



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

FACULTAD TECNOLÓGICA  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**OPTIMIZACIÓN ELÉCTRICA Y MECÁNICA DEL SISTEMA DE BOMBEO EN  
LA PISCINA DE DERRAMES DE LA PLANTA DE MOLIENDA EN FAENA LA  
COIPA, COMPAÑÍA MANTOS DE ORO**

Profesor guía: José Gómez Vega

Patricio Jaime Barrera Araya

Copiapó, Chile 2025.



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

FACULTAD TECNOLÓGICA  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**OPTIMIZACIÓN ELÉCTRICA Y MECÁNICA DEL SISTEMA DE BOMBEO EN  
LA PISCINA DE DERRAMES DE LA PLANTA DE MOLIENDA EN FAENA LA  
COIPA, COMPAÑÍA MANTOS DE ORO**

Profesor guía: José Gómez Vega

Patricio Jaime Barrera Araya

Copiapó, Chile 2025.

## **DEDICATORIA**

A mi pareja, por su amor, por su apoyo incondicional, paciencia y comprensión durante cada etapa de este proceso. Gracias por ser mi fuerza y mi motivación diaria.

A mis hijos, quienes con su amor y alegría me inspiran a ser mejor cada día. Esta dedicación es también para ustedes, con la esperanza de que sigan sus sueños y nunca se rindan.

A la memoria de mi padre, cuya guía, apoyo y amor incondicional fueron la base de mis logros. Su fortaleza y ejemplo de vida siempre serán mi inspiración. Este trabajo es un homenaje a su legado, y aunque no pueda estar físicamente presente, su espíritu vive en cada paso que doy.

Y a mis profesores. Por su dedicación, paciencia y por compartir su sabiduría. Gracias por guiarme, no solo en el ámbito académico, sino también en el crecimiento personal.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I</b> .....	1
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. Objetivo general</b> .....	3
<b>1.2. Objetivos específicos</b> .....	3
<b>1.3. Justificación del problema</b> .....	3
<b>1.4. Problemática del proyecto</b> .....	3
<b>CAPÍTULO II</b> .....	5
<b>MARCO TEORICO</b> .....	5
<b>2.1. Definición y clasificación de bomba</b> .....	5
<b>2.2. Aplicación en minería</b> .....	5
<b>2.3. Piscina de derrame trapezoidal</b> .....	6
<b>2.4. Cálculos hidráulicos y mecánicos</b> .....	6
<b>2.4.1. Fracción volumétrica</b> .....	6
<b>2.4.2. Porcentaje de sólido</b> .....	6
<b>2.4.3. Gravedad específica</b> .....	7
<b>2.4.4. Caudal</b> .....	7
<b>2.4.5. Velocidad del fluido</b> .....	7
<b>2.4.6. Pérdida de carga</b> .....	8
<b>2.4.6.1. Darcy- Weisbach</b> .....	8
<b>2.4.7. Presión en sistema hidráulico</b> .....	8
<b>2.4.8. Potencia hidráulica</b> .....	9

<b>2.4.9. Carga hidráulica total</b> .....	9
<b>2.5. Balanza de Marcy</b> .....	9
<b>2.6. Variables eléctricas</b> .....	10
<b>2.6.1. Corriente alterna</b> .....	10
<b>2.6.2. Potencia eléctrica de entrada</b> .....	11
<b>2.6.3. Corriente nominal en función de la potencia eléctrica</b> .....	11
<b>2.6.4. Variadores de frecuencia</b> .....	11
<b>2.6.4.1. Principio de funcionamiento de un variador</b> .....	12
<b>2.6.5. Controlador lógico programable</b> .....	13
<b>2.6.6. Resistencia eléctrica</b> .....	13
<b>2.6.7. Caída de tensión</b> .....	13
<b>2.7. Actuador eléctrico ON-OFF</b> .....	14
<b>2.7.1. Protección y certificación</b> .....	14
<b>2.7.2. Componentes principales</b> .....	14
<b>2.7.3. ¿Cómo funciona?</b> .....	15
<b>2.7.4. Cálculo del torque</b> .....	15
<b>2.8. Válvula de bola</b> .....	15
<b>2.8.1. Explicación curva de presión – temperatura</b> .....	16
<b>2.8.2. Diagrama perdidas de carga</b> .....	16
<b>2.9. Sensor de temperatura</b> .....	16
<b>2.9.1. Funciones del sensor de temperatura en una bomba</b> .....	16
<b>2.10. Sensor de humedad</b> .....	17
<b>2.10.1. Funciones del sensor de humedad en la bomba</b> .....	17

<b>2.11. Energía eléctrica.....</b>	<b>17</b>
<b>2.11.1. Eficiencia energética .....</b>	<b>17</b>
<b>2.12. KPI.....</b>	<b>17</b>
<b>2.13. Normativas aplicables.....</b>	<b>18</b>
<b>2.13.1. Normativas ambientales en Chile .....</b>	<b>18</b>
<b>2.13.2. Normativas eléctricas.....</b>	<b>18</b>
<b>2.13.3. Normativas hidráulicas y neumáticas .....</b>	<b>19</b>
<b>2.14. Explicación gráfica curva de rendimiento .....</b>	<b>19</b>
<b>2.14.1. Elementos clave de la gráfica .....</b>	<b>20</b>
<b>2.14.2. Cómo interpretar la gráfica .....</b>	<b>20</b>
<b>CAPITULO III .....</b>	<b>21</b>
<b>PROCESO PISCINA DE DERRAMES.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1. Descripción general de la piscina de derrames.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2. Importancia del manejo de los líquidos y sólidos.....</b>	<b>22</b>
<b>3.3. Tipos de líquidos presentes.....</b>	<b>22</b>
<b>3.4. Problemática del sistema actual.....</b>	<b>22</b>
<b>3.5. Proceso técnico .....</b>	<b>23</b>
<b>3.5.1. Impacto técnico.....</b>	<b>23</b>
<b>3.6. Análisis del sistema actual bomba D-294.....</b>	<b>24</b>
<b>3.6.1. Descripción del sistema actual .....</b>	<b>24</b>
<b>3.6.2. Análisis de eficiencia energética.....</b>	<b>24</b>
<b>3.6.3. Costos de mantenimiento.....</b>	<b>24</b>
<b>3.6.4. Requerimiento para la nueva implementación .....</b>	<b>25</b>

<b>3.6.5. Propuesta de mejora</b> .....	25
<b>3.7. Cálculo de parámetros bomba actual</b> .....	25
<b>3.8. Gráfica de curva de rendimiento</b> .....	28
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	30
<b>CÁLCULO DE PISCINA DE DERRAMES</b> .....	30
<b>4.1. Volumen de la piscina de derrames</b> .....	30
<b>4.2. Densidad de los líquidos</b> .....	31
<b>4.3. Selección del tipo de bomba</b> .....	34
<b>4.4. Consideración de diseño</b> .....	35
<b>4.5. Cálculo de altura y presión requerida</b> .....	35
<b>CAPÍTULO V</b> .....	38
<b>MEJORA DEL SISTEMA DE BOMBEO PROPUESTO</b> .....	38
<b>5.1. Selección técnica de la bomba SHW modelo 360-125-1500</b> .....	38
<b>5.1.2. Características técnicas de la bomba SHW 360-125-1500</b> .....	38
<b>5.1.3. Otras características opcionales</b> .....	39
<b>5.1.4. Materiales de construcción</b> .....	40
<b>5.2. Cálculos y evaluación de parámetros operativos</b> .....	42
<b>5.3. Gráfica de la curva de rendimiento</b> .....	44
<b>5.4. Selección del Variador de Frecuencia (VDF)</b> .....	44
<b>5.4.1. Potencia nominal</b> .....	45
<b>5.4.2. Corriente requerida</b> .....	45
<b>5.4.3. Cálculo de sobrecarga del VDF</b> .....	45
<b>5.4.4. Verificación del voltaje nominal</b> .....	46

<b>5.4.5. Factor de sobrecarga</b> .....	46
<b>5.5. Configuración de frecuencia</b> .....	46
<b>5.6. Flexibilidad operativa</b> .....	46
<b>5.7. Razones por la selección</b> .....	47
<b>5.8. Selección del alimentador eléctrico</b> .....	48
<b>5.8.1. Caída de tensión</b> .....	48
<b>5.8.2. Selección del alimentador del cable</b> .....	50
<b>5.8.3. Cálculo del dimensionamiento de fusibles</b> .....	51
<b>5.8.3.1. Capacidad de corriente</b> .....	51
<b>5.8.3.2. Picos de corriente</b> .....	52
<b>5.8.4. Pérdidas por calor y dimensionamiento térmico</b> .....	53
<b>5.8.5. Compatibilidad con el VDF y protecciones</b> .....	53
<b>5.9. Detalle tablero de fuerza VDF</b> .....	53
<b>5.10. Selección de escalerilla porta conductores</b> .....	54
<b>5.10.1. Cálculo de la capacidad de la escalerilla</b> .....	55
<b>5.10.2. Riel unistrut</b> .....	57
<b>5.10.3. Hilo corrido galvanizado</b> .....	58
<b>5.11. Disipación térmica</b> .....	58
<b>5.12. Actuador eléctrico ON-OFF</b> .....	58
<b>5.12.1. Cálculo para seleccionar actuador eléctrico</b> .....	59
<b>5.12.2. Válvula de bola</b> .....	62
<b>5.12.3. Tablero de control remoto</b> .....	64
<b>5.12.3.1. Calculamos el área de la caja</b> .....	65

<b>5.13. Cálculo caja de conexión para bomba sumergible y VDF .....</b>	<b>67</b>
<b>5.13.1. Dimensionar la caja de paso.....</b>	<b>68</b>
<b>5.14. Sensor de nivel ultrasónico.....</b>	<b>69</b>
<b>5.14.1. Cálculo nivel del sensor .....</b>	<b>71</b>
<b>5.15. Transmisor ultrasónico Sitrans LUT400 .....</b>	<b>72</b>
<b>5.15.1. Configuración de parámetros .....</b>	<b>73</b>
<b>5.15.2. Conexión del transmisor al PLC.....</b>	<b>74</b>
<b>5.15.3. Cálculo del uso del transmisor Sitrans LUT400 .....</b>	<b>75</b>
<b>5.16. Requerimiento del PLC y HMI.....</b>	<b>76</b>
<b>5.16.1. PLC Control Expert de Schneider instalada .....</b>	<b>78</b>
<b>5.16.2. Integración con HMI .....</b>	<b>78</b>
<b>5.16.3. Control Expert.....</b>	<b>79</b>
<b>5.16.4. Funciones integradas utilizadas .....</b>	<b>81</b>
<b>5.16.5. Programación del funcionamiento del sistema de bombeo .....</b>	<b>84</b>
<b>5.16.6. Funcionamiento general de la lógica de PLC .....</b>	<b>87</b>
<b>CAPÍTULO VI .....</b>	<b>90</b>
<b>PLANOS ELÉCTRICOS E HIDRÁULICOS.....</b>	<b>90</b>
<b>6.1. Planos eléctricos e hidráulicos .....</b>	<b>90</b>
<b>6.1.1. Planos unilínea tablero control remoto .....</b>	<b>90</b>
<b>6.1.2. Detalle plano VDF 1 .....</b>	<b>91</b>
<b>6.1.3. Detalle VDF 2.....</b>	<b>92</b>
<b>6.1.4. Detalle de plano VDF 3 .....</b>	<b>94</b>
<b>6.1.5. Detalle plano VDF 4 .....</b>	<b>94</b>

6.1.6. Diagrama de conexión sensor de humedad y temperatura .....	95
6.1.7. Diagrama hidráulico .....	96
<b>CAPÍTULO VII.....</b>	<b>97</b>
<b>ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL SISTEMA PROPUESTO .....</b>	<b>97</b>
7.1.    Análisis del comportamiento hidráulico .....	97
7.2.    Evaluación económica.....	97
7.2.1. Beneficios del nuevo sistema .....	98
7.3.    Análisis del comportamiento eléctrico del sistema propuesto.....	98
7.3.1. Evaluación del comportamiento eléctrico.....	98
7.3.2. Beneficios del comportamiento eléctrico propuesto.....	100
7.4.    Cálculo de los KPI del proyecto.....	101
7.4.1. KPI de productividad .....	101
7.4.1.1. Determinar las horas de operación por mes .....	101
7.4.1.2. Calcular el volumen total bombeado .....	101
7.4.1.3. Cálculo de la productividad.....	102
7.4.1.4. Interpretación técnica .....	102
7.5.    KPI de costos energéticos para la bomba propuesta .....	103
7.5.1. Cálculo del consumo energético antes de la mejora.....	103
7.5.2. Cálculo del consumo energético de la bomba .....	104
7.5.3. Cálculo costo mensual de energía .....	104
7.5.4. Cálculo costo anual de energía.....	104
7.5.5. Cálculo del consumo energético de la bomba propuesta.....	104
7.5.6. Cálculo del consumo energético de la bomba .....	104

7.5.7. Cálculo costo mensual de energía .....	105
7.5.8. Cálculo costo anual de energía.....	105
7.5.8.1. Comparación del costo energético .....	105
7.6. KPI de mantenimiento.....	106
7.6.1. KPI de reducción de fallas.....	106
7.6.2. KPI de reducción de costos de mantenimiento.....	107
7.6.3. KPI detención de planta por falla.....	108
7.6.4. KPI pérdidas por detención (costos por inactividad) .....	109
7.6.4.1. Cálculo de pérdida antes de la mejora .....	109
7.6.5. Cálculo de pérdidas después de la mejora .....	110
7.6.6. Cálculo del KPI por detención.....	110
7.7. Resumen de los KPI utilizados.....	111
7.8. Inversión final de los equipos utilizados en la propuesta (mejora) .....	112
<b>CAPÍTULO VIII.....</b>	<b>115</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>115</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>118</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura N° 2.1. Funcionamiento variado de frecuencia.....</b>	<b>12</b>
<b>Figura N° 3.1. Bomba actual.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura N° 3.2. Curva de rendimiento bomba.....</b>	<b>28</b>
<b>Figura N° 4.1. Piscina de derrames área de molienda .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura N° 4.2. Balanza Marcy .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura N° 5.1. Bomba SHW 360-125-1500 .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura N° 5.2. Opciones de agitadores.....</b>	<b>39</b>
<b>Figura N° 5.3. Anillo rociador .....</b>	<b>40</b>
<b>Figura N° 5.4. Curva de rendimiento bomba propuesta.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura N° 5.5. VDF Vacon 100 .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura N° 5.6. Cable 4/0 .....</b>	<b>51</b>
<b>Figura N° 5.7. Tablero de fuerza VDF.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura N° 5.8. Actuador neumático .....</b>	<b>62</b>
<b>Figura N° 5.9. Válvula de bola.....</b>	<b>62</b>
<b>Figura N° 5.10. Curva de presión - temperatura.....</b>	<b>63</b>
<b>Figura N° 5.11. Diagrama de pérdidas de carga.....</b>	<b>64</b>
<b>Figura N° 5.12. Tablero de control remoto .....</b>	<b>66</b>
<b>Figura N° 5.13. Tablero de control remoto .....</b>	<b>69</b>
<b>Figura N° 5.14. Sensor de nivel ultrasónico .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura N° 5.15. Transmisor ultrasónico Sitrans LUT400.....</b>	<b>73</b>
<b>Figura N° 5.16. Conexión del transmisor al PLC .....</b>	<b>75</b>
<b>Figura N° 5.17. Conexión por comunicación .....</b>	<b>79</b>

<b>Figura N° 5.18. PLC Schneider Control Expert .....</b>	<b>80</b>
<b>Figura N° 5.19. PLC M580 EPAC.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura N° 5.20. Lógica de PLC, interacción del PLC con VDF .....</b>	<b>84</b>
<b>Figura N° 5.21. Lógica de PLC, secuencia de control con temporizador .....</b>	<b>85</b>
<b>Figura N° 5.22. Lógica de PLC, monitoreo detallado del VDF .....</b>	<b>86</b>
<b>Figura N° 5.23. Lógica de PLC, completa .....</b>	<b>88</b>
<b>Figura N° 5.24. HMI bomba 294.....</b>	<b>89</b>
<b>Figura N° 5.25. HMI molienda .....</b>	<b>89</b>
<b>Figura N° 6.1. Plano unilineal tablero control remoto .....</b>	<b>90</b>
<b>Figura N° 6.2. Detalle plano VDF 1 .....</b>	<b>92</b>
<b>Figura N° 6.3. Detalle plano VDF 2 .....</b>	<b>93</b>
<b>Figura N° 6.4. Detalle plano VDF 3. ....</b>	<b>94</b>
<b>Figura N° 6.5. Detalle plano VDF 4 .....</b>	<b>95</b>
<b>Figura N° 6.6. Diagrama de conexión sensor de humedad y temperatura.....</b>	<b>96</b>
<b>Figura N° 6.7. Esquema hidráulico.....</b>	<b>96</b>
<b>Figura N° 7.1. Gráfico resultados de perdidas.....</b>	<b>103</b>
<b>Figura N° 7.2. Gráfico costo energético .....</b>	<b>106</b>
<b>Figura N° 7.3. Grafica costo de mantenimiento mensual (USD).....</b>	<b>108</b>
<b>Figura N° 7.4. Grafica de tiempo de operación y paradas.....</b>	<b>109</b>
<b>Figura N° 7.5. Gráfico por pérdidas por detención (mensual y anual) .....</b>	<b>111</b>
<b>Figura N° 7.6. Gráfico de inversión y ahorro.....</b>	<b>114</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla N° 3.1. Datos técnicos bomba actual SHW 210-11KW-1500 .....</b>	<b>29</b>
<b>Tabla N° 4.1. Porcentaje de mezcla.....</b>	<b>31</b>
<b>Tabla N° 5.1. Materiales de construcción de la bomba .....</b>	<b>41</b>
<b>Tabla N° 5.2. Datos técnicos bomba propuesta SHW 360-125.1500 .....</b>	<b>41</b>
<b>Tabla N° 5.3. Especificaciones del VDF .....</b>	<b>47</b>
<b>Tabla N° 5.4. National Code (NEC) .....</b>	<b>52</b>
<b>Tabla N° 5.5. Parámetros de puesta en marcha rápida sensor XPS-15.....</b>	<b>74</b>
<b>Tabla N° 7.1. KPI utilizados con nombres técnicos.....</b>	<b>111</b>
<b>Tabla N° 7.2. Inversión de propuesta .....</b>	<b>112</b>
<b>Tabla N° 7.3. Inversión, ahorros anuales energéticos y mantenimientos.....</b>	<b>114</b>

## **RESUMEN**

Este proyecto desarrolla un enfoque integral para la optimización eléctrica y mecánica del sistema de bombeo en la piscina de derrames de la planta de molienda en Faena La Coipa, perteneciente a la Compañía Mantos de Oro.

El análisis comienza con una evaluación detallada del sistema de bombeo existente, destacando problemas como embancamiento frecuente, baja eficiencia energética y control limitado. Para ello, se realizaron cálculos eléctricos, mecánicos e hidráulicos que permitieron identificar las limitaciones técnicas de la bomba actual y sus componentes asociados. Se identificaron variables clave que afectan el desempeño, incluyendo la capacidad de manejo de sólidos, pérdidas de energía y fallas operativas recurrentes.

Posteriormente, se diseñó un sistema optimizado que incluye la implementación de una bomba más robusta, variadores de frecuencia (VDF) para el control de velocidad, sensores avanzados y un sistema de control automatizado basado en PLC y HMI. Estas mejoras permiten ajustar dinámicamente el caudal. Además, se dimensionaron conductores eléctricos y tableros de alta capacidad que cumplen con los estándares de seguridad y eficiencia establecidos por normativas nacionales e internacionales. También se estimaron los costos de inversión y operación del nuevo sistema, resaltando su viabilidad técnica y económica.

Finalmente, se presentan propuestas para mitigar el impacto ambiental, como el manejo adecuado de derrames y la reducción de residuos. Las pruebas hidráulicas y eléctricas realizadas validaron que el sistema optimizado mejora significativamente la eficiencia operativa y cumple con los más altos estándares de calidad.

**OPTIMIZACIÓN - SISTEMA DE BOMBEO – AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

## **ABSTRACT**

This project develops a comprehensive approach for the electrical and mechanical optimization of the pumping system in the spill pool of the grinding plant at La Coipa site, owned by the Mantos de Oro Company.

The analysis begins with a detailed evaluation of the existing pumping system, highlighting issues such as frequent clogging, low energy efficiency, and limited control. To address this, electrical, mechanical, and hydraulic calculations were performed to identify the technical limitations of the current pump and its associated components. Key variables affecting performance were identified, including solid handling capacity, energy losses, and recurring operational failures.

Subsequently, an optimized system was designed, which includes the implementation of a more robust pump, variable frequency drives (VDF) for speed control, advanced sensors, and an automated control system based on PLC and HMI. These improvements enable dynamic flow adjustment. Additionally, high-capacity electrical conductors and panels were sized to comply with national and international safety and efficiency standards. Investment and operational costs of the new system were also estimated, highlighting its technical and economic feasibility.

Finally, proposals to mitigate environmental impact are presented, such as proper spill management and waste reduction. The hydraulic and electrical tests performed validated that the optimized system significantly improves operational efficiency and meets the highest quality standards.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

La gestión eficiente de derrames en áreas de molienda, es crucial para garantizar la continuidad operativa, la seguridad y el cumplimiento de normativas ambientales. La piscina de derrames en el área de molienda de Faena La Coipa, de la Compañía Mantos de Oro, desempeña un rol crítico al recolectar aguas con altos niveles de sólidos provenientes del proceso. Sin embargo, el sistema de bombeo actual presenta importantes limitaciones para manejar eficientemente estos materiales, lo que afecta tanto su capacidad operativa como su eficiencia energética.

Para afrontar estos desafíos, el proyecto propone un sistema de bombeo eficiente y robusto, con tecnologías avanzadas como motores de alta eficiencia, variador de frecuencia (VDF), para control de velocidad, sensores ultrasónicos y controlador lógico programable (PLC), optimizando el proceso y reduciendo pérdidas eléctricas.

Desde el punto de vista eléctrico, el proyecto aborda la necesidad de una infraestructura adecuada para garantizar un suministro confiable y eficiente de energía a los equipos de bombeo. Esto incluye la selección de conductores eléctricos de alta capacidad, tableros eléctricos con clasificación IP54 para protegerlos en ambientes exigentes, y sistema de protección contra sobrecargas y cortocircuitos. Además, la integración de variadores de frecuencias que permitan ajustar la velocidad del motor en función de las demandas operativas, lo que optimiza el consumo energético y prolonga la vida útil de los equipos.

El presente trabajo se enfoca en analizar y optimizar el sistema de bombeo mediante la implementación de una bomba más robusta y moderna, complementada con tecnologías avanzadas como VDF, PLC, y HMI (interfaz hombre-máquina). Este enfoque no solo permitirá aumentar la capacidad de manejo de sólidos y mejorará la eficiencia energética, sino también la sostenibilidad del sistema frente a la exigencia del proceso minero.

El proyecto se estructura en capítulos, cada uno detallando un aspecto esencial del proceso, como se describe a continuación:

El capítulo II, establece el marco conceptual necesario para los cálculos, la selección de equipos y la propuesta de mejora desarrolladas en los capítulos posteriores.

El capítulo III, destaca las deficiencias del sistema actual y la necesidad de implementar mejoras, como un variador de frecuencia (VDF) y materiales resistentes, para optimizar la gestión de líquidos y sólidos, reducir costos y aumentar la eficiencia operativa y energética.

El capítulo IV, tiene como objetivo proporcionar una base técnica sólida para la implementación de un sistema de bombeo eficiente y robusto, optimizando los costos, reduciendo los tiempos de detención y garantizando la sostenibilidad operativa en el manejo de los derrames.

El capítulo V, se detalla cómo cada componente fue seleccionado y calculado para garantizar un sistema de bombeo eficiente, confiable y robusto para la evacuación de derrames en la piscina del área de molienda.

El capítulo VI, aborda las representaciones gráficas que describen el diseño e implementación de los sistemas eléctricos y de tuberías para el sistema de bombeo

El capítulo VII, detalla el diseño, funcionamiento, resultados, y beneficios del sistema propuesto, demostrando su viabilidad técnica, económica y operativa.

El capítulo VIII, se basa de una síntesis de los resultados alcanzados en el proyecto de optimización de sistema de bombeo en la piscina de derrames en la planta de molienda. Donde se resume los logros, beneficios y el cumplimiento de los objetivos planteados.

## **1.1. Objetivo general**

Optimizar un sistema de bombeo que sea eficiente para la evacuación de derrames en la piscina del área de molienda, a través de cálculos eléctricos, mecánicos e hidráulicos que superen las limitaciones del sistema actual.

## **1.2. Objetivos específicos**

- Describir con precisión el comportamiento hidráulico y eléctrico del sistema actual.
- Dimensionar los equipos y conductores eléctricos requeridos mediante cálculos técnicos precisos.
- Comparar las pérdidas de energía y la eficiencia del sistema actual con el sistema propuesto.
- Implementación de un sistema de control automatizado basado en VFD, PLC, HMI y sensores.
- Estimar los costos de inversión, operación y mantenimiento asociado al sistema propuesto.

## **1.3. Justificación del problema**

La optimización no solo garantiza una operación más eficiente y segura, sino también reducirá los costos de operación y mantenimiento. Además, minimiza los riesgos de embancamiento y asegura el cumplimiento de las normativas ambientales mediante un manejo de sólidos y líquidos.

La optimización incrementa la disponibilidad operativa al reducir las detenciones causadas por sobrecarga y embancamiento. Esto incrementa la continuidad de la producción y evita pérdidas significativas en horas de operación.

## **1.4. Problemática del proyecto**

El sistema de bombeo actual, con una bomba SHW 210-11KW-1500 y partida directa, enfrenta tres principales desafíos técnicos:

1. Embancamiento frecuente: La bomba no maneja eficientemente sólidos superiores al 40 %, lo que provoca fallas operativas recurrentes.
2. Baja eficiencia energética: La operación constante a velocidad fija genera consumo energético su óptimo.
3. Control limitado: El sistema actual carece de monitoreo y ajuste en tiempo real, lo que dificulta la respuesta a condiciones variables del proceso.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEORICO**

Este capítulo desarrolla el marco conceptual y técnico necesario para la implementación de un sistema de bombeo optimizado en la faena La Coipa. Se abordan definiciones, cálculos y normativas aplicables, que servirán como base para la selección de equipos y diseño del sistema.

#### **2.1. Definición y clasificación de bomba.**

Una bomba es un dispositivo diseñado para convertir energía mecánica en energía hidráulica. Según su principio de operación, las bombas se clasifican en:

- Bomba centrifugas: son las más utilizadas en minería debido a su capacidad de manejar líquidos con sólidos en suspensión. En el caso de la faena La Coipa, estas bombas son esenciales para el transporte de pulpas minerales y fluidos con densidades específicas superiores a 1.2, gracias a su diseño robusto y materiales resistentes al desgaste.
- Bombas de desplazamiento positivo: Ideales para líquidos altamente viscosos o con sólidos concentrados. Aunque menos comunes en aplicaciones mineras debido a su menor capacidad limitada de caudal, pueden ser útiles en procesos específicos que requieran precisión.
- Bombas sumergibles: Diseñadas para operar dentro del líquido, reduciendo pérdidas de succión y mejorando la eficiencia en espacios confinados como las piscinas de derrames.

#### **2.2. Aplicación en minería**

En procesos de molienda, las piscinas de derrames contienen mezclas complejas de agua, pulpas minerales y sólidos sedimentables. Estas condiciones exigen:

- Sistemas resistentes al desgaste, como materiales de alto cromo en los componentes de la bomba.
- Equipos capaces de manejar altos volúmenes y densidades específicas superiores a 1.2. veces la densidad del agua.

### 2.3. Piscina de derrame trapezoidal

Una piscina tiene dos bases paralelas de diferente longitud (base superior e inferior) y lados inclinados que convengan. Sus principales dimensiones son:

- Profundidad mayor (P1).
- Profundidad menor (P2).
- Ancho de la piscina (A).
- Longitud de la piscina (L).

Este diseño trapezoidal es común en faenas mineras debido a su capacidad de almacenamiento y su facilidad para manejar volúmenes variables de líquidos y sólidos sedimentables. El volumen se calcula con la fórmula:

$$V = A \times L \times \left( \frac{P1 + P2}{2} \right) \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.1})$$

### 2.4. Cálculos hidráulicos y mecánicos

#### 2.4.1. Fracción volumétrica

La fracción volumétrica (f) representa la proporción de un componente dentro del volumen total. Su fórmula es:

$$f = \frac{V_{del\ componente}}{V_{total}} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.2})$$

#### 2.4.2. Porcentaje de sólido

El porcentaje de sólidos indica la cantidad de sólidos presentes en la mezcla respecto al volumen total. Su fórmula es:

$$\% \text{ de sólido} = \frac{V_{\text{sólidos}}}{V_{\text{total}}} \times 100 \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.3})$$

Estos cálculos son fundamentales para seleccionar equipos que manejen mezclas con altos porcentajes de sólidos, como los encontrados en piscinas de derrames mineras

### 2.4.3. Gravedad específica

La gravedad específica (SG) es la relación entre la densidad de una sustancia y la densidad del agua, en aplicaciones mineras, es común encontrar mezclas con SG superiores a 1.3, lo que requiere bombas robustas y diseños adaptados.

$$SG = \frac{\text{Densidad del sólido}}{\text{Densidad del agua}} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.4})$$

### 2.4.4. Caudal

Se refiere al volumen del líquido que fluye por una tubería o sistema en un tiempo determinado. Se calcula con la fórmula:

$$Q = \frac{V_{\text{total}}}{t} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.5})$$

Dónde:

- Q = Caudal en m<sup>3</sup>/h.
- V<sub>total</sub> = Volumen total m<sup>3</sup>.
- t = Tiempo en horas.

### 2.4.5. Velocidad del fluido

La velocidad del fluido se calcula a partir del caudal e y el área de la sección transversal del conducto, usan la fórmula:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.6})$$

Dónde:

- Q = Caudal en m<sup>3</sup>/h.
- A = Área de la sección transversal m<sup>2</sup>.
- V = Velocidad del fluido  $\left(\frac{m}{s}\right)$ .

#### 2.4.6. Pérdida de carga

La pérdida de carga en una tubería debido al flujo de un fluido puede calcularse usando la formula Darcy- Weisbach:

$$H_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.7})$$

Dónde:

- F = Factor de fricción.
- L =Longitud de la tubería en metros.
- D = Diámetro de la tubería en metros.
- g = Aceleración debido a la gravedad.
- H<sub>f</sub> = Pérdidas de carga en metros.

##### 2.4.6.1. Darcy- Weisbach

La ecuación de Darcy-Weisbach, lleva el nombre de dos ingenieros destacados que contribuyeron significativamente a la hidráulica y el estudio del flujo de fluidos en tuberías.

#### 2.4.7. Presión en sistema hidráulico

El cálculo de la presión en un sistema hidráulico debido a la pérdida de carga puede realizarse usando la relación entre la pérdida de carga y la presión la fórmula es:

$$P = p \times g \times H_{total} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.8})$$

Dónde:

- P = Presión (Pa o N/m<sup>3</sup>).
- $\rho$  = Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>).
- g = Aceleración debido a la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>).
- H<sub>f</sub> = Pérdidas de carga.

#### 2.4.8. Potencia hidráulica

La potencia hidráulica representa la energía requerida para mover un fluido a través de un sistema de bombeo, teniendo en cuenta el caudal, la densidad del fluido y la altura de elevación, su fórmula es:

$$P_{hidráulica} = \frac{\rho * g * Q * H_t}{\eta} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2. 9})$$

Dónde:

- $\rho$  = densidad.
- g = Gravedad.
- Q = Caudal.
- H<sub>t</sub> = Altura total.
- $\eta$  = Eficiencia

#### 2.4.9. Carga hidráulica total

Es la suma de todas las alturas que de superar el fluido dentro de un sistema de bombeo.

$$H_t = H_{estática} + H_{fricción} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.10})$$

### 2.5. Balanza de Marcy

La balanza de Marcy es un instrumento utilizado en minería para medir la densidad o gravedad específica de pulpas, lo que permite determinar el porcentaje de sólidos en

mezclas de agua y minerales. Es esencial en plantas de procesamiento para optimizar proceso como molienda, flotación y bombeo. Su uso es sencillo:

- Se llena un recipiente con la pulpa, se elimina el aire, y se lee directamente la densidad o el porcentaje de sólidos en una escala calibrada.
- Antes de utilizar el recipiente se llena con agua para verifica que no esté descalabrada.

En procesos de molienda, las piscinas de derrames contiene mezclas complejas de agua, pulpas minerales y sólidos sedimentables. Estas características exigen

## **2.6. Variables eléctricas**

Las variables eléctricas son magnitudes que permiten cuantificar y medir las cantidades de energía que se suministran en un proceso industrial.

### **2.6.1. Corriente alterna**

La corriente alterna es predominante en instalaciones industriales debido a su eficiencia en la transmisión de energía. En este proyecto, el suministro eléctrico opera a 380 V y 50 Hz, la corriente trifásica utiliza tres corrientes alternas desfasadas 120°, es ideal para alimentar motores y equipos de alta potencia.

$$I_N = \frac{P}{\sqrt{3}x V x \cos(\theta)} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.11})$$

Dónde:

- P = Potencia.
- V = Tensión de alimentación.
- Cos ( $\theta$ ) = Factor de potencia.

### 2.6.2. Potencia eléctrica de entrada

La potencia eléctrica consumida por una bomba se calcula a partir de la potencia hidráulica y la eficiencia del sistema:

Donde  $\eta$  representa la eficiencia del sistema (bomba, el motor y componentes)

Fórmula:

$$P_{eléctrica} = \frac{P_{hidráulica}}{\eta} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.12})$$

Dónde:

- $P_e$  = Potencia. Eléctrica consumida.
- $P_h$  = Potencia hidráulica.
- $\eta$  = Eficiencia.

### 2.6.3. Corriente nominal en función de la potencia eléctrica

$$I_N = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \cos(\theta) \times \eta} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.13})$$

Dónde:

- $P$  = Potencia de la bomba.
- $V$  = Tensión de alimentación.
- $\eta$  = Eficiencia.
- $\cos(\theta)$  = Factor de potencia.

### 2.6.4. Variadores de frecuencia

Los VDF son dispositivos que regulan la velocidad del motor eléctrico en función de las necesidades del sistema. Su beneficio incluye:

- Reducción del consumo energético: Al operar la bomba solo la velocidad requerida.
- Protección del motor y de la bomba: Al evitar arranques y paradas bruscas
- Flexibilidad operativa: Permiten ajustar el flujo y la presión del sistema en tiempo real.

#### 2.6.4.1. Principio de funcionamiento de un variador

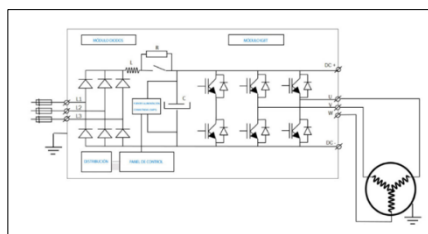
La corriente alterna se transforma en corriente continua. Esta corriente continua se transmite por emisión de pulsos, tanto positivos como negativos, y genera una corriente de motor emulando una señal senoidal. La frecuencia de esta “onda sinusoidal” puede ajustarse variando las tensiones alternas positiva y negativa de CC por unidad de tiempo. Es posible controlar la altura de la corriente de salida con la anchura de la tensión continua pulsante.

corriente alterna -> corriente continua -> corriente modulada (PWM – Pulse Width Modulated)

AC -> DC -> PWM (de corriente continua a corriente modulada (pwm)).

A continuación, el variador de frecuencia transforma la corriente continua en PWM. El variador puede representarse como seis “conmutadores”. Cada conmutador interrumpe la corriente continua durante cierto tiempo, lo que permite generar una corriente que se aproxima a la senoidal.

**Figura N° 2.1. Funcionamiento variado de frecuencia**



**Fuente: Google, funcionamiento VDF.**

### 2.6.5. Controlador lógico programable

El PLC (controlador lógico programable) es un dispositivo electrónico que actúa como cerebro del sistema de control automatizado, permitiendo la supervisión y operación eficiente de procesos industriales. En tu proyecto, el PLC juega un papel crucial en la optimización del sistema de bombeo en la piscina de derrames.

### 2.6.6. Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica es una propiedad fundamental de los materiales que mide su oposición al flujo de corriente eléctrica. En sistemas eléctricos, como el de tu proyecto, el cálculo y manejo adecuado de la resistencia eléctrica es esencial para garantizar eficiencia, seguridad y un diseño correcto.

### 2.6.7. Caída de tensión

La caída de tensión es una reducción en el voltaje a lo largo de un conductor debido a su resistencia e impedancia al flujo de corriente. En sistemas eléctricos como el de tu proyecto, es crucial mantener la caída de tensión dentro de límites aceptables para garantizar una operación eficiente y segura.

Su fórmula es:

$$\Delta V = \frac{\sqrt{3} \times \rho \times L \times I}{S} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.14})$$

1. Formula sección de cable

$$S = \frac{\sqrt{3} \times \rho \times L \times I}{\Delta V} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.15})$$

2. Formula porcentaje de caída de tensión

$$\text{Porcentaje de caída de tensión} = \frac{\Delta V}{V} \times 100 \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.16})$$

Dónde:

- $\Delta V$  = Caída de tensión.
- $I$  = Corriente nominal.
- $L$  = Longitud del cable en metros.
- $\rho$  = Coeficiente de resistividad del cobre.
- $S$  = Sección del conductor en  $mm^2$ .

## **2.7. Actuador eléctrico ON-OFF**

Un actuador eléctrico ON-OFF para una válvula rotativa, como una válvula de bola o mariposa, accionada con la fuerza neumáticamente, combina la presión del control eléctrico con la fuerza neumática para abrir o cerrar la válvula en posición completamente abierta o cerrada sin puntos intermedios. Este tipo de actuador es ideal para aplicaciones de control de flujo donde se requiere un encendido y apagado rápido y eficiente.

### **2.7.1. Protección y certificación**

- Clasificación IP: Selecciona un grado de protección adecuado para el entorno (por ejemplo, IP65 o superior si hay exposición a polvo o humedad).
- Certificaciones: verifica si el actuador cumple con las normativas de la industria, como ATEX para atmosferas explosivas.

### **2.7.2. Componentes principales**

- Válvula rotativa (neumática): la válvula en sí, que puede ser una válvula de mariposa o de bola.
- Actuador neumático: utiliza aire comprimido para generar el movimiento de rotación necesario para abrir o cerrar la válvula.
- Actuador eléctrico: controla el suministro de aire al actuado neumático, activando la función de apertura o cierre mediante señales eléctricas.

### 2.7.3. ¿Cómo funciona?

- El actuador eléctrico recibe una señal de control (por ejemplo, un contacto cerrado desde un PLC o un interruptor manual).
- Esta señal acciona una válvula solenoide que permite la entrada de aire comprimiendo el actuador neumático.
- El actuador neumático utiliza este aire comprimido para girar la válvula mariposa o de bola en 90°, abriendo o cerrando completamente el flujo.

### 2.7.4. Cálculo del torque

El par o torque requerido para operar una válvula de bola está influenciado por la presión del sistema. Utilizaremos la siguiente formula simplificada para obtener un sistema del torque necesario.

$$T = K \times A \times P \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2. 17})$$

Dónde:

- T = Torque requerido en Newton metros, Nm.
- K = Coeficiente que depende de las características de la válvula de bola (usualmente entre 0.2 y 0.5, dependiendo del fabricante y las condiciones del sistema).
- Para este cálculo, usaremos K: 0.3, una estimación conservadora para una válvula de bola con asientos suaves.
- A = Área de la válvula.
- P = Presión del sistema.

## 2.8. Válvula de bola

Una válvula de bola consta de un cuerpo con una abertura circular y una esfera metálica (la bola) que se inserta en esa abertura. Al girar la manivela o palanca de la válvula, la bola rota, bloqueando o permitiendo el paso del fluido a través de la abertura.

### **2.8.1. Explicación curva de presión – temperatura**

Una curva de presión vs. temperatura es una representación gráfica que muestra cómo la presión de un fluido (generalmente un gas o un líquido) varía al cambiar su temperatura, manteniendo otras variables constantes (como el volumen).

### **2.8.2. Diagrama perdidas de carga**

Un diagrama de pérdidas de carga, como el que presentas, es una herramienta gráfica que permite determinar la cantidad de energía que se pierde en forma de presión a lo largo de un sistema de tuberías, en este caso, específicamente en válvulas de bola. Esta pérdida de energía se debe principalmente a la fricción del fluido contra las paredes de la tubería y los componentes internos de la válvula.

## **2.9. Sensor de temperatura**

Un sensor de temperatura en una bomba se utiliza para monitorear las temperaturas críticas de componentes como el motor, rodamientos o el fluido bombeado. Su principal objetivo es detectar sobrecalentamientos que podrían causar daños a la bomba, mejorar la eficiencia operativa y evitar fallas prematuras.

### **2.9.1. Funciones del sensor de temperatura en una bomba**

- Protección del motor: monitorea la temperatura del motor para evitar sobrecalentamiento que podrían dañar la bobina o afectar su rendimiento.
- Monitoreo de los rodamientos: detecta el aumento de temperatura en los rodamientos, que podrían indicar desgaste o falta de lubricación.
- Control del fluido: en algunos casos, monitorea la temperatura del fluido bombeado para asegurar que esté dentro de los rangos operativos seguros.
- Mantenimiento predictivo: proporciona datos para evitar daños antes de que ocurran fallas catastróficas, facilitando el mantenimiento preventivo.
- Seguridad: previene fallos peligrosos por sobrecalentamiento, especialmente en sistemas críticos o de operación continua.

## **2.10. Sensor de humedad**

Un sensor de humedad en una bomba es un dispositivo utilizado para detectar la presencia de agua o humedad dentro de componentes críticos, como los motores o áreas selladas de la bomba. Este sensor ayuda a prevenir fallas graves al alertar el rendimiento de la bomba o causar daño.

### **2.10.1. Funciones del sensor de humedad en la bomba**

- Protección del motor: detecta la presencia de agua en el motor o en zonas críticas, lo que puede indicar una falla en los sellos o una fricción.
- Mantenimiento predictivo: al alertar de humedad anormal, permite realizar intervenciones antes de que ocurran fallas graves.
- Seguridad: previene daños eléctricos por húmedas, especialmente en sistemas que operan en tornos húmedos o sumergidos.

## **2.11. Energía eléctrica**

La energía eléctrica es la capacidad de un sistema eléctrico para realizar trabajo. Se mide en kilovatios-hora (kWh) y se calcula como:

$$E = P \times t \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.18})$$

### **2.11.1. Eficiencia energética**

Se refiere a la capacidad de un sistema o dispositivo para convertir la energía de entrada en energía útil, minimizando las pérdidas de energía.

## **2.12. KPI**

Los KPI (Key Performance Indicators) son métricas utilizadas para medir la efectividad, eficiencia y cumplimiento de los objetivos de un sistema o proyecto. En el contexto de tu proyecto de mejora del sistema de bombeo en la piscina de derrames, los

KPI te permiten monitorear y evaluar el desempeño del sistema, asegurando que cumpla con los objetivos planteados.

La eficiencia energética y operativa del sistema mediante el uso de tecnologías avanzadas esto es esencial en industrias de alta demanda energética, como la minería, donde los costos de electricidad representan una parte significativa del gasto operacional.

### **2.13. Normativas aplicables**

Son un conjunto de leyes o normas que se aplican a un caso específico. Las normas son requisitos obligatorios que se pueden aplicar a individuos, empresas, gobiernos, instituciones, entre otros.

#### **2.13.1. Normativas ambientales en Chile**

1. Ley 19.300 – Evaluación de impacto ambiental: Regula la implementación de proyectos que puedan impactar negativamente el medio ambiente. En el caso del sistema de bombeo optimizado, se garantiza el cumplimiento al minimizar fugas y manejar sólidos de forma eficiente.
2. Código del agua (ley 20.017): Regula la extracción y manejo responsable del agua, indispensable para el diseño sostenible del sistema.

#### **2.13.2. Normativas eléctricas**

1. Reglamento de instalaciones eléctricas (decreto supremo N.º 327): Establece los requisitos de seguridad para instalaciones de baja, media y alta tensión.
2. Norma Chilena NCH 4/2003: establece los requisitos de instalación, operación y mantenimiento de equipos eléctricos en instalaciones industriales, aplicable al montaje de variadores de frecuencia (VDF), tableros y conexiones.
3. Normas IEC 60204–1: Especifica requisitos de seguridad y cableado para maquinarias, relevantes para los dispositivos de protección eléctrica del sistema.

4. Norma IEEE 519: Calidad de energía y control de armónicos: establece los límites de distorsión armónica en sistemas eléctricos industriales, especialmente importante cuando se emplean VDF para minimizar los armónicos y mejorar la calidad de la energía.
5. Protocolos de comunicación industrial (Ethernet Profinet y Ethernet IP): Son relevantes para asegurar la integración y compatibilidad de los sistemas de control de la boba (PLC, HMI, sensores) en una red industrial de comunicación eficiente y segura.

### **2.13.3. Normativas hidráulicas y neumáticas**

1. Norma chilena NCH3197: Componentes hidráulicos y neumáticos: regula el diseño, fabricación y pruebas de equipos y sistemas hidráulicos y neumáticos para garantizar seguridad, eficiencia y rendimiento.
2. Norma ISO 4413: Cubre aspectos de diseño y mantenimiento de sistemas hidráulicos.
3. Norma ISO 4414: Requisitos generales para sistemas neumáticos: define estándares de seguridad para la operación y mantenimiento de sistemas neumáticos, aplicando criterios de diseño, selección de componentes y control de riesgo.
4. Norma ISO 8573: Calidad del aire en sistemas neumáticos: establece clases de calidad del aire comprimido, especificando límites de partículas, agua y aceite en el aire para proteger componentes neumáticos y evita fallas en sistema de control.
5. Norma ASME B31.3: Regula el diseño y pruebas de tubería de proceso industrial, aplicable al transporte de fluidos en el sistema de bombeo

### **2.14. Explicación gráfica curva de rendimiento**

Esta gráfica, también conocida como curva de rendimiento, nos proporciona una visión completa del comportamiento de una bomba sumergible a diferentes caudales. Cada curva representa el rendimiento de la bomba a una velocidad de rotación específica.

### **2.14.1. Elementos clave de la gráfica**

- Eje X (Caudal): Representa el volumen de líquido que la bomba puede mover en un determinado tiempo, generalmente expresado en m<sup>3</sup>/h.
- Eje Y (Altura manométrica o cabeza): Indica la altura máxima a la que la bomba puede elevar el líquido, expresada en metros.
- Curvas de rendimiento: Cada curva representa una velocidad de rotación de la bomba. A medida que aumenta el caudal, la altura manométrica disminuye, y viceversa. Esto se debe a que la energía de la bomba se distribuye entre vencer la resistencia del fluido y elevarlo a una cierta altura.
- Zona de eficiencia: La zona sombreada en azul representa la región de máxima eficiencia de la bomba. Es decir, el rango de operación donde la bomba consume la menor cantidad de energía para mover un determinado caudal.
- Punto de diseño: El punto de diseño de la bomba es aquel donde se espera que opere en condiciones normales. Este punto suele estar indicado en la gráfica.

### **2.14.2. Cómo interpretar la gráfica**

- Selección de la bomba: Para seleccionar una bomba, se debe conocer el caudal y la altura manométrica requeridos por la aplicación. Se busca el punto que representa estas condiciones en la gráfica y se selecciona la curva que pase más cerca de ese punto.
- Eficiencia: La zona de máxima eficiencia indica el rango de operación óptimo de la bomba. Operar fuera de esta zona puede resultar en un mayor consumo de energía y una menor vida útil de la bomba.
- Cavitación: Las curvas de la gráfica también pueden indicar la zona de cavitación, que es una condición de funcionamiento no deseada que puede dañar la bomba.

## CAPITULO III

### PROCESO PISCINA DE DERRAMES

Este capítulo analiza el funcionamiento actual del sistema de bombeo en la piscina de derrames de la planta de molienda. Se describen las fuentes de líquido que alimentan la piscina, el proceso técnico de extracción y envío de materiales, y las principales limitaciones del sistema actual. El análisis busca identificar las áreas críticas que requieren optimización para garantizar un manejo eficiente de líquidos y sólidos.

#### 3.1. Descripción general de la piscina de derrames

El manejo de líquidos en la piscina de derrames es fundamental para evitar acumulaciones que interfieran con la operación continua de la planta. Las fuentes principales de agua y pulpa que ingresan a la piscina incluyen:

1. Aguas de lavado de piso: Contienen finos y residuos que deben ser gestionados para evitar acumulaciones en las áreas de trabajo.
2. Aguas de sello de las bombas de molinos: Usadas para prevenir fugas de pulpa, eventualmente descargan en la piscina de derrames.
3. Bandeja de correas: Captura derrames y filtraciones durante el transporte de mineral.
4. Descarga de las bombas de piso (D-242 y D-236): Retiran el exceso de agua y pulpa de zonas específicas hacia la piscina.
5. Fugas en equipos: Incluyen bombas, válvulas y ducto, que contribuyen al volumen de la piscina.

Esta piscina está diseñada para gestionar tanto líquidos como sólidos presentes en el proceso productivo, asegurando su contención y tratamiento adecuado. Además, facilita la reincorporación de estos materiales al proceso productivo y previene derrames hacia el medio ambiente.

### **3.2. Importancia del manejo de los líquidos y sólidos**

El manejo eficiente de líquidos y sólidos asegura continuidad operativa, reduce costos y riesgo, y promueve la sostenibilidad al prevenir derrames y reutilizar agua. En resumen, el manejo optimizado de líquidos y sólidos impulsa:

- Eficiencia técnica: mejor desempeño del proceso productivo
- Cumplimiento legal: Reducción de riesgos ambientales.
- Sostenibilidad: Reutilización de recursos y reducción de desechos.
- Seguridad: Prevención de accidentes relacionados con derrames.

### **3.3. Tipos de líquidos presentes**

En la planta de molienda y específicamente en la piscina de derrames, se encuentran los siguientes líquidos:

1. Agua de proceso: Utilizada en diversas partes del circuito de molienda, puede contener sólidos y pulpa.
2. Pulpa mineral: Mezcla de agua y partículas minerales finas resultantes del proceso de molienda.
3. Barro o lodo: Mezcla más espesa de sólidos y agua, proveniente de derrames o sedimentación de minerales.
4. Aguas de lavado: Usadas para enfriar y sellar bombas, contienen pequeñas cantidades de sólidos en suspensión.

La densidad y viscosidad de estos líquidos influyen directamente en el diseño y capacidad del sistema de bombeo para manejarlos eficientemente.

### **3.4. Problemática del sistema actual**

El sistema de bombeo basado en la bomba D-294 presenta limitaciones que impactan negativamente en la eficiencia operativa y energética del proceso. Los problemas identificados incluyen:

1. Capacidad limitada para manejar sólidos: No soporta concentraciones superiores al 40 %, generando embancamientos frecuentes.
2. Falta de control ajustable: El sistema carece de monitoreo en tiempo real, dificultando la respuesta a variaciones en las condiciones del proceso.
3. Consumo energético elevado: Operar constantemente a velocidad fija, incrementa el costo de energía.

### **3.5. Proceso técnico**

1. Extracción de aguas y pulpas:
  - La bomba succiona el líquido acumulado en la piscina mediante un impulsor que genera presión para mover fluidos.
  - Como bomba sumergible, transforma la energía mecánica de rotación en energía cinética, impulsando el fluido hacia el exterior.
2. Envío al harnero:
  - El material bombeado es enviado a los harneros 236 o 237 del molino SAG, según la disponibilidad del equipo en operación.
  - Este proceso asegura que el flujo de material se integre al circuito de molienda, optimizando el uso de recursos y evitando interrupciones.

#### **3.5.1. Impacto técnico**

- Control de desechos líquidos: La bomba evita acumulaciones excesivas en la piscina, reduciendo riesgos de desbordamiento.
- Eficiencia operativa: Al reincorporar el agua al proceso mediante los harneros, se optimiza el uso de recursos hídricos y se reducen costos.
- Sistema de control: La bomba opera desde un centro de control de motores (CCM), pero carece de control ajustable de velocidad, limitando su eficiencia.

### **3.6. Análisis del sistema actual bomba D-294**

El sistema actual de bombeo en la piscina de derrames de la planta de molienda se caracteriza por su configuración básica, lo que ha llevado a varios problemas operativos que afectan, el desgaste del equipo y el cumplimiento de los estándares ambientales. A continuación, se describe el análisis técnico del sistema existente (use los datos de la bomba en la tabla 3.1.).

#### **3.6.1. Descripción del sistema actual**

El sistema actual, modelo 210-11KW-1500, es un equipo centrífugo con un motor de 11 kW y sistema de partida directa. Este diseño está limitado en su capacidad de manejo de sólidos y eficiencia energética. Los principales problemas asociados son: (figura 2.1.).

- Manejo inadecuado de sólidos: El diseño no permite el transporte eficiente de materiales con una concentración superior al 40 %.
- Fallas frecuentes: La acumulación de sólidos genera bloques y desgaste acelerado de componentes.
- Consumo energético elevado: La operación constante a velocidad fija incrementa los costos energéticos.

#### **3.6.2. Análisis de eficiencia energética**

La bomba actual consume un promedio de 9.6 kWh, lo que representa un gasto mensual significativo. Esta cifra podría reducirse mediante el ajuste dinámico del caudal y el uso de motores más eficientes.

#### **3.6.3. Costos de mantenimiento**

Los costos de mantenimiento mensual del sistema actual son elevados, debido a fallas frecuentes en el sistema de sellado y al desgaste de componentes internos. Estas intervenciones no planificadas afectan directamente la productividad de la planta.

### 3.6.4. Requerimiento para la nueva implementación

Para superar estas limitaciones, se plantea implementar un sistema que incorpore:

- Soporte concentraciones de sólidos superiores al 40 %.
- Permita el ajuste dinámico del caudal mediante un variador de frecuencia.
- Reduzca los costos de mantenimiento mediante materiales de alta resistencia y un diseño optimizado.

### 3.6.5. Propuesta de mejora

Se propone un sistema de bombeo optimizado que incorpore:

- Bomba robusta: Capaz de manejar sólidos superiores al 40 %.
- Control de velocidad: Implementación de VDF para regular el caudal según las necesidades.
- Materiales avanzados: Uso de componentes resistentes al desgaste y corrosión para reducir fallas.
- Monitoreo automatizado: Integración de sensores y PLC para optimizar la operación y responder a cambios en tiempo real.

## 3.7. Cálculo de parámetros bomba actual

### 1. Cálculo de corriente

Como se detalla en la ecuación (**Ec. N° 2.11**).

Dónde:

- $P = 11 \text{ kW}$  (potencia de la bomba).
- $V = 380 \text{ V}$  (tensión de alimentación).
- Factor de potencia 0.7 (entregado por la empresa).

$$I_N = \frac{11 \text{ kW}}{\sqrt{3} \times 380 \text{ V} \times \cos(0.7)} = 23.9 \text{ A}$$

**Figura N° 3.1. Bomba actual**



**Fuente: Elaboración propia, planta La Coipa.**

2. Cálculo de potencia eléctrica de entrada

Como se detalla en la ecuación. (Ec. N° 2. 12).

$$P_{eléctrica} = \frac{6.1}{0.85} = 7.2 \text{ kW}$$

Dónde:

- 6.1 = Potencia hidráulica.
- 0.85 = Eficiencia de la bomba.

Los 7.2 kW calculados son una estimación bajo condiciones operativas específicas y con eficiencia máxima, mientras que los 11 kW de la placa de la bomba representan la potencia máxima que puede consumir en condiciones de máxima carga o arranque sin controlar las pérdidas.

3. Calculo potencia hidráulica

La potencia hidráulica requerida para elevar el líquido, considerando el caudal, la altura total y la gravedad específica del líquido es según: (Ec. N° 2.9).

$$P_{hidráulica} = \frac{1000 \times 9.81 \times 0.0278 \times 19}{0.85} = 6.1 \text{ kW}$$

Dónde:

- 1000 kg / m<sup>3</sup>, es la densidad del agua.
- 9.81 m / s<sup>2</sup>, es la gravedad.
- 0.0278 m<sup>3</sup> / s, es el caudal.
- 19 m, es la altura total.
- 0.85, es la eficiencia de la bomba.

#### 4. Potencia hidráulica en caballos de fuerza (HP)

$$P_{hidráulica (HP)} = \frac{kW}{Hp} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 3.1})$$

$$P_{hidráulica (HP)} = \frac{6.1}{0.746} = 8.2 \text{ HP}$$

#### 5. Carga hidráulica total

Como se detalla en las ecuaciones. (**Ec. N° 2.6**), (**Ec. N° 2.7**), (**Ec. N° 2.10**).

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.0278}{\pi * \left(\frac{0.1016}{2}\right)^2} = 3.4 \text{ m/s}$$

Dónde:

- 0.106 m, es el diámetro de la tubería de 4”.
- 36 m, es la longitud total de la tubería.
- 19 m, es la altura total.
- 0.02, es el factor de fricción para flujo turbulento.

$$H_{fricción} = 0.02 * \frac{36L}{0.1016} * \frac{(3.4)v^2}{2 * 9.81} = 4.89 \text{ m}$$

Carga total:

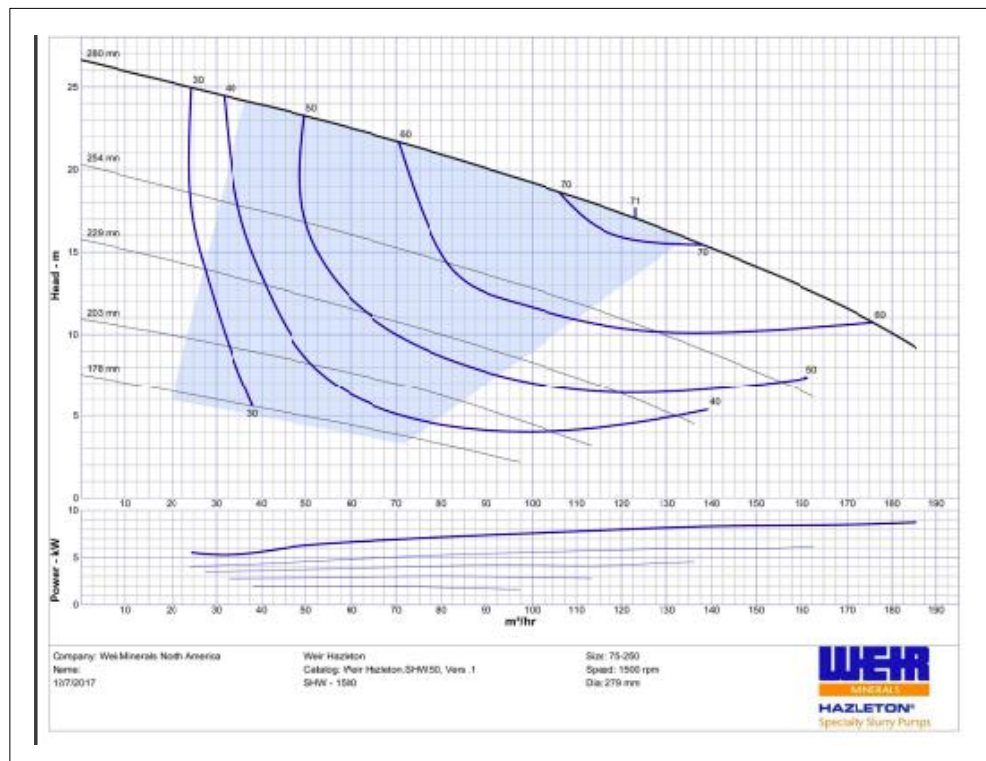
$$H_T = 19 + 4.89 = 23.89 \text{ m}$$

Una eficiencia del 85 % con partida directa en un abomba significa que, del total de la potencia eléctrica consumida por el motor el 85 % se convierte en trabajo útil para mover el fluido, mientras que el 15 % restante es pierde principalmente en forma de calor y fricción dentro del sistema.

### 3.8. Gráfica de curva de rendimiento

En la gráfica se muestra las variables claves en el comportamiento de la bomba bajo diferentes condiciones de operación. (Explicación de gráfica página 33).

**Figura N° 3.2. Curva de rendimiento bomba**



**Fuente: Manual Weir VULCO.**

**Tabla N° 3.1. Datos técnicos bomba actual SHW 210-11KW-1500**

Parámetro	Descripción
Modelo	SHW 210-11KW-1500
Potencia	11 kW – maneja fluidos densos y grandes caudales sin comprometer el rendimiento.
Velocidad	1500 rpm – adecuada para bombear fluidos a largas distancias o superar grandes alturas
Tensión de alimentación	380 V – estándar en instalaciones industriales, garantiza compatibilidad con la red eléctrica.
Frecuencia	50 Hz
Corriente nominal	23.9 A – compatible con la infraestructura eléctrica de la planta.
Máxima sumergencia	23 m – permite operación eficiente en profundidades importantes.
Capacidad de caudal	100 m <sup>3</sup> /h – vaciado eficiente de la piscina en menos de una hora.
Altura total de elevación	19 m – supera los 15.54 m requeridos en este sistema.
Gravedad específica (S.G)	1.00 – limitada para manejar líquidos con sólidos al 40 %.
Potencia en CV	8.2 hp

**Fuente: Elaboración propia, datos entregados por fabricante.**

## CAPÍTULO IV

### CÁLCULO DE PISCINA DE DERRAMES

Este capítulo consiste en el análisis y cálculo detallado de los parámetros necesarios para dimensionar adecuadamente la piscina de derrames en la planta de molienda. Se calcula su volumen, la fracción volumétrica de cada componente (agua, pulpa y barro), el porcentaje de sólidos en la mezcla, y la gravedad específica de la mezcla. Estos valores son esenciales para la selección de una bomba que cumpla con las condiciones operativas y garantizando una evacuación eficiente y sostenible.

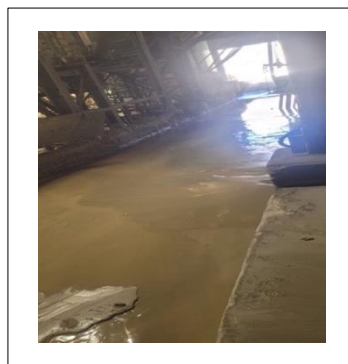
#### 4.1. Volumen de la piscina de derrames

La piscina de derrames tiene forma trapezoidal, con dimensiones diseñadas para optimizar la capacidad de retención y manejo de fluidos residuales. Su volumen se calcula con la ecuación y figuras. (Ec. N° 2.1), (figura N° 4.1. y figura N° 4.2.).

- 3 metros, es la profundidad mayor (P1).
- 1 metro, es la profundidad menor (P2).
- 3 metros, es el ancho de la piscina (A).
- 25 metros, es la longitud de la piscina (L).

$$V = 3 \text{ m} \times 25 \text{ m} \times \left( \frac{3 \text{ m} + 1 \text{ m}}{2} \right) = 150 \text{ m}^3$$

**Figura N° 4.1. Piscina de derrames área de molienda**



**Fuente: Elaboración propia, planta La Coipa**

## 4.2. Densidad de los líquidos

Las densidades de los líquidos presentes son:

- Agua 1000 kg / m<sup>3</sup>.
- Pulpa mineral 1200 kg / m<sup>3</sup>
- Barro 2400 kg / m<sup>3</sup>.

Variando según su composición.

Con los resultados de análisis de la toma de muestra de la piscina, donde la mezcla contiene un 60 % de agua, 30 % de pulpa mineral y 10 % de barro, es posible ajustar los cálculos necesarios para seleccionar una bomba que maneje estas proporciones de sólidos y líquidos. Estos resultados son fundamentales para dimensionar adecuadamente el equipo de bombeo, ya que influyen directamente en la densidad de la mezcla, el caudal necesario y la capacidad de manejo de sólidos que debe tener la bomba. (Vea los datos de la tabla 4.1.).

Este tipo de análisis también permite evaluar mejor la eficiencia energética y operativa del sistema de bombeo y planificar su mantenimiento para garantizar que pueda evacuar la piscina de forma rápida y eficiente sin sufrir un desgaste prematuro.

**Tabla N° 4.1. Porcentaje de mezcla**

Material	Porcentaje de mezcla
Agua	60 %
Pulpa	30 %
Barro	10 %

**Fuente: Elaboración propia.**

## 1. Cálculo del volumen

$$V_{densidad} = V_{total} \times \% \text{ de mezcla} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 4.1})$$

$$V_{agua} = 150 m^3 \times 0.60 = 90 m^3$$

$$V_{pulpa \text{ mineral}} = 150 m^3 \times 0.30 = 45 m^3$$

$$V_{barro} = 150 m^3 \times 0.10 = 15 m^3$$

Dónde:

- $150 m^3$ , es el volumen de la piscina de derrames.
- 0.60, es el volumen de agua en la piscina de derrames.
- 0.30, es el volumen de la pulpa mineral en la piscina de derrames.
- 0.10, es el volumen de barro en la piscina de derrames.

Estos cálculos dan un desglose del volumen de cada componente en la piscina de derrames, lo cual es fundamental para la selección y diseño de la bomba y el sistema de evacuación.

## 2. Cálculo de la fracción volumétrica

Como se detalla en la ecuación. (Ec. N° 1.1).

$$FV_{agua} = \frac{90 m^3}{150 m^3} = 0.6$$

$$FV_{pulpa} = \frac{45 m^3}{150 m^3} = 0.3$$

$$FV_{barro} = \frac{15 m^3}{150 m^3} = 0.1$$

Estas fracciones volumétricas son consistentes con los resultados de la toma de muestra y son fundamentales para el diseño del sistema de bombeo, ya que determinan cómo se comportan los diferentes componentes en la mezcla durante la evacuación.

### 3. Cálculo del porcentaje de sólido

Para el cálculo del sólido en la piscina de derrames se suma el volumen de los sólidos del barro y la pulpa mineral, para obtener el volumen del sólido total.

$$V_{sólidos} = V_{pulpa} + V_{barro} \quad (\text{Ec. N}^\circ 4.2)$$

$$V_{sólidos} = 45 \text{ m}^3 + 15 \text{ m}^3 = 60 \text{ m}^3$$

Ahora, se calcula el porcentaje de sólido que se encuentra en la piscina de derrames. Se detalla en la ecuación. (Ec. N° 2.3).

$$\% \text{ de sólido} = \frac{60 \text{ m}^3}{150 \text{ m}^3} \times 100 = 40 \%$$

El porcentaje de sólidos en la mezcla de la piscina de derrames es de 40 %.

Este valor es crucial para seleccionar una bomba que pueda manejar adecuadamente la mezcla y garantizar un funcionamiento eficiente del sistema de evacuación.

En este caso, la mezcla tiene:

- 40 % de sólidos, que representan la pulpa y el barro, los cuales tienen una densidad de  $1200 \text{ kg} / \text{m}^3$  (esto significa que los sólidos son más densos que el agua).
- 60 % de líquido, que es principalmente agua, con una densidad de  $1000 \text{ kg} / \text{m}^3$ , ya que el agua es nuestra referencia estándar.

Para obtener la gravedad específica de toda la mezcla se utiliza la siguiente fórmula: se detalla en la ecuación. (Ec. N° 2.4).

Dónde:

- $1200 \text{ kg} / \text{m}^3$ , es la densidad del sólido.
- $1000 \text{ kg} / \text{m}^3$ , es la densidad del agua.

$$SG = \frac{1200 \text{ kg}/\text{m}^3}{1000 \text{ kg}/\text{m}^3} = 1.2$$

La gravedad específica que la mezcla en la piscina de derrames es 1.2 veces más densa que el agua pura. Esta densidad está influenciada por la cantidad significativa de sólidos (40 %), presentes en la mezcla. Con una gravedad específica más alta que la del agua, la mezcla será más difícil de bombear y requerirá una bomba capaz de manejar líquidos con alto contenido de sólidos y mayor densidad.

#### 4. Cálculo de caudal necesario

Para determinar el tipo de bomba necesaria para evacuar la piscina de derrames, primero se debe calcular el caudal necesario en  $\text{m}^3 / \text{h}$ . Se detalla en la ecuación. (**Ec. N° 2.5**).

Dónde:

- $Q = \text{m}^3/\text{h}$ .
- $V_{\text{total}} = 150 \text{ m}^3$ .
- $t = 1 \text{ hora}$ .

$$Q = \frac{150 \text{ m}^3}{1 \text{ h}} = 150 \text{ m}^3/\text{h}$$

El caudal necesario para vaciar la piscina de derrames en 1 hora es de  $150 \text{ m}^3/\text{h}$ .

#### 4.3. Selección del tipo de bomba

Con base en el caudal requerido de  $150 \text{ m}^3/\text{h}$  y una concentración de sólidos del 40 %, se selecciona una bomba capaz de manejar líquidos densos y partículas en suspensión.

La bomba propuesta SHW 360-125-1500 cumple con estos requisitos, permitiendo una operación eficiente y segura para las condiciones del sistema.

Las bombas sumergibles de sólido, también son adecuadas para bombear mezclas de sólidos, proporcionando una buena capacidad de succión y evitando el bloqueo de la bomba.

#### 4.4. Consideración de diseño

El diseño de la bomba a considerar:

- Materiales resistentes a la abrasión para manejar mezclas densas.
- Sistema de sellado para prevenir fallas por desgaste.
- Compatibilidad con variadores de frecuencia para ajustar el caudal y reducir el consumo energético.

#### 4.5. Cálculo de altura y presión requerida

Para calcular la altura y presión requeridas para evacuar líquido en un sistema de bombeo que incluye una altura vertical, una distancia horizontal y un caudal específico, se debe seguir los siguientes pasos:

Dónde:

- $150 \text{ m}^3 / \text{h}$ , es el caudal.
- 36 metros, es la longitud total de la tubería (6 metros de altura + 30 metros de distancia horizontal).
- 6 metros de altura vertical.
- 30 metros de distancia horizontal.
- 0.1016 metros, diámetro de la tubería de 4”.

1. Convertir caudal de  $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  a  $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$  (Ec. N° 4.3).

$$Q = 150 \text{ m}^3/\text{h} = \frac{150}{3600} = 0.04167 \text{ m}^3/\text{s}$$

2. Convertir el diámetro de la tubería a metros.

$$A = 4" \times 0.0254 \text{ m/pulgada} = 0.1016 \text{ m}$$

3. Cálculo de área transversal de la tubería

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 4.4})$$

$$A = \frac{\pi \times (0.1016 \text{ m})^2}{4} = 0.0081 \text{ m}^2$$

4. Cálculo velocidad del fluido

Se utiliza la ecuación. (Ec. N° 2.6).

$$v = \frac{0.04167 \text{ m}^3/\text{s}}{0.0081 \text{ m}^2} = 5.14 \text{ m/s}$$

5. Cálculo de pérdida de carga

Se utiliza la ecuación. (Ec. N° 2.7).

Dónde:

- F, es el factor de fricción con un valor de 0.03.
- L, es la longitud de la tubería en metros (36 metros).
- D, es el diámetro de la tubería en metros (0.1016 m).
- g, es la aceleración debido a la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>).
- $H_f$  = pérdidas de carga en metros (m)

$$H_f = 0.02 \times \frac{36 \text{ m}}{0.1016 \text{ m}} \times \frac{(5.14 \text{ m/s})^2}{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2} = 9.54 \text{ m}$$

## 6. Altura total

La altura total que la bomba debe superar es la suma de la altura vertical y la pérdida de carga. Se utiliza la ecuación. (Ec. N° 2.10).

$$H_{total} = 6 m + 9.54 m = 15.54 m$$

## 7. Cálculo de presión

Se utiliza la ecuación. (Ec. N° 2.8).

$$P = 1200 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 15.54 \text{ m} = 182,936.88 \text{ pa (182.9 kpa)}$$

El cálculo del porcentaje de sólidos en la piscina de derrames se realizó mediante un análisis detallado de la composición del agua, la pulpa y el barro presentes en la piscina. Para obtener resultados precisos, se verificó con la balanza Marcy, la cual corroboró los datos obtenidos, confirmando que la composición de la piscina es de un 60 % de agua, un 30 % de pulpa y un 10 % de barro. (Figura N° 4.3.).

Este análisis fue esencial para seleccionar la bomba adecuada, ya que se identificó la necesidad de un sistema capaz de manejar una alta concentración de sólidos. Gracias a la validación de los resultados con la balanza Marcy, se garantizó que la bomba seleccionada, como la SHW 360-125-1500, podría operar eficientemente con un contenido de sólidos de hasta un 60 %, optimizando la evacuación sin riesgo de embancamiento o sobrecarga.

**Figura N° 4.2. Balanza Marcy**

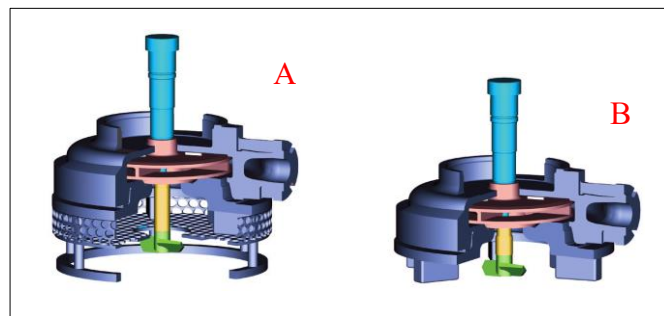


**Fuente: Elaboración propia, planta La Coipa.**



1. Sellos mecánicos balanceados: Diseño de carburo de silicio en cámara de aceite, optimizando la durabilidad y minimizando la exposición a fluidos abrasivos.
2. Materiales robustos: Construcción en hierro de alto cromo resistente a la abrasión.
3. Opciones adicionales incluyen chaqueta de enfriamiento, protectores de succión y un anillo rociador, mejorando la capacidad de manejo de sólidos y prolongando la vida útil del sistema.
4. Opciones de agitadores: se ofrecen dos opciones de agitadores según el tipo de sólidos.
  - La opción de diseño del agitador “A” permite una eliminación más completa de los sólidos finos.
  - La opción de diseño del agitador “B” agita agresivamente los sólidos más grandes del fondo del sumidero.

**Figura N° 5.2. Opciones de agitadores**



**Fuente: Catalogo Weir Vulco.**

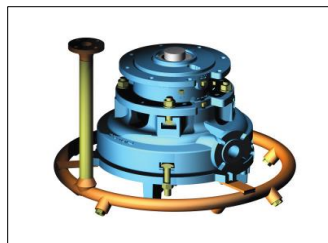
### **5.1.3. Otras características opcionales**

- Chaqueta de enfriamiento, permite una operación continua con el motor sin la necesidad de estar sumergible.
- Protector de succión, previene obstrucción de sumideros donde se presenten fragmentos de materiales sólidos muy grandes.
- La desconexión rápida guía el SHW hacia el sumidero con conexión automática a la tubería de descarga.

- El codo de descarga en hierro con alto contenido de cromo y un espesor de pared pesado permite una instalación de menor costo al tener el codo de descarga correctamente diseñado y dimensionado para su aplicación.
- Anillo rociador diseñado para su aplicación que permite una mejor eliminación del sumidero de sólidos más grandes al rociador líquido a alta presión nuevamente dentro el sumidero.
- El soporte de deslizamiento permite una instalación más sencilla en el sitio y proporciona el posicionamiento correcto de la bomba en su sumidero.

El anillo rociador se selecciona para complementar el sistema de bombeo con la bomba SHW 360-125-1500 porque mejora significativamente la capacidad de manejo de sólidos en el sumidero prolongando la vida útil de la bomba, y optimiza la eficiencia operativa del sistema de evacuación de derrames. Su implementación es una solución rentable y eficaz en entornos industriales donde el contenido de sólidos es elevado.

**Figura N° 5.3. Anillo rociador**



**Fuente: Catalogo Weir Vulco.**

#### **5.1.4. Materiales de construcción**

La imagen muestra las partes de la bomba, sus materiales de construcción y las especificaciones ASTM correspondientes, enfocándose en garantizar resistencia al desgaste, la corrosión y el manejo de materiales abrasivos.

**Tabla N° 5.1. Materiales de construcción de la bomba**

Materiales de construcción		
Parte	Material	Especificaciones
Carcasa	Cromo A05	ASTM A532, Clase III, Tipo A
Impulsor	Cromo A05	ASTM A532, Clase III, Tipo A
Tuerca del Impulsor	450 HT	ASTM A564, Endurecido
Eje	416 SS	ASTM A582, Tipo 416
Seguros	316 SS	ASTM A193, Grado 8 BM
Cubierta del motor	Hierro fundido	ASTM A48, Clase 30
Agitador	Cromo A05	ASTM A532, Clase III, Tipo A
Extensión del eje	17-4 PH	ASTM A564

**Fuente: Catalogo Weir Vulco.**

**Tabla N° 5.2. Datos técnicos bomba propuesta SHW 360-125.1500**

Parámetros	Descripción
Modelo	SHW 360-125-1500
Potencia	125 hp (93.2 kW) – permite manejar fluidos densos y a grandes caudales sin comprometer el rendimiento
Velocidad	1500 rpm – adecuada para aplicaciones que requieran bombear fluidos a largas distancias o superar grandes alturas.
Tensión de alimentación	380 V – estándar en la mayoría de instalaciones industriales, asegurando compatibilidad con la red eléctrica.
Frecuencia	50 Hz – frecuencia estándar en sistemas eléctricos industriales.
Corriente nominal	190 A – compatible con la infraestructura eléctrica de planta.
Máxima sumergencia	23 m – garantiza un trabajo eficiente incluso en menos de una hora.
Capacidad de caudal	150 m <sup>3</sup> /h – asegura un vaciado eficiente de la piscina en menos de una hora.
Altura total de elevación	41 m – capacidad para superar una altura total más que suficiente para las exigencias del sistema.
Gravedad específica (S.G)	1.89 – diseñada para manejar líquidos de alta densidad, crucial en sistemas con mezclas de sólidos del 40 %.
Potencia en Hp	49.95 Hp

## 5.2. Cálculos y evaluación de parámetros operativos

### 1. Carga hidráulica total (Head Total)

El head total combina la altura estática y las pérdidas por fricción en la tubería: utilizando la ecuación (Ec. N° 2.6), (Ec. N° 2.7), (Ec. N° 2.10).

Dónde:

- Altura estática ( $H_{estática}$ ): 41 metros.
- Diámetro de la tubería: 4" = 0.1016 metros.
- Longitud total de la tubería: 36 metros.
- Velocidad del fluido ( $v$ ):

$$v = \frac{0.04167}{\pi * \left(\frac{0.1016}{2}\right)^2} = 5.14 \text{ m/s}$$

- Factor de fricción ( $f$ ): Asumimos 0.02 para flujo turbulento.

Pérdidas por fricción ( $H_{fricción}$ ):

$$H_{fricción} = 0.02 * \frac{36L}{0.1016} * \frac{(5.14)v^2}{2 * 9.81} = 9.54 \text{ m}$$

Carga total:

$$H_T = 41 + 9.54 = 50.54 \text{ m}$$

Una eficiencia del 85 % con partida automatizada implica que la bomba está optimizada para funcionar de manera eficiente durante la operación continua y su arranque automatizado minimiza picos de corriente, lo que reduce el desgaste y mejora el control energético en el proceso.

### 2. Caudal y Tiempo de Vaciado:

Para la piscina de  $150\text{ m}^3$ , se requiere un caudal de al menos  $150\text{ m}^3/h$  para vaciar la piscina en un tiempo razonable (1 hora). La bomba SHW tiene la capacidad de entregar exactamente  $150\text{ m}^3/h$ , lo que cumple con ese requisito.

### 3. Altura manométrica total

La altura manométrica total se compone de la elevación vertical y las pérdidas de presión en el sistema.

- Altura vertical. 6 m (de la piscina al nivel del harnero).
- Pérdida de presión en la tubería: esto incluye pérdidas por fricción a lo largo de los 36 m de tubería (4 pulgadas) y las pérdidas por accesorios.
- La bomba SHW modelo 360-125-1500 con una altura de elevación de 41 metros es capaz de superar ampliamente la altura total de 15.54 metros que requiere el sistema.

### 4. Densidad y gravedad específica

- Densidad promedio del fluido:  $1200\text{ kg/m}^3$ , lo que implica que la bomba debe estar diseñada para trabajar con una mayor densidad que el agua ( $1000\text{ kg/m}^3$ ).
- Gravedad específica (S.G.): 1.89, lo que significa que el fluido tiene un comportamiento diferente en términos de presión y caudal.

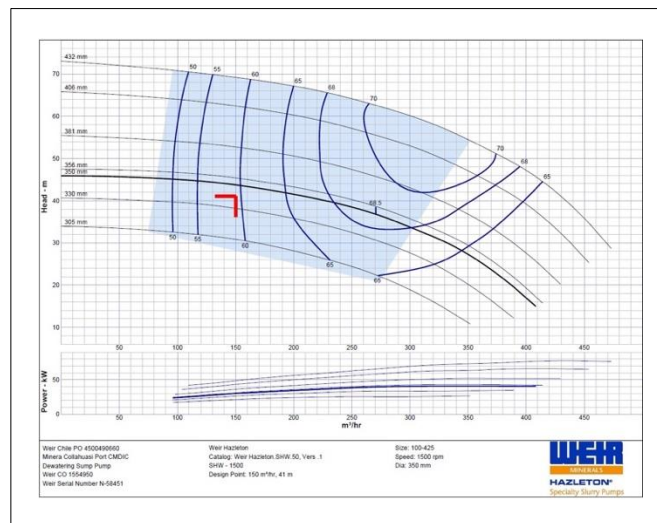
### 5. Potencia requerida

- La potencia nominal de la bomba de 125 hp es adecuada para manejar la densidad del fluido y la altura manométrica total calculada, proporcionando un margen de seguridad para el funcionamiento:
- Con una gravedad específica de 1.89, la bomba está diseñada para manejar fluidos con una alta densidad, asegurando que pueda evacuar la piscina de derrames con la concentración de sólidos necesario.

### 5.3. Gráfica de la curva de rendimiento

En la gráfica se muestra varias variables claves en el comportamiento de una bomba bajo diferentes condiciones de operación. A continuación, se explica los elementos típicos que pueden aparecer en este gráfico. **(Figura 5.4.)**. (Explicación de grafica de curva en página 33).

**Figura N° 5.4. Curva de rendimiento bomba propuesta**



**Fuente: Catalogo Weir Vulco.**

### 5.4. Selección del Variador de Frecuencia (VDF)

Se selecciona el VDF Vacon modelo 0100-3L-0261-5, compatible con la bomba propuesta. Las especificaciones en la tabla 5.2.

**Figura N° 5.5. VDF Vacon 100**



**Fuente: Catalogo VDF vacon 100.**

#### 5.4.1. Potencia nominal

El VDF debe tener una potencia nominal mayor o igual a la potencia requerida por la bomba.

- 93,2 kW potencia de la bomba.
- 132 kW potencia del VDF.

La potencia del VDF (132 kW) supera la potencia requerida por la bomba (93.2 kW). Lo cual esto cumple el requisito.

#### 5.4.2. Corriente requerida

El VDF debe tener una potencia nominal mayor o igual a la potencia requerida por la bomba.

$$I_{VDF} \geq I_{motor}$$

$$261 A \geq 190 A$$

EL VDF es adecuado en términos de corriente, ya que puede manejar hasta 261 A, suficiente para los 190 A de la bomba.

#### 5.4.3. Cálculo de sobrecarga del VDF

Para verificar el comportamiento del VDF durante arranques y cargas temporales.

$$I_{sobrecarga} = I_{VDF} \times \text{Factor de sobrecarga.} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 5.4})$$

$$I_{sobrecarga} = 261 \times 1.5 = 387 A$$

Esto confirma que el VDF seleccionado puede manejar condiciones extremas sin fallas.

#### 5.4.4. Verificación del voltaje nominal

El voltaje del motor está dentro del rango de operación del VDF.

El VDF soporta 400 V, y el motor está diseñado para 380V. Esto es aceptable porque la mayoría de los VDF tiene tolerancia para operar en  $\pm 10\%$  del voltaje nominal. En este caso:

$$380\text{ V} \in [360\text{ V}, 440\text{ V}]$$

El voltaje es compatible con el motor.

#### 5.4.5. Factor de sobrecarga

Los VDF deben soportar sobrecargas temporales del motor. Verificando el margen de corrientes que el VDF puede manejar.

$$\text{Sobrecarga disponible} = I_{VDF} - I_N \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.5)$$

$$\text{Sobrecarga disponible} = 261\text{ A} - 190\text{ A} = 71\text{ A}$$

Esto indica que el VDF puede manejar sobrecargas adicionales del motor hasta un 36 % más de la corriente nominal. Esto es adecuado, ya que los motores generalmente requieren márgenes del 10 % al 25 % en arranques o condiciones transitorias.

#### 5.5. Configuración de frecuencia

El motor opera a 50 Hz, y el VDF soporta 50/60 Hz, lo que asegura compatibilidad en frecuencia. Utilice tabla 5.2.

#### 5.6. Flexibilidad operativa

Compatible con protocolos modernos de comunicación como Ethernet Profinet, facilitando la integración con el PLC y el sistema de control HMI.

Este VDF está perfectamente adaptado para las exigencias del sistema de bombeo propuesto y contribuirá significativamente a mejorar la eficiencia energética y operativa del sistema.

### 5.7. Razones por la selección

**Tabla N° 5.3. Especificaciones del VDF**

Parámetro	Especificaciones
Marca	Vacon - fabricante del variador de frecuencia.
Modelo	0100-3L-0261-5 – modelo específico del VDF seleccionado.
Corriente nominal	261 A – capacidad para manejar altos niveles de corriente.
Potencia	132 KW – compatible con aplicaciones industriales de gran demanda energética.
Voltaje	380 – 400V – intervalo de voltaje estándar para la mayoría de instalaciones eléctricas industriales.
Frecuencia de operación	50/60 Hz – compatible con redes eléctricas de diferentes regiones del mundo.
Clasificación IP	IP54 – protección contra polvo y salpicaduras, ideal para entornos industriales exigentes.
Protocolo de comunicación	Ethernet Profinet y Ethernet IP – soporte para protocolos de comunicación modernos para integrar con sistemas de automatización.

**Fuente: Catalogo VDF vacon 100.**

## 5.8. Selección del alimentador eléctrico

### 5.8.1. Caída de tensión

Para calcular la caída de tensión, utilizamos la siguiente ecuación (Ec. N° 2.14).

Dónde:

- $V$  = Caída de tensión.
- $I$  = Corriente nominal (190 A).
- $R$  = Resistencia del cobre por metros.
- $L$  = Longitud del cable en metros (ida y vuelta, por lo que son 100 m).
- $\rho$  = Resistividad del cobre ( $0.0175 \Omega \times mm^2 / m$ ).
- Temperatura ambiente  $40^\circ C$ .

1. Cálculo de tensión permitida en voltios

$$380 V \times 3 \% = 11.4 V$$

2. Calculo sección del cable

$$S = \frac{\sqrt{3} \times 0.0175 \times 100 \times 190}{11.4} = 50.52 mm^2 \quad (\text{Ec. N}^\circ 2.15)$$

La sección estándar inmediatamente superior sería  $50 mm^2$  o  $70 mm^2$ , dependiendo del nivel de seguridad y pérdidas aceptables.

Para confirmar el cálculo, se verifica en la tabla de la norma IEC o NEC relacionadas con las capacidades de carga de cables.

Comparando esta caída de tensión con la tensión nominal de 380 V:

Se selecciona un cable 4/0 por los siguientes factores:

1. Alta demanda de corriente:

- Equipos de gran potencia: El cable 4/0 es capaz de transportar grandes cantidades de corriente sin sobrecalentarse. Se utiliza comúnmente para alimentar equipos que requieren mucha energía, como hornos industriales, equipos de soldadura, sistemas de climatización de gran capacidad, etc.
- Largas distancias: En instalaciones donde la distancia entre la fuente de alimentación y la carga es considerable, se requiere un cable de gran sección para minimizar las pérdidas por caída de tensión.

## 2. Minimización de pérdidas:

- Menor resistencia: Al tener una sección transversal mayor, el cable 4/0 presenta una menor resistencia eléctrica. Esto significa que se disipa menos energía en forma de calor durante la transmisión de corriente, lo que resulta en una mayor eficiencia.

## 3. Margen de seguridad:

- Futuras expansiones: Al elegir un cable con una capacidad de corriente superior a la demanda actual, se deja un margen para futuras ampliaciones del sistema eléctrico o para posibles aumentos de carga.
- Fluctuaciones de carga: Los sistemas eléctricos están sujetos a variaciones en la demanda de corriente. Un cable de mayor calibre puede acomodar estas fluctuaciones sin problemas.

## 4. Normativas y códigos eléctricos:

- Cumplimiento: La elección del cable 4/0 debe cumplir con los requisitos establecidos en el Código Eléctrico Nacional (NEC) y otras normativas locales. Estos códigos especifican los tamaños de cable adecuados para diferentes aplicaciones y condiciones de instalación.

Al elegir el cable 4/0 se realiza cálculo de caída de tensión para verificar si está dentro del límite permitido (3 %).

### 1. Cálculo de la caída de tensión.

Dónde:

- $\sqrt{3} = 1.732$
- I = Corriente nominal (190 A).
- L = Longitud del cable en metros (ida y vuelta, por lo que son 100 m).
- $\rho$  = Resistividad del cobre ( $0.0175 \Omega \times mm^2 / m$ ).
- Sección del conductor 4/0 AWG:  $S = 107.2 mm^2$ .

$$\Delta V = \frac{\sqrt{3} \times 0.0175 \times 100 \times 190}{107.2} = 5.36 V \quad (\text{Ec. N}^\circ \mathbf{2.14})$$

La caída de tensión es de aproximadamente 5.36 V.

### 2. Porcentaje de caída de tensión

$$\Delta\% = \frac{5.36V}{380V} \times 100 = 1.41 \% \quad (\text{Ec. N}^\circ \mathbf{2.16})$$

La caída de tensión está dentro del límite permitido (3 %), por lo que el cable 4/0 es adecuado para la instalación.

#### **5.8.2. Selección del alimentador del cable**

La selección del cable 4/0 como alimentador es una decisión que implica una evaluación cuidadosa de diversos factores para garantizar un suministro eléctrico seguro y eficiente. A continuación, se detallan los principales aspectos a considerar: (use los datos de la tabla 5.3.).

¿Por qué elegir un cable 4/0?

El cable 4/0 es una excelente opción cuando se requiere transportar altas corrientes eléctricas. Sus principales ventajas son:

- Alta capacidad de conducción: Gracias a su gran sección transversal, puede manejar cargas elevadas sin sobrecalentarse.
- Baja caída de tensión: Reduce las pérdidas de energía en largas distancias.
- Margen de seguridad: Permite futuras expansiones del sistema eléctrico.

**Figura N° 5.6. Cable 4/0**



**Fuente: Google, cable 4/0.**

### 5.8.3. Cálculo del dimensionamiento de fusibles

$$I_{fusible} = I_{nominal} \times 1.25. \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.6)$$

$$I_{fusible} = 190 \times 1.25 = 237.5 \text{ A}$$

El fusible debe ser al menos 240 A para soportar sobrecargas temporales sin dispararse.

#### 5.8.3.1. Capacidad de corriente

El cable seleccionado 4/0 AWG de cobre tiene una capacidad de corriente variable dependiendo de factores como el tipo de aislamiento y la temperatura ambiente. Bajo condiciones estándar:

- Un conductor 4/0 AWG en cobre puede soportar entre 195 A y 230 A, según las tablas de capacidad de corriente de la National Electrical Code (NEC) para instalaciones con aislamiento adecuado. (figura 5.7.).

Dado que la corriente nominal de la bomba es de 190 A y las del VDF es de 261 A, el cable 4/0 AWG es adecuado, a que puede manejar la corriente de forma segura sin sobrecalentarse, asumiendo que se selecciona un aislamiento apropiado para ambientes industriales.

### 5.8.3.2. Picos de corriente

Durante los arranques y paradas, el sistema puede experimentar picos de corriente, típicamente de hasta 150-160 % de la corriente nominal. Esto significa que, en el peor escenario, la corriente podría alcanzar valores de hasta 285 A, por períodos cortos.

El cable 4/0 es capaz de soportar estos picos brevemente sin sobrecalentarse, siempre y cuando el tiempo de duración del pico esté dentro de los márgenes tolerables.

**Tabla N° 5.4. National Code (NEC)**

**TABLA 310-16**

CAPACIDAD DE CONDUCCION DE CORRIENTE EN AMPERES DE CONDUCTORES AISLADOS DE 0 A 2000 VOLTS, 60 °C A 90 °C, NO MAS DE 3 CONDUCTORES EN UN CABLE, EN UNA CANALIZACION O DIRECTAMENTE ENTERRADOS Y PARA UNA TEMPERATURA AMBIENTE DE 30 °C							
		TEMPERATURAS MAXIMAS DE OPERACION (VER TABLA 310-13)					
AREA DE LA SECCION TRANSVERSAL (MM <sup>2</sup> -KCMIL)	AREA DE LA SECCION TRANSVERSAL (MM <sup>2</sup> )	COBRE			ALUMINIO		
		80°C TW, UF*	75°C RHW, THW, THHW, THLS, THWLS, THWN, XHHW, USE*	90°C SIS, FEIP, FEIPB, RHW, RHW-2, THW-2, THWN-2, USE-2, XHHW, XHHW-2	80°C TW, UF*	75°C RHW, THW, THHW, THWLS, THWLS, THWN, XHHW, USE*	90°C SIS, FEIP, FEIPB, RHW, RHW-2, THW-2, THWN-2, USE-2, XHHW, XHHW-2
18	0.8235			14			
16	1.307			18			
14	2.082	20	20	25			
12	3.307	25	25	30	20	20	25
10	5.26	30	35	40	25	30	35
8	8.367	40	50	55	30	40	45
6	13.3	55	65	75	40	50	60
4	21.15	70	85	95	55	65	75
2	33.62	95	115	130	75	90	100
1	42.41	110	130	150	85	100	115
1/0	53.48	125	150	170	100	120	135
2/0	67.43	145	175	195	115	135	150
3/0	85.01	165	200	225	130	155	175
4/0	107.2	195	230	260	150	180	205
250	126.7	215	255	290	170	205	230
300	152	240	285	320	190	230	255
350	177.3	260	310	350	210	250	280
400	202.7	280	335	380	225	270	305
500	253.4	320	380	430	260	310	350
600	304	355	420	475	285	340	385
750	380	400	475	535	320	385	435
1000	506.7	455	545	615	375	445	500

FACTORES DE CORRECCION POR TEMPERATURA							
TEMPERATURA AMBIENTE °C	PARA TEMPERATURA AMBIENTE DIFERENTE DE 30°C, MULTIPLICAR LAS CAPACIDADES DE CORRIENTE DE LA TABLA MOSTRADA ARRIBA POR EL FACTOR DE CORRECCION CORRESPONDIENTE EN ESTA TABLA						
21-25	1.08	1.05	1.04	1.08	1.05	1.04	
26-30	1	1	1	1	1	1	
31-35	0.91	0.94	0.96	0.91	0.94	0.96	
36-40	0.82	0.88	0.91	0.82	0.88	0.91	
41-45	0.71	0.82	0.87	0.71	0.82	0.87	
46-50	0.58	0.75	0.82	0.58	0.75	0.82	
51-55	0.41	0.67	0.76	0.41	0.67	0.76	
56-60		0.58	0.71		0.58	0.71	
61-70		0.33	0.58		0.33	0.58	
71-80			0.41			0.41	

LA PROTECCION PARA SOBRECORRIENTE PARA CONDUCTORES DE COBRE, ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE, EN LOS TIPOS MARCADOS CON UN ASTERISCO (\*), NO DEBE EXCEDER DE:  
 15 A PARA 2.082 MM<sup>2</sup> (14), 20 A PARA 3.307 MM<sup>2</sup> (25) Y 30 A PARA 5.260 MM<sup>2</sup> (40) PARA CONDUCTORES DE COBRE.  
 15 A PARA 3.307 MM<sup>2</sup> (25), Y 25 A PARA 5.260 MM<sup>2</sup> (40) PARA CONDUCTORES DE ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE.  
 LO ANTERIOR DESPUES QUE SE HAYAN APLICADO LOS FACTORES DE CORRECCION POR TEMPERATURA AMBIENTE Y AGRUPOAMIENTO DE CONDUCTORES.

Fuente: Google, NEC.

#### **5.8.4. Pérdidas por calor y dimensionamiento térmico**

Al conducir corriente, el cable disipa energía en forma de calor. La disipación de calor debe ser considerada, especialmente si el cable está en un entorno confinado o con ventilación limitada. El cable 4/0 tiene suficiente sección transversal para disipar adecuadamente el calor generado a la corriente nominal de 190 A, siempre y cuando las condiciones de instalación sigan las normativas, como evitar agrupamientos excesivos de cables que puedan inhibir la disipación de calor.

#### **5.8.5. Compatibilidad con el VDF y protecciones**

El VDF de la marca Vacon modelo 0100-3L-0261-5 tiene una corriente nominal de 261 A. el cable 4/0 es compatible con esta corriente, por lo que se puede conectar al VDF si problemas. Sin embargo, es importante considerar las protecciones adecuadas:

- Fusibles de protección: se recomienda instalar fusibles o interruptores automáticos ajustados a la corriente máxima que pueda soportar el cable. En este caso.
- Conexión a tierra: es fundamental garantizar una correcta puesta a tierra del sistema para proteger el VDF y el motor de sobretensiones.

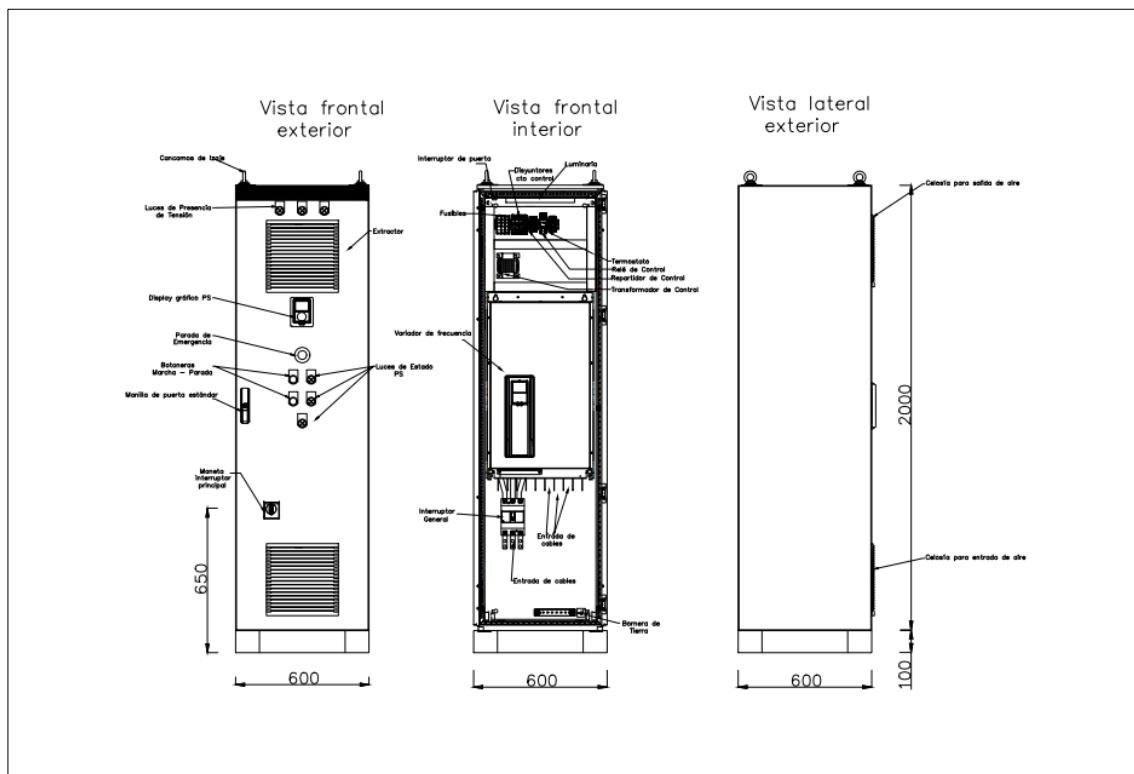
#### **5.9. Detalle tablero de fuerza VDF**

El detalle de un tablero de fuerza con VDF es esencial para la operación y control eficiente de motores en aplicaciones industriales. El tablero proporciona protección eléctrica, control de velocidad y monitoreo de los quipos a los que está conectada. Aquí describo los componentes típicos y el funcionamiento de un tablero de fuerza equipado con un VDF.

- Interruptor general o seccionador: desconecta el tablero de la red para seguridad.
- Fusibles o interruptores automáticos: protegen contra sobrecargas y corto circuitos.

- Filtro de entrada y reactor de entrada: reducen interferencias y protegen de picos de tensión.
- VDF: controla la velocidad del motor ajustando la frecuencia de la corriente.
- Reactores o filtros de salida: protegen el motor de picos de voltaje generados por el VDF.
- Sistema de control (PLC – HMI): monitorea y ajusta la operación del VDF.
- Ventilación: evita sobrecargas del sistema.
- Medidores, luces y botoneras: permiten monitoreo y control manual.

**Figura N° 5.7. Tablero de fuerza VDF**



**Fuente: Catalogo VDF vacon 100.**

### 5.10. Selección de escalerilla porta conductores

La elección de una escalerilla porta conductores es un paso crítico en la instalación de sistemas eléctricos para asegurar el correcto soporte y protección de los cables. A

continuación, se describe un análisis técnico detallado para seleccionar una escalerilla de 300 mm de ancho por 100 mm de altura, considerando la cantidad de conductores, el peso total la corriente y el espacio necesario para disipar el calor.

### 5.10.1. Cálculo de la capacidad de la escalerilla

#### 1. Dimensiones

- Ancho: 300 mm.
- Altura: 100 mm.
- Longitud estimada: 50 metros (para el recorrido de los cables desde el tablero hasta la bomba y el VDF).

#### 2. Carga de conductores

El cable seleccionado es un 4/0 AWG para la alimentación de la bomba y el variador de frecuencia (VDF), con una corriente nominal de 190 A.

- Peso del cable 4/0 AWG: aproximadamente 0.68 kg/m.
- Longitud del cable: 50 m.

El peso total por cable será:

$$\text{Peso total por cable} = 0.68 \text{ kg/m} \times 50 \text{ m} = 34 \text{ kg por conductor}$$

Como un sistema trifásico lleva tres conductores de fase, (más un neutro y tierra), el peso total sería.

$$\text{Peso total de los conductores} = 34 \text{ kg} \times 4 \text{ (tres fases y neutro)} = 136 \text{ kg}$$

#### 3. Factor de llenado

Según las normas de instalación (como la NEMA VE-1 y el NEC), la escalerilla debe tener un factor de llenado del 50-60 % para permitir una adecuada ventilación y evitar el sobrecalentamiento.

- Ancho de la escalerilla: 300 mm.
- Altura disponible para cables: 100 mm.

Área total disponible:

$$A_{total} = W \times H \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.7)$$

Dónde:

- $A_{total}$  = Área total.
- W = Ancho de la escalerilla.
- H = Altura de la escalerilla.
- L = largo de la escalerilla.

$$A_{total} = 300 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} = 30,000 \text{ mm}^2 \text{ o } 300 \text{ cm}^2$$

#### 4. Área ocupada por los conductores

El diámetro del cable 4/0 AWG es aproximadamente 11.68 mm de diámetro (según tabla AWG).

- Área por conductor:

$$A_{conductor} = \pi \times (d/2)^2 \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.8)$$

$$A_{conductor} = \pi \times (11.68 \text{ mm} / 2)^2 = 107.21 \text{ mm}^2$$

Dónde:

- $A_{ocupada total}$  = Área ocupada total.
- 4 = Número de conductores.

$$A_{ocupada total} = 107.21 \text{ mm}^2 \times 4 = 428.84 \text{ mm}^2$$

Este valor está dentro del límite de 50-60% de factor de llenado, que sería:

$$A_{\text{permitida}} = 300 \text{ cm}^2 \times 0.6 = 180 \text{ cm}^2 \text{ o } 18,000 \text{ mm}^2$$

#### 5. Resistencia mecánica

La escalerilla seleccionada debe soportar el paso de 136 kg de conductores más un factor de seguridad adicional. Las escalerillas de 300 x 100 mm típicamente tienen una capacidad de carga entre 300 y 500 kg (dependiendo del espesor del metal y la distancia entre los soportes), por lo que una escalerilla de este tamaño sería adecuada para el peso de los cables.

#### 6. Espacio de los soportes

El espaciado de los soportes de la escalerilla, en función del peso de los cables es normalmente de 1.5 a 2 metros para evitar que la escalerilla se doble o se deforme con el tiempo. El fabricante generalmente especifica el espaciado máximo de soportes, pero con una carga de 136 kg, un espaciado de 1,5 m sería suficiente para garantizar la resistencia estructural.

Para el soporte de la escalerilla porta conductores, se puede emplear un sistema fabricado con riel unistrut e hilo corrido galvanizado, que proporciona una solución y ajustable para instalaciones eléctricas.

#### **5.10.2. Riel unistrut**

Es un riel de acero galvanizado diseñado para soportar cargas pesadas y ofrecer flexibilidad en la instalación, permite el montaje y fijación de la escalerilla de manera sencilla y ajustable.

Resistente a la conexión gracias a su galvanizado, adecuado para ambientes industriales.

### **5.10.3. Hilo corrido galvanizado**

Utilizado para suspender la escalerilla desde el techo o una estructura superior, el diseño de rosca permite ajustes de altura precisos para nivelar la escalerilla.

### **5.11. Disipación térmica**

Uno de los factores importantes en la selección de la escalerilla es permitir una buena disipación del calor generado por los cables bajo carga. Dado que el factor de llenado está por debajo del 60 %, se considera que hay suficiente espacio libre para la circulación del aire y evitar la acumulación de calor excesivo.

#### 1. Consideraciones de instalación

- Material de la escalerilla: generalmente se recomienda utilizar acero galvanizado o acero inoxidable en áreas industriales, para evitar la corrosión.
- Protección IP: dependiendo del entorno de instalación (interior o exterior), es posible que se requieran tapas o cubiertas adicionales para la escalerilla para proteger los cables contra el polvo, agua, o daños mecánicos.

### **5.12. Actuador eléctrico ON-OFF**

Un actuador eléctrico ON-OFF para una válvula rotativa, como una válvula de bola o mariposa, accionada con la fuerza neumáticamente, combina la presión del control eléctrico con la fuerza neumática para abrir o cerrar la válvula en posición completamente abierta o cerrada sin puntos intermedios. Este tipo de actuador es ideal para aplicaciones de control de flujo donde se requiere un encendido y apagado rápido y eficiente.

#### 1. Especificaciones de la válvula neumática

- Tamaño de la válvula: 2 pulgadas.
- Tipo de válvula: De bola.

- Presión de operación: La presión del fluido influye en el torque para mover la válvula.

## 2. Especificaciones del actuador neumático

- Par requerido: Verifica el torque necesario para abrir y cerrar la válvula, dependiendo del tamaño y las condiciones de operación.
- Presión de aire comprimido: Normalmente de 5 a 8 bares (73 a 116 psi).

## 3. Selección del actuador eléctrico ON-OFF

- Tener un torque adecuado para controlar la válvula neumática.
- Voltaje: verificar la compatibilidad con la fuente de alimentación (generalmente 24 VDC, 110 VAC, O 220 VAC).
- Señal de control: ON-OFF (interruptor, PLC).
- Tipo de montaje: los actuadores eléctricos y neumáticos a menudo se combinan con una válvula solenoide para gestionar el suministro de aire al actuador neumático.
- Tiempo de ciclo: define el tiempo en segundos que tarda en realizar la apertura o el cierre completo.

### **5.12.1. Cálculo para seleccionar actuador eléctrico**

El cálculo para seleccionar el actuador adecuado para una válvula de bola de 2 pulgadas implica calcular el torque necesario para abrir y cerrar la válvula bajo las condiciones de operación.

#### 1. Parámetros iniciales

- Diámetro de la válvula: 2 pulgadas.
- Tipo de fluido: agua.
- Presión del sistema: 6 bar.

#### 2. Cálculo del área de la válvula

Primero, se convierte el tamaño de la válvula de pulgadas a metros y se calcula el área que actúa sobre la bola de la válvula.

El área transversal de la válvula es:

$$A = \pi x (d/2)^2 \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 5.9})$$

Dónde:

- T: es el torque requerido en Newton metros, Nm.
- K: es un coeficiente que depende de las características de la válvula de bola (usualmente entre 0.2 y 0.5, dependiendo del fabricante y las condiciones del sistema). Para este cálculo, usaremos K: 0.3, una estimación conservadora para una válvula de bola con asientos suaves.
- A: es el área de la válvula.
- P: es la presión del sistema.

$$1 \text{ bar} = 100,000 \text{ Pa}$$

$$P = 6 \text{ bares} = 6 x 100,000 = 600,000 \text{ Pa}$$

$$T = 0.3 x 0.00202 x 600,000 = 363.6 \text{ Nm}$$

### 3. Cálculo del torque

El par o torque requerido para operar una válvula de bola está influenciado por la presión del sistema. Se utiliza la siguiente formula simplificada para obtener un sistema del torque necesario.

Dónde:

- T: es el torque requerido en Newton metros, Nm.
- K: es un coeficiente que depende de las características de la válvula de bola (usualmente entre 0.2 y 0.5, dependiendo del fabricante y las condiciones del

sistema). Para este cálculo, usaremos K: 0.3, una estimación conservadora para una válvula de bola con asientos suaves.

- A: es el área de la válvula.
- P: es la presión del sistema.

$$1 \text{ bar} = 100,000 \text{ Pa}$$

$$P = 6 \text{ bares} = 6 \times 100,000 = 600,000 \text{ Pa}$$

$$T = 0.3 \times 0.00202 \times 600,000 = 363.6 \text{ Nm} \quad (\text{Ec. N}^\circ \mathbf{2.17})$$

El torque estimado para abrir o cerrar la válvula de bola bajo condiciones es de aproximadamente 364 Nm.

#### 4. Factor de seguridad

Para tener en cuenta variaciones en la operación, desgaste de la válvula o variaciones en la presión, es recomendable agregar un factor de seguridad. Un factor típico es del 25-30 %. En este cálculo se utilizará el factor de 1.3:

$$T_{\text{actuador}} = T \times \text{factor de seguridad} \quad (\text{Ec. N}^\circ \mathbf{5.10})$$

$$T_{\text{actuador}} = 364 \text{ Nm} \times 1.3 = 473.2 \text{ Nm}$$

Por lo tanto, el actuador debe ser capaz de proporcionar al menos 473 Nm de torque.

#### 5. Actuador eléctrico

Es un dispositivo que convierte energía (eléctrica a neumática) en movimiento para controlar válvulas en sistemas industriales.

**Figura N° 5.8. Actuador neumático**

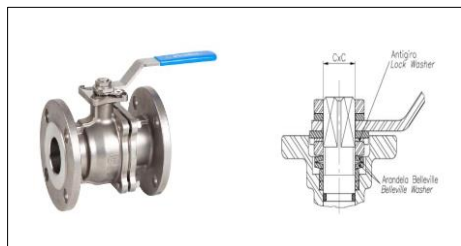


**Fuente: Catalogo valbia.**

### 5.12.2. Válvula de bola

Es un dispositivo que regula el flujo de líquidos o gases mediante una esfera perforada giratoria.

**Figura N° 5.9. Válvula de bola**

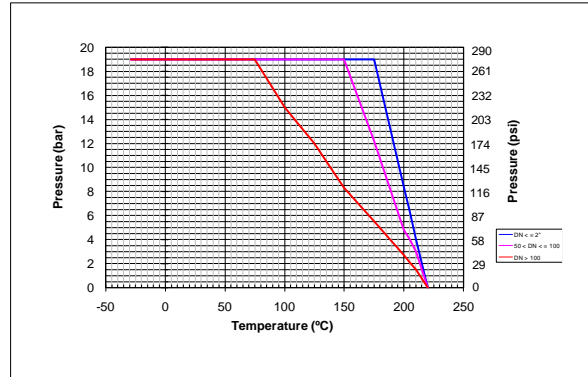


**Fuente: Catalogo genebre.**

#### 1. Curva de presión y temperatura

La curva de presión-temperatura muestra los límites operativos del sistema según la relación entre presión y temperatura.

**Figura N° 5.10. Curva de presión - temperatura**



**Fuente: Catalogo genebre.**

## 2. Interpretación de la gráfica

En la gráfica que has compartido, observamos múltiples curvas, cada una representando un comportamiento diferente del fluido a medida que aumenta la temperatura.

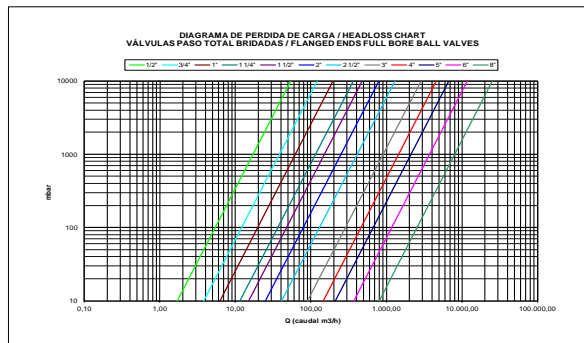
Elementos clave de la gráfica:

- Eje X (Temperatura): Representa la temperatura del fluido, generalmente expresada en grados Celsius (°C).
- Eje Y (Presión): Representa la presión del fluido, expresada tanto en bares como en libras por pulgada cuadrada (psi).
- Curvas: Cada curva representa un comportamiento diferente del fluido, posiblemente debido a diferentes sustancias, condiciones iniciales o procesos.

## 3. Diagrama de pérdidas de carga

El diagrama de pérdidas de carga muestra la relación entre el caudal que fluye a través del sistema y las pérdidas de presión o carga debido a la fricción en tuberías o componentes del sistema, como válvulas y accesorios.

**Figura N° 5.11. Diagrama de pérdidas de carga**



**Fuente: Catalogo genebre.**

El diagrama que has compartido se refiere a válvulas de bola de paso total bridadas. Cada línea en el gráfico representa una válvula de un diámetro nominal específico (1", 2", 3", etc.).

Ejes del gráfico:

- Eje X (Q): Representa el caudal del fluido que pasa a través de la válvula, expresado en unidades de flujo (m<sup>3</sup>/h en este caso).
- Eje Y ( $\Delta P$ ): Representa la pérdida de carga, es decir, la diferencia de presión entre la entrada y la salida de la válvula, expresada en unidades de presión (bar en este caso).

### 5.12.3. Tablero de control remoto

Este tablero de control en terreno permite controlar manualmente la bomba y la válvula, gestionando su operación desde el terreno mientras se comunica con el VDF en la sala eléctrica.

#### 1. Componentes claves

- Botoneras
  - Botonera verde (arranque), botonera roja (parada), de la bomba.
  - Botonera verde (abrir), botonera roja (cerrar) de la válvula.
- Luces indicadoras

- Verde, bomba en funcionamiento.
  - Rojo, bomba detenida, o en falla.
  - Amarillo, advertencia.
- Parada de emergencia
    - Botón para detener inmediatamente la bomba y cerrar la válvula.

## 2. Funcionamiento

- Operación manual: los operadores utilizan las botoneras para controlar la bomba y la válvula localmente. Al presionar el botón de arranque, el VDF activa el motor a la velocidad preestablecida.
- Sin variación de velocidad: la velocidad de la bomba es fija, no hay ajustes dinámicos durante la operación.
- Mantenimiento de estado: el estado de la bomba y la válvula es indicado a través de las luces LED en el tablero.

## 3. Seguridad

- Protección IP65: Asegura que el tablero es resistente a polvo y agua.
- Parada de emergencia: permite una rápida desconexión del sistema en caso de emergencia

El tablero de control no solo sirve como un interfaz para controlar los equipos, sino también es fundamental para la verificación del estado de los componentes y actúa como un apoyo operacional crucial. Proporciona a los operadores una herramienta efectiva para gestionar el sistema de manera segura y eficiente.

### **5.12.3.1. Calculamos el área de la caja**

se considera una caja con dimensiones:

- Ancho: 400 mm (0.40 m).

- Altura: 600 mm (0.60 m).
- Profundidad: 300 mm (0.30 m).

1. Área de las dos caras laterales (Altura x Ancho):

$$A_{lateral} = 2 x (\text{ancho} x \text{altura}) \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 5.11})$$

$$A_{lateral} = 2 x (0.4 \text{ m} x 0.6 \text{ m}) = 0.48 \text{ m}^2$$

2. Área de las dos caras frontales (Altura x Profundidad):

$$A_{frontal} = 2 x (\text{profundidad} x \text{altura}) \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 5.12})$$

$$A_{frontal} = 2 x (0.3 \text{ m} x 0.6 \text{ m}) = 0.36 \text{ m}^2$$

3. Área de las dos caras superior e inferior (Ancho x Profundidad):

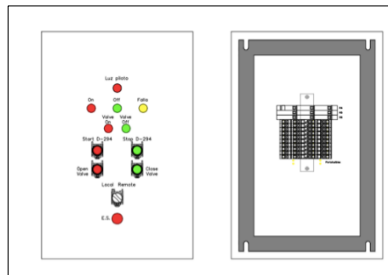
$$A_{superior\_inferior} = 2 x (\text{ancho} x \text{altura}) \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 5.13})$$

$$A_{superior\_inferior} = 2 x (0.3 \text{ m} x 0.4 \text{ m}) = 0.36 \text{ m}^2$$

4. Área total

$$A_{total} = 0.48 \text{ m}^2 + 0.36 \text{ m}^2 + 0.36 \text{ m}^2 = 1.20 \text{ m}^2$$

**Figura N° 5.12. Tablero de control remoto**



**Fuente: Elaboración propia.**

### 5.13. Cálculo caja de conexión para bomba sumergible y VDF

La caja de conexión es un dispositivo eléctrico diseñado para interconectar de manera segura y ordenada la bomba sumergible con el alimentador del variador de frecuencia (VDF). Su función es facilitar la gestión de las conexiones eléctricas, asegurando un funcionamiento confiable del sistema de bombeo.

- La caja está diseñada para ser robusta y compacta, ocupando poco espacio y permitiendo una instalación sencilla.
- Fabricada con materiales que ofrecen resistencias a la corrosión y condiciones ambientales adversas, garantizando durabilidad y longevidad.
- Con clasificación IP65, protege las conexiones internas del polvo y húmedas que es crucial para su funcionamiento en ambientes industriales.
- Incluye terminales para facilitar la conexión de la bomba y el VDF, permitiendo un acceso rápido a las conexiones eléctricas,

#### 1. Cálculo del área del cable

Se utiliza la ecuación (Ec. N° 5.9).

Dónde:

- Numero de cables: 6.
- Tamaño de los cables: 4/0 AWG, diámetro aproximado 11.7 mm (0.0117 m).

$$A_{cable} = \pi (0.0117/2)^2 = 1.077 \times 10^{-4} m^2$$

#### 2. Cálculo área total de los cables

$$A_{total} = 6 \times A_{cable} \text{ (Ec. N° 5.14)}$$

$$A_{total} = 6 \times 1.077 \times 10^{-4} = 6.462 \times 10^{-4}$$

#### 3. Cálculo del área total con espacio adicional

Se recomienda añadir un 30 % al área total para permitir la ventilación y evitar el sobrecalentamiento.

$$A_{total-final} = A_{total} \times 1.3 \text{ (Ec. N° 5.15)}$$

$$A_{total-final} = 6.462 \times 10^{-4} \times 1.3 = 8.3986 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

### 5.13.1. Dimensionar la caja de paso

Para determinar las dimensiones de la caja de paso, se consideran las siguientes recomendaciones.

- Profundidad: mínimo 100 mm (0.1 m).
- Área de la caja:  $A_{caja} \geq A_{total-final}$

$$A_{caja} = ancho \times profundidad \text{ (Ec. N° 5.16)}$$

$$Ancho = \frac{A_{caja}}{profundidad}$$

$$Ancho = \frac{8.3986 \times 10^{-4}}{0.1} = 0.008386 \text{ m}^2 \approx 839.86 \text{ cm}^2$$

Se considera una caja con dimensiones:

- Ancho: 400 mm (0.40 m).
- Altura: 600 mm (0.60 m).
- Profundidad: 300 mm (0.30 m).

1. Área de las dos caras laterales (altura x ancho):

$$A_{lateral} = 2 \times (ancho \times altura) \text{ (Ec. N° 5.11)}$$

$$A_{lateral} = 2 \times (0.4 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}) = 0.48 \text{ m}^2$$

2. Área de las dos caras frontales (altura x profundidad):

$$A_{frontal} = 2 x (\text{profundidad} x \text{altura}) \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.12)$$

$$A_{frontal} = 2 x (0.3 \text{ m} x 0.6 \text{ m}) = 0.36 \text{ m}^2$$

3. Área de las dos caras superior e inferior (ancho x profundidad):

$$A_{superior\_inferior} = 2 x (\text{ancho} x \text{altura}) \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.13)$$

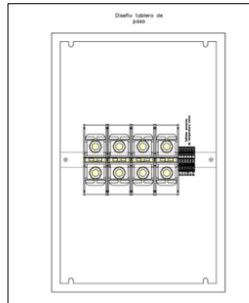
$$A_{superior\_inferior} = 2 x (0.3 \text{ m} x 0.4 \text{ m}) = 0.36 \text{ m}^2$$

4. Área total

$$A_{total} = 0.48 \text{ m}^2 x 0.24 \text{ m}^2 x 0.36 \text{ m}^2 = 1.08 \text{ m}^2$$

Dado el volumen de la caja propuesta, 600 mm x 400 mm x 300 mm es más que suficiente para albergar los cables de 4/0 AWG, proporcionando espacio adicional no solo para la organización de los cables, sino también para asegurar una buena ventilación y facilitar el mantenimiento.

**Figura N° 5.13. Tablero de control remoto**



**Fuente: Elaboración propia.**

#### **5.14. Sensor de nivel ultrasónico**

Para el sensor de nivel ultrasónico XPS-15, puedes beneficiarte de su precisión y fiabilidad en la medición sin contacto, ideal para manejar en líquidos o sólidos dentro de la piscina de derrames. Este modelo robusto para ambientes industriales y se integra bien

con el sistema, operado por PLC y VDF, garantizando que puedas monitorear y controlar el nivel sin riesgo de desgaste del sensor.

**Figura N° 5.14. Sensor de nivel ultrasónico**



**Fuente: Catalogo sensor ultrasónico XPS 15.**

#### 1. Beneficios del sensor

- Compensación integrada de temperatura.
- Sensor de baja resonancia con zona muerta limitada.
- Revestimiento de espuma opcional para ambientes con polvo.
- Insensibles a las adherencias y prácticamente exentos de mantenimiento.
- Insensibles a sustancias químicas.
- Herméticamente sellados.

#### 2. Gama de aplicación

Los sensores XPS son idóneos para aplicaciones con riesgo de inmersión, insensibles al vapor y a las sustancias corrosivas y pueda instalarse sin brida.

La serie XPS permite elegir entre varias versiones, para rangos de medición hasta 30 metros y temperaturas hasta 95° C.

Los sensores Echo Max emiten impulsos sonoros y destacan por su ángulo de haz estrecho. El controlador de nivel se basa en la medición de tiempo de recorrido de impulso ultrasónico (emisión/recepción), para calcular la distancia.

El sensor ultrasónico XPS-15 de alta frecuencia diseñado para una amplia gama de aplicaciones con líquidos y sólidos. Utilizable con determinados controladores. Dotado de sensor de temperatura. Rango de medición:

- Mínimo 0.3 metros.
- Máximo 15 metros.

#### 5.14.1. Cálculo nivel del sensor

Para calcular el nivel con el sensor ultrasónico XPS-15, se debe considerar el tiempo que tarda el pulso ultrasónico en viajar desde el sensor hasta la superficie del líquido a regresar. La distancia al nivel del líquido (d) se calcula utilizando la fórmula:

$$d = \frac{v * t}{2} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 5.17})$$

Dónde:

- v, es la velocidad del sonido en el aire (aproximadamente 343 m / s) a 20° C, aunque varía con la temperatura.
- t, es el tiempo que tarda el pulso en hacer el viaje de ida y vuelta 0.012 s.
- El factor 2 divide por dos el viaje de ida y vuelta para obtener solo la distancia de ida.

$$d = \frac{343 \text{ m/s} * 0.012 \text{ s}}{2} = 2.058 \text{ m}$$

El sensor detecta una distancia de 2.058 m desde su posición hasta la superficie del líquido.

La fórmula para el nivel del líquido es:

$$L = H_{\text{sensor}} - d \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 5.18})$$

Dónde:

- H es la altura total de la piscina (3 metros).
- D es la distancia medida por el sensor al nivel de la superficie del líquido.

$$L = 5 \text{ m} - 2.058 \text{ m} = 2.942 \text{ m}$$

Esto significa:

- El sensor está colocado 2 metros por encima de la parte superior de la piscina, lo que significa que mide la distancia desde una altura total de 5 metros ( 2m del sensor + 3 metros de la piscina) hasta la superficie del líquido.

### **5.15. Transmisor ultrasónico Sitrans LUT400**

Para integrar el Sitrans LUT400 en el sistema de bombeo y asegurar una medición precisa del nivel de líquido en la piscina, estos son los puntos clave a considerar en su configuración.

#### **1. Instalación del LUT400**

- Se ubica, el transmisor directamente sobre la piscina, a altura de 3 metros desde el fondo.
- Se instalada el LUT400 de forma perpendicular a la superficie del líquido para evitar errores de medición por inclinación.

#### **2. Integración con el sistema de control**

- El transmisor LUT400 se conecta al PLC Control Expert y configura el HMI para mostrar el nivel en tiempo real. El transmisor LUT400 es compatible con protocolos de comunicación como HART o Modbus, facilitando la integración.

### 5.15.1. Configuración de parámetros

- Se configura el rango de medición máximo de 3 metros, que es la altura total de la piscina.
- Se puede establecer alarmas par niveles críticos, como el 0.3 metros de mínimo y 2.5 metros como máximo.
- Se activa la compensación de temperatura del LUT400 para ajustar la velocidad del sonido según las variaciones de temperatura y así mejora la precisión

**Figura N° 5.15. Transmisor ultrasónico Sitrans LUT400**



**Fuente: Catalogo Sitrans LUT 400,**

**Tabla N° 5.5. Parámetros de puesta en marcha rápida sensor XPS-15**

Parámetros de puesta en marcha rápida	Ajustes	Descripción
Transductor	Xps-15	Transductor por utilizar con el lut400
Operación	Nivel	Nivel de material en referencia con el punto de calibración mínimo
Unidades	Metros	Unidad de medida del sensor
Punto de calibración máximo	1.0	Nivel de proceso lleno
Punto calibración mínimo	15.0	Nivel vacío del proceso
Velocidad de reacción	Ninguno	Ajuste de velocidad de llenado/velocidad de vaciado a 0.1 m/minuto
Fuente de temperatura	Ambiente	Temperatura ambiente

**Fuente: Catalogo sensor ultrasónico XPS 15.**

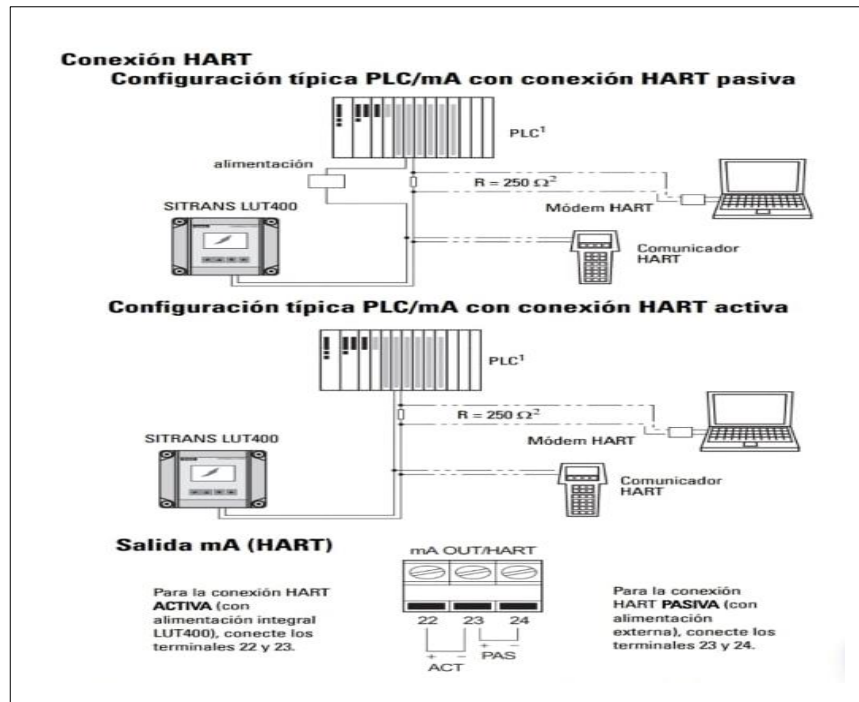
### **5.15.2. Conexión del transmisor al PLC**

Para conectar el transmisor ultrasónico Sitrans LUT400 al PLC, se puede optar por las siguientes dos configuraciones:

- Conexión activa (transmisor alimentado por el LUT400)
  - En esta configuración, el LUT400 proporciona la alimentación de 24 VDC al PLC.
  - Conectar la alimentación del LUT400 a la entrada de alimentación del PLC que se alimentara con 24 VDC.
  
- Conexión pasiva (transmisor alimentado por el PLC)
  - En esta configuración, el PLC suministra los 24VDC necesarios al LUT 400.

- Conectar la alimentación del PLC de 24VDC al terminal de alimentación del LUT400.

**Figura N° 5.16. Conexión del transmisor al PLC**



**Fuente: Catalogo Sitrans LUT 400.**

### 5.15.3. Cálculo del uso del transmisor Sitrans LUT400

Para calcular el uso del transmisor ultrasónico Sitrans LUT400 en una piscina de derrames:

1. Determinar el rango de medición:
  - Altura máxima 3 metros.
  - Tipo de líquido: agua con pulpa (densidad promedio de  $1200 \text{ kg/m}^3$ ).
2. Cálculo de la velocidad del sonido

- Temperatura 25° C.
- Cálculo

$$c = 331.3 + (0.6 * T) \text{ (Ec. N° 5.19)}$$

$$c = 331.3 + (0.6 * 25) = 343.8 \text{ m/s}$$

### 3. Verificación del rango de medición

- El LUT400 tiene un rango de 0 a 6 metros, adecuado para medir 3 metros.

### 4. Salida del transmisor

- 4 mA para 0 metro y 20 mA para 3 metros.
- A 1.5 metros, la salida será aproximadamente 12 mA.

## 5.16. Requerimiento del PLC y HMI

Para seleccionar un PLC y HMI adecuados para el sistema de bombeo en la sala eléctrica del área de molienda, es necesario considerar los siguientes requerimientos técnicos y operativos.

### 1. Compatibilidad con el sistema existente

- Comunicación con el VDF: el PLC debe ser compatible con el protocolo de comunicación del variador de frecuencia seleccionado (Vacon, modelo 0100-31-0261-5), que soporta Ethernet Profinet y Ethernet IP. Esto permitirá una integración eficiente entre el PLC y el VDF.
- Protocolos de comunicación: tanto el PLC como el HMI deben soportar los mismos protocolos de red (Profinet, Ethernet IP) para una comunicación fluida entre ambos dispositivos y el resto del sistema.

## 2. Capacidad de procesamiento del PLC

- Número de entradas y salidas (I/O): el PLC debe tener la cantidad adecuada de entradas/salidas digitales y analógicas para monitorear y controlar los sensores (nivel ultrasónico, presión, temperatura (y actuadores (bomba, válvulas, etc.) del sistema.
- Capacidad de expansión: es recomendable que el PLC permita la adición de módulos de expansión si se requiere ampliar el sistema en el futuro.
- Memoria y velocidad de procesamiento: asegurarse de que el PLC tenga suficiente capacidad de memoria y velocidad para procesar las señales del sistema de bombeo, así como para manejar algoritmos complejos de control.

## 3. Interfaz de usuario HMI

- Integración con el PLC y VDF: la HMI debe estar configurada para visualizar y ajustar parámetros del VDF y mostrar alertas del sistema de bombeo, como niveles de líquido, estado de operación de la bomba, consumo energético, etc.
- Visualización de alarmas y eventos: es importante que la HMI permita la visualización clara de alarmas y eventos del sistema para facilitar la toma de decisiones en terreno.

## 4. Normativa y cumplimiento

- Cumplimiento de normas: el PLC y la HMI deben cumplir con normativas industriales como IEC, ANSI, y cumplir con las regulaciones ambientales y de seguridad para la operación en minería.

## 5. Funciones de control y seguridad

- Funciones: el PLC debe permitir la implementación de estrategias de seguridad, como bloques y etiquetado, para garantizar un manejo seguro durante el mantenimiento.
- Monitoreo y diagnóstico remoto: el sistema debe permitir el monitoreo y diagnóstico remoto a través de redes industriales para mejorar la supervisión y el mantenimiento preventivo.

### **5.16.1. PLC Control Expert de Schneider instalada**

El PLC Control Expert de Schneider tiene compatibilidad con el VDF Vacon 0100-3L-0261-5 a través de protocolos de comunicación industrial estándar como Ethernet/IP y Profinet, que son soportados por ambos equipos.

#### 1. Protocolos de comunicación

El Control Expert de Schneider soporta Ethernet/IP, Modbus TCP, y Profinet, que son mismos protocolos que utiliza el VDF Vacon. Esto garantiza que ambos dispositivos pueden comunicarse sin problemas, permitiendo el control y monitoreo del variador desde el PLC.

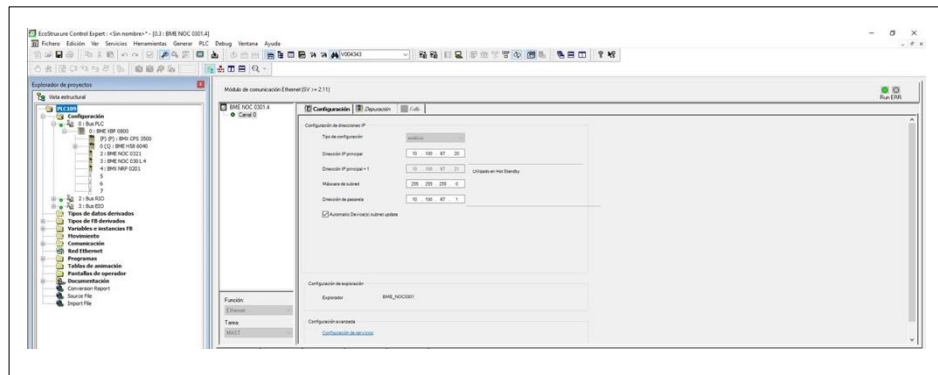
#### 2. Comunicación de parámetros

Se puede configurar fácilmente el PLC para monitorear y controlar el VDF, ajustando parámetros como la velocidad de la bomba, los arranque/paradas y la visualización de estados y alarmas en el HMI.

### **5.16.2. Integración con HMI**

EL HMI Schneider es compatible, lo cual se podrá visualizar y gestionar los datos y del VDF y del PLC en una sola interfaz, mejorando la supervisión y control del sistema de bombeo.

**Figura N° 5.17. Conexión por comunicación**



**Fuente: Elaboración propia.**

### 5.16.3. Control Expert

Control Expert es un software de programación único para cinco plataformas de PLC Modicon:

- M340
- M580
- Premium
- Quantum
- Momentum

Con Control Expert viene todo lo necesario para programar un sistema completo de control y automatización para todo su ciclo de vida, desde el diseño hasta la depuración, operación y mantenimiento, dado que utilizaremos el PLC M580 EPAC (Ethernet programmable Automation Controller) ubicado en la sala eléctrica de molienda, este equipo posee las siguientes características claves:

**Figura N° 5.18. PLC Schneider Control Expert**



**Fuente: Catalogo PLC Schneider control Expeprt.**

- Utiliza módulos X80 de E/S, basados en M340, con capacidad nativa de Ethernet.
- Alto rendimiento y procesadores, fuentes de alimentación y redes redundantes.
- Ciber seguridad mejorada.
- Ofrece una migración fácil desde plataformas de hardware heredadas compatibles.
- Ideal para aplicaciones medianas a grandes.

**Figura N° 5.19. PLC M580 EPAC**



**Fuente: Catalogo PLC Schneider control Expeprt.**

#### 5.16.4. Funciones integradas utilizadas

Son capacidades pre programadas que vienen incluidas en su sistema para facilitar la automatización de procesos industriales. Estas funciones permiten realizar tareas comunes como operaciones lógicas, temporización, conteo, cálculo matemático, y comunicación sin necesidad de programarlas desde cero.

- La función AND en un PLC permite activar una salida solo si todas las condiciones de entrada son verdaderas, es esencial en proceso donde varias condiciones deben cumplirse simultáneamente para ejecutar una acción, como en sistemas de seguridad o control automatizado.
- La función OR en un PLC activa la salida si al menos una de las entradas es verdadera. Es útil en situaciones donde varias condiciones pueden cumplir el mismo objetivo, como encender un motor si cualquiera de dos botones es presionado. Si todas las entradas están en estado “0” (falso), la salida será “0”.
- La función R\_TRIG (Rising Edge Trigger) en un PLC detecta un cambio de estado de “0” a “1” en una entrada. Su salida se activa solo durante un ciclo del programa al momento de detectar este cambio. Es útil para identificar eventos únicos, como presionar un botón, sin mantener activa la salida constantemente mientras el botón sigue presionado.
- La función SR (SET-Reset) en un PLC es una memoria biestable que controla una salida con dos señales independientes, Si ambas entradas están activas simultáneamente, generalmente Reset tiene prioridad, dependiendo de la configuración del PLC. Es útil en procesos donde se requiera mantener un estado hasta que se reciba una señal específica para cambiarlo.
  - Set (S): Activa la salida (la pone en estado “1”).
  - Reset (R): Desactiva la salida (la pone en estado “0”).
- La función RS (Reset-SET) en un PLC es similar a la función SR, pero con una diferencia clave, Reset tiene prioridad sobre Set, Se usa en aplicaciones donde es crítico garantizar que la salida se apague al recibir una señal de reinicio.

- Reset (R): Siempre desactiva la salida (estado “0”) cuando está activo, sin importar el estado de Set (S).
  - Set (S): Activa la salida (estado “1”) solo si Reset (R) está inactivo.
- La función MOVE en un PLC se utiliza para transferir un valor de un lugar a otro, como copiar datos de una variable a otra. Es una instrucción básica que permite asignar valores a registros o salidas de manera sencilla. Por ejemplo, si se tiene un valor de entrada de un sensor y se desea transferir a una variable interna del PLC para ser procesada o utilizada posteriormente, se usa el MOVE.
  - La función TON (Timer On-Delay) en un PLC se utiliza para generar un retraso de tiempo antes de activar una salida. Su funcionamiento es el siguiente:
    - Cuando la entrada se activa, el temporizador comienza a contar el tiempo.
    - Si la entrada se mantiene activa durante el tiempo programado, la salida se activa.
    - Si la entrada se desactiva antes de que complete el tiempo, el temporizador se reinicia.
  - La función CTU (Counter Up) en un PLC es un contador ascendente. Se utiliza para contar eventos que ocurren durante el tiempo de operación. Su funcionamiento básico es:
    - Entrada: Cuando se recibe una señal de entrada, el contador incrementa su valor.
    - Contador: El valor del contador se incrementa en cada ciclo del programa.
    - Salida: Cuando se alcanza un valor predefinido (preset), se activa una salida.
  - La función EQ (Equal) en un PLC compara dos valores y verifica si son iguales. Si los valores son iguales, la salida de la función EQ será 1) verdadera; si no son iguales, la salida será 0 (falsa). Esta función es útil para tomar decisiones basadas en la igualdad de dos variables, como verificar si un contador ha alcanzado un valor específico o si una medición está dentro de un rango específico.

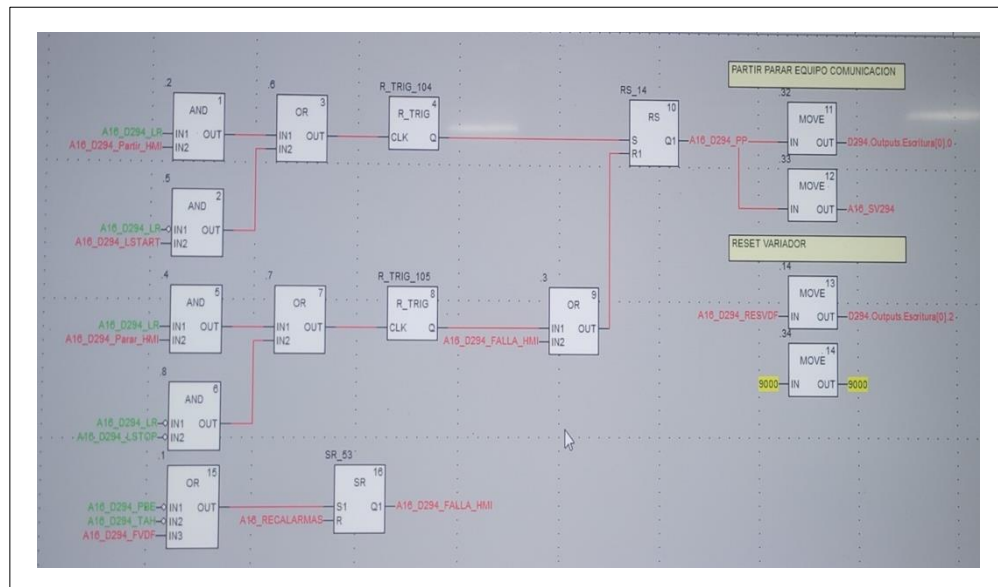
- La función READ\_VAR en un OLC se utiliza para leer valores de una variable o de una dirección de memoria específica. Permite acceder a datos almacenados dentro del sistema, como entradas, salidas o variables internas, y es esencial para interactuar con dispositivos o módulos externos en un proceso de automatizado. Esta función facilita la recopilación de información durante la ejecución del programa.
- La función INT\_TO\_WORD en un PLC convierte datos de tipo IN (como entradas de bits) en un formato de palabra (WORD), que es un tipo de variable de 16 bits. Esta conversión permite agrupar varios bits de entrada en una sola unidad de datos (palabra) para facilitar su manejo y procesamiento dentro del sistema. Es útil cuando se necesita trabajar con varios bits de una forma más compacta y eficiente
- La función WORD\_TO\_BIT en un PLC convierte una variable de tipo WORD (16 bits) en bits individuales. Cada bit de la palabra se extrae y se asigna a una dirección de memoria separada, permitiendo que se pueda acceder y manejar de manera más detallada a cada bit dentro del proceso. Esta función es útil cuando se necesita manipular o verificar de manera individual los bits de una palabra que representa múltiples estados o entradas.
- La función DIV en un PLC realiza una operación de división entre dos valores. El resultado es el cociente de la división, y a menudo también se devuelve el residuo de la operación. Esta función se usa para dividir números enteros o variables y obtener el resultado entero, descartando cualquier valor decimal. Es útil en aplicaciones que requieren dividir cantidades, como en el cálculo de ratios o distribución de recursos en procesos automatizados.
- La función WRITE\_VAR en un PLC se utiliza para escribir o asignar valores a una variable o dirección de memoria específica. Esta función permite modificar el valor de las variables internas del PLC o interactuar con dispositivos y sistemas conectados. Es comúnmente utilizada para cambiar estados o actualizar configuraciones de parámetros en tiempo real durante la ejecución del programa.

### 5.16.5. Programación del funcionamiento del sistema de bombeo

El programa mostrado corresponde a la lógica de control de un sistema de bombeo gestionado a través de un PLC, utilizando entradas y salidas relacionadas con el HMI (Human Machine Interface), el variador de frecuencia (VFD), y las señales de protección y control del sistema. A continuación, se detalla su funcionamiento:

- a. Primera imagen (interacción del PLC con el VDF y señales de control).

**Figura N° 5.20. Lógica de PLC, interacción del PLC con VDF**



**Fuente: Elaboración propia, Lógica PLC.**

#### 1) Señales de control del VDF

- El PLC envía señales de inicio/parada y referencia de velocidad al VDF.
- Se usan comandos como RUN y STOP, además de ajustar la velocidad deseada.

#### 2) Monitoreo de estados

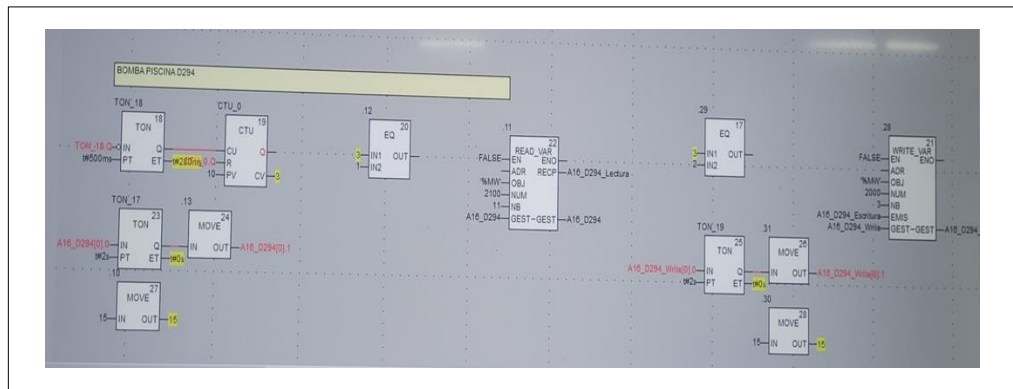
- El PLC verifica el estado del VDF por medios de bits como:

- RDY: el variador está listo.
- RUN: el motor está funcionando.
- Fallas: indica advertencias o errores.
- Referencia aceptada: comprueba si el variador acepta la velocidad configurada.

### 3) Referencias de velocidad y ajuste

- Se envían valores de frecuencia o porcentaje de velocidad deseada desde el PLC al VDF.
- b. Segunda imagen (secuencia de control con temporizadores y lógica de seguridad).

**Figura N° 5.21. Lógica de PLC, secuencia de control con temporizador**



**Fuente: Elaboración propia, Lógica PLC.**

#### 1) Secuencia de arranque y parada:

- Los temporizadores configuran un tiempo de retardo para el inicio y parada, evitando arranques bruscos.
- Se valida que todas las condiciones de seguridad (estado listo del VDF, motor detenido, etc.) estén cumplidas antes de iniciar el arranque.

## 2) Lógica de seguridad:

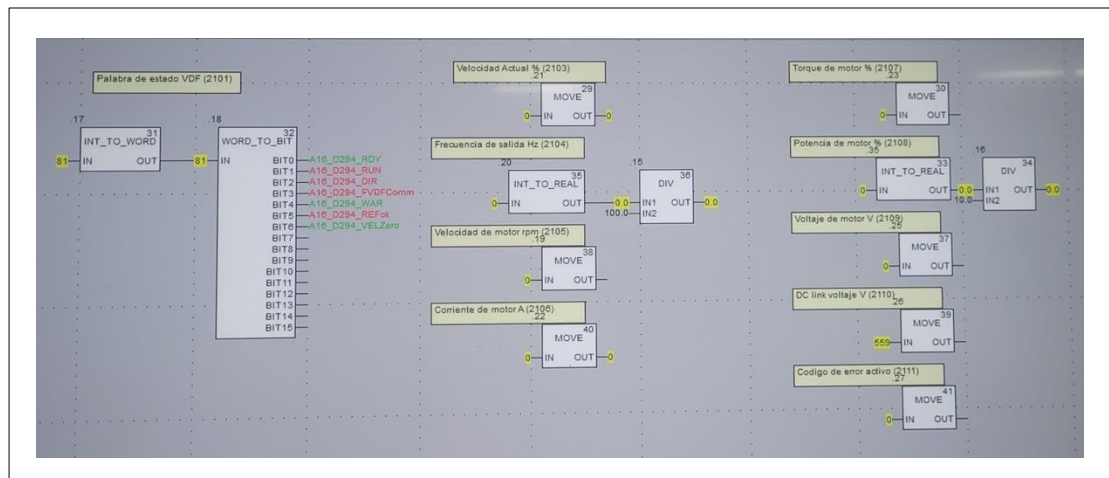
- Incluye protecciones para evitar que el motor arranque:
  - Hay fallas activas.
  - El motor esté sobrecargado.
  - La velocidad inicial no está en cero.

## 3) Control de estados:

- Utiliza bloques de contactos (normalmente abiertos/cerrados) para cambiar entre estados como parado, arrancando, funcionando, o deteniéndose.

### c. Tercera imagen (monitoreo detallado de parámetros del VDF).

**Figura N° 5.22. Lógica de PLC, monitoreo detallado del VDF**



**Fuente: Elaboración propia, Lógica PLC.**

## 1) Lectura de parámetros:

- El PLC recibe datos del VDF como:
  - Velocidad actual (%).

- Frecuencia de salida (Hz).
- Corriente (A) y torque (%).
- Potencia (%).
- Voltaje (V).
- Voltaje del enlace DC.
- Códigos de error activos.

2) Conversión de datos:

- Se convierten valores enteros a reales (formato flotante) o se ajustan escalas (como el divisor para frecuencia).

3) Indicadores de rendimiento:

- se calculan valores como la velocidad en RPM o el porcentaje de torque, que permitan evaluar si la bomba está operando eficientemente.

4) Diagnóstico:

- El código de error permite identificar y registrar fallas específicas en el sistema para facilitar su mantenimiento.

#### **5.16.6. Funcionamiento general de la lógica de PLC**

1. Control automático y seguro:

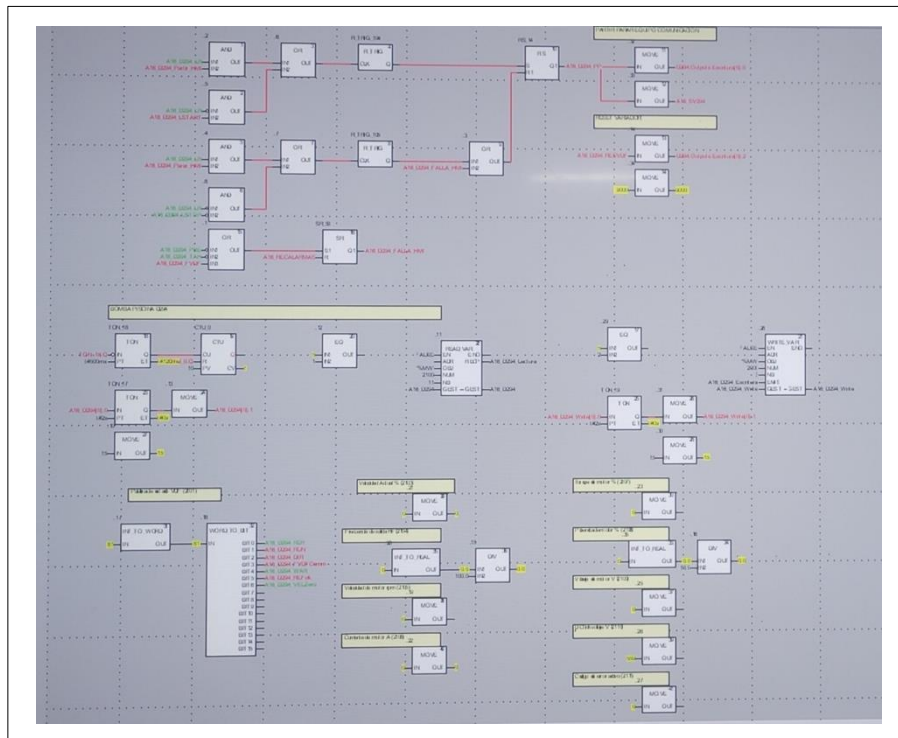
- El PLC controla la bomba mediante el VDF, asegurando un arranque/parada suave y eficiente.
- Verifica que todas las condiciones sean seguras antes de iniciar o detener el sistema.

2. Ajuste dinámico:

- El PLC regula la velocidad de la bomba en tiempo real para adaptarse a las necesidades del proceso, optimizando el consumo energético y reduciendo el desgaste.
3. El sistema supervisa parámetros eléctricos y mecánicos del motor y el VDF, asegurando que la bomba opere dentro de rangos seguros.
  4. Diagnóstico y protección:
    - Ante una falla o advertencia (como sobrecarga, alta corriente, bajo nivel o error de comunicación), el PLC detiene el sistema y alerta al operador para evitar daños.

Este sistema es altamente eficiente, confiable y adaptable, ideal para procesos industriales donde el control preciso del bombeo es esencial.

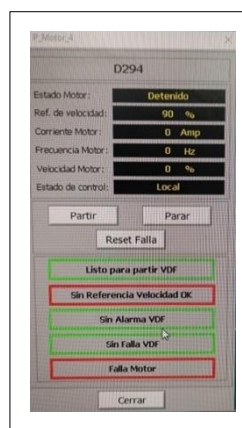
**Figura N° 5.23. Lógica de PLC, completa**



**Fuente: Elaboración propia, Lógica PLC.**

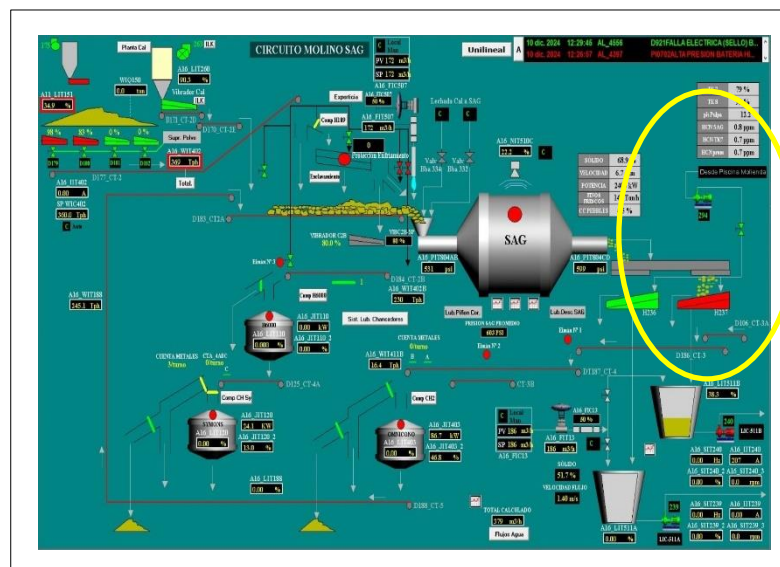
La imagen (5.24 y 5.25) muestra el panel de control SCADA del motor D294 en el circuito de molienda SAG. Indica que el motor está detenido, sin consumo eléctrico ni velocidad activa. El control está en modo local, permitiendo operaciones directas como partir, parar, alternar entre control manual o automático, y reiniciar fallas. Es una herramienta para monitoreo y control en tiempo real del motor dentro del proceso de molienda. Este sistema es altamente eficiente, confiable y adaptable, ideal para procesos industriales donde el control preciso del bombeo es esencial.

**Figura N° 5.24. HMI bomba 294**



**Fuente: Elaboración propia, Lógica PLC.**

**Figura N° 5.25. HMI molienda**



**Fuente: Elaboración propia, Lógica PLC.**

## CAPÍTULO VI

### PLANOS ELÉCTRICOS E HIDRÁULICOS

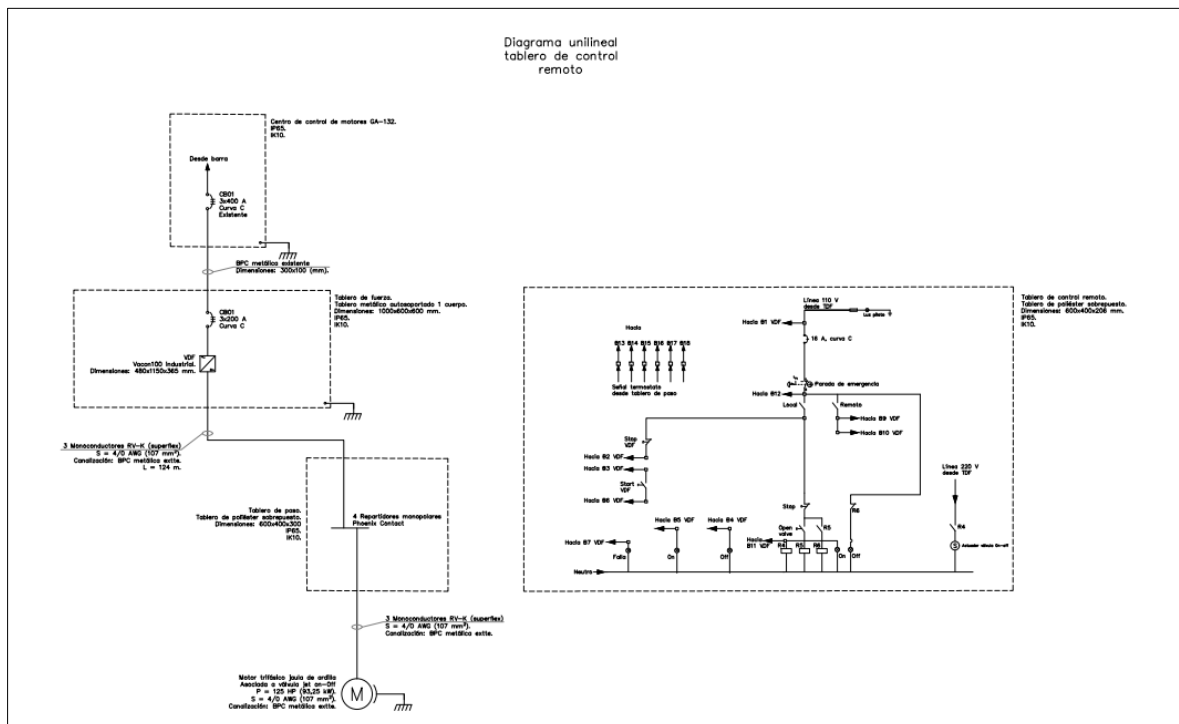
El capítulo VI, aborda las representaciones graficas que describen el diseño e implementación de los sistemas eléctricos y de tuberías para el sistema de bombeo.

#### 6.1. Planos eléctricos e hidráulicos

Los planos eléctricos e hidráulicos son representaciones graficas utilizadas en la ingeniería para mostrar los sistemas eléctricos y de tuberías, respectivamente. Veamos en detalle que es cada uno

##### 6.1.1. Planos unilineal tablero control remoto

Figura N° 6.1. Plano unilineal tablero control remoto



Fuente: Elaboración propia, VDF vacon 100.

El diagrama unilineal muestra el diseño eléctrico del sistema de bombeo, destacando:

1. Componentes principales: Variador de Frecuencia (VDF Vacon 100), motor trifásico de 125 HP y tableros de control remoto (600x400x206 mm, IP65) y de fuerza (1000x600x600 mm, IP65).
2. Cableado: Conductores RV-K 4/0 AWG (107 mm<sup>2</sup>) y canalización metálica externa (50 m).
3. Protecciones: Interruptores automáticos (CB01 de 3x200 A y CB02 de 3x400 A) y botón de parada de emergencia.
4. Integración: Conexiones al VDF para control y monitoreo, válvula ON-OFF y termostato.
5. Indicadores: Luces piloto para estado (encendido, apagado, falla).

El diseño garantiza control, seguridad y eficiencia en la operación del sistema de bombeo.

### **6.1.2. Detalle plano VDF 1**

El plano detalla la instalación y conexiones del Variador de Frecuencia (VDF) Vacon 100 industrial, que controla la bomba de 132 kW (261 A, 380 VAC). Incluye:

#### **1. Entradas y salidas:**

- Entrada: Fases L1, L2, L3 (380 VAC) con conductores de 95 mm<sup>2</sup>.
- Salida: Terminales U, V, W hacia el motor y conexión a tierra (PE).
- Alimentación auxiliar: 120 VAC y 220 VAC mediante transformador interno.

#### **2. Protecciones:**

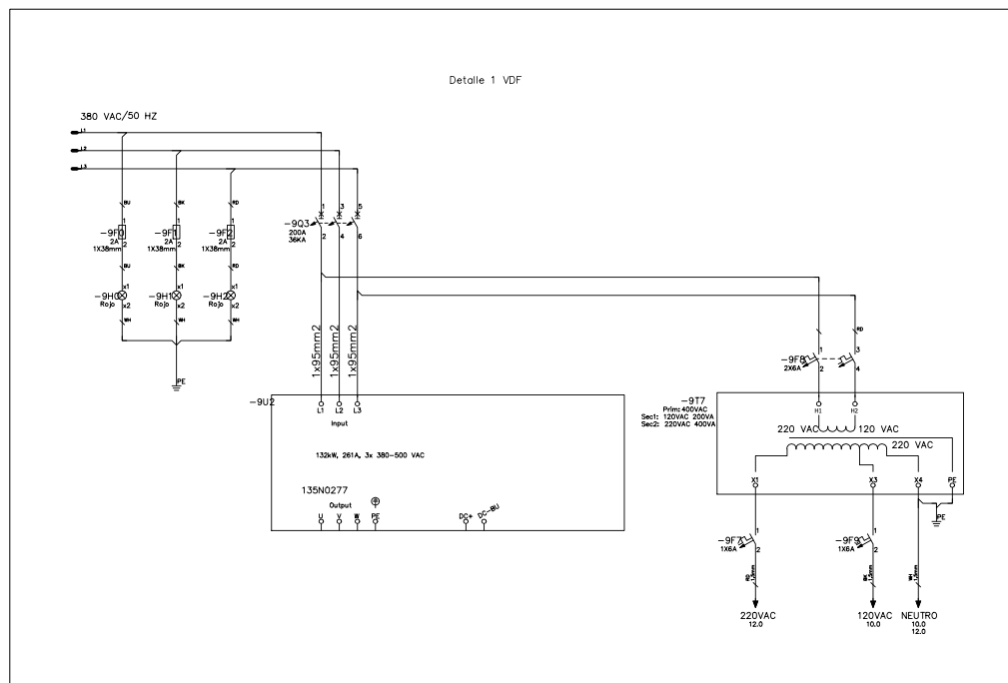
- Interruptor automático, se realiza cambio de (200 a 225 A para la entrada principal. Se proporciona un margen del 18% sobre la corriente nominal, suficiente para transitorios y sobrecargas.
- Circuitos auxiliares protegidos (2 A y 6 A).

- Conductores principales de 95 mm<sup>2</sup> y auxiliares de 1.5 mm<sup>2</sup>.
- Canalización adecuada para seguridad.

### 3. Seguridad:

- Sistema de conexión a tierra robusto (PE).
- Indicadores de operación, falla y estado.

**Figura N° 6.2. Detalle plano VDF 1**



**Fuente: Elaboración propia, VDF vacon 100.**

### 6.1.3. Detalle VDF 2

El detalle del VDF 2 describe las conexiones y señales entre el variador de frecuencia (VDF), el PLC y el tablero de control remoto.

#### 1. Componentes principales



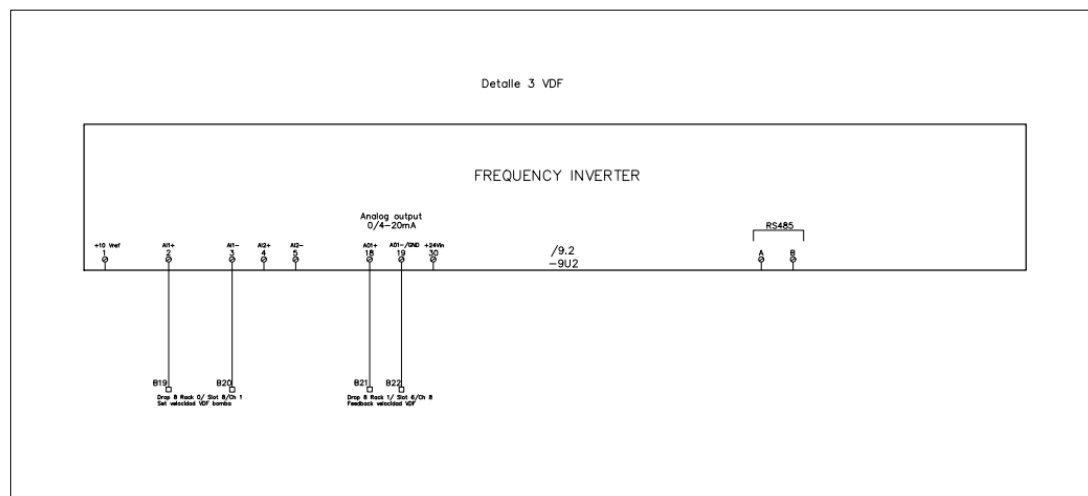
### 6.1.4. Detalle de plano VDF 3

El detalle del VDF 3, muestra conexiones para control y monitoreo del variador de frecuencia (VDF):

1. Entradas analógicas (AI1, AI2): Reciben señales del PLC para ajustar la velocidad del VDF.
2. Salidas analógicas (AO1): Envían retroalimentación de la velocidad real al PLC.
3. Comunicación RS485: Permite intercambio de datos entre el VDF y el PLC.
4. Fuente de alimentación: +24 V y GND para señales de control.

Este diseño garantiza un control preciso del VDF y retroalimentación eficiente en el sistema de bombeo.

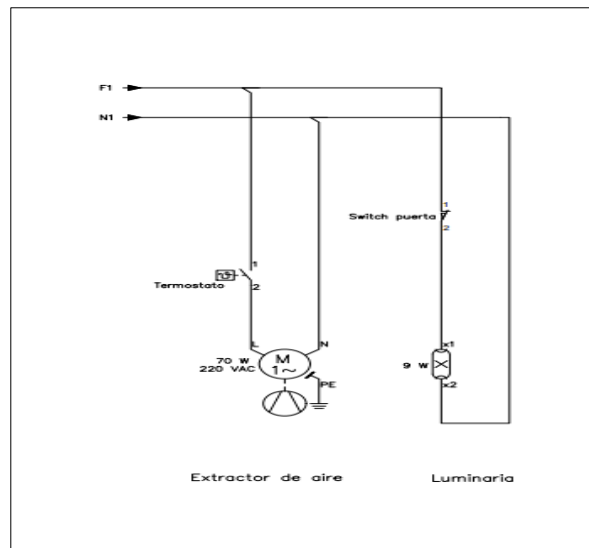
**Figura N° 6.4. Detalle plano VDF 3.**



2. Luminaria interna (70 W, 220 VAC): Facilita inspecciones y mantenimiento.
3. Switch de puerta: Detecta apertura para seguridad.
4. Termostato: Controla la temperatura interna.

Garantiza seguridad, ventilación y facilidad de mantenimiento del VDF.

**Figura N° 6.5. Detalle plano VDF 4**

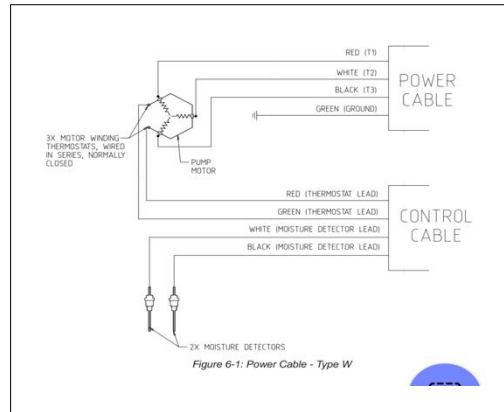


**Fuente: Elaboración propia, VDF vacon 100.**

#### 6.1.6. Diagrama de conexión sensor de humedad y temperatura

El esquema muestra sensores de humedad y temperatura conectados a través del cable de control (señales Red y Green). Destacan condiciones anómalas en el motor y transmiten estas señales al sistema de control para prevenir fallas críticas.

**Figura N° 6.6. Diagrama de conexión sensor de humedad y temperatura**

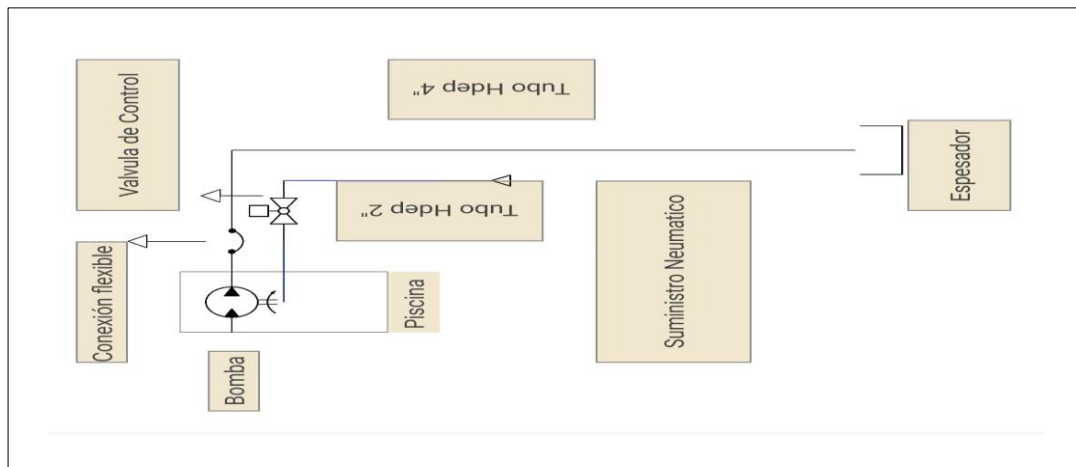


**Fuente: Elaboración propia, VDF vacon 100.**

### 6.1.7. Diagrama hidráulico

El diagrama representa un sistema hidráulico donde una bomba transporta líquido desde una piscina al harnero a través de tuberías HDEP (2" Y 4"), regulado por una válvula de control operada neumáticamente. Incluye una conexión flexible para reducir vibraciones, asegurando transporte eficiente y controlado en condiciones industriales.

**Figura N° 6.7. Esquema hidráulico**



**Fuente: Elaboración propia, esquema hidráulico.**

## CAPÍTULO VII

### ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL SISTEMA PROPUESTO

Este capítulo se evalúa la viabilidad técnica y económica del sistema de bombeo propuesto, con el objetivo de demostrar su superioridad frente al sistema actual. Se analizarán los costos de inversión, los costos operativos y los beneficios a largo plazo que generará la nueva instalación.

#### 7.1. Análisis del comportamiento hidráulico

El sistema de bombeo existente presentaba limitaciones significativas en cuanto a capacidad, eficiencia y manejo de sólidos. Para superar estas deficiencias, se diseñó un nuevo sistema basado en la bomba SHW 360-125-1500, seleccionada por sus características técnicas superiores.

Los cálculos hidráulicos detallados en la Tabla 5.2. confirman que el nuevo sistema ofrece un margen de seguridad considerable. La altura total de elevación de la bomba (41 m) supera ampliamente los requerimientos del sistema (14.54 m), garantizando un funcionamiento estable y eficiente incluso en condiciones operativas variables. Además, las pérdidas de carga en la tubería se han minimizado gracias a un diseño optimizado, lo que contribuye a una mayor eficiencia energética.

#### 7.2. Evaluación económica

El La viabilidad económica del proyecto se ha evaluado considerando los siguientes aspectos:

- Inversión inicial: Se ha calculado el costo total de adquisición e instalación de la nueva bomba, tuberías y accesorios.
- Costos operativos: Se han estimado los costos anuales de energía eléctrica, mantenimiento preventivo y correctivo, así como otros gastos asociados a la operación del sistema.

- Ahorros proyectados: Se han cuantificado los ahorros que se obtendrán gracias a la mayor eficiencia energética, la reducción de averías y la prolongación de la vida útil del equipo.
- Periodo de recuperación de la inversión: Se ha determinado el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial a través de los ahorros generados.

### **7.2.1. Beneficios del nuevo sistema**

La implementación del nuevo sistema de bombeo traerá consigo los siguientes beneficios:

- Mayor eficiencia energética: Gracias a una bomba más eficiente y a la reducción de pérdidas en la tubería, se logrará un ahorro significativo en el consumo de energía eléctrica.
- Mayor fiabilidad: La bomba SHW 360-125-1500 es reconocida por su robustez y fiabilidad, lo que reducirá el número de averías y tiempos de parada.
- Mayor capacidad: El nuevo sistema podrá satisfacer una mayor demanda de caudal, asegurando un suministro continuo y confiable.
- Menor costo de mantenimiento: La reducción de averías y la mayor vida útil del equipo disminuirán los costos de mantenimiento a largo plazo.

### **7.3. Análisis del comportamiento eléctrico del sistema propuesto**

El sistema eléctrico integra la bomba SHW 360-125-1500, con un variador de frecuencia (VDF) Vacon 0100-3L-0261-5, y otros componentes para garantizar eficiencia y confiabilidad. Use tabla 5.2. y 5.4.

#### **7.3.1. Evaluación del comportamiento eléctrico**

##### **1. Consumo energético**

- Potencia de entrada requerida por la bomba

$P_{entrada}: 93.2 \text{ KW}$

- Con un factor de eficiencia del sistema mejorado del 92 %, la potencia consumida por el sistema eléctrico es más eficiente que en el sistema actual.

## 2. Compatibilidad del VDF con la bomba

- El VDF Vacon 0100-3L0261-5 tiene una corriente nominal de 261 A, que es mayor a la corriente requerida por la bomba 190 A, garantizando un margen de operación seguro para picos de carga.

## 1. Control de velocidad y optimización energética

- El VDF permite operar la bomba a velocidades variables según las demandas del proceso, optimizando el consumo energético y evitando sobrecargas, especialmente en condiciones de manejo de sólidos.

## 2. Caída de tensión en el cableado

- Longitud del cableado ida y vuelta: 100 m.
- Caída de tensión máxima permitida: 3 %.
- Según los cálculos, la sección transversal del cable (4/0) cumple con los requisitos para mantener una caída de tensión menor al límite permitido, asegurando la estabilidad del sistema.

## 3. Temperatura y protección

- Clasificación IP54 del VDF garantiza protección contra polvo y salpicaduras, lo cual es crucial en ambiente industriales.
- La temperatura ambiente (25-30° C), está dentro del rango operativo de los equipos eléctricos seleccionados.

## 4. Impacto en la demanda eléctrica

- La capacidad del sistema propuesto para operar de manera eficiente reduce la demanda eléctrica total al eliminar las paradas frecuentes y reinicios asociados con fallos en el sistema actual.

#### 5. Cumplimiento normativo

- El sistema propuesto cumple con los estándares industriales para la operación de equipos eléctricos en entornos industriales (IEC y NEMA).

### **7.3.2. Beneficios del comportamiento eléctrico propuesto**

#### 1. Reducción de pérdidas energéticas

- La implementación del VDF minimiza pérdidas por sobrecarga y mejora la eficiencia general del sistema, reduciendo el costo energético.

#### 2. Optimización del consumo en carga parcial

- Al ajustar la velocidad de la bomba, el VDF permite operar de manera eficiente incluso en condiciones de carga parcial, lo cual no es posible en sistemas de partida directa.

#### 3. Protección y durabilidad.

- El control del VDF reduce el impacto del arranque directo en los componentes eléctricos y mecánicos, prolongando la vida útil de los equipos.
- La protección contra sobrecarga y fallas operativas garantiza la estabilidad eléctrica del sistema.

#### 4. Impacto ambiental

- La mayor eficiencia energética del sistema disminuye las emisiones indirectas de carbono, contribuyendo a prácticas sostenibles.

El análisis eléctrico del sistema propuesto demuestra que la combinación de la SHW 360-125-1500 y el VDF Vacon 0100-3L-0261-5 optimiza el rendimiento, incrementa la eficiencia energética, y minimiza las interrupciones operativas. Además, ofrece flexibilidad para manejar distintas condiciones de operación, garantizando un desempeño seguro y eficiente.

#### **7.4. Cálculo de los KPI del proyecto**

Para calcular los KPI del proyecto, se requieren algunos datos clave que permitirán realizar los análisis de productividad, costos, mantenimiento, y medio ambiente. A continuación, se detalla:

##### **7.4.1. KPI de productividad**

Datos iniciales:

1. Caudal antes de la mejora:  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  con fallas recurrentes.
2. Caudal después de la mejora:  $150 \text{ m}^3/\text{h}$ .
3. Volumen de la piscina:  $150 \text{ m}^3$ .
4. Horas de operación: 12 horas.
5. Día de operación mensual: 30 días. (sistema actual con 4 fallas al mes y el sistema propuesto se contempla 1 falla por mes para su mantención, con duración de 10 horas)

##### **7.4.1.1. Determinar las horas de operación por mes**

$$\text{Horas de operacion por mes} = 12 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \times 30 \text{ días} = 360 \frac{\text{horas}}{\text{mes}} \quad (\text{Ec. N}^\circ 7.1)$$

##### **7.4.1.2. Calcular el volumen total bombeado**

$$\text{Volumen total bombeado antes} = 100 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 320 \text{ horas} = 32,000 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Volumen total bombeado después} = 150 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 350 \text{ horas} = 52,500 \text{ m}^3/\text{h}$$

#### 7.4.1.3. Cálculo de la productividad

$$Productividad (\%) = \left( \frac{Caudal_{antes} - Caudal_{Después}}{Caudal_{antes}} \right) \times 100 \quad (\text{Ec. N}^\circ 7.2)$$

$$Productividad (\%) = \left( \frac{150 - 100}{100} \right) \times 100 = 50 \%$$

- Esto indica que la mejora en la productividad del sistema de bombeo es 50 % superior en comparación con el estudio inicial.

#### 7.4.1.4. Interpretación técnica

- Incremento de la eficiencia: el aumento del caudal a  $150 \text{ m}^3/\text{h}$  permite evacuar el volumen completo de la piscina en 1 hora, mientras que antes tomaba 1.5 horas, optimizando tiempos y reduciendo el desgaste por ciclos operativos más largos.
- Impacto en la capacidad operativa: el sistema mejorado no solo reduce las fallas, sino que incrementa significativamente la capacidad del manejo de líquidos y sólidos, mejorando la continuidad operativa y reduciendo pérdidas por detenciones.
- Sostenibilidad del sistema: la operación a mayor eficiencia reduce los costos energéticos y los gastos asociados al mantenimiento, gracias al diseño optimizado con VDF, PLC, y sensores.

Este análisis respalda la viabilidad técnica y económica de la mejora, justificando su implementación como una solución eficiente y sostenible para el proceso de evacuación de derrames en la piscina del área de molienda.

**Figura N° 7.1. Gráfico resultados de perdidas**



**Fuente: Elaboración propia, datos de la planta**

### 7.5. KPI de costos energéticos para la bomba propuesta

El KPI de costo energético evalúa la eficiencia energética del sistema de bombeo mejorado. Para realizar el cálculo, es necesario comparar el consumo de energía de la bomba antes y después de la mejora, considerando tanto la potencia de las bombas como las horas de operación y el costo de energía.

#### 7.5.1. Cálculo del consumo energético antes de la mejora

Datos:

- Potencia de la bomba antes de la mejora: 11KW con partida directa.
- La bomba falla cuatro veces al mes con duración de 10 horas.
- Horas de operación por mes 360 horas al mes.
- Horas de inactividad por fallas: 4 fallas x 10 horas = 40 horas.
- Horas efectivas de operación al mes: 320 horas
- Precio del KWh: 0,02378 USD/KWh.

### 7.5.2. Cálculo del consumo energético de la bomba actual

$$\text{Consumo energético} = \text{Potencia} \times \text{Horas de operación} \quad (\text{Ec. N}^\circ 7.3)$$

$$\text{Consumo energético mensual} = 11 \text{ KW} \times 320 \text{ horas} = 3,520 \text{ KWh}$$

$$\text{Consumo energético anual} = 3,520 \text{ KWh} \times 12 \text{ meses} = 42,240 \frac{\text{KWh}}{\text{año}}$$

### 7.5.3. Cálculo costo mensual de energía

$$\text{Costo} = \text{Consumo de energía} \times \text{Precio por KWh} \quad (\text{Ec. N}^\circ 7.4)$$

$$\text{Costo} = 3,520 \text{ KWh} \times 0.02378 \frac{\text{USD}}{\text{KWh}} = 83.70 \text{ USD}$$

### 7.5.4. Cálculo costo anual de energía

$$\text{Costo} = 42,240 \text{ KWh} \times 0.02378 \frac{\text{USD}}{\text{KWh}} = 1,008.74 \text{ USD}$$

### 7.5.5. Cálculo del consumo energético de la bomba propuesta

#### Datos:

- Potencia de la bomba propuesta: 93.2 kW con VDF, PLC, HMI.
- La bomba se detiene 1 vez al mes para mantenimiento con duración de 10 horas.
- Horas de operación por mes 360 horas al mes.
- Horas de detención: 1 x 10 horas = 10 horas.
- Horas efectivas de operación al mes: 350 horas
- Precio del kWh: 0,02378 USD/kWh.

### 7.5.6. Cálculo del consumo energético de la bomba

$$\text{Consumo energético} = \text{Potencia} \times \text{Horas de operación} \quad (\text{Ec. N}^\circ 7.5)$$

$$\text{Consumo energético} = 93.2 \text{ KW} \times 350 \text{ horas} = 32,620 \text{ KWh}$$

$$\text{Consumo energético anual} = 32,620 \text{ KWh} \times 12 \text{ meses} = 391,440 \text{ KWh/año}$$

#### 7.5.7. Cálculo costo mensual de energía

$$\text{Costo} = \text{Consumo de energía} \times \text{Precio por kWh}$$

$$\text{Costo} = 32,620 \text{ kWh} \times 0.02378 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} = 775.70 \text{ USD}$$

#### 7.5.8. Cálculo costo anual de energía

$$\text{Costo} = 391,440 \text{ kWh} \times 0.02378 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} = 9,308.44 \text{ USD}$$

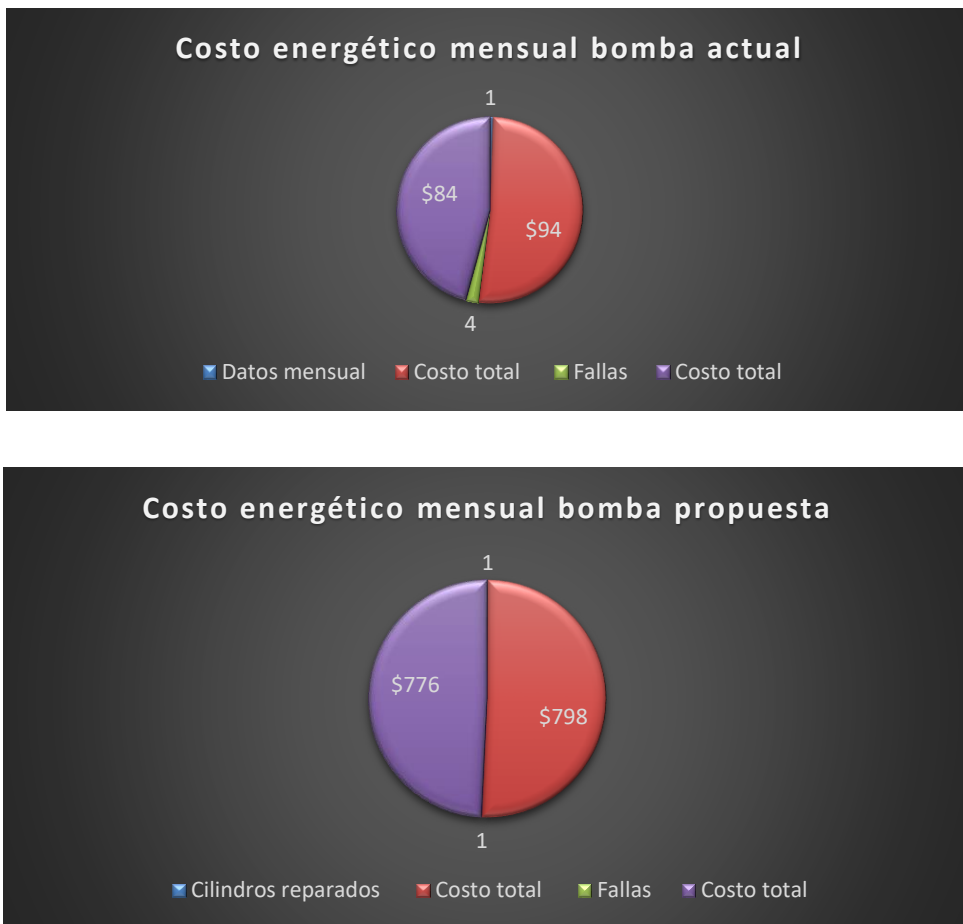
##### 7.5.8.1. Comparación del costo energético

- Costo mensual antes de la mejora: 83.70 USD.
- Costo anual antes de la mejora: 1,008.24 USD.
- Costo mensual después de la propuesta: 775.70 USD
- Costo anual después de la propuesta: 9,308.44 USD.

El aumento en el costo se debe a la mayor potencia de la bomba mejorada, aunque este sistema es más eficiente en cuanto a operación continua debido a la mejora en el control de velocidad y reducción de fallas.

Este análisis revela que, aunque el costo energético mensual y anual es más alto con la bomba propuesta, la eficiencia del sistema mejorado podría justificarlo a largo plazo si se considera la reducción en los costos de mantenimiento y las pérdidas operativas por falla.

**Figura N° 7.2. Gráfico costo energético**



**Fuente: Elaboración propia, datos calculados.**

### **7.6. KPI de mantenimiento**

El KPI se utiliza para evaluar la efectividad de las mejoras implementadas en los sistemas y equipos, en este caso, el sistema de bombeo.

#### **7.6.1. KPI de reducción de fallas**

El KPI mide la cantidad o parada inesperadas que ocurren después de implementar mejoras. Para calcularlo, se puede usar la siguiente formula.

$$KPI_{reduccion\ de\ fallas} = \frac{f.\text{antes de la mejora} - f.\text{despues de la mejora}}{fallas\ antes\ de\ la\ mejora} \times 100 \text{ (Ec. N}^\circ \text{ 7.6)}$$

$$KPI_{reduccion\ de\ fallas} = \frac{4 - 1}{4} \times 100 = 75 \%$$

### 7.6.2. KPI de reducción de costos de mantenimiento

Este KPI evalúa cuanto se han reducido los costos de mantenimiento, incluyendo horas de trabajo, repuestos, y otros gastos asociados. Se puede calcular con la siguiente formula.

$$KPI_{costos\ mnto} = \frac{\text{costo mantto antes} - \text{costo mantto despues}}{\text{costo de mantenimiento antes}} \times 100 \text{ (Ec. N}^\circ \text{ 7.7)}$$

- Costo de mantenimiento antes de la mejora: \$20,000 USD al mes.
- Costo de mantenimiento después de la mejora: \$5,000 USD al mes.

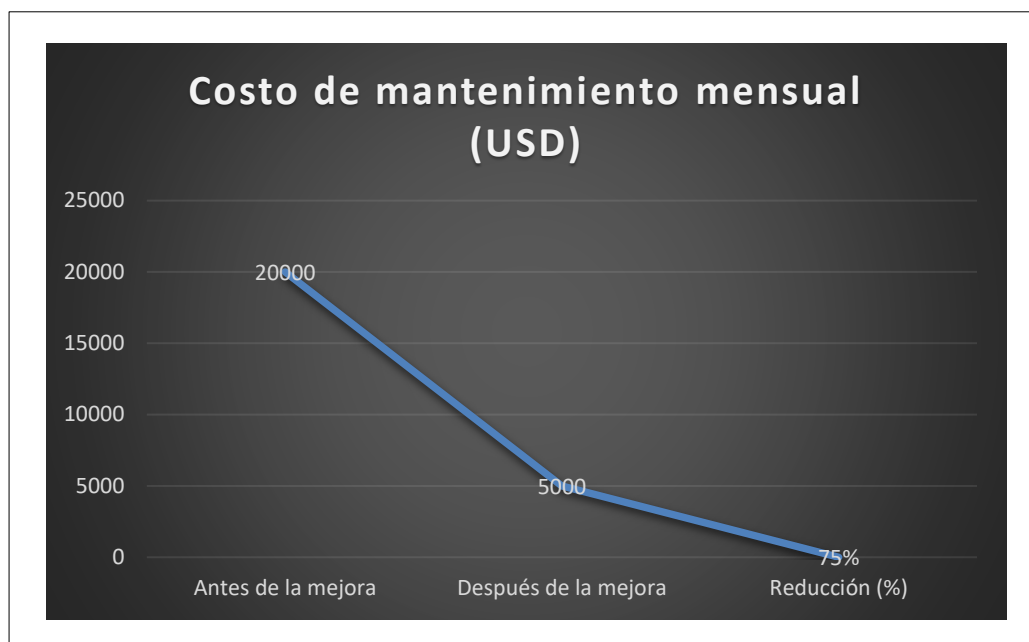
$$KPI_{reduccion\ costos\ mantenimiento} = \frac{20,000 - 5,000}{20,000} \times 100 = 75 \%$$

Esto indica que los costos de mantenimiento se han reducido en un 75 % tras la mejora.

Este tipo de KPI ayuda a evaluar la eficiencia de las mejoras implementadas, en este caso, el sistema de bombeo con VDF, PLC, y HMI. Estos indicadores pueden mostrar

que, aunque el costo energético puede ser más alto, los beneficios a largo plazo en cuanto a fiabilidad del sistema y ahorro en mantenimiento son significativos.

**Figura N° 7.3. Grafica costo de mantenimiento mensual (USD)**



**Fuente: Elaboración propia, datos calculados.**

### 7.6.3. KPI detención de planta por falla

Este KPI mide tiempo de inactividad o las detenciones de la planta debido a fallas de equipos, y se calcula con la siguiente formula.

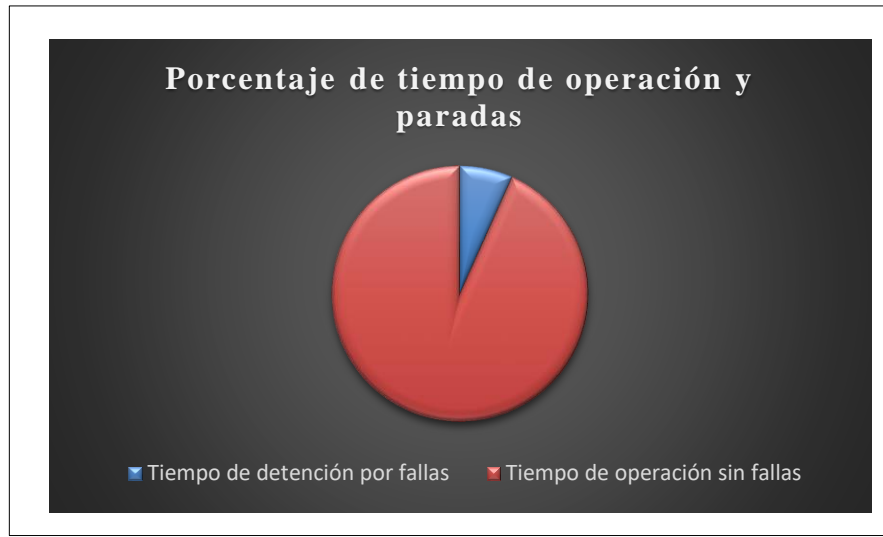
$$KPI_{\text{Detención por falla}} = \frac{\text{Tiempo de detención por falla}}{\text{Tiempo total de operación}} \times 100 \quad (\text{Ec. N}^\circ 7.8)$$

La planta tuvo un total de operación de 600 horas aproximadas de operación al mes y se registran 40 horas por detención por fallas del equipo.

$$KPI_{\text{Detención por falla}} = \frac{40}{600} \times 100 = 6.67 \%$$

Esto indica que el 6.67 % del tiempo de operación de la planta se pierde debido a fallas del sistema.

**Figura N° 7.4. Grafica de tiempo de operación y paradas**



**Fuente: Elaboración propia, datos calculados.**

#### **7.6.4. KPI pérdidas por detención (costos por inactividad)**

Este KPI mide las pérdidas económicas generadas debido al tiempo de inactividad por fallas de quipos. Se calcula considerando los costos asociados a la detención, como la pérdida de producción, costos de mantenimiento, y otros gastos relacionados.

- La planta pierde \$70,000 USD en producción por hora de detención.
- Ingreso mensual por producción 50,400,000 USD.
- Ingreso anual por producción 604,480,000 USD

##### **7.6.4.1. Cálculo de pérdida antes de la mejora**

$$Pérdidas_{antes\ mensual} = 40\ horas \times 70,000 \frac{USD}{hora} = 2,800,000\ USD/mes$$

$$Pérdidas_{antes\ anual} = 2,800,000 \frac{USD}{mes} \times 12\ meses = 33,600,000\ USD/anual$$

### 7.6.5. Cálculo de pérdidas después de la mejora

$$Pérdidas_{despues\ mensual} = 10\ horas \times 70,000 \frac{USD}{hora} = 700,000\ USD/mes$$

$$Pérdidas_{despues\ anual} = 700,000 \frac{USD}{mes} \times 12\ meses = 8,400,000\ USD/anual$$

### 7.6.6. Cálculo del KPI por detención

- Antes de la mejora

$$KPI_{antes\ (mensual)} = \frac{pérdidas\ antes}{ingreso\ mensual} \times 100 \quad (\text{Ec. N}^\circ 7.9.)$$

$$KPI_{antes\ (mensual)} = \frac{2,800,000}{50,400,000} \times 100 = 5.56\ \%$$

$$KPI_{antes\ (anual)} = \frac{pérdidas\ antes\ (anual)}{ingreso\ anual} \times 100$$

$$KPI_{antes\ (anual)} = \frac{33,600,000}{604,800,000} \times 100 = 5.56\ \%$$

- Después de la mejora

$$KPI_{despues\ (mensual)} = \frac{pérdidas\ antes}{ingreso\ mensual} \times 100$$

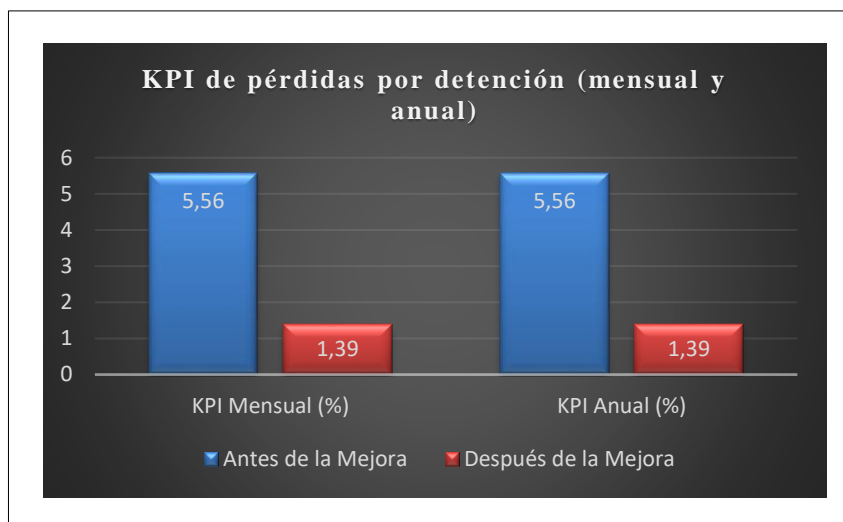
$$KPI_{despues(mensual)} = \frac{700,000}{50,400,000} \times 100 = 1.39\ \%$$

$$KPI_{despues\ (anual)} = \frac{pérdidas\ antes\ (anual)}{ingreso\ anual} \times 100$$

$$KPI_{despues\ (anual)} = \frac{8,400,000}{604,800,000} \times 100 = 1.39\ \%$$

Esto refleja una reducción en las pérdidas de aproximadamente el 75 %, demostrando un impacto positivo en la eficiencia operativa.

**Figura N° 7.5. Gráfico por pérdidas por detención (mensual y anual)**



**Fuente: Elaboración propia, datos calculados.**

## 7.7. Resumen de los KPI utilizados

**Tabla N° 7.1. KPI utilizados con nombres técnicos**

KPI	Nombre técnico
KPI de productividad	Power By (productivity)
KI de costos energéticos	Energy cost efficiency
KPII de reducción de fallas	Failure rate reduction
KPI de reducción de costos de mantto	Mainteance cost reduction
KPI por detención de planta por falla	Downtime due to failure
KPI de pérdidas por detención	Losses due to downtime

## 7.8. Inversión final de los equipos utilizados en la propuesta (mejora).

El análisis de recuperación de inversión es fundamental en la evaluación de proyectos de mejora, ya que permite estimar el tiempo que se tarda en recuperar el costo inicial de una inversión a partir de los ahorros generados. En este caso se evaluó el sistema propuesto de bombeo, que incluye una bomba de mayor capacidad y tecnología avanzada con VDF, PLC, sensores ultrasónicos y otros elementos de control con el objetivo de optimizar y reducir los costos de mantenimiento y consumo energético.

**Tabla N° 7.2. Inversión de propuesta**

Componente	Unidad	Costo aprox. (CLP)
Bomba SHW 360.125.1500	1	\$15,000,000
VDF Vacon 100	1	\$15,000,000
Cable 4/0	500 metros	\$ 7,000,000
Tableros	2	\$ 3,000,000
Escalerilla porta conductores	70 metros	\$2,000,000
Sensor con transmisor	1	\$2,800,000
Actuador eléctrico	1	\$440,000
Hilo corrido ½”	40	\$1,570,141
Riel unistrut	50	\$1,384,750
Mano de obra	1	\$31,902,293
Total		\$81,097,184

Si el costo de mantenimiento es de 5,000 USD al mes, podemos calcular el ahorro anual por mantenimiento y sumar esos ahorros energéticos anuales para obtener una estimación más precisa del tiempo de recuperación de la inversión.

### 1. Cálculo del Ahorro Anual por Mantenimiento

- El costo de mantenimiento mensual es de 5,000 USD. Para obtener el ahorro anual por mantenimiento, multiplicamos este valor por 12 meses.

$$Ahorro_{Anual \text{ por mantenimiento}} = 5,000 \frac{USD}{mes} \times 12 \text{ meses} = 60,000 \text{ USD/año}$$

## 2. Retorno de la inversión (ROI)

- Mide la rentabilidad de la inversión comparando la ganancia o ahorro generado por el proyecto con la inversión realizada,

$$ROI = \frac{Ahorros \text{ totales anuales}}{Inversión \text{ total}} \times 100 \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 5.10})$$

$$ROI = \frac{69,324.95 \text{ USD}}{81,951.94 \text{ USD}} \times 100 = 84,3 \%$$

## 3. Ahorro Total Anual

- El ahorro total anual es la suma del ahorro energético actual y el ahorro por mantenimiento:

$$Ahorro_{Total \text{ anual}} = 9,324.95 \text{ USD} + 60.000 \text{ USD} = 69,324.95 \text{ USD/año}$$

## 4. Cálculo del tiempo de recuperación de la inversión

- Ahora que tenemos el ahorro total anual, podemos calcular el tiempo de recuperación de la inversión total:

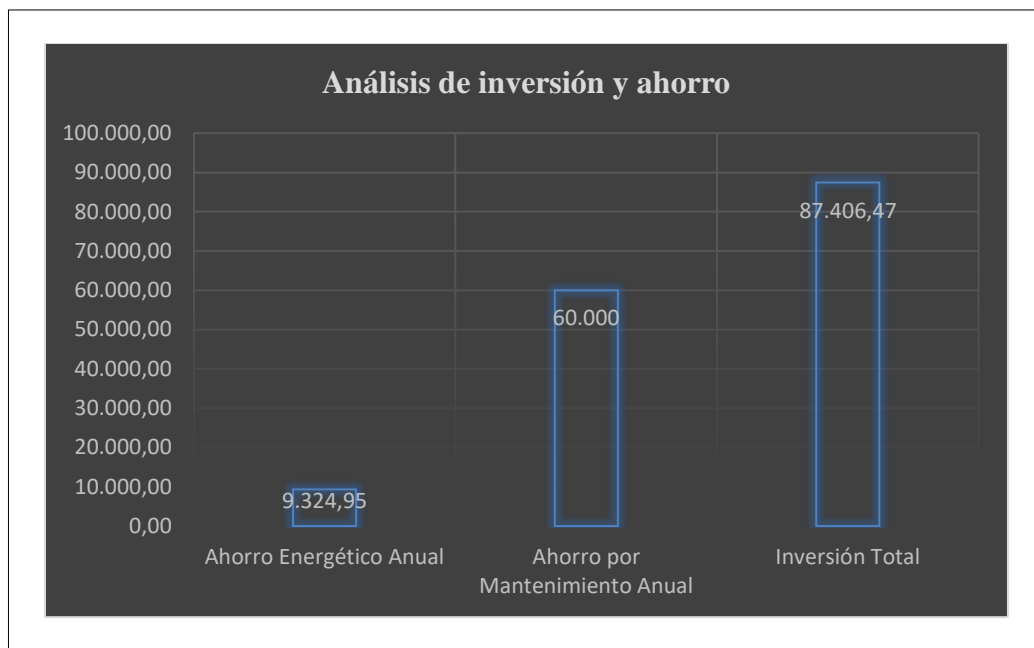
$$Tiempo_{de \text{ recuperación}} = \frac{Inversión \text{ total en USD}}{Ahorro \text{ total anual en USD}} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 5.11})$$

$$Tiempo_{de \text{ recuperación}} = \frac{81,951.94 \text{ USD}}{69,324.95 \text{ USD}} = 1.18 \text{ años}$$

**Tabla N° 7.3. Inversión, ahorros anuales energéticos y mantenimientos.**

Concepto	Valor
Inversión total en USD	81,951.94 USD
Ahorro energético anual	9,324.95 USD
Ahorro por mantenimiento anual	60,000 USD
Ahorro total anual	69,324.95 USD
Tiempo de recuperación de la inversión	1.18 AÑOS (13 meses)

**Figura N° 7.6. Gráfico de inversión y ahorro.**



## **CAPÍTULO VIII**

### **CONCLUSIONES**

El proyecto de optimización integral del sistema de bombeo en la piscina de derrames de la planta de molienda de la Coipa representa una solución efectiva a los desafíos operativos, energéticos y ambientales asociados con el manejo de líquidos y sólidos en procesos mineros. La implementación de una bomba más robusta (SHW 360-125-1500) junto con un variador de frecuencia (VDF). Sensores avanzados y un sistema de control automatizado basado en PLC y HMI permitió superar las limitaciones de sistema anterior, mejorando significativamente la eficiencia y reduciendo los costos asociados

Entre los principales logros destacan:

- La mejora en la capacidad de manejo de sólidos, aumentando del 40 % al 60 %, y la optimización del tiempo de evacuación de la piscina.
- La reducción de los costos operativos y de mantenimiento, generando un ahorro mensual estimado en \$5,827,098 USD y asegurando un retorno de inversión en aproximadamente 13 meses.
- La estabilidad operativa y la reducción de riesgo de embancamiento, lo que garantiza una operación continua y sin interrupciones.
- A pesar del aumento en el costo energético, se compensa con una significativa reducción en pérdidas operativas y costos de mantenimiento.
- El cumplimiento de normativas ambientales y el aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos, lo que posiciona a la operación en línea con estándares de sostenibilidad.

Este proyecto no solo valida la importancia de una planificación técnica rigurosa y el uso de tecnologías avanzadas, sino que también demuestra cómo una inversión inicial puede traducirse en beneficios económicos, operativos y ambientales a largo plazo. En

síntesis, esta optimización refuerza el compromiso de la planta con la mejora continua, eficiencia y la sostenibilidad en sus procesos industriales.

Conclusiones específicas para cada uno de los objetivos propuestos, el análisis se centrará en sintetizar los resultados alcanzados en relación con cada objetivo planteado. Aquí están las conclusiones basadas en los objetivos específicos identificados:

1. Describir el comportamiento hidráulico y eléctrico del sistema actual:

- El sistema actual presenta una baja capacidad de manejo de sólidos (40 %), lo que genera frecuentes embancamientos. Su control eléctrico limitado y consumo energético su óptimo revelan deficiencias que impactan la operación y la eficiencia energética. Además, las fallas frecuentes incrementan el costo de mantenimiento y las detenciones operativas.

2. Dimensionar los equipos y conductores eléctricos requeridos mediante cálculos técnicos:

- Se determinó que una bomba SHW 360-125-1500, junto con un cable de alimentación 4/0 y un VDF modelo Vacon 0100-3L-0261-5, son adecuados para manejar los requerimientos del sistema. Estos cálculos aseguran estabilidad en la operación y reducen la caída de tensión en el sistema eléctrico, optimizando la eficiencia energética.

3. Comparar las pérdidas de energía y la eficiencia del sistema actual con el sistema propuesto:

- El análisis comparativo mostró que el sistema mejorado reduce el embancamiento en un 75 % y mejora la eficiencia energética al operar con un VDF, PLC y HMI. Aunque el costo energético del sistema mejorado es mayor debido a la mayor potencia de la bomba, este se

compensa con una reducción significativa en fallas y costos de mantenimiento.

4. Describir la implementación de un sistema de control automatizado basado en VDF, PLC, HMI y sensores para optimizar la operación de la bomba:

- La integración de un PLC Schneider, un VDF Vacon y sensores ultrasónicos garantiza un control eficiente del sistema, permitiendo ajustes dinámicos en la velocidad de la bomba. Esto optimiza el consumo energético y prolonga la vida útil del equipo, asegurando un desempeño confiable bajo condiciones variables.

5. Estimar los costos de inversión, operación y mantenimiento asociado al sistema propuesto:

- El análisis financiero determinó una inversión inicial de \$81,097,181 CLP, con un retorno estimado en 13 meses gracias a la reducción de costos por mantenimiento (75 %) y pérdidas por detenciones operativas. Esto demuestra la viabilidad económica de la mejora propuesta.

## BIBLIOGRAFÍA

- Vulco, wear. (2022). Warman. Centrifugal slurry pumps, (v644600258), pp 1-37,
- 100, vacon. (2017). ac drives installation application manual. German:
- Electric, Schneider. (2023). Laboratorio control expert. Chile:
- Warman. (2017). warman submersible pumps. USA: N-53662-4
- Minerals, weir. (2010). operation & maintenance manual & manufacturing records. USA:
- Ministerio de energía chile. (2021). reglamento de instalaciones de consumo. Recuperado de <https://energia.gob.cl>
- Superintendencia de electricidad y combustible (SEC). (2024). Guías y normativas para instalaciones eléctricas y calidad de energía en instalaciones industriales. Recuperado de <https://sec.cl>
- Pérez, M. (2020). Fundamentos de variadores de frecuencia y control de motores. : Marcombo
- López R, Martínez. (2017). sistemas de bombeo y energía hidráulica. : Tecnociencia
- Genebre, válvula. (2020). Válvula de esfera paso total bridada. 2528a, (), pp1-6
- Actuador, valvia. (2013). actuador rotativos neumática. , (02-02.01), pp1,
- Balanza marcy. Recuperado de <https://balanzas-marcy.com/balanzas-marcy-para-medir-densidad-de-pulpa/>
- MasterD []. (2018 26 julio). la densidad, explicación y ejemplo práctico. [Video]. Recuperado de <https://youtu.be/RD0RWeyvSHM?si=qMchiNWgGwAoQ6NK>

- Walter Chávez []. (2023 junio 01). Caída de tensión. [Video]. Recuperado de <https://youtu.be/TNI8dHqdrwo?si=Hy9yTFHmtJVmsKpQ>