B:220V AC, 1NA+1NC; LC1D65AM7 - SE	1	638.18	638.18
16	Contacto de Fuerza TeSys D, 3P, 12A AC-3, 25A AC-1, B:220V AC, 1NA+1NC, LC1D12M7 - SE	2	122.94	245.89
17	Conmutador de Transferencia 1-0-2, 3P, 63A, IP40, C42.A212.600.E - KRAUS & NAIMER	1	320.16	320.16
18	Supresor de sobretensión, iPRD 40 40 KA 350V 1P+N A9L40500 - SE	1	591.33	591.33
19	Fuente de Alimentación Modular 200-240VAC, 24VDC, 2.5A, 60W, ABL7RM24025 - SE	1	414.35	414.35
20	Borne de Paso, UT 16 101A, 1.5-25mm2(16-4 AWG), Tornillo, A=12.2mm -PHOENIX CONTACT	4	5.66	22.66
21	Tapa Final para Borne, D-UT 16 - PHOENIX CONTACT	1	1.75	1.75
22	Borne de Paso, UT 4 41A, 0.14-6mm2(26-10 AWG), Tornillo, A=6.2mm - PHOENIX CONTACT	22	2.73	59.97
23	Tapa final - D-UT 2,5/10 - PHOENIX CONTACT	2	1.40	2.81
24	Borne de Paso, 2PISOS, UTTB 4 36A, 0.14-6mm2(26-10AWG), Tornillo, A=6.2mm- PHOENIX CONTACT	12	7.02	84.25
25	Tapa Final para Borne, D-UTTB 2,5/4 - PHOENIX CONTACT	1	1.99	1.99
26	Borne Porta fusible, UT 4-HESI(5x20), 10A, 0.14-6mm2(26-10 AWG), Tornillo, A=6.2mm - PHOENIX CONTACT	4	13.69	54.75
27	Tope Final para RIEL DIN, E/UK - PHOENIX CONTACT	14	2.56	35.85
28	Soporte para Marcador de Regletas de Borne, KLM-A - PHOENIX CONTACT	6	3.30	19.82
29	Modulo Relé + Base, PLC-RSC- 230UC/21 B:230VAC/220VDC, O:5-250VAC/DC, 6A, 1NANC - PHOENIX CONTACT	9	63.14	568.28
30	Modulo Relé + Base, PLC-RSC-230UC/21-21 B:230VAC/220VDC, O: 5-250VAC/DC, 6A, 2NANC - PHOENIX CONTA	1	73.55	73.55
31	Ventilador con Rejilla TopTherm, 600(390)m3/h, 230V, 87W, 323*323mm, IP54 - RITTAL	1	634.58	634.58

32	Rejilla de Ventilación C/Estera Filtrante, 323*323mm(292*292mm), IP54 - RITTAL	1	135.12	135.12
33	UPS Liebert-Emerson GXT5-3000IRT2UXLE, 220Vac, 3KVA, 6bat x 12Vx9Ah=648Wh	1	3481.61	3,481.61
34	Módulo de batería externa Liebert-Emerson GXT5, 12bat x 12Vx9Ah=1'296 Wh	1	1966.83	1,966.83
35	Transformador de aislamiento 220Vac, 4KVA, factor K1	1	2002.52	2,002.52
			Total	28,803.46

Fuente. Elaboración propia.

El costo conjunto de ambos tableros asciende a S/ 85,188.78, resultado de la suma del tablero de control (S/ 56,385.32) y el gabinete de fuerza y control (S/ 28,803.46). Este monto es significativamente menor frente a los beneficios económicos obtenidos, ya que los resultados presentados en el capítulo anterior evidencian un ahorro aproximado de 1.9 millones de dólares anuales gracias a la reducción del tiempo de abastecimiento, la optimización del flujo operativo y la mejora en la disponibilidad de los camiones mineros.

En consecuencia, la relación costo–beneficio demuestra de manera sólida la viabilidad económica de la inversión realizada. La implementación del sistema de abastecimiento a 300 GPM no solo incrementa la eficiencia operacional, sino que también genera un retorno sustancial en un corto plazo, justificando plenamente la modernización tecnológica ejecutada.

CAPITULO V: CONCLUSIONES

Luego de haber culminado con éxito la implementación del proyecto.

- Se implementó de manera satisfactoria el sistema automático de abastecimiento de combustible, logrando despachos de **alto caudal** con capacidad de 300 GPM para camiones mineras de gran porte con un desempeño confiable y estable.
- Se realizó el adecuado acondicionamiento y configuración de los **instrumentos** en campo a sus parámetros operativos requeridos, como el flujómetro de placa orificio, el transmisor de presión diferencial, el transmisor de temperatura, el contómetro volumétrico, entre otros. Dicho proceso fue validado mediante la **calibración** de cada instrumento, obteniendo exactitudes menores de $\pm 0.1\%$ del span. Esto garantiza su correcto funcionamiento dentro del sistema de abastecimiento, permitiendo un monitoreo y control preciso de las variables operativas.
- Se logró la implementación del algoritmo de control en el PLC Schneider Eléctric M580, desarrollando una **lógica de control secuencial** para el proceso de despacho, capaz también de gestionar situaciones de fallo. Así mismo, se integró un lazo de control cerrado **PID** para la regulación del caudal, lo que permitió mantener la variable controlada de manera adecuada frente a perturbaciones, logrando autorregularse para mantener el flujo de abastecimiento, asegurando una respuesta estable del sistema. Se

estableció una comunicación confiable mediante el protocolo **Modbus TCP** entre el controlador y el variador ATV630. Además, se implementó el monitoreo y control del proceso a través de una pantalla HMI. Todo esto simplifica la interacción con el sistema de abastecimiento, facilita la operación y evitando errores en la ejecución de los procesos.

- La automatización del proceso permitió reducir significativamente el **tiempo de despacho** de combustible de 29 min a 16 min, lo que representa una disminución al 55,2% respecto al tiempo anterior, optimizando el flujo de **operación** de los camiones. Esto se tradujo en un incremento en la **productividad**, reduciendo los tiempos muertos y mejorando la eficiencia general del sistema.

CAPITULO VI: RECOMENDACIONES

Las recomendaciones son las siguientes:

- Se recomienda la implementación del sistema de abastecimiento de combustible con flujo regulado de 300 GPM en **otras operaciones mineras**, especialmente aquellas que buscan optimizar la eficiencia en el despacho de combustible y reducir tiempos muertos. La estandarización de este sistema permitirá mejorar la disponibilidad de los camiones mineros, incrementar la productividad y reducir costos operativos asociados a la inactividad de los equipos. Además, su integración con tecnologías de automatización garantiza un control preciso del flujo, minimizando variaciones y optimizando el proceso de abastecimiento.
- Se recomienda cumplir rigurosamente el **plan de mantenimiento preventivo y predictivo** del sistema de abastecimiento de combustible, con el fin de preservar su rendimiento óptimo, reducir la ocurrencia de fallas y prolongar su vida útil. Este enfoque permitirá anticipar y mitigar posibles desgastes o averías, evitando la necesidad de intervenciones correctivas que podrían afectar la continuidad y confiabilidad de las operaciones de control.
- Se recomienda, en caso se desea aumentar el caudal de trabajo a **400 GPM**, que ya es un caso de operación minera de **ultra alta producción**, se realice un adecuado dimensionamiento de varios equipos dentro del Skid.

Entre los aspectos principales a considerar:

- **Pistola Wiggings:** La utilizada en este proyecto está diseñada para 300 GPM, con un límite máximo de 350 GPM, lo que podría generar restricciones en escenarios de mayor demanda. Se requiere una de mayor capacidad.
- **Etapas de filtrado:** Un mayor caudal implica un flujo más rápido del combustible a través del sistema, lo que **puede arrastrar más impurezas y partículas en suspensión**, aumentando el riesgo de daños en los inyectores del motor. Por ello se usan filtros dobles o de mayor filtrado como 1um.
- **Bomba centrífuga:** Actualmente, tiene una capacidad máxima de 400 GPM, pero solo bajo ciertas condiciones operativas. No puede superar este caudal debido a sus limitaciones físicas y debe operar en concordancia con la potencia del variador de frecuencia para un funcionamiento óptimo.

CAPITULO VII: BIBLIOGRAFÍA

Alarie, S., & Gamache, M. (2002). *Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment.*

Astrom, K. J., & Hagglund., T. (2009). " *Control PID avanzado* ". Madrid, España.

Azañero Ruiz, L. F., & Guerrero Orrillo, L. A. (2019). "*Carguío y acarreo en flotas mineras; una revisión sistemática*" [Tesis para título- Universidad Privada del Norte]. Cajamarca, Perú. Obtenido de <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/22051>

Bonzi Ríos, J. I. (2016). "*Propuesta de mejora de la utilización efectiva en base a disponibilidad de la flota de carguío y transporte en Minería Los Pelambres*" [Memoria para título de Ingeniero - Universidad de Chile]. Santiago de Chile, Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/139829>

Cahuana Cuba, C. A. (2019). "*Plan de monitoreo para reducir costos de consumo de neumáticos en operación de camiones Komatsu 930E-4SE. Caso: Minera Las Bambas.*" [Tesis para Maestro- Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Arequipa, Perú. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12773/13489>

Company, D. (2025). *Conozca los códigos de limpieza ISO.* (D. Company, Editor) Obtenido de <https://www.donaldson.com/es-mx/engine/filters/technical-articles/understanding-iso-cleanliness-codes/>

- Contreras Acuña, A. (2013). *"Reducción de las demoras operativas en el servicio de grifo a los volquetes"* [Tesis para título- Universidad Nacional de Ingeniería]. Lima, Perú. Obtenido de <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/10338>
- Creus Solé, A. (2011). *"Instrumentación industrial"* Octava Edición. México, México.
- Dominguez Dominguez, S. (15 de abril de 2024). *El Peruano*. Obtenido de <https://elperuano.pe/noticia/241323-mineria-aportara-el-95-al-pbi-nacional-este-ano>
- González Gazmuri, R. I. (2016). *"Optimización de las horas operativas de los CAEX en los procesos de descarga en chancado y abastecimiento de combustible mediante la utilización de modelamientos compuestos y redes neuronales"* [Tesis para obtención título- Universidad de Chile]. Santiago de Chile, Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/141629>
- HEXAGON. (2017). *OP Pro Manager User Reference Manual Software v2.07*. Tucson, Arizona, EEUU.
- Hilasaca Gómez, H. H. (2021). *"Optimización de tiempos de espera de volquetes en la zona de descarga de mineral para el incremento de la productividad en la unidad operativa Cuajone"* [Tesis para título- Universidad Nacional de Moquegua]. Moquegua, Perú. Obtenido de <https://repositorio.unam.edu.pe/items/11600b9c-0909-4f22-b64c-9423436f5316>
- IPU, I. P. (2017). *Norma ISO4406:2017 para combustible diésel*. (R. U. ipu@ipu.co.uk, Editor) Obtenido de <https://www.ipu.co.uk/iso-4406-2017-standard-diesel-fuel/>
- Lopez Condori, R. D. (2019). *"Modernización del sistema de supervisión y control del Oleoducto Norperuano mediante migración al protocolo*

TCP/IP" [Tesis para título de Ingeniero - Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Arequipa, Perú. Obtenido de <https://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/1890>

Mestanza Alcantara, S. (2021). *"La gestión de la demora en el abastecimiento de combustible y su influencia en la productividad de equipos de acarreo en una empresa minera de la ciudad de Cajamarca"* [Tesis para título- Universidad Nacional de Moquegua]. Cajamarca, Perú. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11537/28272>

MINEM. (2025). *"Anuario Minero 2024, Ministerio de Energía y Minas" Primera Edición - Lima - mayo de 2025*. Lima, Perú. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/6827926-anuario-minero-2024>

Mora Estrada, G. M. (2015). *"Estudio para la mejora del sistema de biocombustible del Terminal Pascuales de EP Petroecuador"* [Tesis para obtención título- Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. Guayaquil, Ecuador. Obtenido de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/3794>

Nicola Mesias, P. A. (2015). *"Diseño de una arquitectura de red para la integración de bahías de carga con controlador híbrido programable HC-900 para el Terminal Pascuales de Petroecuador"* [Tesis para obtención título- Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. Guayaquil, Ecuador. Obtenido de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/3844>

Ogata, K. (2010). *"Ingeniería de control moderno"*, Quinta edición. Madrid, España.

Pulido, H. G. (2010). *Calidad total y productividad*. Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana, México.

Zuñiga Estay, M. H. (2021). *"Evaluación económica: camiones autónomos vs. convencionales"* [Tesis para Maestro- Universidad de Chile]. Santiago

de Chile, Chile. Obtenido de
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181055>

CAPITULO VIII: ANEXOS

Anexo A: Diagrama de lazos

Anexo B: Gabinete TFC-001

Anexo C: Tablero de control TC-001

--	--	--	--	--	--



Figura 238 Diagrama de lazos 01- Entradas analógicas. Fuente. Elaboración propia.



Figura 239 Diagrama de lazos 02- Entradas y salidas digitales. Fuente. Elaboración propia.

Figura 240 Diagrama de lazos 03- Vínculo con actuador de válvula motorizada. Fuente. Elaboración propia.

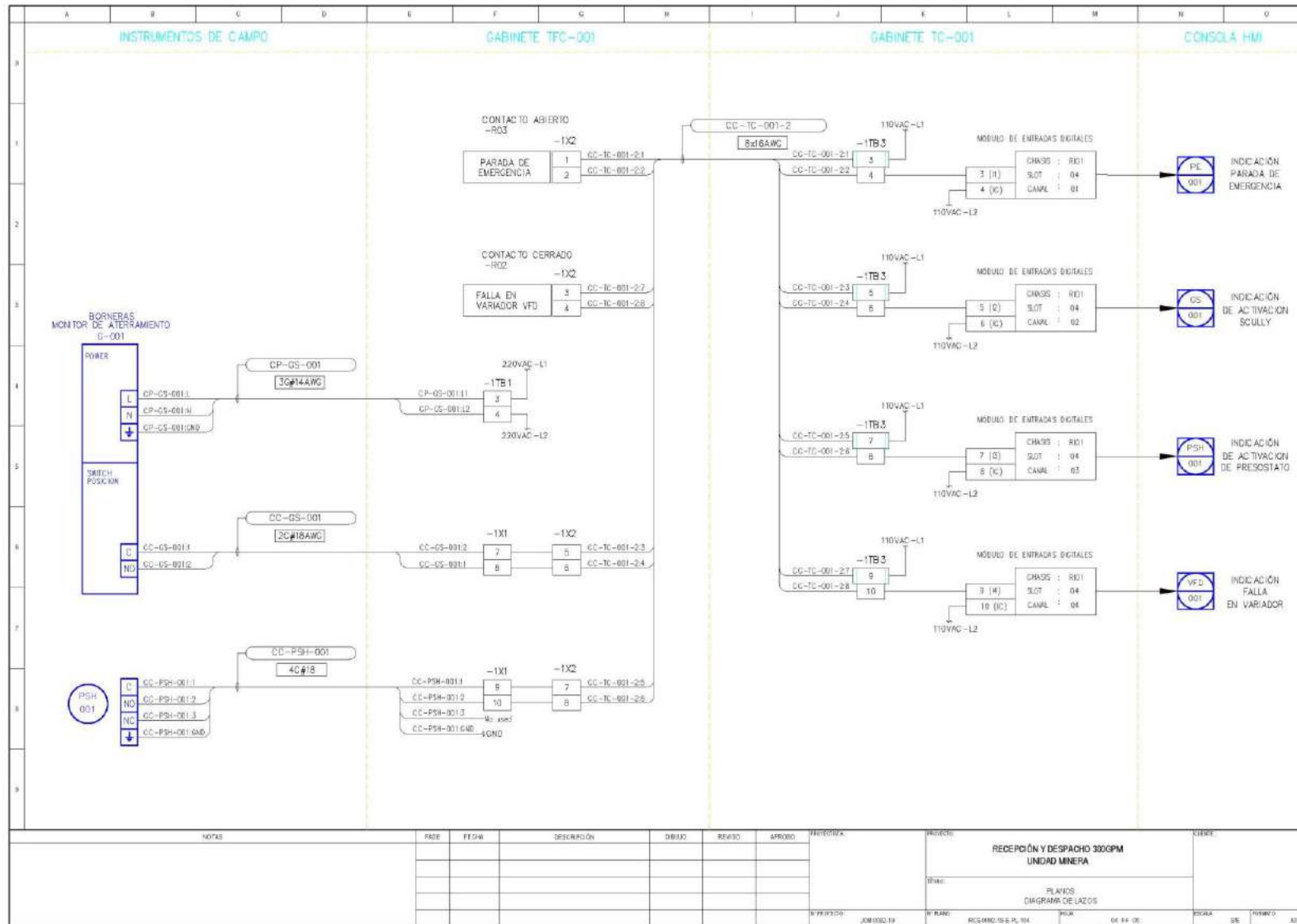


Figura 241 Diagrama de lazos 04- Entradas digitales. Fuente. Elaboración propia.

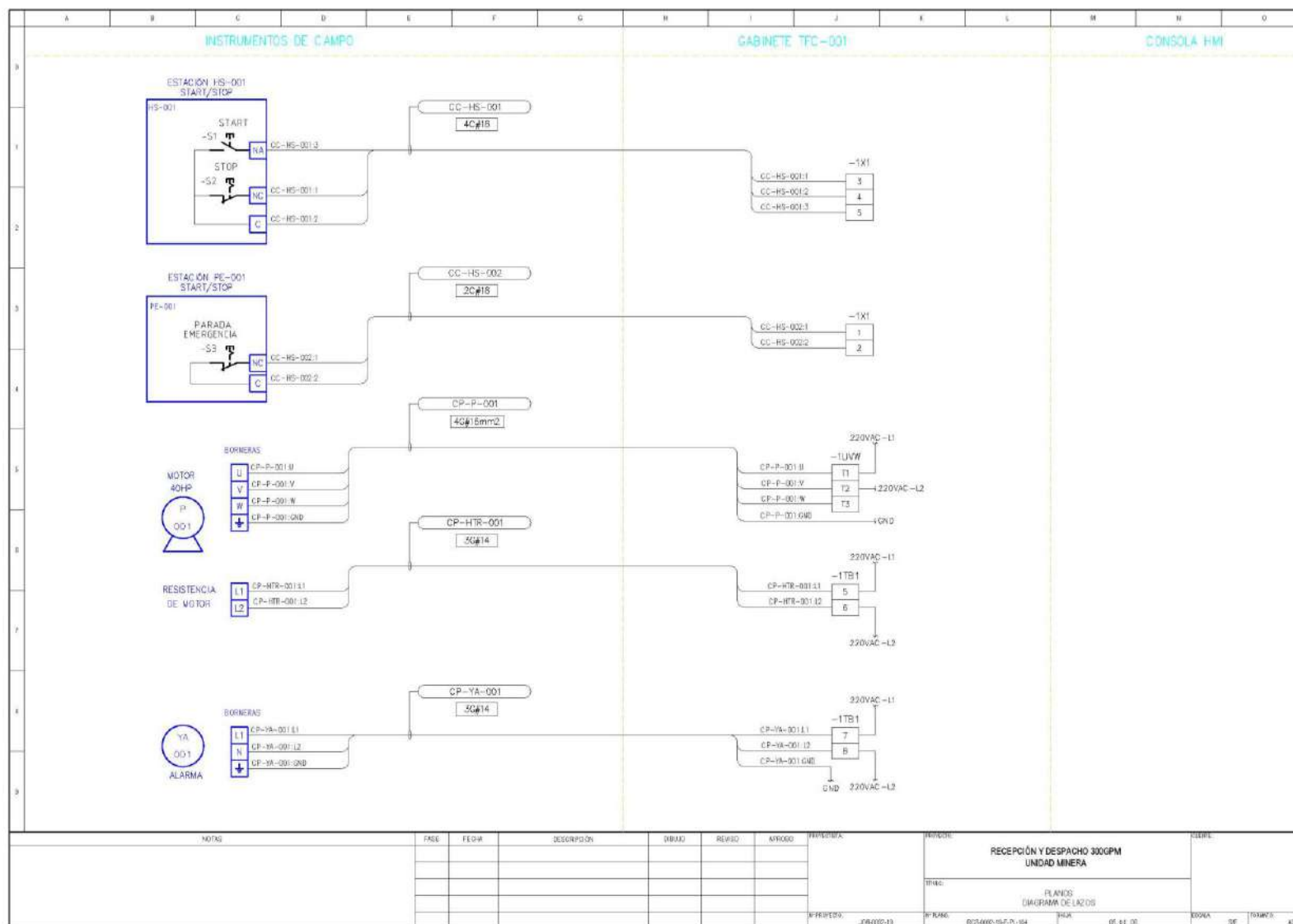


Figura 242 Diagrama de lazos 05- Equipos de campo a tablero de TFC-001. Fuente. Elaboración propia.

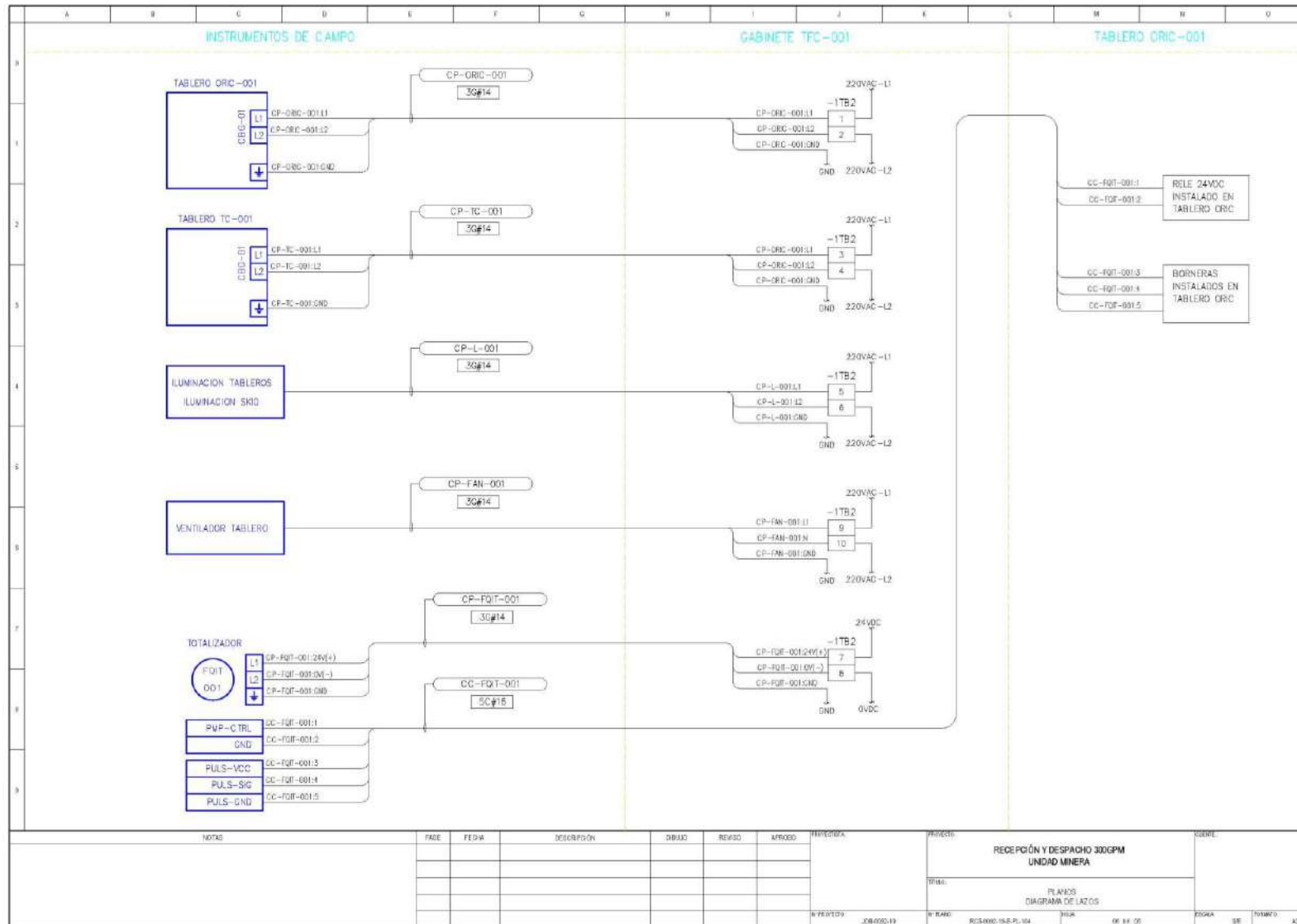


Figura 243 Diagrama de lazos 06- Equipos de campo a tablero de TFC-001 y ORIC-001. Fuente. Elaboración propia.

Anexo B: Gabinete TFC-001

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O																																																																																	
9																																																																																																
1	<table><tr><th>CODIGO</th><th>DESCRIPCION</th><th>FUNCION</th></tr><tr><td>-CG01</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 3X(70-100)A 38kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>INTERRUPTOR GENERAL</td></tr><tr><td>-CBG01</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X50A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>INTERRUPTOR GENERAL (IF+N) 230VAC</td></tr><tr><td>-MCP01</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 3X(35-80)A 38kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>ALIMENTACIÓN VARIADOR</td></tr><tr><td>-KM01</td><td>CONTACTOR Tesys D 85A, MODELO LC1D85AKUE, MARCA: SCHNEIDER</td><td>ENERGIA A VARIADOR VFD01</td></tr><tr><td>-VFD01</td><td>VDF 40HP, 380VAC, MODELO ATV330D30N4, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>VARIACION CAUDAL DE BOMBA</td></tr><tr><td>-CB01</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>ALIMENTACIÓN HEATER PARA BOMBA</td></tr><tr><td>-CB02</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>ALIMENTACIÓN VERIFICADOR DE TIERRA</td></tr><tr><td>-CB03</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>ALIMENTACIÓN VÁLVULA DE CORTE</td></tr><tr><td>-KB1</td><td>CONTACTOR Tesys D 12A 100-250VAC, MODELO LC1D12KUE, MARCA: SCHNEIDER</td><td>ACTIVACIÓN VÁLVULA DE CORTE</td></tr><tr><td>-CB04</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X4A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>ALIMENTACIÓN ALARMA SONORA</td></tr><tr><td>-KB2</td><td>CONTACTOR Tesys D 12A 100-250VAC, MODELO LC1D12KUE, MARCA: SCHNEIDER</td><td>ACTIVACIÓN ALARMA SONORA</td></tr><tr><td>-CB05</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>RESERVA</td></tr><tr><td>-CB06</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>ALIMENTACIÓN TRANSFORMADOR</td></tr><tr><td>-CB07</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>ALIMENTACIÓN UPS</td></tr><tr><td>-UPS01</td><td>UPS 3kV, GXT4-3000RT-230, MARCA: VERTIV</td><td>UPS</td></tr><tr><td>-DS01</td><td>CONMUTADOR CQ-3P-63A 1-0-2 C42 A212 900 E KRAUSNAIMER</td><td>CONMUTADOR DE UPS</td></tr><tr><td>-CB08</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>INTERRUPTOR GENERAL UPS</td></tr><tr><td>-CB09</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>ALIMENTACIÓN ORIC-001</td></tr><tr><td>-CB10</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>ALIMENTACIÓN TABLERO DE CONTROL TC-001</td></tr><tr><td>-CB11</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>ALIMENTACIÓN ILUMINACIÓN</td></tr><tr><td>-CB12</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>ALIMENTACIÓN DE FUENTE 24VDC</td></tr><tr><td>-CB13</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>CIRCUITO DE CONTROL DE TFC-001</td></tr><tr><td>-CB14</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>RESERVA</td></tr><tr><td>-SP01</td><td>SUPRESOR ABL42500, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC</td><td>SUPRESOR SOBRETENSIONES</td></tr><tr><td>-PS01</td><td>FUENTE DE ALIMENTACION ABL7RM24025, 24VCC, 2.5 Amp (60W)</td><td>ENERGIA 24VDC PARA COMPUTADOR DE FLUJO</td></tr><tr><td>-T01</td><td>TRANSFORMADOR DE AISLAMIENTO 4KVA, TIPO RACK 15"</td><td>PROTECCION DE EQUIPOS ELECTRONICOS</td></tr></table>															CODIGO	DESCRIPCION	FUNCION	-CG01	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 3X(70-100)A 38kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	INTERRUPTOR GENERAL	-CBG01	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X50A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	INTERRUPTOR GENERAL (IF+N) 230VAC	-MCP01	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 3X(35-80)A 38kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN VARIADOR	-KM01	CONTACTOR Tesys D 85A, MODELO LC1D85AKUE, MARCA: SCHNEIDER	ENERGIA A VARIADOR VFD01	-VFD01	VDF 40HP, 380VAC, MODELO ATV330D30N4, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	VARIACION CAUDAL DE BOMBA	-CB01	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN HEATER PARA BOMBA	-CB02	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN VERIFICADOR DE TIERRA	-CB03	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN VÁLVULA DE CORTE	-KB1	CONTACTOR Tesys D 12A 100-250VAC, MODELO LC1D12KUE, MARCA: SCHNEIDER	ACTIVACIÓN VÁLVULA DE CORTE	-CB04	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X4A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN ALARMA SONORA	-KB2	CONTACTOR Tesys D 12A 100-250VAC, MODELO LC1D12KUE, MARCA: SCHNEIDER	ACTIVACIÓN ALARMA SONORA	-CB05	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	RESERVA	-CB06	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN TRANSFORMADOR	-CB07	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN UPS	-UPS01	UPS 3kV, GXT4-3000RT-230, MARCA: VERTIV	UPS	-DS01	CONMUTADOR CQ-3P-63A 1-0-2 C42 A212 900 E KRAUSNAIMER	CONMUTADOR DE UPS	-CB08	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	INTERRUPTOR GENERAL UPS	-CB09	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN ORIC-001	-CB10	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN TABLERO DE CONTROL TC-001	-CB11	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN ILUMINACIÓN	-CB12	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN DE FUENTE 24VDC	-CB13	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	CIRCUITO DE CONTROL DE TFC-001	-CB14	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	RESERVA	-SP01	SUPRESOR ABL42500, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	SUPRESOR SOBRETENSIONES	-PS01	FUENTE DE ALIMENTACION ABL7RM24025, 24VCC, 2.5 Amp (60W)	ENERGIA 24VDC PARA COMPUTADOR DE FLUJO	-T01	TRANSFORMADOR DE AISLAMIENTO 4KVA, TIPO RACK 15"	PROTECCION DE EQUIPOS ELECTRONICOS
CODIGO	DESCRIPCION	FUNCION																																																																																														
-CG01	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 3X(70-100)A 38kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	INTERRUPTOR GENERAL																																																																																														
-CBG01	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X50A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	INTERRUPTOR GENERAL (IF+N) 230VAC																																																																																														
-MCP01	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 3X(35-80)A 38kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN VARIADOR																																																																																														
-KM01	CONTACTOR Tesys D 85A, MODELO LC1D85AKUE, MARCA: SCHNEIDER	ENERGIA A VARIADOR VFD01																																																																																														
-VFD01	VDF 40HP, 380VAC, MODELO ATV330D30N4, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	VARIACION CAUDAL DE BOMBA																																																																																														
-CB01	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN HEATER PARA BOMBA																																																																																														
-CB02	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN VERIFICADOR DE TIERRA																																																																																														
-CB03	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN VÁLVULA DE CORTE																																																																																														
-KB1	CONTACTOR Tesys D 12A 100-250VAC, MODELO LC1D12KUE, MARCA: SCHNEIDER	ACTIVACIÓN VÁLVULA DE CORTE																																																																																														
-CB04	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X4A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN ALARMA SONORA																																																																																														
-KB2	CONTACTOR Tesys D 12A 100-250VAC, MODELO LC1D12KUE, MARCA: SCHNEIDER	ACTIVACIÓN ALARMA SONORA																																																																																														
-CB05	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	RESERVA																																																																																														
-CB06	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN TRANSFORMADOR																																																																																														
-CB07	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN UPS																																																																																														
-UPS01	UPS 3kV, GXT4-3000RT-230, MARCA: VERTIV	UPS																																																																																														
-DS01	CONMUTADOR CQ-3P-63A 1-0-2 C42 A212 900 E KRAUSNAIMER	CONMUTADOR DE UPS																																																																																														
-CB08	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X20A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	INTERRUPTOR GENERAL UPS																																																																																														
-CB09	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN ORIC-001																																																																																														
-CB10	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN TABLERO DE CONTROL TC-001																																																																																														
-CB11	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN ILUMINACIÓN																																																																																														
-CB12	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	ALIMENTACIÓN DE FUENTE 24VDC																																																																																														
-CB13	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	CIRCUITO DE CONTROL DE TFC-001																																																																																														
-CB14	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A 10kA, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	RESERVA																																																																																														
-SP01	SUPRESOR ABL42500, MARCA: SCHNEIDER ELECTRIC	SUPRESOR SOBRETENSIONES																																																																																														
-PS01	FUENTE DE ALIMENTACION ABL7RM24025, 24VCC, 2.5 Amp (60W)	ENERGIA 24VDC PARA COMPUTADOR DE FLUJO																																																																																														
-T01	TRANSFORMADOR DE AISLAMIENTO 4KVA, TIPO RACK 15"	PROTECCION DE EQUIPOS ELECTRONICOS																																																																																														
2																																																																																																
3																																																																																																
4																																																																																																
5																																																																																																
6																																																																																																
7																																																																																																
8																																																																																																
9																																																																																																
10																																																																																																
11																																																																																																
12																																																																																																
13																																																																																																
14																																																																																																
15																																																																																																
16																																																																																																
17																																																																																																
18																																																																																																
19																																																																																																
20																																																																																																
21																																																																																																
22																																																																																																
23																																																																																																
24																																																																																																
25																																																																																																
26																																																																																																
27																																																																																																
28																																																																																																
29																																																																																																
30																																																																																																
31																																																																																																
32																																																																																																
33																																																																																																
34																																																																																																
35																																																																																																
36																																																																																																
37																																																																																																
38																																																																																																
39																																																																																																
40																																																																																																
41																																																																																																
42																																																																																																
43																																																																																																
44																																																																																																
45																																																																																																
46																																																																																																
47																																																																																																
48																																																																																																
49																																																																																																
50																																																																																																
51																																																																																																
52																																																																																																
53																																																																																																
54																																																																																																
55																																																																																																
56																																																																																																
57																																																																																																
58																																																																																																
59																																																																																																
60																																																																																																
61																																																																																																
62																																																																																																
63																																																																																																
64																																																																																																
65																																																																																																
66																																																																																																
67																																																																																																
68																																																																																																
69																																																																																																
70																																																																																																
71																																																																																																
72																																																																																																
73																																																																																																
74																																																																																																
75																																																																																																

MOTAS		PROYECTO	FECHA	DESCRIPCION	DETALLE	REVISI	APROBADO	PROYECTISTA	PROYECTADO	REVISADO	APROBADO
									RECEPCION Y DESPACHO 300GPM UNIDAD MINERA		
									TITULO		
									PLANO DE DESERVO MECANICO TABLERO TFC-001		
									N PLANO	R024000-042MPL-01	NOVA
									01 de 08		SE
									SIGNA		FECHA

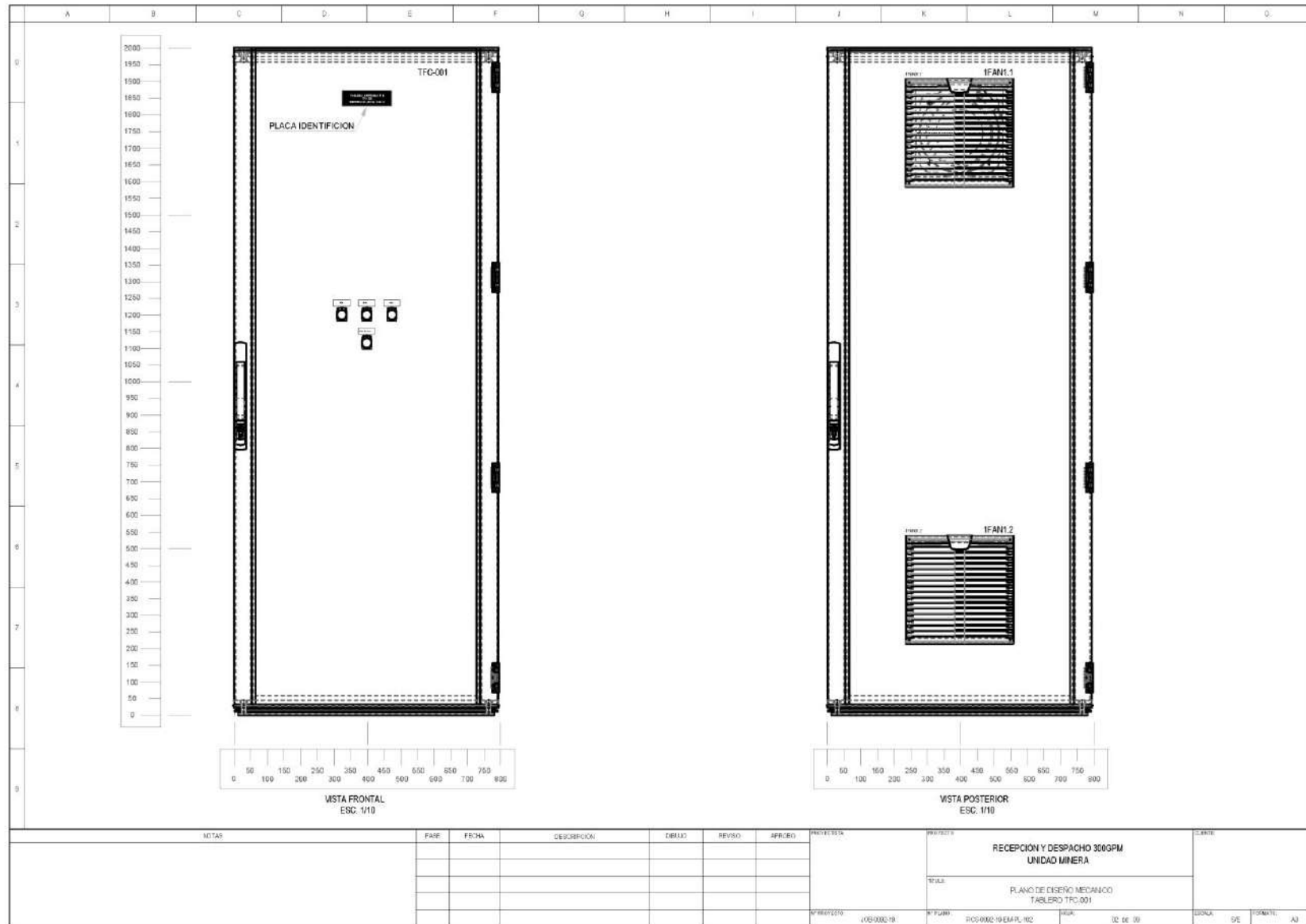


Figura 245 Gabinete TFC-001- Exterior. Fuente. Elaboración propia.

Figura 246 **Gabinete TFC-001- Interior frontal.** Fuente. Elaboración propia.

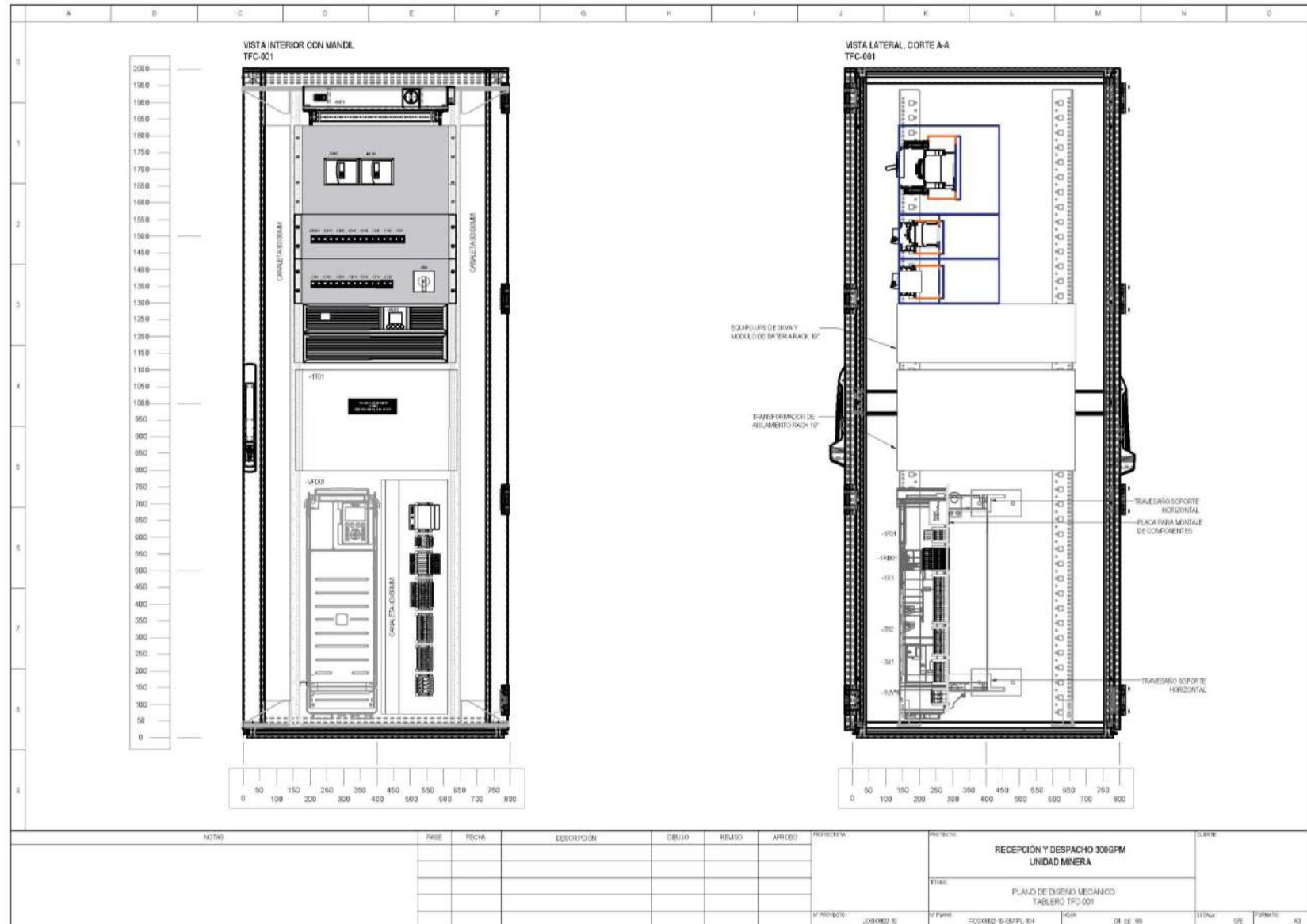


Figura 247 Gabinete TFC-001- Interior frontal y lateral. Fuente. Elaboración propia.

Figura 248 Gabinete TFC-001- Cajetín interior #1. Fuente. Elaboración propia.

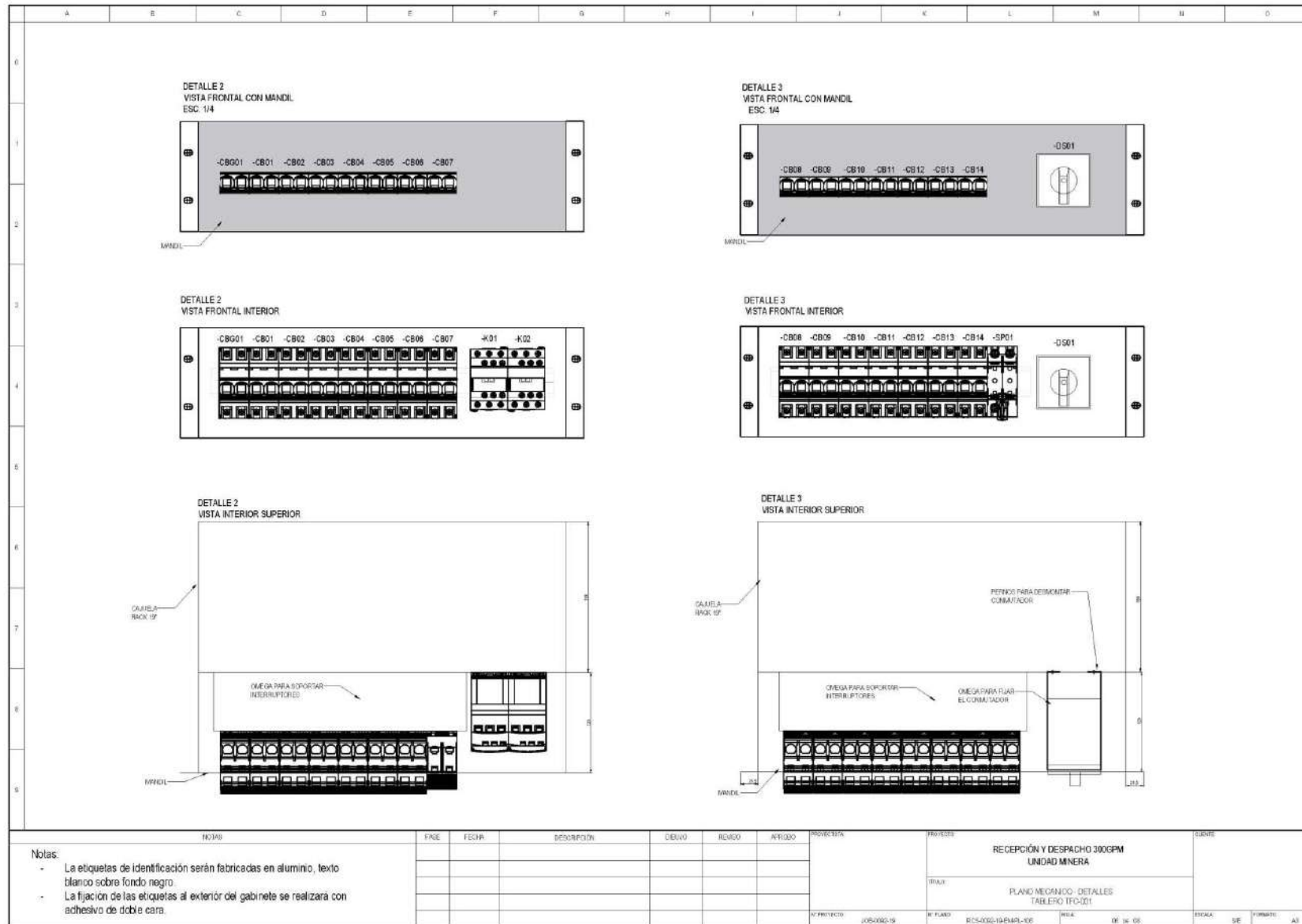


Figura 249 Gabinete TFC-001- Cajetín interior #2. Fuente. Elaboración propia.

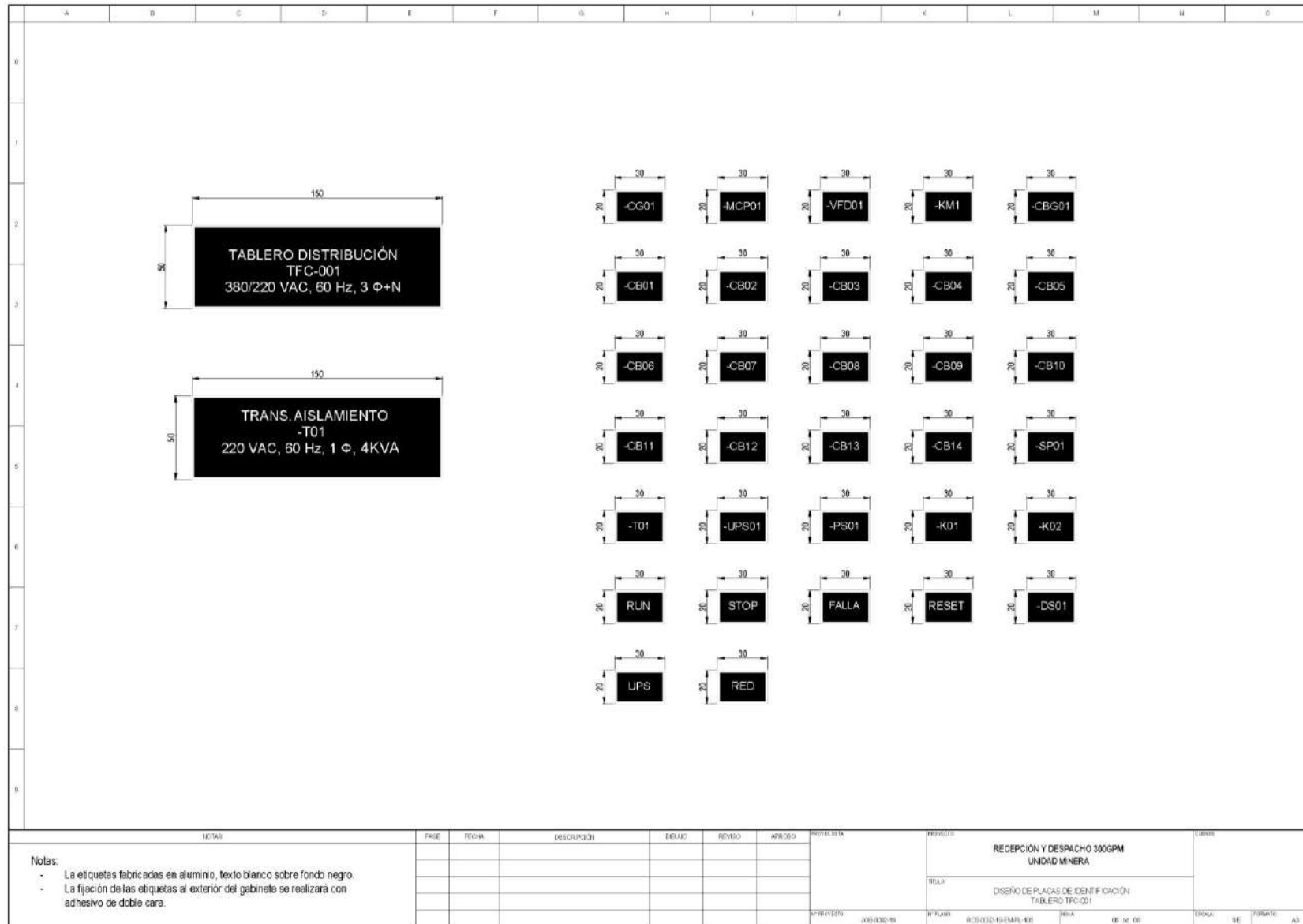


Figura 251 Gabinete TFC-001- Placas metálicas de identificación. Fuente. Elaboración propia.

Figura 252 Gabinete TFC-001- Diagrama unifilar-01 Fuente. Elaboración propia.

Figura 253 Gabinete TFC-001- Diagrama de conexonado-02 Fuente. Elaboración propia.

Figura 254 Gabinete TFC-001- Diagrama de conexionado-03 Fuente. Elaboración propia.

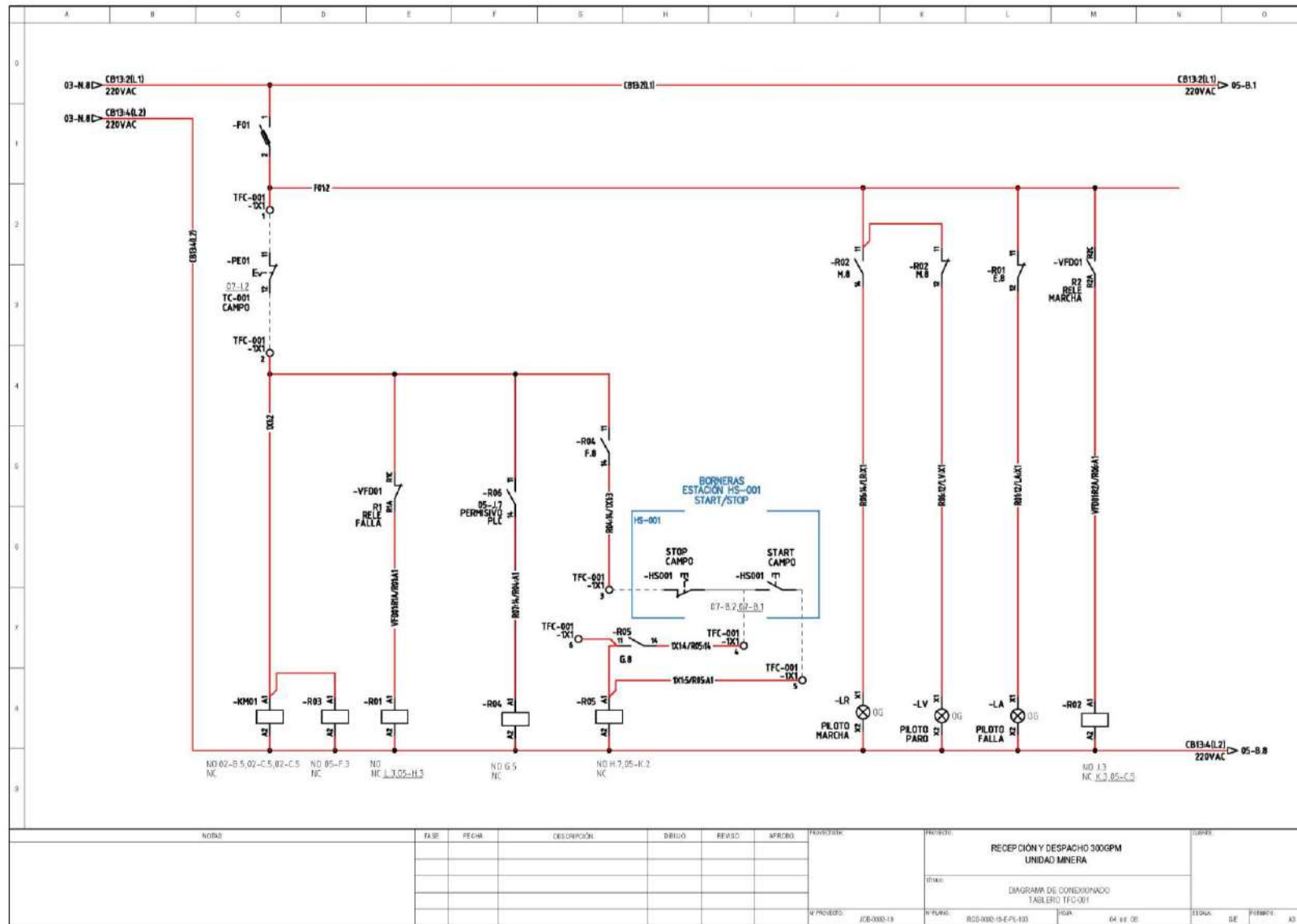


Figura 255 Gabinete TFC-001- Diagrama de conexiones-04 Fuente. Elaboración propia.

Figura 256 Gabinete TFC-001- Diagrama de conexionado-05 Fuente. Elaboración propia.

Figura 257 Gabinete TFC-001- Diagrama de conexonado-06 Fuente. Elaboración propia.

Figura 258 Tablero TC-001- Listado de componentes. Fuente. Elaboración propia.

Figura 259 Tablero TC-001- Distribución mecánica. Fuente. Elaboración propia.

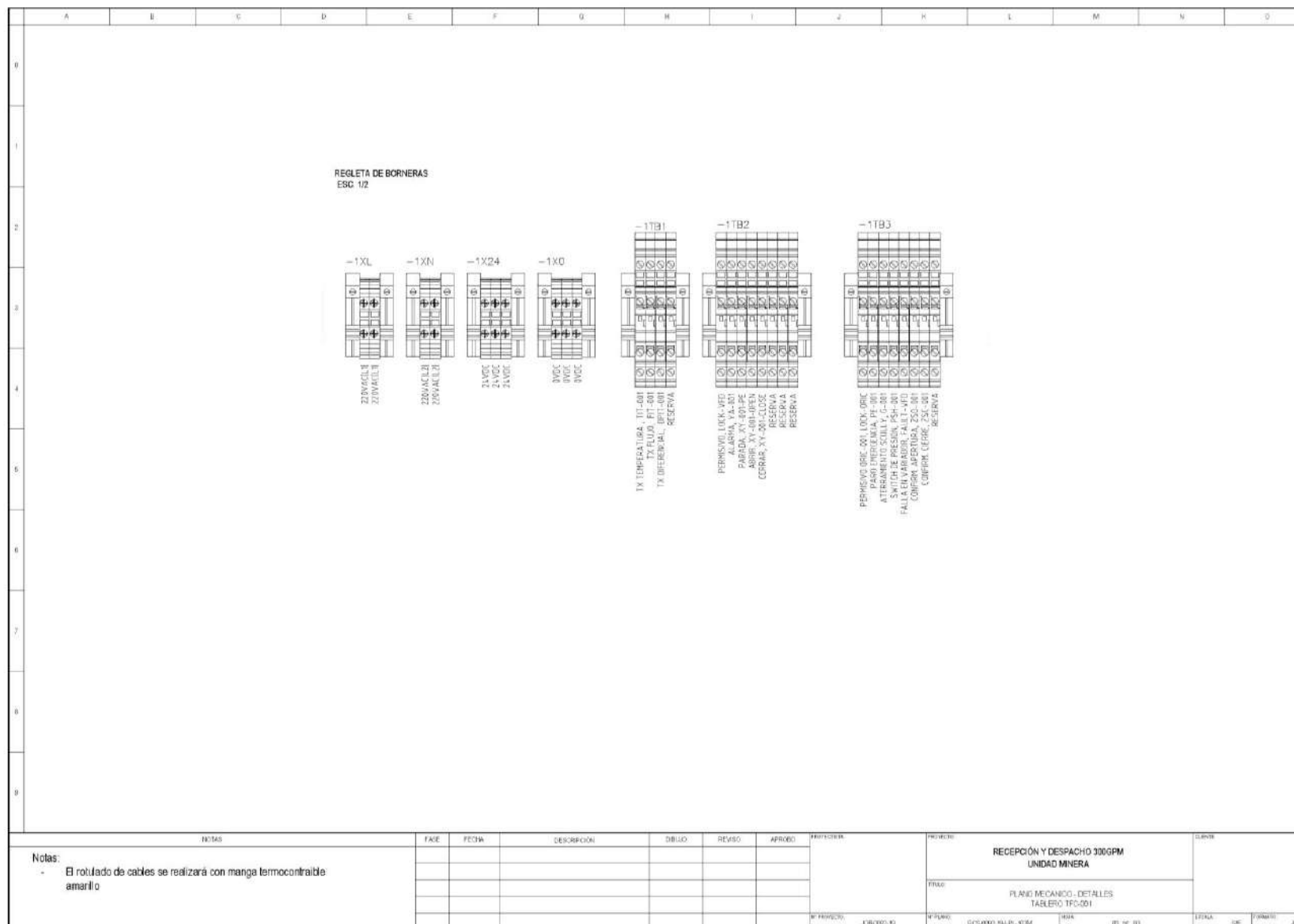


Figura 260 Tablero TC-001- Regleta de borneras. Fuente. Elaboración propia.

Figura 261 Tablero TC-001- Diagrama unifilar-01. Fuente. Elaboración propia.

Figura 262 Tablero TC-001- Diagrama de conexionado-02. Fuente. Elaboración propia.

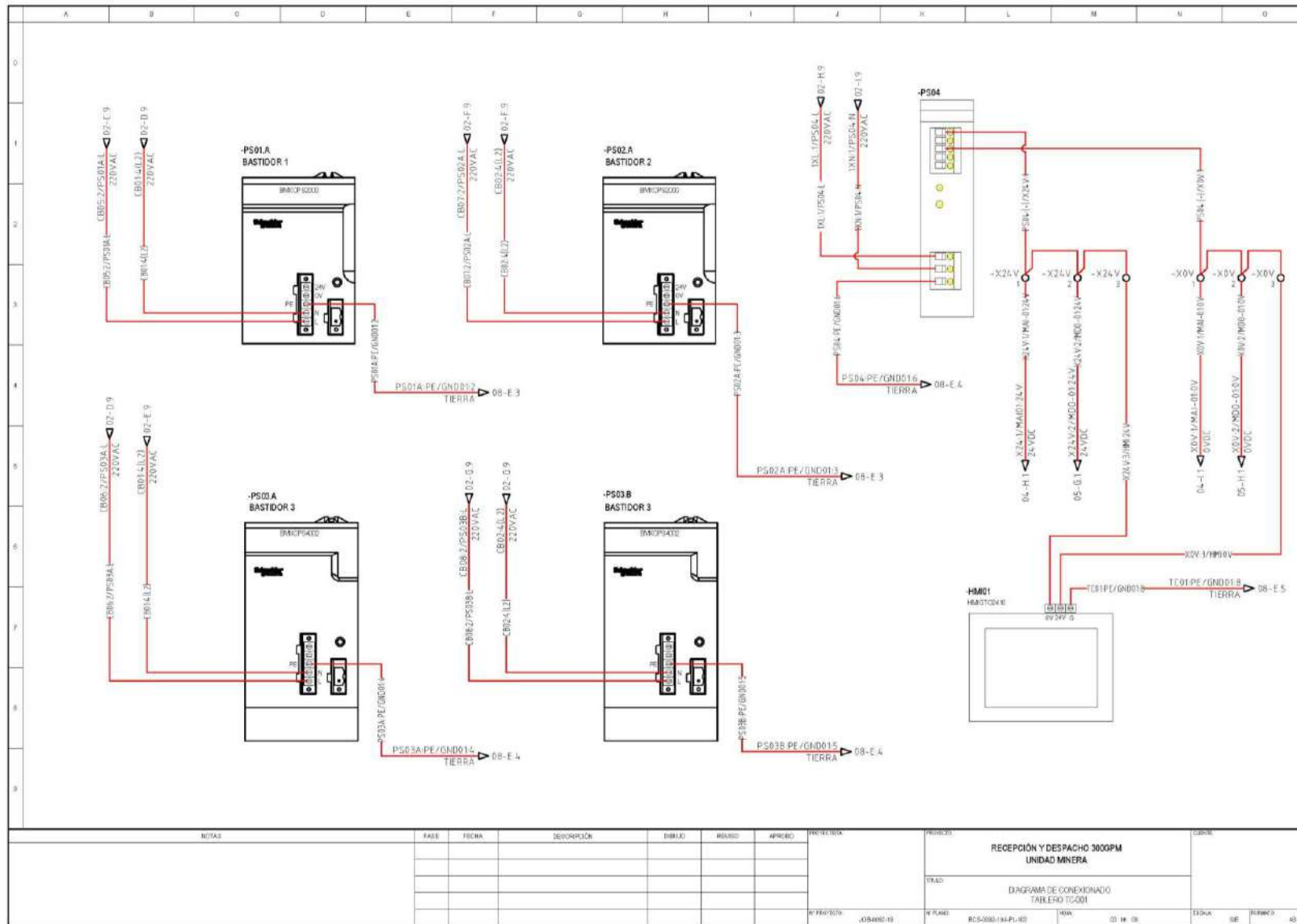


Figura 263 Tablero TC-001- Diagrama de conexiónado-03. Fuente. Elaboración propia.

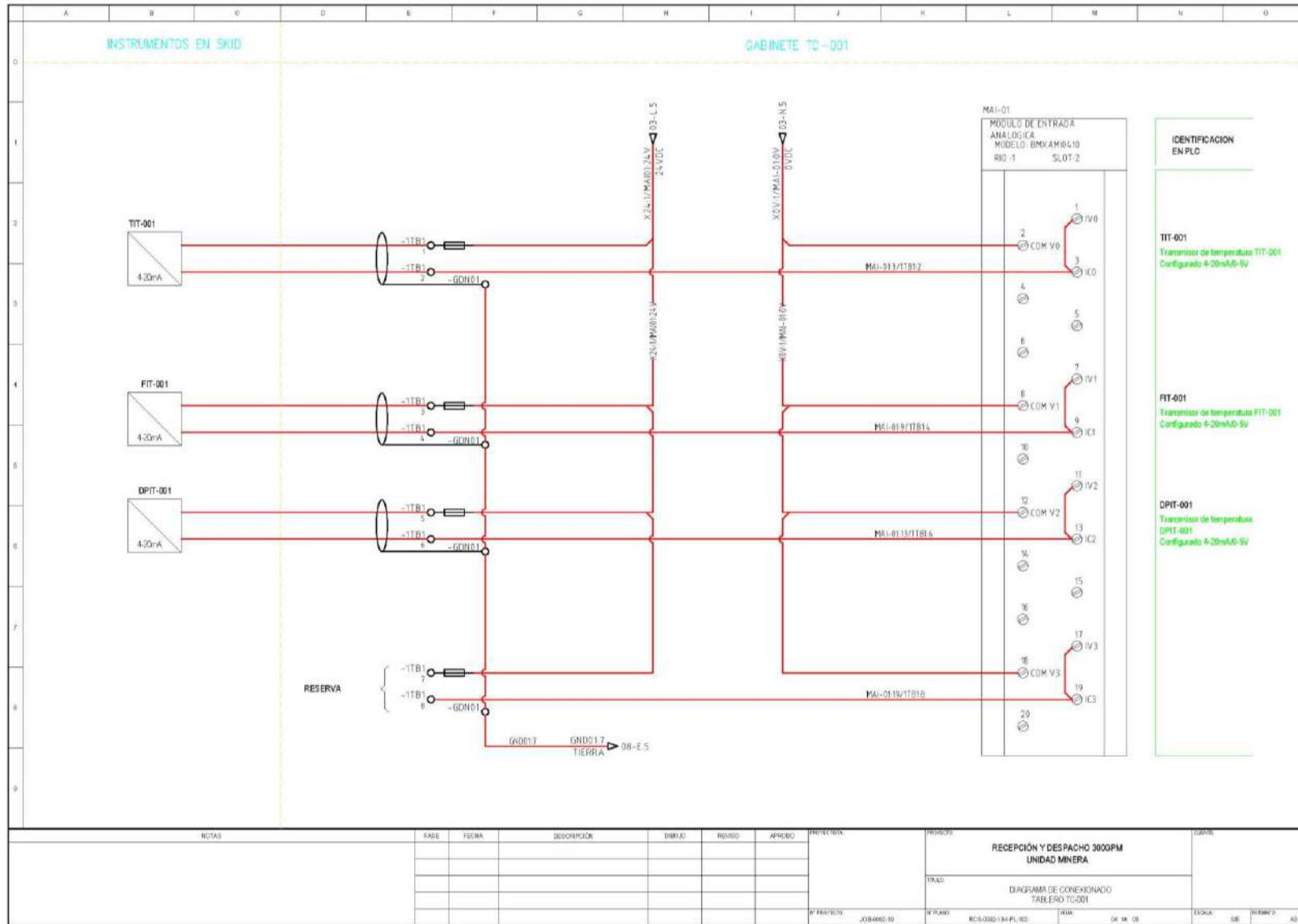


Figura 264 Tablero TC-001- Diagrama de conexionado-04. Fuente. Elaboración propia.

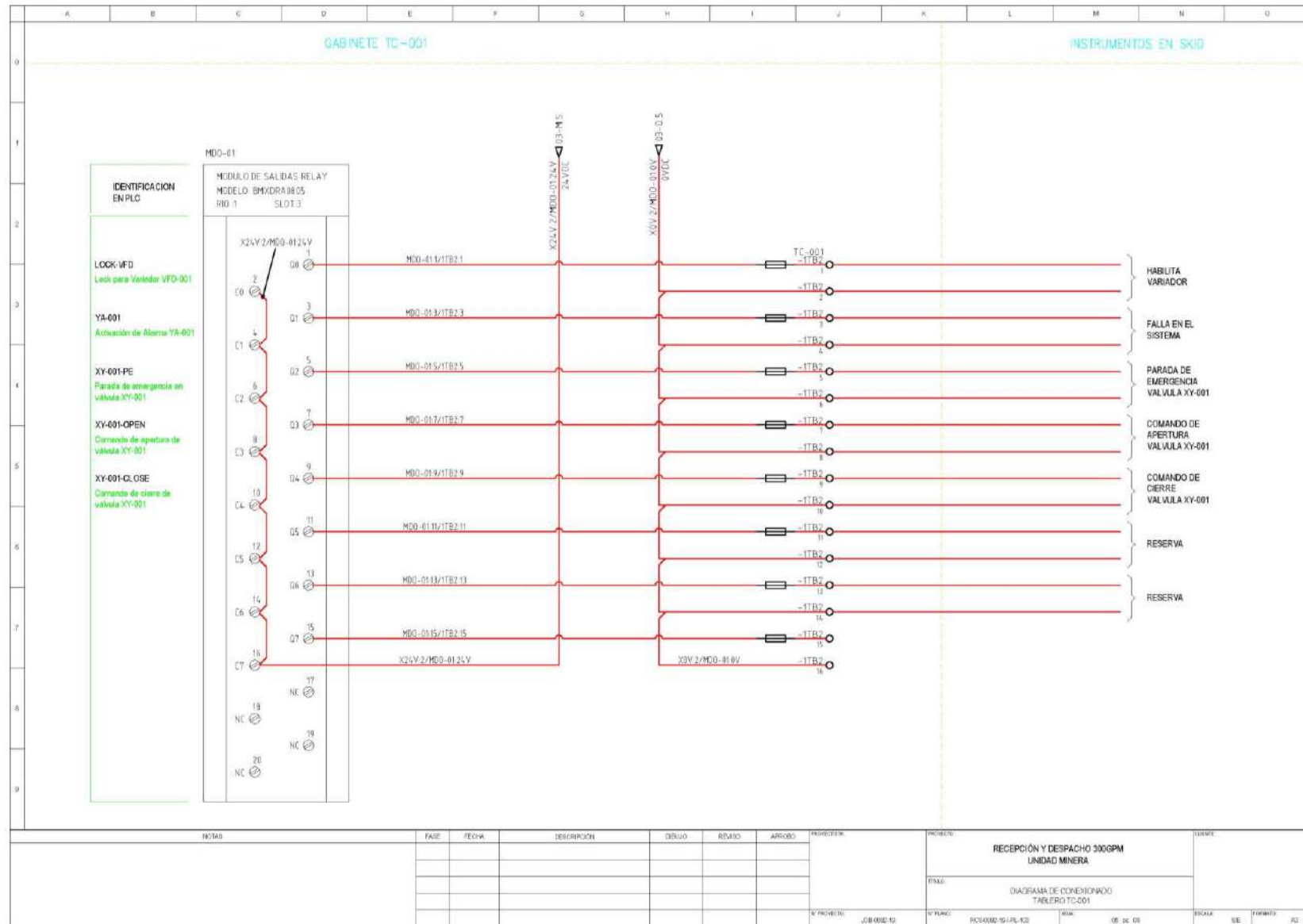


Figura 265 Tablero TC-001- Diagrama de conexionado-05. Fuente. Elaboración propia.

Figura 266 **Tablero TC-001- Diagrama de conexionado-06.** Fuente. Elaboración propia.

Figura 267 Tablero TC-001- Diagrama de conexionado-07. Fuente. Elaboración propia.

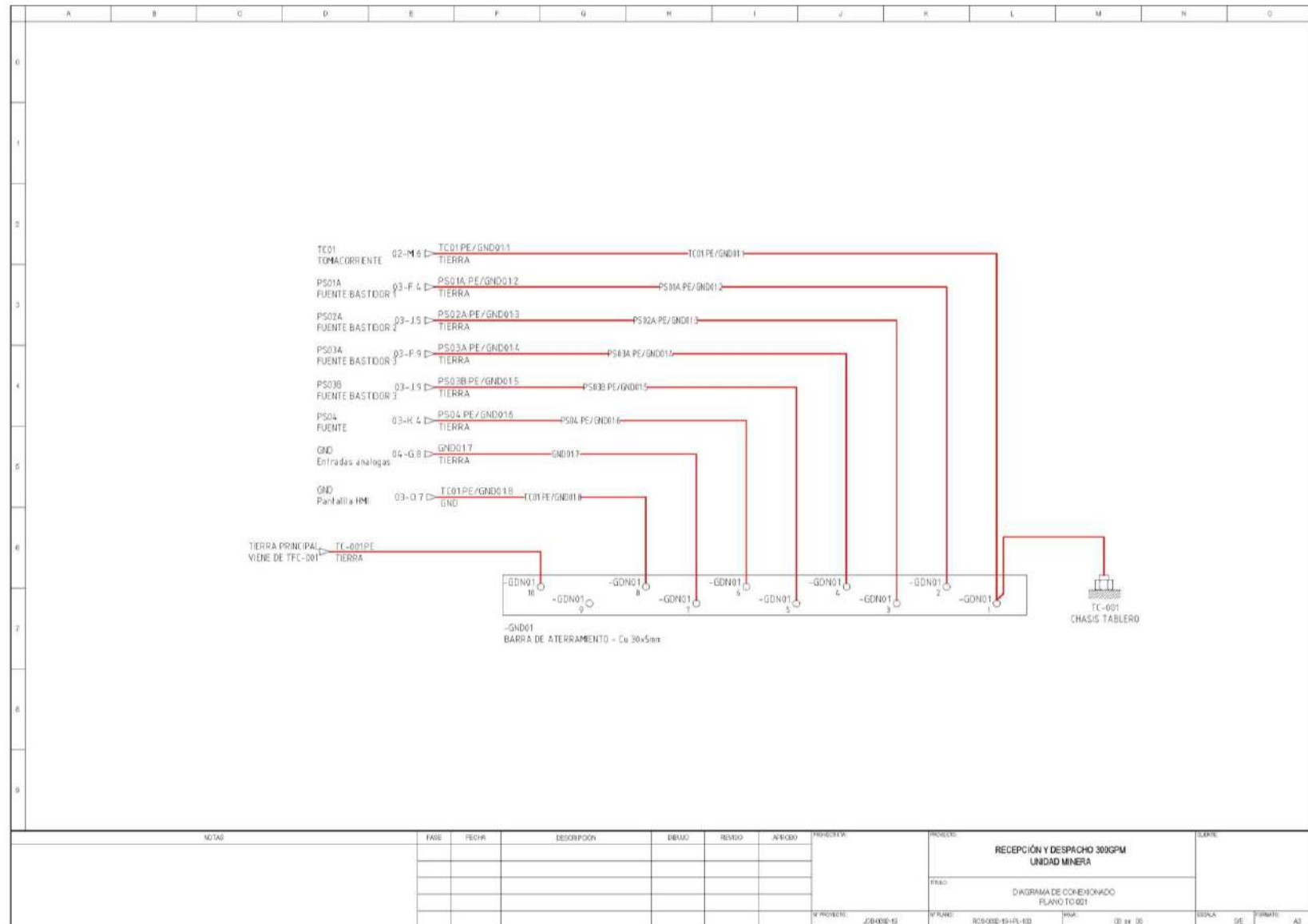


Figura 268 Tablero TC-001- Diagrama de conexionado-08. Fuente. Elaboración propia.