

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**DISEÑO DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA AUTOMATIZAR SISTEMA DE CALIBRACIÓN
PARA REGULADORES DE FLUJO**

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Ingeniero de Ejecución en CONTROL E
INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Alumno:

Iván Alexander Quinteros Reinoso

Profesor Guía:

Franz Yurjevic Perin

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Diseño de control automático para automatizar sistema de calibración para reguladores de flujo

Nombre del candidato(a): Iván Alexander Quinteros Reinoso

Carrera / Grado: Ingeniería de ejecución en control e instrumentación industrial

Campus: Sede Viña del Mar Departamento: Electrotecnia e Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Franz Yurjevic Perin, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente

DEJO CONSTANCIA que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

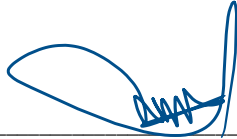
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

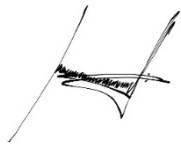
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 06 Abril 2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 06-04-2026 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

RESUMEN

KEYWORDS: Automatización, control PID, VDF, OMNI.

El presente trabajo de título aborda el diseño de un sistema de control automático para la calibración de medidores de flujo, orientado a mejorar la eficiencia, estabilidad y precisión del proceso. La solución propuesta se basa en la implementación de un computador de flujo OMNI como controlador principal, el cual permite regular las variables del sistema mediante una estrategia de control PID, actuando sobre un variador de frecuencia (VDF) y válvulas de control.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES	2
1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 <i>Gpi lab</i>	4
1.2 <i>Planteamiento del problema</i>	5
1.2.1 Definición del problema:	6
1.2.2 Diagrama de Ishikawa	8
1.2.3 Importancia de resolverlo.....	8
1.2.4 Involucrados	9
1.3 <i>Solución del problema</i>	10
1.4 <i>Requerimientos</i>	11
1.5 <i>Alternativas de solución</i>	12
1.5.1 Alternativa N°1: Incorporar microcontrolador para registro de datos.	12
1.5.2 Alternativa N°2: Diseño de control automático con computador de flujo OMNI.	12
1.5.3 Alternativa N°3: Reemplazo de actuadores a eléctricos o neumáticos.	13
1.6 <i>Evaluación de las 3 alternativas de solución</i>	13
1.6.1 Alternativa seleccionada.....	16
1.7 <i>Objetivos del proyecto</i>	16
1.7.1 Objetivo general.....	17
1.7.2 Objetivos específicos	17
CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	18
2 DESARROLLO DE DISEÑO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN ELEGIDO	19
2.1 <i>Análisis de la solución seleccionada</i>	20
2.2 <i>Equipos por utilizar para el desarrollo del diseño</i>	21
2.2.1 Variador de frecuencia FR-D740-080-NA de Mitsubishi Electric.....	21
2.2.2 Computador de flujo OMNI	22
2.2.3 Microcontrolador Arduino Uno.....	23
2.2.4 HMI Siemens SIMATIC KTP700 Basic.....	25
2.2.5 Transmisor de temperatura	26
2.2.6 Transmisor de presión Rosemount 3051CD.....	27
2.2.7 Transmisor de flujo másico Coriolis Proline Promass 84F	28

2.2.8	Pasarela serial RS485 a ethernet modbus	29
2.2.9	Fuente de poder	30
2.2.10	Válvula ON-OFF motorizada.	30
2.2.11	Válvula de control Cla-Val CPC 138-L21	31
2.2.12	La bomba centrífuga de superficie Pedrollo CP 220B	32
2.3	<i>Configuración de computador de flujo OMNI</i>	33
2.3.1	Descripción de la figura y conexión de las Entradas y Salidas Digitales	34
2.3.2	Configuración de las entradas y salidas digitales	36
2.3.3	Salidas y entradas analógicas	38
2.3.4	Asignación de las variables del diseño	41
2.3.5	Estructura de registros Modbus del equipo	41
2.3.6	Puerto de tarjeta serial	42
2.4	<i>Ajustes y configuración del Variador de frecuencia</i>	43
2.5	<i>Procedimiento para visualizar datos en hmi</i>	46
2.5.1	Código de arduino r4 wifi	47
2.5.2	Simulación de lectura de datos desde el OMNI.....	50
2.6	<i>Procedimiento y secuencia de calibración.....</i>	51
2.7	<i>Cálculos de stpoint del proceso</i>	53
2.8	<i>Plano p&id del sistema actual</i>	55
2.9	<i>Plano P&ID del skid proyectado</i>	56
2.10	<i>Esquema de comunicación de los equipos</i>	57
2.11	<i>Comunicación y protocolo de cada equipo.....</i>	59
2.12	<i>Diagrama de flujo del proceso..... ¡Error! Marcador no definido.</i>	
CAPÍTULO 3:	<i>ANÁLISIS ECONÓMICO</i>	65
3	<i>EVALUACIÓN ECONÓMICA Y ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DEL PROYECTO</i>	66
3.1	<i>Carta Gantt.....</i>	66
3.2	<i>Costos de materiales</i>	67
3.3	<i>Costos de mano de obra</i>	68
3.4	<i>Costos totales</i>	69
3.5	<i>Incremento de eficiencia del proceso</i>	70
3.5.1	Número de instrumentos calibrados por día.....	71
3.5.2	Número de instrumentos calibrados al mes.....	71

3.5.3	Número de instrumentos calibrados al año	72
3.5.4	Total, de horas dedicadas al mes por el proceso de calibración	72
3.5.5	Total, de horas anual por proceso de calibración	73
3.5.6	Ahorro de horas-hombre.....	74
3.5.7	Reducción de costos en horas-hombre.....	74
3.5.8	Ingresos por calibración de medidores de flujos.....	76
3.6	<i>Flujo de caja</i>	77
3.6.1	Beneficio adicional.....	80
3.7	<i>Análisis de Sensibilidad</i>	81
CONCLUSIONES		84
BIBLIOGRAFÍA		85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Ubicación de GPI Lab.....	5
Figura 1-2 Skid de calibración actual de Gpi Lab.....	7
Figura 1-3 Diagrama de Ishikawa.	8
Figura 2-1 Variador de frecuencia, fr-d740-080-na de Mitsubishi electric.....	22
Figura 2-2 Computador de flujo, OMNI 6000.....	23
Figura 2-3 Microcontrolador Arduino R4 Wifi.....	24
Figura 2-4 Pantalla HMI Siemens SIMATIC KTP700 Basic.....	25
Figura 2-5 Transmisor de temperatura Rosemount™ 3144P.....	26
Figura 2-6 Transmisor de presión Rosemount 3051CD.....	27
Figura 2-7 Transmisor de flujo másico Coriolis Proline Promass 84F	28
Figura 2-8 Pasarela Serial RS485 a Ethernet Modbus.	29
Figura 2-9 Fuente de poder de 220(VAC) a 24(VDC).....	30
Figura 2-10 Válvula ON-OFF.	31
Figura 2-11 Válvula de control Cla-Val CPC 138.	32
Figura 2-12 Boma Pedrollo CP 220B.....	33
Figura 2-13 Entradas y salidas digitales del OMNI.	35
Figura 2-14 Configuración entradas y salidas digitales del OMNI.....	36
Figura 2-15 Salida digital.	37
Figura 2-16 Salidas analógicas del OMNI.	38
Figura 2-17 Entradas analógicas.....	39
Figura 2-18 Salidas analógicas.....	40
Figura 2-19 Estructura de registros modbus del OMNI.	42
Figura 2-20 Puerto de tarjeta serial del OMNI.	43
Figura 2-21 Parámetros frecuencia máxima y mínima.	44
Figura 2-22 Parámetros de tiempos de aceleración y frenado.....	44
Figura 2-23 Parámetro corriente nominal.....	45
Figura 2-24 Parámetros selección entrada analógica.	45

Figura 2-25 Parámetros de frecuencias señal analógica.....	46
Figura 2-26 Parámetros dirección de giro y modo de operación.....	46
Figura 2-27 Código para lectura de datos del OMNI y compartir hacia HMI.....	48
Figura 2-28 Código para lectura de datos del OMNI y compartir hacia HMI.....	49
Figura 2-29 Código para lectura de datos del OMNI y compartir hacia HMI.....	50
Figura 2-30 simulación de registro de datos desde el OMNI.	51
Figura 2-31 Secuencia de calibración de medidores de flujo.....	53
Figura 2-32 Plano actual del skid.....	56
Figura 2-33 Plano P&ID proyectado del skid.	57
Figura 2-34 Simbología plano P&ID.....	57
Figura 2-35 Esquema de comunicaciones de los equipos.....	58
Figura 2-36 Diagrama de flujo del proceso	64
Figura 3-1 Carta Gantt.	67
Figura 3-2 Costos de materiales.	68
Figura 3-3 Valor de horas hombre.	69
Figura 3-4 Costos totales del proyecto.....	69
Figura 3-5 Beneficios al implementar la automatización en el sistema.	73
Figura 3-6 Horas hombre utilizadas para el proceso.....	74
Figura 3-7 Ingresos por calibración de 1,2,3 instrumentos.....	76
Figura 3-8 Ingresos por calibración de 4,5,6 instrumentos.....	77
Figura 3-9 Flujo de caja anual considerando la calibración de 209 instrumento al año.....	78
Figura 3-10 Flujo de caja anual considerando la calibración de un 25% más de servicios anual.	79
Figura 3-11 Flujo de caja anual con un 10% menos de servicios anual.	80
Figura 3-12 Análisis de sensibilidad de 209 instrumento calibrados al año.	81
Figura 3-13 Análisis de sensibilidad para un aumento de calibraciones del 25% anual.	82
Figura 3-14 Análisis de sensibilidad para una disminución de calibraciones del 10% anual.	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.Puntuación de criterios	13
Tabla 1-2.Grilla de evaluación de criterios.....	14
Tabla 1-3. Ventajas y desventajas de las alternativas.....	15
Tabla 2-1 Entradas analógicas.	41
Tabla 2-2. Salidas analógicas.	41
Tabla 2-3. Salidas digitales.	41
Tabla 2-4 Procedimiento y secuencia de calibración.	51
Tabla 2-5. Comunicación de los Transmisores.	59
Tabla 2-6.Comunicación de OMNI con Arduino uno R4 Wifi.....	60
Tabla 2-7.Comunicación de Arduino con HMI	60
Tabla 2-8.Comunicación de OMNI con VDF	61
Tabla 2-9.Comunicación de OMNI con Válvulas ON-OFF.....	61
Tabla 2-10 Comunicación de OMNI con válvula de control	62

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS:

GPI LAB	: Laboratorio perteneciente al grupo GPI.
ISO/IEC 17025	: Norma de laboratorios.
API	: American petroleum institute.
INN	: Instituto nacional de normalización.
OMNI	: Computador de flujo.
HMI	: interfaz hombre-máquina.
SCADA	: Supervisory control and data acquisition.
PLC	: Programmable logic controller.
PID	: Proportional-integral-derivative controller.
PT	: Transmisor de presión
TT	: Transmisor de temperatura
FT	: Transmisor de flujo.
AI	: Entrada analógica.
AO	: salida analógica.
DI	: Entrada digital.
DO	: Salida digital.
FV	: Válvula ON/OFF.

FCV	: válvula control de flujo.
VDF	: Variador de frecuencia.
RS-485	: Estándar de comunicación serial.
MODBUS RTU	: Protocolo de comunicación.

B. SIMBOLOGÍA:

4–20 mA	: Señal analógica estándar industrial.
bar	: Unidad de medida de presión
°C	: Unidad de medida de temperatura.
m³/h	: Unidad de medida de caudal.
mA	: Unidad de medida de corriente eléctrica.
Hz	: Unidad de frecuencia.
%	: Porcentaje.
≥	: Símbolo matemático que indica “mayor o igual que”.
≤	: Símbolo matemático que indica “menor o igual que”.
ON	: Estado de activación o energización de un equipo o señal.

OFF : Estado de desactivación o des energizado de un equipo o señal.

NA : Normalmente abierto, condición de reposo de un dispositivo.

NC : Normalmente cerrado, condición de reposo de un dispositivo.

RLY : Relé utilizado como elemento intermedio de maniobra y protección.

F : Fusible utilizado como elemento de protección eléctrica.

inH₂O : Pulgadas de columna de agua.

INTRODUCCIÓN

La calibración de medidores y reguladores de flujo constituye una actividad fundamental dentro del ámbito industrial, dado que garantiza la exactitud de las mediciones en procesos de transferencia de líquidos y gases. La ausencia de una calibración adecuada puede generar desviaciones significativas en las mediciones, ocasionando pérdidas económicas, incumplimientos normativos y alteraciones en los procesos productivos.

En el laboratorio GPI Lab, el sistema de calibración opera actualmente de forma manual, situación que limita la estabilidad del flujo, incrementa la probabilidad de error humano y dificulta la trazabilidad de los datos obtenidos. Estas limitaciones impiden el cumplimiento total de los requisitos establecidos por la norma ISO/IEC 17025, que regula la competencia técnica y la confiabilidad de los resultados emitidos por los laboratorios de calibración y ensayo.

El presente proyecto tiene como propósito el diseño de un sistema de control automático capaz de regular el flujo con precisión, estabilidad y repetibilidad. La propuesta contempla la integración de un computador de flujo OMNI, un variador de frecuencia (VDF), sensores industriales y una interfaz HMI, con el objetivo de automatizar el proceso de calibración, registrar digitalmente los datos y garantizar la trazabilidad completa de los ensayos.

La implementación del sistema permitirá optimizar los tiempos de operación, incrementar la eficiencia del proceso y mejorar la calidad técnica del servicio entregado por GPI Lab. De esta manera, el proyecto establece las bases para una modernización tecnológica alineada con los estándares internacionales y las exigencias del mercado actual.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1 INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la instrumentación industrial, la calibración de medidores de flujo es un proceso crítico para garantizar la precisión y confiabilidad en la medición de caudales, especialmente en aplicaciones donde se manejan líquidos como combustibles, agua u otros productos industriales. Este proceso debe ejecutarse bajo condiciones controladas que aseguren la estabilidad hidráulica, la trazabilidad de los datos y la repetibilidad de los resultados.

Los laboratorios dedicados a esta actividad operan bajo normativas internacionales, tales como la **ISO/IEC 17025**, que establece los requisitos técnicos y de gestión que deben cumplir para asegurar la validez de los resultados obtenidos. Entre estos requisitos se destacan el control preciso de las condiciones de operación, la documentación del proceso y la minimización del error humano.

En algunos casos, los sistemas de calibración utilizados aún operan de forma manual, lo que representa una serie de limitaciones técnicas y operativas. Estos sistemas requieren que el caudal sea regulado mediante el ajuste manual de válvulas, lo cual genera inestabilidad en el flujo, provoca turbulencias y puede afectar directamente la precisión de las mediciones.

Además, la falta de automatización impide el monitoreo continuo de variables críticas como el caudal, la presión o la temperatura, y dificulta la recopilación y almacenamiento sistemático de los datos de calibración. Esto compromete el cumplimiento de los estándares normativos, afecta la confiabilidad técnica del proceso y limita la eficiencia operativa del laboratorio.

Frente a este contexto, se vuelve fundamental plantear un diseño de mejora que contemple la incorporación de un sistema de control automático capaz de regular el flujo con mayor precisión, garantizar condiciones de operación estables y asegurar la trazabilidad digital de los resultados obtenidos. Este diseño busca sentar las bases técnicas y funcionales necesarias para una futura implementación, contribuyendo al cumplimiento normativo, optimizando los tiempos de calibración, reduciendo la intervención del operador y elevando el nivel de calidad del servicio prestado.

1.1 GPI LAB

GPI Lab es una empresa chilena especializada en la calibración industrial de instrumentación, con foco en medidores de flujo utilizados en la transferencia de productos líquidos como combustibles, productos químicos, agua y otros. Fue fundada el 4 de junio de 2018 como una división independiente del Grupo GPI, con el objetivo de cumplir los requisitos de acreditación bajo la norma ISO/IEC 17025, la cual exige operar exclusivamente como laboratorio sin realizar otros servicios industriales.

La empresa tiene más de 20 años de experiencia acumulada en procesos de transferencia con custodia (custody transfer) y cuenta con sistemas de medición operativos en diversas instalaciones en Chile, lo que le otorga reconocimiento en el sector energético e industrial.

GPI Lab ofrece servicios de calibración y ajuste tanto en laboratorio como en terreno. Para las calibraciones en laboratorio, retiran los equipos desde las instalaciones del cliente y los trasladan a su taller especializado, donde cuentan con equipos patrones certificados que aseguran trazabilidad y precisión. En el caso de las calibraciones en terreno, estas se realizan bajo condiciones reales de operación, siguiendo criterios establecidos por la normativa API MPMS, lo que permite una evaluación más precisa del comportamiento de los medidores en su entorno habitual de trabajo.

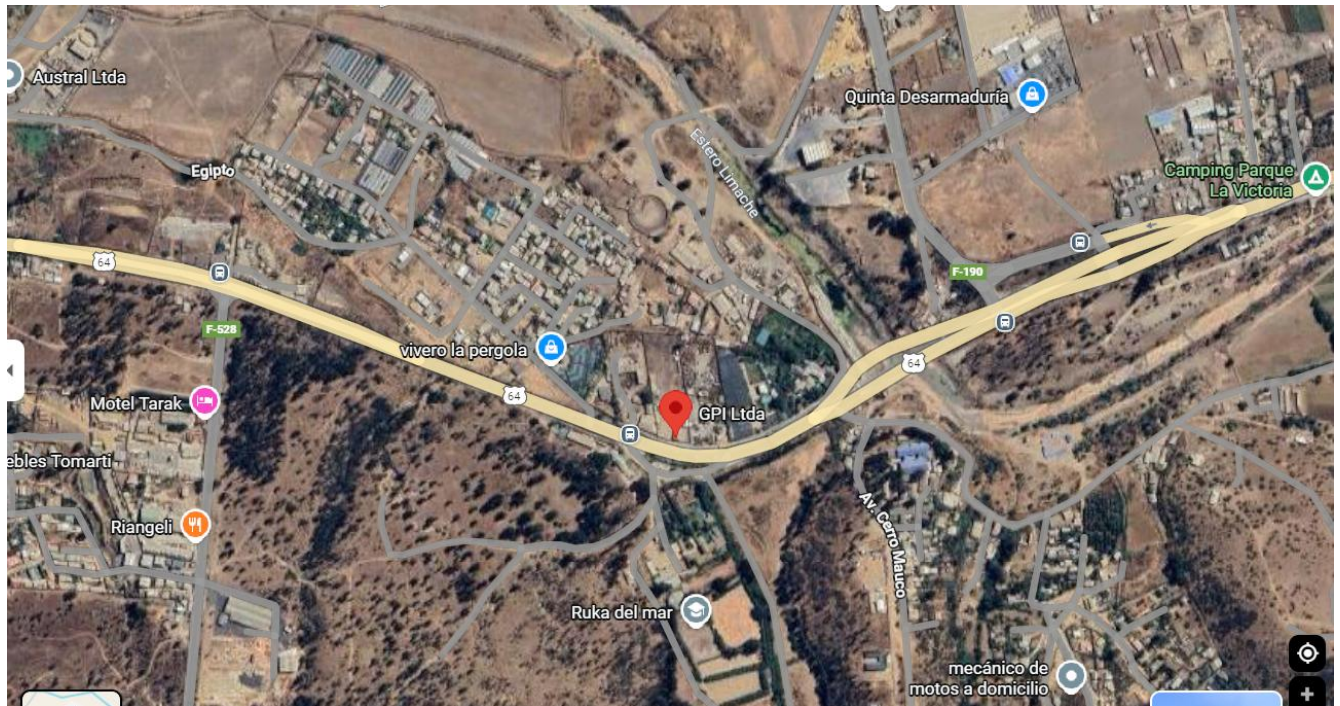
Además, la empresa ofrece el arriendo de medidores de flujo de instalación rápida, especialmente útiles para mediciones temporales o en situaciones donde no se dispone de instrumentación fija. También realiza auditorías de medición, en las cuales se inspeccionan y diagnostican los sistemas existentes para proponer mejoras que optimicen el rendimiento y la confiabilidad de los equipos.

Entre los equipos que calibran se incluyen medidores de tipo Coriolis, desplazamiento positivo, turbina, placa orificio, ultrasónicos, entre otros. Todos sus procesos están basados en normativas internacionales como ISO/IEC 17025 para calibraciones volumétricas y másicas, y API MPMS (Capítulos IV y V) para medición de hidrocarburos líquidos y transferencia con custodia.

Una de las principales características que distingue a GPI Lab es que realiza calibraciones sin importar la marca o modelo del medidor, brindando soluciones compatibles con una amplia gama de equipos.

GPI Lab mantiene su oficina comercial en 5 Norte 1163, Viña del Mar, y su taller/laboratorio se ubica en Ruta 64Ch, Parcela 13, Villa Independencia, Concón.

La ubicación del taller de GPI Lab se ve en la figura 1-1 la cual es Ruta 60 Ch, Parcela 13, km 15.580, Villa Independencia. - Casilla #7182, Concón, Correos de Chile, 2510000 Concón, Valparaíso



Fuente: Ubicación Google Maps

Figura 1-1 Ubicación de GPI Lab.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, el sistema de calibración de medidores de flujo en el laboratorio GPI Lab opera de forma manual, lo que limita su precisión, eficiencia y capacidad de operación. Para cambiar el

caudal, se ajustan válvulas manualmente, lo que genera inestabilidad en el flujo y errores en las mediciones. Además, no existe un sistema automático de control ni de registro de datos, lo que dificulta cumplir con los requisitos de trazabilidad, repetibilidad y calidad exigidos por la norma ISO/IEC 17025. Esta situación afecta directamente la confiabilidad del proceso de calibración.

1.2.1 Definición del problema:

Actualmente, el sistema de calibración de medidores de flujo en el laboratorio GPI Lab opera de forma manual, lo que limita la precisión, eficiencia y trazabilidad del proceso. Para ajustar el caudal, se utilizan válvulas manuales, lo cual puede tomar entre 10 a 15 minutos por corrida solo en alcanzar el flujo deseado. Esta operación no solo es lenta, sino que también introduce variaciones entre corridas y dificulta mantener un flujo estable.

Cada punto de calibración requiere tres mediciones y se calibran cuatro puntos de flujo distintos, lo que implica un total de 12 mediciones por calibración completa. Si se considera también el tiempo de medición (de 5 a 15 minutos por corrida), el proceso total puede durar entre 3 a 6 horas, dependiendo de las condiciones de operación.

Además, el sistema carece de automatización en el control de flujo y registro de datos, lo que impide cumplir adecuadamente con los requerimientos de trazabilidad, repetibilidad y control de calidad establecidos por la norma ISO/IEC 17025. Esta situación afecta directamente la confiabilidad y eficiencia del proceso de calibración, así como su capacidad de respuesta ante mayores demandas operativas.



Fuente: Foto tomada en dependencia de la empresa.

Figura 1-2 Skid de calibración actual de Gpi Lab.

En la Figura 1-2 se observa el funcionamiento actual del sistema de calibración, el cual se realiza de forma manual. El operador define la apertura de las válvulas hasta alcanzar el caudal deseado, proceso que puede tomar entre 10 y 15 minutos, tiempo durante el cual se busca estabilizar el

flujo dentro del sistema. Una vez alcanzado un punto de flujo estable, se procede a realizar tres mediciones consecutivas para dicho punto.

Este procedimiento se repite para un total de cuatro puntos de flujo distintos, lo que implica la ejecución de doce mediciones por cada proceso de calibración. Cada medición tiene una duración aproximada de entre 5 y 15 minutos, dependiendo de las condiciones de operación y la estabilidad del sistema. Finalmente, al completar las doce mediciones, se da por finalizado el proceso de calibración del instrumento.

1.2.2 Diagrama de Ishikawa



Fuente: Elaboración propia en canvas

Figura 1-3 Diagrama de Ishikawa.

1.2.3 Importancia de resolverlo

Resolver este problema es fundamental para mejorar la precisión, trazabilidad y eficiencia del proceso de calibración de medidores de flujo en GPI Lab.

El desarrollo de un sistema de control automático y registro digital permitirá:

- Asegurar la estabilidad hidráulica y la repetibilidad de las mediciones.
- Cumplir plenamente con los requisitos técnicos de la norma ISO/IEC 17025.
- Incrementar la confiabilidad y competitividad del laboratorio frente al mercado nacional e internacional.
- Optimizar el tiempo de calibración y reducir la dependencia del operador humano.
- Garantizar una mayor trazabilidad y respaldo técnico en cada proceso realizado.

En síntesis, resolver este problema permitirá elevar la calidad del servicio, fortalecer la reputación de GPI Lab y consolidar su posición como referente nacional en calibración industrial.

1.2.4 Involucrados

Los principales involucrados y afectados por el problema del sistema de calibración manual en GPI Lab son los siguientes:

- GPI Lab (la empresa)
Es el actor principal afectado. La falta de automatización en el proceso de calibración limita su capacidad operativa, reduce la eficiencia de los servicios y puede afectar la confiabilidad técnica de los resultados. Además, el incumplimiento de los estándares de calidad puede impactar negativamente la acreditación del laboratorio y su reputación en el mercado.
- Operadores y técnicos del laboratorio
Son directamente afectados, ya que deben realizar ajustes manuales que requieren alta precisión y generan una carga de trabajo adicional. La falta de control automático aumenta el riesgo de error humano y dificulta la repetibilidad de los ensayos, afectando su desempeño y seguridad en el trabajo.
- Clientes y empresas usuarias de los servicios

Los clientes que confían en GPI Lab para la calibración de sus instrumentos pueden verse afectados por posibles desviaciones en las mediciones, lo que puede repercutir en la precisión de sus propios procesos industriales y en la toma de decisiones basadas en datos inexactos.

- Organismos acreditadores y entidades normativas

Instituciones como el Instituto Nacional de Normalización (INN) y otros organismos internacionales que supervisan el cumplimiento de la norma ISO/IEC 17025 también son parte interesada, ya que la falta de trazabilidad y control automático puede comprometer el cumplimiento normativo exigido para mantener la acreditación del laboratorio.

- Dirección y administración de GPI Lab

La gerencia se ve afectada por la disminución de la productividad, los posibles costos derivados de retrabajos y la pérdida de competitividad frente a otros laboratorios que ya cuentan con sistemas automatizados de calibración.

- Proveedores tecnológicos

Los proveedores de instrumentación, software y sistemas de control también están involucrados indirectamente, ya que la modernización del sistema representa una oportunidad de colaboración para mejorar la infraestructura tecnológica del laboratorio.

1.3 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Para resolver las limitaciones del sistema actual de calibración manual, se propone diseñar un sistema de control automático de caudal que permita regular el flujo de manera precisa, estable y reproducible.

La solución busca automatizar el proceso de calibración de medidores de flujo, integrando sensores, actuadores y un sistema de registro digital de datos que garantice la trazabilidad, la estabilidad hidráulica y el cumplimiento de la norma ISO/IEC 17025.

Esta automatización permitirá optimizar los tiempos de operación, reducir el error humano y asegurar una mayor confiabilidad en los resultados emitidos por el laboratorio.

1.4 REQUERIMIENTOS

Se mencionan a continuación los requerimientos necesarios para llevarlo a cabo de manera adecuada.

Requerimientos Funcionales:

- Controlar automáticamente el caudal de flujo mediante válvulas motorizadas o actuadores eléctricos/neumáticos.
- Implementar un sistema de monitoreo en tiempo real de las variables hidráulicas (caudal, presión y temperatura).
- Registrar automáticamente los datos de calibración en una base centralizada con respaldo digital.
- Visualizar, control y almacenamiento de los parámetros del sistema mediante una interfaz HMI o software SCADA.
- Mantener la estabilidad hidráulica durante el proceso de calibración.
- Integrar alarmas y rutinas de seguridad ante fallas o condiciones fuera del rango operativo.

Requerimientos Técnicos:

- Incorporar sensores de caudal y presión con salida analógica o digital (4–20 mA, Modbus, etc.).
- Desarrollar un algoritmo de control (PID u otro apropiado) que regule la apertura de válvulas para mantener el caudal deseado.

- Diseñar una interfaz de usuario que permita configurar los puntos de calibración y visualizar los resultados.
- Garantizar la compatibilidad con los instrumentos existentes en el skid de calibración.
- Cumplir con los estándares de seguridad eléctrica e industrial aplicables al laboratorio.

1.5 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Existen tres posibles soluciones para automatizar el sistema de calibración de medidores de flujo en GPI Lab. Cada una será evaluada bajo los criterios de innovación, beneficio y factibilidad, con el objetivo de seleccionar la alternativa que represente el mayor avance tecnológico, aporte operativo y viabilidad de implementación. Se espera que esta evaluación permita identificar una solución integral que responda a las necesidades actuales del laboratorio y proyecte su desarrollo a futuro.

1.5.1 Alternativa N°1: Incorporar microcontrolador para registro de datos.

Esta alternativa propone mejorar las limitaciones actuales asociadas al registro de datos en cada corrida de calibración incluyendo variables como presión, temperatura y caudal. Mediante la incorporación de un sistema de adquisición y almacenamiento más eficiente. Sin embargo, mantiene el ajuste manual del caudal y la presión en el skid de calibración, sin incorporar automatización en el control del flujo. En consecuencia, si bien optimiza la trazabilidad documental, no resuelve las restricciones operativas derivadas de la manipulación manual de los parámetros críticos del proceso

1.5.2 Alternativa N°2: Diseño de control automático con computador de flujo OMNI.

Se propone diseñar un sistema automatizado para el proceso de calibración de medidores de flujo que integre un computador de flujo OMNI como controlador central, un VDF para regular la

velocidad de la bomba (y por tanto el caudal), sensores industriales para medir variables críticas y una interfaz de usuario para control, visualización y registro de datos en tiempo real (HMI).

Este sistema permitirá mantener condiciones hidráulicas estables, reducir errores humanos y garantizar trazabilidad completa, cumpliendo plenamente con los requisitos de ISO/IEC 17025.

1.5.3 Alternativa N°3: Remplazo de actuadores a eléctricos o neumáticos.

Esta alternativa consiste en mantener el sistema de control manual o semi-manual pero sustituir las válvulas manuales por actuadores eléctricos o neumáticos automáticos que permitan el ajuste remoto y más preciso del flujo sin necesidad de intervención directa constante del operador. La operación puede ser controlada desde un panel básico o un sistema simple de control (sin necesidad de computador de flujo ni VDF).

1.6 EVALUACIÓN DE LAS 3 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

A partir de las soluciones planteadas anteriormente, se realizará un análisis comparativo utilizando criterios específicos que permitirán evaluar cuál de las alternativas es la más viable de implementar. Cada criterio será calificado como se muestra en la tabla 1-1 de evaluación. La suma de los puntajes obtenidos en cada criterio determinará el resultado final de cada alternativa. Aquella que obtenga la mayor puntuación será considerada como la opción más adecuada para llevar a cabo en la práctica.

Tabla 1-1. Puntuación de criterios

Tabla de Puntuación de Alternativas de Solución		
Deficiente	Aceptable	Óptimo
1	2	3

Fuente: Elaboración propia en base a escala de evaluación.

Los criterios que se considerarán para la selección de la mejor alternativa de solución serán cinco, cada uno con un peso específico en función de su importancia en el contexto del proyecto.

- Innovación, el cual evalúa el grado de incorporación de nuevas tecnologías o metodologías que agreguen valor al sistema actual.
- Beneficio, que considera el impacto positivo que genera la alternativa en términos de eficiencia operativa, precisión, trazabilidad y cumplimiento normativo.
- Factibilidad técnica, la cual analiza la viabilidad de implementación considerando los recursos disponibles, la compatibilidad del sistema y la complejidad técnica del desarrollo.
- Relación inversión/ganancia, donde se pondera el equilibrio entre el costo de implementación y los beneficios técnicos y económicos que se obtendrán a corto y largo plazo.
- Tiempo de implementación, valorando positivamente aquellas soluciones que puedan ejecutarse en menor tiempo sin afectar el funcionamiento del laboratorio.

En la tabla 1-2 se presentan los resultados ponderados de cada alternativa en base a estos criterios. La alternativa con el mayor puntaje total será seleccionada como la base del diseño que se desarrollará en este proyecto, con el fin de mejorar el sistema de calibración actual de GPI Lab.

Tabla 1-2.Grilla de evaluación de criterios

Característica/Alternativa	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Innovación (20%)	1	3	2
Beneficio (30%)	2	3	2
Factibilidad (15%)	3	2	3
Inversión/Ganancia (25%)	2	3	2
Tiempo implementación (10%)	3	2	3
Puntuación final	1,6	2,75	2,25

Fuente: Elaboración propia en base a escala de evaluación.

Tabla 1-3. Ventajas y desventajas de las alternativas.

ALTERNATIVAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Nº1: Mejorar el sistema con un microcontrolador para registro de datos.	Optimiza trazabilidad y registro de variables. Mejora documentación sin modificar mucho el sistema.	Mantiene operación manual. No reduce errores humanos. No garantiza estabilidad hidráulica. No cumple completamente ISO/IEC 17025.
Nº2: Diseño de control automático con computador de flujo OMNI.	- Automatización completa del proceso. - Condiciones hidráulicas estables y precisas. - Reducción de errores humanos. - Registro y trazabilidad en tiempo real. - Cumple ISO/IEC 17025. - Mayor eficiencia y seguridad.	- Mayor complejidad y costos. - Requiere configuración y programación de todos los dispositivos. - Dependencia de sistemas electrónicos.
Nº3: Reemplazo de actuadores manual por eléctricos o neumáticos.	- Ajuste remoto de válvulas. - Mayor precisión que operación manual. - Reducción de fatiga y errores humanos.	- No automatiza completamente el proceso. - Dependencia del operador para definir parámetros. - Registro limitado. - No garantiza estabilidad hidráulica total.

Fuente: Creación propia en Word.

1.6.1 Alternativa seleccionada

Según la puntuación final obtenida en la evaluación de criterios, la alternativa número dos, basada en la automatización integral del control de caudal mediante el uso de un computador de flujo OMNI 6000, un variador de frecuencia y una interfaz HMI, se justifica como la opción óptima debido a su capacidad para asegurar precisión, repetibilidad y trazabilidad en el proceso de calibración del laboratorio. Esta solución permite el control dinámico y estable del caudal mediante un lazo cerrado gobernado por el OMNI, reduciendo la variabilidad humana y mejorando la exactitud en la generación de puntos de ensayo. La incorporación de un VFD permite ajustar la velocidad de la bomba con alta resolución, optimizando el rendimiento energético y adaptándose a diversos rangos de operación. Asimismo, la adquisición automática, registro digital y visualización en tiempo real de variables críticas —como caudal, presión y temperatura— incrementan significativamente la confiabilidad operativa y facilitan el cumplimiento de los requisitos de trazabilidad establecidos por ISO/IEC 17025. Desde el punto de vista técnico y económico, esta alternativa presenta la mejor relación entre inversión y beneficio, ya que utiliza dispositivos industriales estándar. Esta alternativa facilita su implementación sobre la infraestructura actual, permite agregar o reemplazar componentes sin rediseñar el sistema completo y reduce significativamente los tiempos de instalación y mantenimiento, constituyéndose como la opción más estable y adaptable a las necesidades de GPI Lab.

1.7 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Esta sección define los objetivos que guían el desarrollo del proyecto de automatización del sistema de calibración de medidores de flujo en GPI Lab, con el fin de mejorar su precisión, trazabilidad y cumplimiento normativo.

1.7.1 Objetivo general

- Diseñar un sistema de control automático para calibración de medidores de flujo.

1.7.2 Objetivos específicos

- Describir funcionamiento actual del skid de calibración y determinar sus limitaciones técnicas en el control manual.
- Elaborar proyecto de control automático para calibración de medidores de flujo.
- Realizar evaluación económica del proyecto.

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

2 DESARROLLO DE DISEÑO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN ELEGIDO

Se requiere automatizar el proceso de calibración de medidores de flujo, de modo que el sistema sea capaz de controlar de manera autónoma las variables de operación, principalmente el caudal y la presión, asegurando condiciones estables durante la adquisición de datos. El funcionamiento del sistema se basa en la definición de distintos puntos de operación, los cuales son alcanzados mediante la regulación de la frecuencia de la bomba, permitiendo establecer el caudal requerido. Una vez que el sistema alcanza y estabiliza el punto de flujo deseado, se ejecuta una secuencia de medición compuesta por tres registros consecutivos, separados por intervalos de tiempo definidos, con el fin de garantizar la repetibilidad y confiabilidad de los datos. Posteriormente, el sistema ajusta automáticamente un nuevo punto de operación y repite el procedimiento, completando un total de cuatro niveles de flujo, lo que equivale a doce mediciones por cada proceso de calibración.

Para la implementación de esta solución, se requiere un sistema de control automático cuyo elemento central es un computador de flujo, encargado de supervisar y regular el comportamiento del proceso. Este controlador gestiona la operación de los elementos de control, tales como una válvula on-off motorizada, una válvula de control y un variador de frecuencia, permitiendo mantener las condiciones de operación dentro de los rangos establecidos. Asimismo, el sistema incorpora instrumentación industrial compuesta por transmisores de caudal, presión y temperatura, los cuales proporcionan información en tiempo real para la toma de decisiones del controlador. La información adquirida es transmitida mediante protocolo de comunicación RS485 hacia un microcontrolador, el cual actúa como interfaz para la visualización de datos en una HMI, facilitando el monitoreo y supervisión del proceso por parte del operador. En conjunto, la solución considera la integración de un computador de flujo, un variador de frecuencia, válvulas de control, instrumentación de medición, un sistema de visualización y una infraestructura de comunicación adecuada, permitiendo la automatización eficiente y confiable del proceso de calibración.

2.1 ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN SELECCIONADA

La solución planteada establece una arquitectura de control que integra de manera coherente todos los elementos críticos del proceso: medición, regulación, supervisión y actuación. En primer lugar, los transmisores de presión, temperatura y caudal entregan señales analógicas normalizadas (4–20 mA) hacia el computador de flujo OMNI, el cual actúa como núcleo del sistema, centralizando el procesamiento y disponiendo de una base de datos interna capaz de registrar en tiempo real los valores de operación. A partir de estas variables, el OMNI determina las acciones de control necesarias para mantener condiciones estables dentro del proceso. Para la regulación del caudal, el OMNI gobierna el variador de frecuencia Mitsubishi D740 mediante una señal analógica proporcional que define la velocidad de la bomba, complementada por salidas digitales para comandos de marcha o paro. De manera paralela, las tres válvulas ON/OFF se gestionan mediante salidas discretas que energizan relés de mando, mientras que la válvula de control modulante se acciona mediante una señal de 4–20 mA que permite un ajuste proporcional de su apertura. Esta coordinación entre actuadores mecánicos y eléctricos proporciona un control fino y flexible del flujo, permitiendo compensar variaciones de demanda o condiciones operativas.

Como complemento a la capa de control, la solución incorpora un microcontrolador Arduino con interfaz RS-485. Este dispositivo opera como maestro Modbus RTU, consultando periódicamente al OMNI para obtener tanto las variables medidas como las consignas de control, incluida la frecuencia enviada al VFD. El Arduino, actuando como pasarela de comunicaciones, transforma dicha información y la retransmite por Ethernet hacia una HMI externa, donde el operador puede visualizar en tiempo real el estado de sensores, válvulas, actuadores y condiciones del proceso. Este enfoque permite mantener al OMNI como la fuente primaria de control y decisión, mientras que el Arduino y la HMI cumplen funciones de supervisión, monitoreo remoto y registro histórico sin interferir en la lógica operativa principal. En conjunto, la arquitectura seleccionada demuestra ser robusta, escalable y coherente con los estándares de instrumentación industrial, permitiendo una integración eficiente entre medición, control y visualización, y asegurando a su vez trazabilidad operativa, seguridad y facilidad de mantenimiento.

2.2 EQUIPOS POR UTILIZAR PARA EL DESARROLLO DEL DISEÑO

Se describen los dispositivos seleccionados para el desarrollo del sistema, con el objetivo de fundamentar su utilización en función de sus características técnicas, niveles de precisión y compatibilidad entre estándares industriales. La selección de estos equipos responde a la necesidad de asegurar una medición confiable de las variables críticas del proceso, una regulación estable de las condiciones de operación y una adecuada disponibilidad de información en tiempo real. Asimismo, se consideran criterios asociados a la robustez operacional, de modo de garantizar la coherencia técnica del sistema y la trazabilidad de los datos generados durante la operación.

2.2.1 Variador de frecuencia FR-D740-080-NA de Mitsubishi Electric

En la figura 2-1 se observa el variador de frecuencia seleccionado para el accionamiento del conjunto motobomba corresponde al modelo FR-D740-080-NA de Mitsubishi Electric, perteneciente a la serie D700, diseñada específicamente para el control de motores trifásicos en aplicaciones industriales de automatización. Este equipo, con una capacidad aplicable de 3,7 kW, proporciona una corriente nominal de 8 A y es capaz de soportar sobrecargas del 150 % durante 60 s y del 200 % durante 0,5 s, lo que garantiza un margen operativo adecuado frente a las demandas dinámicas de la bomba de 4 HP utilizada en el skid de calibración. El variador opera sobre una red trifásica de 380–480 V, implementando modulación PWM y un algoritmo de control vectorial simplificado que permite mantener un par estable a bajas velocidades, asegurar un arranque progresivo del motor y reducir esfuerzos mecánicos en la hidráulica del sistema.

El FR-D740-080-NA integra una entrada analógica 4–20 mA, por la cual recibe desde el computador de flujo OMNI la consigna de frecuencia asociada al lazo de control de caudal, permitiendo una regulación precisa y estable del flujo durante las distintas etapas del procedimiento de calibración. Complementariamente, dispone de entradas digitales programables para funciones de marcha, paro, habilitación externa y selección de modos, junto con un conjunto completo de protecciones internas contra sobrecorriente, sobretensión, pérdida de fase y sobrettemperatura, asegurando una operación segura del motor y del circuito hidráulico.

El equipo incorpora un panel frontal que facilita la parametrización local y permite comunicación RS-485 (Modbus RTU) para la supervisión de variables críticas como corriente, frecuencia de salida, alarmas y estados operativos. Estas características hacen del FR-D740-080-NA un actuador robusto, confiable y plenamente compatible con los requerimientos técnicos del skid, proporcionando la capacidad de control necesaria para una regulación dinámica, precisa y segura del caudal durante el proceso de calibración



Fuente: <https://rhona.cl/producto/968/variador-de-frecuencia-5hp-37kw.html>

Figura 2-1 Variador de frecuencia, fr-d740-080-na de Mitsubishi electric.

2.2.2 Computador de flujo OMNI

En la figura 2-2 se observa el OMNI 6000, es un computador de flujo de arquitectura industrial avanzada que, para los efectos de este proyecto, se establece como la unidad central de medición, procesamiento y control del sistema hidráulico. El equipo dispone de entradas analógicas normalizadas en 4–20 mA, compatibles con los transmisores de presión, temperatura y caudal instalados en la línea, permitiendo la adquisición precisa de variables de proceso mediante algoritmos internos de acondicionamiento, linealización y filtrado digital. Adicionalmente, el OMNI cuenta con salidas analógicas de 4–20 mA destinadas al envío de consignas de control hacia

el variador de frecuencia Mitsubishi D740 y hacia la válvula modulante, habilitando la regulación dinámica tanto de la velocidad de la bomba. En complemento, integra salidas digitales discretas orientadas al accionamiento de válvulas ON/OFF mediante relés intermedios, garantizando aislamiento eléctrico y confiabilidad en la operación. El equipo se alimenta mediante tensión alterna (AC), normalmente en el rango de 110–230 VAC, lo que permite su integración directa en sistemas de control industrial sin necesidad de fuentes externas de corriente continua. Toda la información adquirida y calculada se gestiona dentro de una base de datos interna estructurada, accesible externamente mediante el protocolo Modbus RTU sobre RS-485, a través del cual un microcontrolador Arduino opera como maestro de comunicación para transmitir los datos hacia la HMI. Estas características consolidan al OMNI como un controlador robusto y conforme a los estándares de instrumentación industrial, plenamente adecuado para la integración de sensores, actuadores y sistemas de supervisión dentro de la solución propuesta.



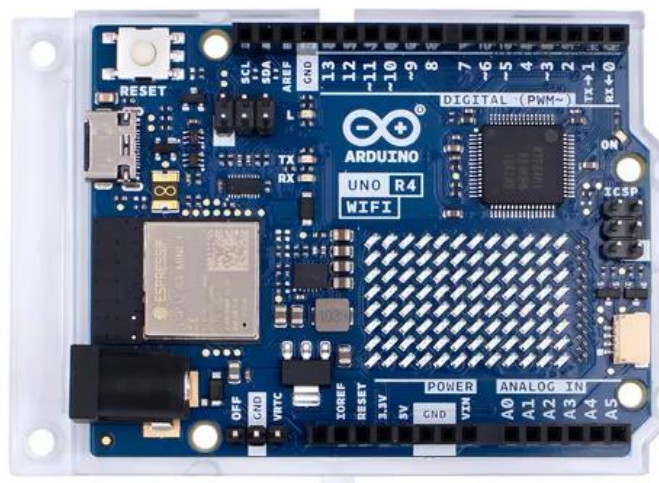
Fuente: <https://escosud.com/productos.php?prodId=23>

Figura 2-2 Computador de flujo, OMNI 6000.

2.2.3 Microcontrolador Arduino Uno

En la figura 2-3 se observa el Arduino UNO R4 WiFi es una plataforma microcontrolada de última generación basada en el microcontrolador Renesas RA4M1 (arquitectura ARM Cortex-M4 a 48 MHz), la cual integra mayores capacidades de procesamiento, memoria y estabilidad respecto a

versiones previas de la línea UNO. Este modelo incorpora conectividad inalámbrica Wifi de 2,4 GHz, habilitada mediante un módulo ESP32-S3 embebido, permitiendo la transmisión de datos a través de redes TCP/IP sin necesidad de hardware adicional. Dentro de la solución propuesta, el Arduino UNO R4 Wifi actúa como un módulo intermediario entre el computador de flujo OMNI y la interfaz HMI, cumpliendo exclusivamente funciones de adquisición, estructuración y transferencia de datos, sin intervenir en la lógica de control del proceso. Para la comunicación con el OMNI, el Arduino se conecta a un transceptor RS-485 externo y opera como maestro Modbus RTU, consultando periódicamente los registros del controlador para obtener variables como caudal, presión, temperatura, estado de válvulas y señal de salida hacia el variador de frecuencia. Posteriormente, organiza esta información y la envía hacia la HMI a través de su interfaz WiFi utilizando protocolos basados en Ethernet, tales como Modbus TCP o tramas TCP/IP estructuradas, permitiendo que la interfaz gráfica muestre los datos en tiempo real sin interactuar directamente con los instrumentos de campo. La robustez del microcontrolador RA4M1, sumada a la conectividad integrada y a la amplia compatibilidad con librerías industriales, convierte al Arduino UNO R4 WiFi en un dispositivo idóneo para desempeñar el rol de pasarela de comunicaciones dentro de la arquitectura propuesta, garantizando una separación clara entre el control ejecutado por el OMNI y la supervisión realizada por la HMI.

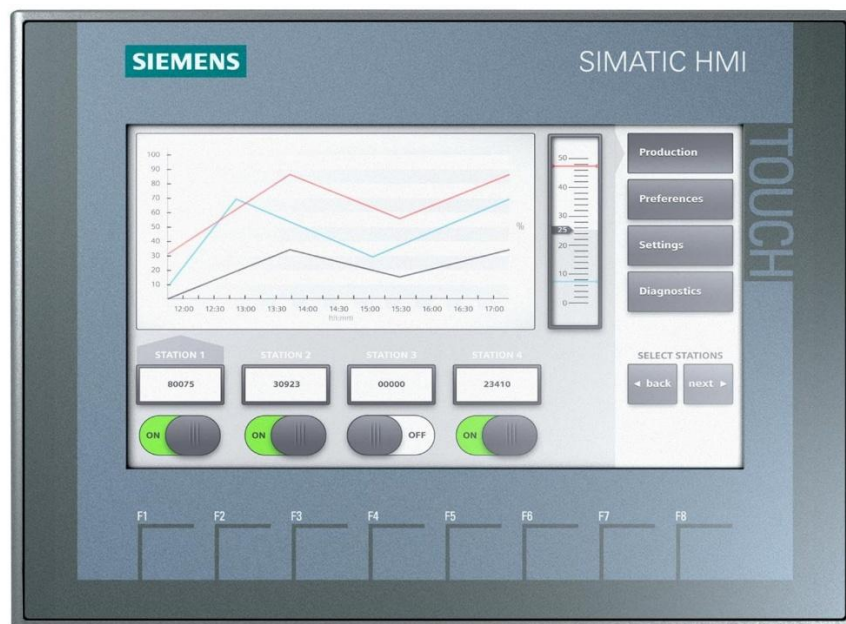


Fuente: <https://www.mercadolibre.cl/arduino-uno-r4-wifi/p/MLC32626335>

Figura 2-3 Microcontrolador Arduino R4 Wifi.

2.2.4 HMI Siemens SIMATIC KTP700 Basic

En la figura 2-4 se observa la pantalla Siemens SIMATIC KTP700 Basic es una interfaz HMI industrial equipada con una pantalla TFT de 7 pulgadas y conectividad EtherNET/PROFINET, diseñada para la supervisión local de procesos en entornos de automatización. Este panel permite la visualización en tiempo real de variables como caudal, presión y temperatura, mediante la comunicación con el Arduino UNO R4 WiFi a través de protocolos basados en TCP/IP. Su arquitectura soporta la configuración mediante Siemens WinCC, permitiendo definir tags, alarmas y pantallas de operación adaptadas al sistema. Además, su grado de protección frontal IP65 garantiza resistencia mecánica y ambiental, lo que lo hace adecuado para instalación en tableros de control. Gracias a estas características, el KTP700 Basic cumple el rol de interfaz de supervisión del sistema, mostrando al operador los datos procesados por el OMNI y retransmitidos por el Arduino.



Fuente: <https://escosud.com/productos.php?prodId=23>

Figura 2-4 Pantalla HMI Siemens SIMATIC KTP700 Basic.

2.2.5 Transmisor de temperatura

En la figura 2-5 se observa el transmisor elegido para el diseño de este proyecto fue el Rosemount™ 3144P, el cual se alimenta mediante una tensión de 24 VDC a través de un lazo de corriente. Su rango de medición depende del sensor conectado (RTD o termocupla), pudiendo abarcar temperaturas típicamente entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el caso de sensores RTD estándar. Su señal es enviada por medio de una corriente de 4–20 mA, correspondiente a la magnitud medida. El trabajo de este dispositivo es excitar el sensor de temperatura, recibir su variación resistiva o termoeléctrica, procesarla y convertirla en una señal estandarizada en el rango de 4 a 20 mA dependiendo del valor censado por el sensor. De esta manera, si el equipo detecta una temperatura mínima configurada (por ejemplo $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) transmitirá 4 mA, mientras que si registra la temperatura máxima del rango configurado (por ejemplo $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) enviará 20 mA. Este transmisor fue seleccionado debido a la compatibilidad con las entradas analógicas de 4–20 mA del computador de flujo OMNI, facilitando la integración directa al sistema de control.

Transmisor de temperatura Rosemount™ 3144P

con tecnología Rosemount X-well™



Fuente: Manual del equipo.

Figura 2-5 Transmisor de temperatura Rosemount™ 3144P.

2.2.6 Transmisor de presión Rosemount 3051CD

En la figura 2-6 se observa el transmisor de presión seleccionado para este proyecto corresponde al Rosemount 3051CD, un instrumento diseñado para medir presión diferencial con alta precisión y estabilidad. Este equipo opera mediante una alimentación externa de 10,5 a 42,4 VDC, trabajando en un lazo estándar de 4–20 mA, donde 4 mA representan el valor mínimo configurado (LRV) y 20 mA el máximo del rango (URV). El 3051CD puede configurarse en distintos rangos de presión según la cápsula instalada, siendo los más comunes aquellos que permiten medir presiones bajas y medias, típicamente entre ± 25 inH₂O, ± 1000 inH₂O, lo hace adecuado para aplicaciones de medición de flujo, nivel por diferencial, y monitoreo de presión en sistemas hidráulicos y neumáticos. Su microprocesador interno convierte la presión diferencial aplicada a la celda en una señal eléctrica proporcional, realizando de forma automática la linealización, compensación de temperatura y diagnóstico del sensor antes de entregar la señal 4–20 mA al sistema de control. Este modelo fue seleccionado debido a su compatibilidad con las entradas analógicas del computador de flujo OMNI, su reconocida fiabilidad industrial y su capacidad de trabajar con rangos reducidos expresados en pulgadas de columna de agua (inH₂O), permitiendo una alta sensibilidad en la medición del proceso.

Transmisor de presión Rosemount 3051 con protocolo HART®



Fuente: Manual del equipo.

Figura 2-6 Transmisor de presión Rosemount 3051CD

2.2.7 Transmisor de flujo másico Coriolis Proline Promass 84F

En la figura 2-7 se observa el transmisor de flujo másico Coriolis Proline Promass 84F es un instrumento de alta exactitud diseñado para aplicaciones industriales críticas y transferencia de custodia, capaz de medir simultáneamente flujo másico, flujo volumétrico, densidad y temperatura del proceso. Su sensor está fabricado en materiales inoxidables resistentes a la corrosión, con opciones como 304L y 316L, y cuenta con un grado de protección IP67 que garantiza operación confiable en ambientes severos. Admite rangos amplios de temperatura del medio, desde -50 a $+200$ °C en su versión estándar y hasta $+350$ °C en la versión de alta temperatura, mientras que su transmisor puede operar en condiciones ambientales entre -20 y $+60$ °C, ampliables a -40 °C según configuración. El equipo incorpora una pantalla de cuatro líneas con operación táctil desde el exterior, permitiendo configuración local sin necesidad de herramientas adicionales. Dispone de múltiples salidas modulares, incluyendo 4–20 mA, pulsos, frecuencia, interruptores y relevadores; además de comunicación digital mediante HART o Modbus RS485, ofreciendo una integración versátil con sistemas SCADA y computadores de flujo. Su alimentación flexible (DC 16–62 V, AC 85–260 V o AC 20–55 V) amplía las posibilidades de instalación. Estas características posicionan al transmisor como un equipo robusto, preciso y confiable para medición fiscal y control avanzado de procesos.



Fuente: Manual del equipo.

Figura 2-7 Transmisor de flujo másico Coriolis Proline Promass 84F

2.2.8 Pasarela serial RS485 a ethernet modbus

En la figura 2-8 se observa la pasarela de comunicaciones seleccionada permite la conversión bidireccional entre interfaces seriales y Ethernet, facilitando la interconexión entre dispositivos que operan bajo los protocolos Modbus RTU y Modbus TCP/IP. Este equipo dispone de un puerto RS-485 y un puerto Ethernet, lo que habilita la integración de redes industriales cableadas con infraestructuras basadas en TCP/IP. Su diseño soporta un amplio rango de tensión de alimentación, comprendido entre 5 y 36 VDC, lo que le otorga flexibilidad para su incorporación en distintos entornos industriales. Adicionalmente, el puerto RS-485 incorpora protección antiestática capaz de soportar descargas de hasta 2 kV, aumentando la confiabilidad de la comunicación frente a perturbaciones eléctricas. La pasarela permite la transmisión transparente de datos entre los distintos medios físicos sin alterar la estructura de los mensajes, e incluye su propia fuente de alimentación, simplificando su integración dentro del sistema de control.



Fuente: <https://altronics.cl/convertidor-rs485-ethernet-modbus>

Figura 2-8 Pasarela Serial RS485 a Ethernet Modbus.

2.2.9 Fuente de poder

En la figura 2-9 se observa la fuente de alimentación de 220 VAC a 24 VDC es un dispositivo encargado de convertir la tensión de red de corriente alterna en una tensión continua estabilizada apta para la alimentación de los sistemas de control e instrumentación. Su función principal es suministrar una energía segura, constante y libre de variaciones para equipos de baja potencia, tales como módulos de comunicación, sensores, actuadores y sistemas electrónicos de control. Gracias a su regulación interna, esta fuente garantiza estabilidad eléctrica, reducción de ruido y protección frente a sobrecargas y cortocircuitos, asegurando el correcto funcionamiento de los dispositivos conectados al circuito de control.



Fuente: <https://dmu.cl/fuente-poder-mdr-60-24-meanwell?srltid=AfmBOoqW9eIN8RUL0M007QWGTaw65qu-uwAz88NvVCG2PoWROsxYaaL>

Figura 2-9 Fuente de poder de 220(VAC) a 24(VDC).

2.2.10 Válvula ON-OFF motorizada.

En la figura 2-10 se observa la válvula motorizada de 2 vías seleccionada opera bajo un principio ON/OFF (abierto o cerrado) y es accionada eléctricamente mediante un actuador integrado, lo que permite su operación remota y automática en sistemas de control. Está construida para controlar el flujo de fluidos en condiciones industriales —agua, vapor, aceites u otros medios

compatibles— mediante su cuerpo robusto con sello metálico y mecanismos de cierre diseñados para ofrecer estanqueidad cuando la válvula está cerrada. Su diseño mecánico admite distintos diámetros nominales (DN15 a DN100), con presión nominales típicas de PN16 a PN25 (o superiores según versión), lo que la hace apta para diversas condiciones de operación de presión y temperatura, conforme al medio de trabajo. El actuador eléctrico puede alimentarse a distintas tensiones (por ejemplo 24 VDC, 24 VAC o 220 VAC según versión) y está preparado para generar el par necesario para efectuar la maniobra de apertura/cierre de la válvula de manera confiable, incluso en condiciones dinámicas de operación. Esta válvula es adecuada para integrarse en un sistema automatizado de control de flujo gracias a su compatibilidad con señales digitales de comando (ON/OFF) desde un controlador, permitiendo así la gestión de rutas de flujo, el encendido/apagado de secciones del skid y la automatización del control.



Fuente: <https://unox.com.tr/es/valvula-de-control-de-encendido-y-apagado-motorizada-de-2-vias/>

Figura 2-10 Válvula ON-OFF.

2.2.11 Válvula de control Cla-Val CPC 138-L21

En la figura 2-11 se observa la válvula de control Cla-Val CPC 138-L21 es un dispositivo de posicionamiento hidráulico-electrónico diseñado para ofrecer una modulación precisa y estable del flujo en sistemas de agua potable, riego presurizado y aplicaciones industriales. Su funcionamiento se basa en un actuador motorizado de tipo brushless, de bajo consumo y alimentado generalmente a 24 VDC, el cual gobierna un piloto hidráulico interno que modula la

presión en la cámara de control de la válvula principal. Esta arquitectura híbrida eléctrica para la consigna e hidráulica para la fuerza de operación permite obtener una respuesta altamente fiable, suave y repetible, al tiempo que reduce el desgaste mecánico y los requerimientos energéticos. La consigna de posicionamiento se realiza mediante señal analógica estandarizada de 4–20 mA, lo que hace que la CPC 138-L21 sea completamente compatible con sistemas automatizados como PLC, RTU o plataformas SCADA, permitiendo la regulación remota de caudal, presión o nivel con gran estabilidad aun frente a variaciones bruscas de presión en la red. Su diseño incluye un mecanismo interno de compensación que evita golpes hidráulicos y asegura transiciones graduales en la apertura, contribuyendo a prolongar la vida útil de tuberías y equipos asociados. Además, su construcción robusta y su configuración modular permiten un mantenimiento simplificado y una larga durabilidad incluso en condiciones exigentes.



Fuente: <https://solcov.com/producto/valvula-de-posicionamiento-motorizada-4-20-ma/>

Figura 2-11 Válvula de control Cla-Val CPC 138.

2.2.12 La bomba centrífuga de superficie Pedrollo CP 220B

En la figura 2-12 se observa la bomba centrífuga de superficie Pedrollo CP 220B representa una opción robusta y adecuada para el sistema de circulación y control de caudal propuesto, debido a sus características de potencia (4 HP, alimentación trifásica a 380 V), su capacidad hidráulica y su construcción industrial. Está diseñada para bombear agua limpia sin partículas abrasivas, con una capacidad de manejo de caudales elevados (orden de varios cientos de litros por minuto) y

alturas manométricas compatibles con los requerimientos del skid. Su cuerpo de hierro fundido, eje en acero inoxidable y diseño de impulsor metálico le brindan resistencia al desgaste y durabilidad bajo operación continua. Además, su eficiencia energética y motor de alto rendimiento aseguran un funcionamiento estable y confiable incluso en condiciones exigentes, lo que permite integrarla con un variador de frecuencia para regulación dinámica del caudal. Por estas razones, la CP 220B se ajusta a los requerimientos hidráulicos y operativos del proyecto, garantizando desempeño, fiabilidad y compatibilidad con los demás componentes del sistema de control automatizado.



Fuente: <https://bombasproservices.cl/producto/bomba-pedrollo-cp-220b-4hp-380v/>

Figura 2-12 Boma Pedrollo CP 220B.

2.3 CONFIGURACIÓN DE COMPUTADOR DE FLUJO OMNI

La configuración del computador de flujo OMNI constituye una etapa fundamental para asegurar la correcta medición, registro y gestión de las variables operacionales del sistema. Este proceso permite parametrizar el equipo de acuerdo con las condiciones específicas de operación, tales como tipo de fluido, rangos de caudal, presión y temperatura, garantizando así la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos. A través de una adecuada configuración, es posible

optimizar el desempeño del sistema de medición y asegurar su integración con los sistemas de control y supervisión.

2.3.1 Descripción de la figura y conexión de las Entradas y Salidas Digitales

La figura 2-13 muestra la disposición física de los módulos de entradas y salidas digitales (I/O) instalados en un computador de flujo OMNI. Este diagrama sirve como referencia visual para identificar en qué módulo y en qué bloque de terminales se deben conectar las señales digitales provenientes del campo.

En la parte central de la figura se observan los distintos módulos I/O instalados verticalmente. Cada módulo ocupa una ranura y está asociado a un bloque de terminales identificado como TB1, TB2. En estos bloques es donde se conectan físicamente los cables de las señales digitales. Los módulos representados incluyen:

- IODigital 1–12
- IODigital 13–24

Los módulos de tipo IODigital son los encargados de manejar las entradas y salidas digitales del sistema. Cada módulo cuenta con 12 posiciones de conexión, numeradas del 1 al 12 y del 13 al 24 lo cual permite identificar individualmente cada señal conectada.

- Conexión de las señales digitales

Cada entrada o salida digital del ciclo de medición debe ser conectada a una terminal específica del computador OMNI siguiendo estas reglas:

Identificación de la señal

Antes de conectar, cada señal debe tener un Tag definido (por ejemplo: “Alarma de bajo flujo”, “Estado de válvula”, etc.).

Selección del módulo correspondiente

Según el número de señales disponibles y el diseño del ciclo, la señal se asignará a uno de los módulos IO Digital.

Ejemplo: si la señal pertenece a las primeras 12 entradas digitales, se conectará al módulo IO Digital 1–12.

Ubicación del bloque de terminales (TB)

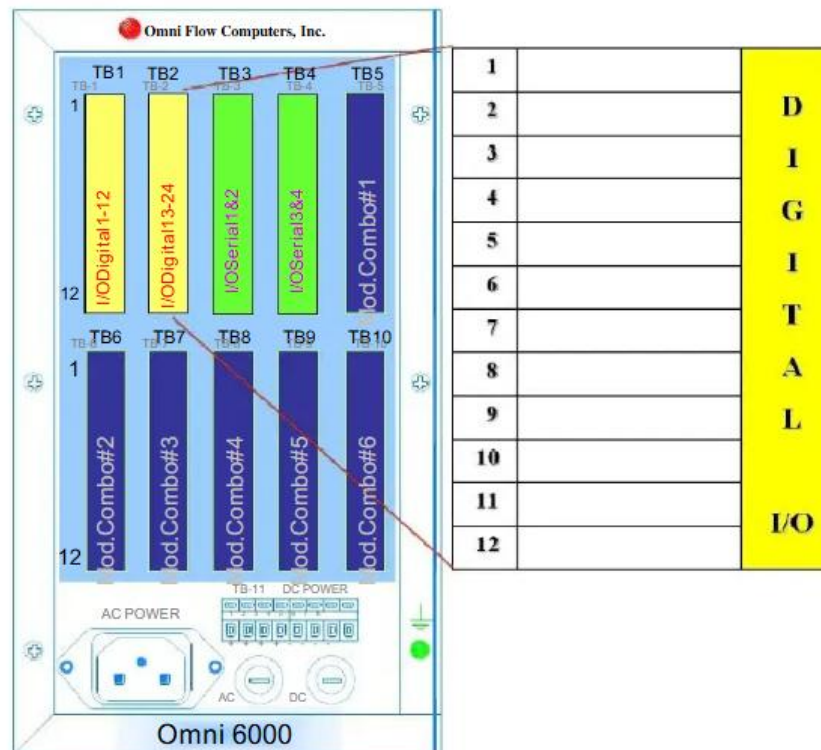
Cada módulo está asociado a un grupo de terminales etiquetado como TB1, TB2.

En la figura 2-13 se observa claramente cómo cada módulo está vinculado a su respectivo bloque de terminales.

Registro en la tabla de asignación

A la derecha de la figura se muestra una tabla donde deben documentarse todas las señales digitales. Esta tabla incluye 12 filas correspondientes a los 12 canales del módulo y permite anotar:

- El número de terminal utilizado.
- El Tag de la señal conectada.
- El tipo de señal (entrada o salida digital).
- Observaciones o funciones adicionales.



Fuente: Manual del Equipo

Figura 2-13 Entradas y salidas digitales del OMNI.

2.3.2 Configuración de las entradas y salidas digitales

La figura 2-14 muestra el procedimiento para la configuración de las entradas y salidas digitales (I/O digitales) del computador de flujo. El sistema permite un máximo de 24 señales digitales, las cuales pueden ser programadas de acuerdo con la función requerida en el proceso de medición o control.

Al configurar cada I/O digital, el equipo solicita el número de la base de datos de la variable asociada. Este número identifica de forma única una variable interna del sistema, ya sea medida, calculada o generada por alguna función de control. Mediante este índice, la I/O digital queda vinculada directamente a la lógica interna del computador de flujo, permitiendo su uso como condición, evento o comando dentro del sistema.

La figura 2-14 en el lado derecho muestra la pantalla de configuración donde se programan los parámetros de cada I/O digital:

Assigned as: Tipo de señal asignada.

Rmk: Campo para comentarios o notas técnicas.

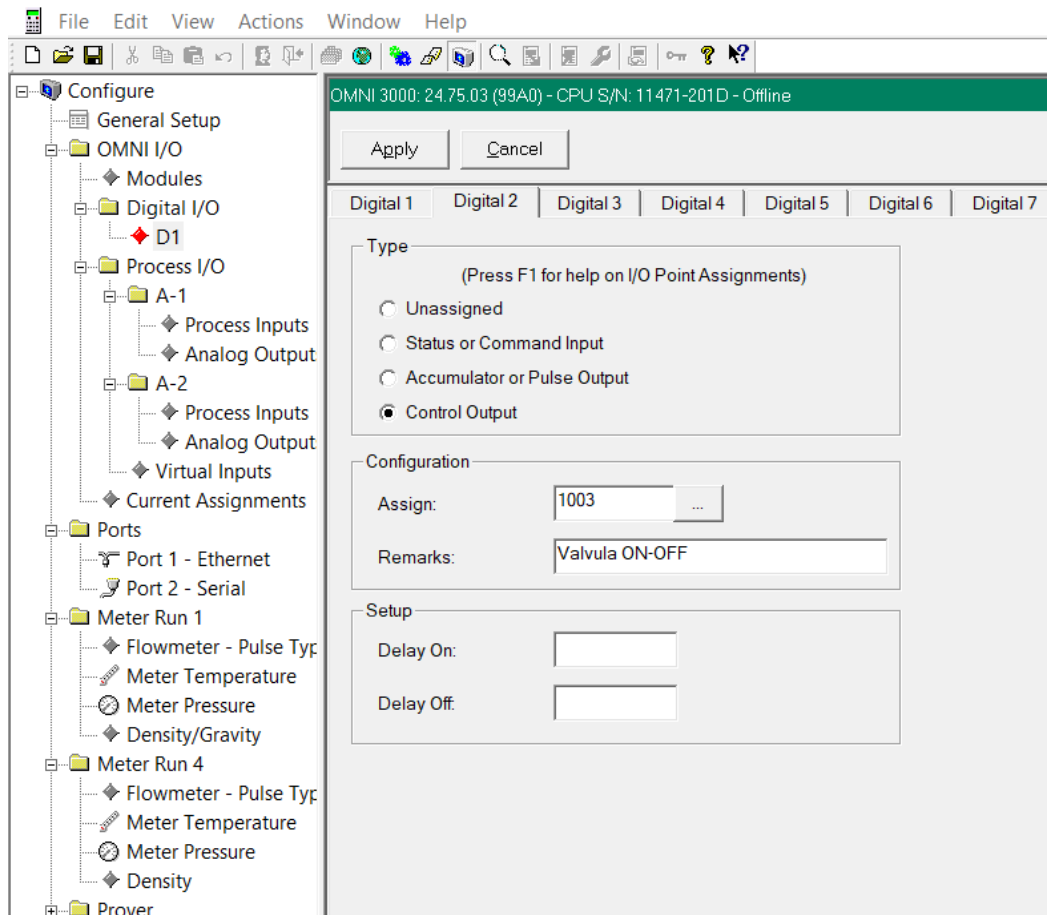
Delay On/ Delay Off: Valores de temporización aplicables a entradas digitales.



Fuente: Manual del Equipo

Figura 2-14 Configuración entradas y salidas digitales del OMNI.

La figura 2-15 muestra la configuración de una salida digital del OMNI destinada al control de una válvula ON/OFF. El canal se define como Control Output, lo que permite que el computador de flujo gobierne directamente un elemento discreto del proceso. La salida se asigna a una función de control específica mediante el parámetro Assign y se identifica a través de una descripción funcional en el campo Remarks. Adicionalmente, el sistema permite configurar retardos de activación y desactivación, los cuales se utilizan para optimizar la secuencia de operación. Esta configuración habilita el accionamiento seguro y confiable de la válvula mediante un relé intermedio, integrándola al control general del proceso.



Fuente: Software OMNICOM

Figura 2-15 Salida digital.

2.3.3 Salidas y entradas analógicas

La figura 2-16 y el texto muestran el procedimiento utilizado para la configuración de las salidas analógicas del sistema de medición. El computador de flujo admite hasta 12 salidas analógicas, cada una capaz de transmitir una señal estándar de 4 a 20 mA. Estas señales son empleadas para comunicar variables de proceso hacia dispositivos externos.

Para la configuración de cada salida analógica, el sistema solicita dos parámetros esenciales. El primero corresponde a la selección del Índice de la base de datos. Dentro del computador de flujo, todas las variables medidas, calculadas o generadas por el sistema se encuentran organizadas en una base de datos interna. Cada una de estas variables posee un número de índice, el cual funciona como un identificador único que permite al equipo reconocerla y manipularla.

Al asignar un índice específico a una salida analógica, se establece qué variable del sistema será convertida en una señal eléctrica. En otras palabras, el número de índice determina qué valor del proceso se enviará físicamente a través del rango de 4–20 mA.

- **Asign:** Número de índice de la variable
- **Rmk:** observación o comentario
- **At 4mA:** Valor asociado a los 4mA
- **At 20mA:** Valor asociado a los 20mA.

```

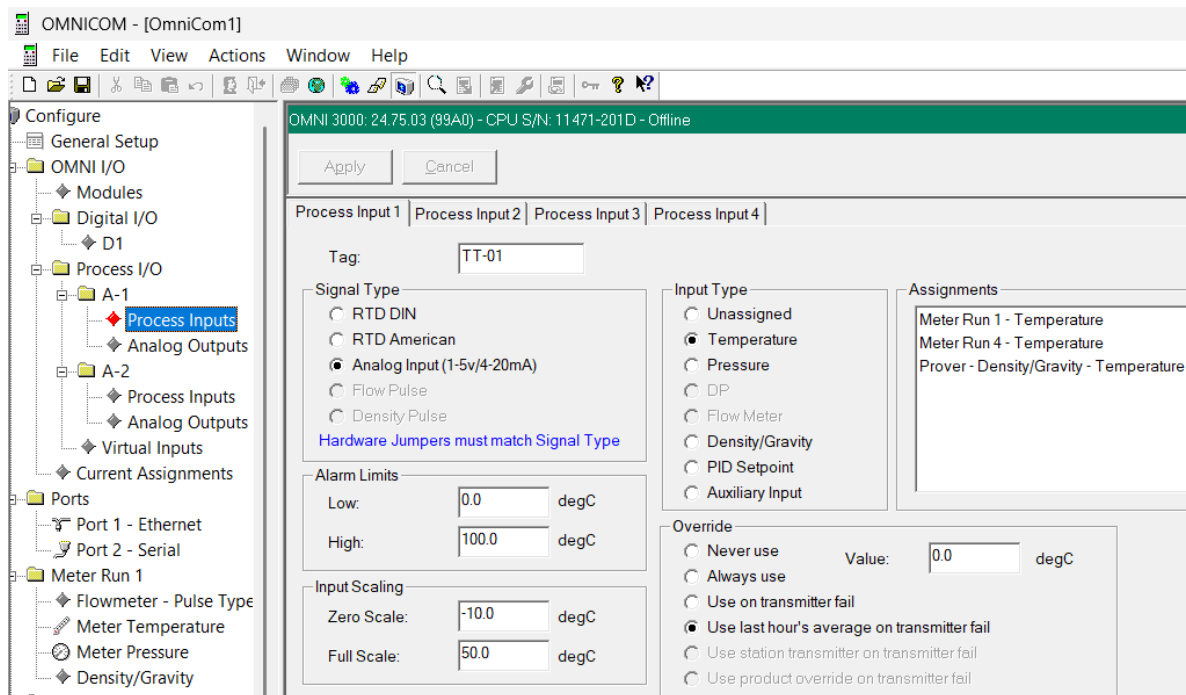
** ANALOG OUTPUT #1 **
Asign
Rmk
at 4 mA
at 20mA
** ANALOG OUTPUT #2 **
Asign
Rmk
at 4 mA
at 20mA
..... Output #3 y Output #4

```

Fuente: Manual del Equipo

Figura 2-16 Salidas analógicas del OMNI.

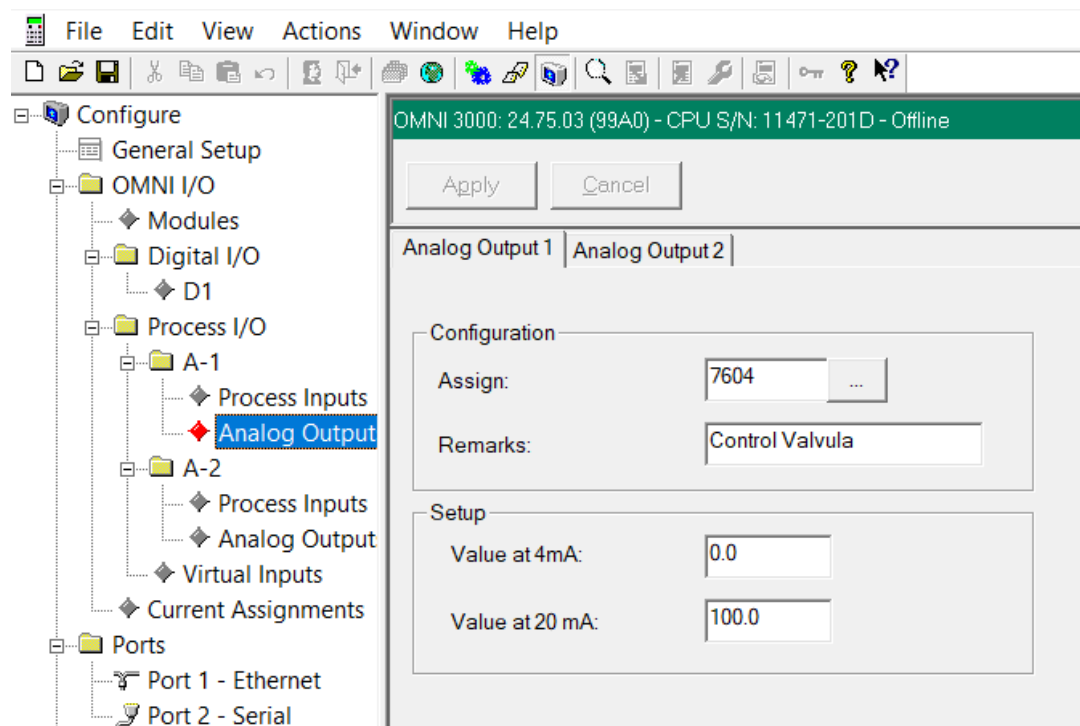
La figura 2-17 muestra el procedimiento de configuración de las entradas analógicas del OMNI, correspondiente a los tres transmisores del sistema de medición. Para cada transmisor, la señal se define en el menú Process Inputs como Analog Input (4–20 mA), asegurando la compatibilidad con los dispositivos de campo y con la configuración de hardware del equipo. Posteriormente, se selecciona el tipo de variable de proceso asociada a cada entrada, permitiendo que el computador de flujo interprete correctamente las señales en sus respectivas unidades de medidas. El rango de medición se establece mediante el escalamiento de entrada, asociando los valores mínimo y máximo de corriente a los rangos definidos por el proceso. Adicionalmente, se configuran límites de alarma alto y bajo para cada transmisor, con el fin de detectar condiciones anormales y proteger la operación del sistema. Finalmente, las entradas analógicas se asignan a los Meter Run correspondientes, permitiendo que las variables de presión, temperatura y caudal sean utilizadas en los cálculos de compensación y control, garantizando precisión, confiabilidad y continuidad operativa del sistema de medición.



Fuente: Software OMNICOM.

Figura 2-17 Entradas analógicas.

La figura 2-18 muestra el procedimiento de configuración de una salida analógica del OMNI, destinada al control de una válvula de proceso. En el menú Analog Output, la salida se asigna mediante un identificador interno del sistema, el cual define la variable de proceso que será transmitida al dispositivo de campo. La señal de salida se configura en formato 4–20 mA, estableciendo un escalamiento proporcional en el que 4 mA representan el 0 % de operación y 20 mA el 100 %, de acuerdo con los parámetros definidos en el apartado Setup. Esta configuración permite que la válvula modulante reciba una señal continua y proporcional desde el computador de flujo, ajustando su posición en función de los requerimientos operacionales del proceso. Adicionalmente, el campo Remarks se utiliza para la identificación funcional de la salida, contribuyendo a una operación clara, segura y mantenible del sistema de control.



Fuente: Software OMNICOM.

Figura 2-18 Salidas analógicas.

2.3.4 Asignación de las variables del diseño

Tabla 2-1 Entradas analógicas.

ENTRADAS ANALÓGICAS	MÓDULO	BORNERA DE CONEXIÓN
Transmisor de presión	Combo I/O #1 TB5	1
Transmisor de temperatura	Combo I/O #1 TB5	3
Transmisor de flujo	Combo I/O #1 TB5	5

Fuente: Creación propia en Word.

Tabla 2-2. Salidas analógicas.

SALIDAS ANALÓGICAS	MÓDULO	BORNERA DE CONEXIÓN
Válvula de control	Combo I/O #1 TB5	11
Variador de Frecuencia	Combo I/O #1 TB5	12

Fuente: Creación propia en Word.

Tabla 2-3. Salidas digitales.

SALIDAS DIGITAL	MÓDULO	BORNERA DE CONEXIÓN
Válvula ON-OFF	I/O DIGITAL 1-12 TB1	1

Fuente: Creación propia en Word.

2.3.5 Estructura de registros Modbus del equipo

En la figura 2-19 se observa la base de datos Modbus del equipo se estructura mediante un mapa de registros de los direccionados en el cual se almacenan las variables del proceso de acuerdo con su naturaleza. Los estados discretos se registran en formatos tipo bit, mientras que los valores numéricos se almacenan en registros de 16 bits y 32 bits, correspondientes a datos de tipo entero y real, respectivamente, dependiendo de la naturaleza de la variable medida. Cada variable posee una dirección Modbus definida que permite su lectura y escritura por medio de funciones

estándar del protocolo, asegurando un acceso ordenado, confiable y compatible con sistemas de automatización y supervisión industrial.



Fuente: Manual del Equipo

Figura 2-19 Estructura de registros modbus del OMNI.

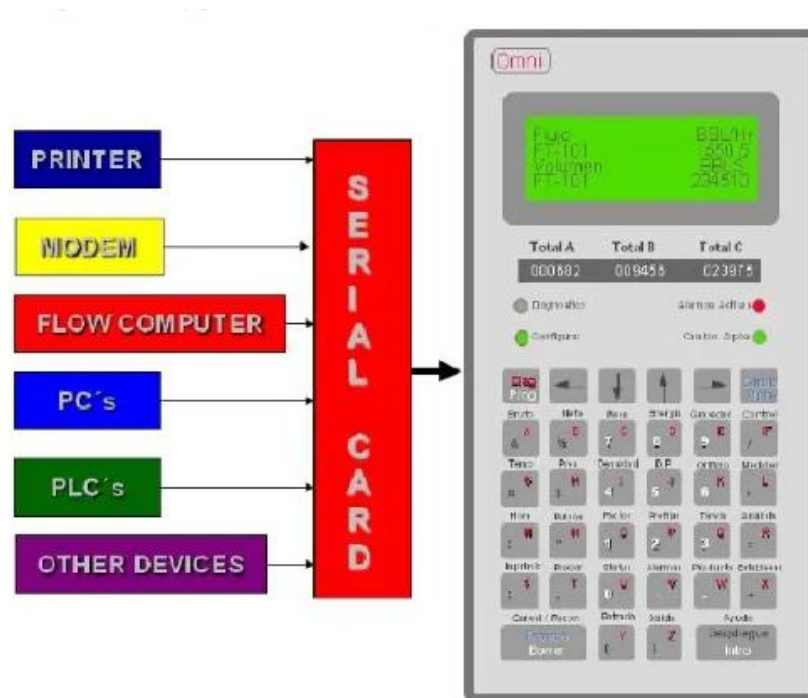
2.3.6 Puerto de tarjeta serial

En la figura 2-20 se observa los puertos disponibles en las tarjetas seriales del equipo están diseñados para permitir la integración directa con diversos dispositivos externos utilizados en sistemas de automatización y medición industrial. Estos puertos constituyen la interfaz primaria para el intercambio de datos entre el computador de flujo y otros equipos complementarios.

Es importante destacar que el computador de flujo actúa como el elemento central del sistema de medición. Los dispositivos conectados a él intercambian información mediante estructuras de comunicación estandarizadas. Este intercambio se realiza a través de un protocolo, que define el formato de los mensajes, los comandos, las respuestas y las reglas de sincronización entre los dispositivos.

Gracias a esta arquitectura basada en comunicación serial, el sistema puede integrarse de manera flexible con una amplia variedad de tecnologías externas, permitiendo la supervisión, el registro de datos y el control de procesos con alta confiabilidad.

Esto nos permite comunicarse con el computador de flujo para poder sacar los datos que se necesitan para exportarlos a otro equipo.



Fuente: Manual del Equipo

Figura 2-20 Puerto de tarjeta serial del OMNI.

2.4 AJUSTES Y CONFIGURACIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

El variador de frecuencia presenta una serie de ajustes que se configuran mediante parámetros, donde cada parámetro cumple una función específica. Estos ajustes se detallan y pueden observarse en las siguientes figuras 2-21, 2-22, 2-23, 2-24, 2-25 y 2-26.

- **Parámetro 1 (Frecuencia máxima de salida):** Establece la frecuencia límite superior que el variador puede entregar al motor. Determina la velocidad máxima de la bomba y protege el motor contra sobre velocidad y sobrecarga mecánica.
- **Parámetro 2 (Frecuencia mínima de salida):** Define la frecuencia mínima operativa. Permite un arranque controlado desde cero o bajas velocidades, evitando golpes hidráulicos y manteniendo la estabilidad del flujo.
- **Parámetro 3 (Frecuencia base):** Representa la frecuencia nominal del motor usada como referencia para el control V/F. Mantiene la relación voltaje/frecuencia constante para asegurar torque estable a lo largo de todo el rango de velocidad.

⊙ 1	Frecuencia máxima de salida	0 a 120 Hz	120 Hz
⊙ 2	Frecuencia mínima de salida	0 a 120 Hz	0 Hz
⊙ 3	Curva V/f (frecuencia base)	0 a 400 Hz	50 Hz

Fuente: Manual del Equipo

Figura 2-21 Parámetros frecuencia máxima y mínima.

- **Parámetro 7 (Tiempo de aceleración):** Define el tiempo que el variador tarda en aumentar la frecuencia desde la mínima hasta la máxima. Controla la pendiente de aceleración, evitando picos de corriente y golpes hidráulicos en la bomba durante el arranque.
- **Parámetro 8 (Tiempo de desaceleración):** Establece el tiempo que el variador tarda en reducir la frecuencia desde la máxima hasta la mínima. Garantiza un paro controlado, protegiendo la bomba, tuberías y el sistema contra golpes de ariete o sobrecarga mecánica.

⊙ 7	Tiempo de aceleración	0 a 3600 s	5/10 s *2
⊙ 8	Tiempo de frenado	0 a 3600 s	5/10 s *2

Fuente: Manual del Equipo

Figura 2-22 Parámetros de tiempos de aceleración y frenado.

- **Parámetro 9 (Ajuste de corriente nominal):** Define la corriente máxima que el variador permite que circule por el motor durante operación continua. Este parámetro asegura que el motor funcione dentro de sus límites térmicos, evitando sobrecalentamiento y daños eléctricos.

⊙ 9	Ajuste de corriente para la protección termoelectrónica del motor	0 a 500 A	Corriente nominal
------------	--	-----------	-------------------

Fuente: Manual del Equipo

Figura 2-23 Parámetro corriente nominal.

- **Parámetro 73 (Selección de entrada analógica):** Define el tipo de señal analógica que el variador recibirá para controlar la frecuencia de salida. En este caso, se configura para 4-20 mA, que es la señal que envía el computador de flujo Omni. Al ajustar correctamente este parámetro, el variador interpreta proporcionalmente la señal recibida: 4 mA corresponde a la frecuencia mínima (0 Hz o frecuencia mínima definida) y 20 mA corresponde a la frecuencia máxima (frecuencia máxima definida), permitiendo un control preciso de la velocidad de la bomba desde el sistema externo.

73	Selección entrada analógica de valor consigna	0, 1, 10, 11	1
-----------	--	--------------	---

Fuente: Manual del Equipo

Figura 2-24 Parámetros selección entrada analógica.

- **Parámetro 125 (frecuencia mínima):** Corresponde a la frecuencia que el variador aplicará cuando la señal analógica esté en su valor mínimo (por ejemplo, 4 mA).
- **Parámetro 126 (frecuencia máxima):** Corresponde a la frecuencia que el variador aplicará cuando la señal analógica esté en su valor máximo (por ejemplo, 20 mA).

⊙ 125	Consigna de velocidad a entrada analógica máxima en borne 2 (frecuencia)	0 a 400 Hz	50 Hz
⊙ 126	Consigna de velocidad a entrada analógica máxima en borne 4 (frecuencia)	0 a 400 Hz	50 Hz

Fuente: Manual del Equipo

Figura 2-25 Parámetros de frecuencias señal analógica.

- **Parámetro 078 (Configuración de giro):** Define la dirección de rotación del motor. Para la bomba Pedrollo se ajusta en 0, permitiendo solo giro hacia adelante, evitando inversión de sentido que podría dañar la bomba o las tuberías.
- **Parámetro 079 (Modo de operación):** Determina desde dónde se controlará el variador. En este caso, se ajusta en 1 (control por terminal externo/Omni), deshabilitando el control desde el teclado del VFD. Esto permite que el computador de flujo Omni controle directamente la velocidad de la bomba mediante la señal analógica (4-20 mA) y comandos de arranque/parada.

78	Prohibición de inversión	0, 1, 2	0
⊙ 79	Selección de modos de funcionamiento	0, 1, 2, 3, 4, 6, 7	0

Fuente: Manual del Equipo

Figura 2-26 Parámetros dirección de giro y modo de operación.

2.5 PROCEDIMIENTO PARA VISUALIZAR DATOS EN HMI

El usuario desea implementar un sistema en el cual el controlador de flujo Omni actúe como el dispositivo principal de adquisición y control, recopilando los datos de los transmisores de presión (PT), temperatura (TT) y flujo (FT). El Omni concentra toda la información del proceso, incluyendo caudal, presión y temperatura, y la pone a disposición para su lectura externa.

Para visualizar y procesar estos datos, el Omni se conecta mediante RS-485 a un Arduino, que actúa como pasarela inteligente. El Arduino solicita los registros al Omni utilizando el protocolo

Modbus RTU, recibe los valores crudos y los convierte aplicando los factores de escala correspondientes, transformando cada registro en valores claros y comprensibles, asociados a su nombre y unidad de medida (por ejemplo, L/min para flujo, bar o m para presión y °C para temperatura).

Posteriormente, el Arduino organiza todos los datos en un formato estructurado y los envía a la HMI mediante Ethernet, usando Modbus TCP o un protocolo definido, de manera que la HMI pueda mostrar de forma ordenada cada variable con su valor y unidad correspondiente.

Este sistema asegura que toda la información controlada por el Omni se procese, se presente de forma clara y se visualice en tiempo real, facilitando el monitoreo y la supervisión de la bomba y de las variables críticas del proceso.

2.5.1 Código de arduino r4 wifi

A continuación, se presenta el código de Arduino, el cual está diseñado para transmitir los datos del proceso desde el controlador principal hasta la HMI. Este organiza y despliega la información de manera estructurada, permitiendo la visualización en tiempo real de variables críticas como flujo, presión, temperatura, estado de válvulas y setpoint del variador de frecuencia.

En la figura 2-27 se observa la esta etapa inicial del programa donde se realiza la configuración del sistema, en la cual se inicializan los dispositivos de visualización y se definen las variables principales del proceso. Se configuran dos pantallas LCD destinadas a la visualización de parámetros operacionales simulando la HMI, tales como flujo, temperatura, presión y estado de la válvula, además de indicadores mediante leds que permiten representar condiciones específicas del sistema. Asimismo, se establecen valores iniciales para las variables de proceso, lo que permite simular o representar el estado base de operación. Finalmente, se inicia la comunicación serial y se lleva a cabo la configuración de las pantallas, mostrando mensajes de arranque que permiten verificar el correcto funcionamiento del sistema.

```

8  #include <LiquidCrystal.h>
9
10 // ----- LCDs -----
11 // LCD1: Temperatura, Flujo, Válvula ON/OFF
12 LiquidCrystal lcd1(12, 11, 5, 4, 3, 2); // RS, E, D4, D5, D6, D7
13
14 // LCD2: Estado % válvula de control, Presión, Setpoint VDF
15 LiquidCrystal lcd2(10, 9, 8, 7, 6, A0); // RS, E, D4, D5, D6, D7
16
17 // ----- LEDs -----
18 const int ledValvula = A1; // Indica estado válvula ON/OFF
19 const int ledVDF     = A2; // Indica si VDF > 50 Hz
20
21 // ----- Variables de proceso -----
22 float flujo = 120.5; // L/min
23 float presion = 3.2; // bar
24 float temperatura = 45.7; // °C
25 bool valvulaEstado = true; // ON/OFF
26 float setpointVDF = 50.0; // Hz
27 float valvulaPorcentaje = 75; // % de apertura válvula de control
28
29 // ----- Setup -----
30 void setup() {
31     Serial.begin(9600);
32
33     // Configurar LCDs
34     lcd1.begin(16,2);
35     lcd2.begin(16,2);
36
37     lcd1.print("LCD1 Iniciada");
38     lcd2.print("LCD2 Iniciada");
39 }

```

Fuente: Software Arduino IDE.

Figura 2-27 Código para lectura de datos del OMNI y compartir hacia HMI.

En la figura 2-28 se observa la etapa del programa donde se realiza la configuración de los pines asociados a los indicadores luminosos, estableciéndolos como salidas digitales para permitir la representación del estado de operación del sistema. Posteriormente, se ejecuta una breve pausa y se limpian las pantallas LCD, con el fin de prepararlas para la visualización continua de las variables del proceso. Durante el ciclo principal de ejecución, se simulan variaciones en los parámetros operacionales, tales como flujo, presión, temperatura, estado de la válvula y setpoint del variador de frecuencia, mediante la generación de valores aleatorios controlados. Finalmente,

estos datos son desplegados en las pantallas LCD, permitiendo monitorear en tiempo real el comportamiento del sistema, donde una pantalla presenta información de temperatura, flujo y estado de la válvula, mientras que la otra muestra el porcentaje de apertura, la presión y el setpoint del sistema.

```

41   pinMode(ledValvula, OUTPUT);
42   pinMode(ledVDF, OUTPUT);
43
44   delay(1000);
45   lcd1.clear();
46   lcd2.clear();
47 }
48
49 // ----- Loop -----
50 void loop() {
51   // --- Simular cambios en proceso ---
52   flujo += random(-5,6)*0.1;           // ±0.5 L/min
53   presion += random(-2,3)*0.01;        // ±0.02 bar
54   temperatura += random(-3,4)*0.1;     // ±0.3 °C
55   valvulaEstado = (random(0,2)==1);    // ON/OFF aleatorio
56   setpointVDF += random(-2,3)*0.1;     // ±0.2 Hz
57   valvulaPorcentaje += random(-3,4)*0.5; // ±1.5% apertura
58
59   // --- LCD1: Temperatura, Flujo, Válvula ---
60   lcd1.setCursor(0,0);
61   lcd1.print("Temp: "); lcd1.print(temperatura,1); lcd1.print("C");
62   ..
63   lcd1.setCursor(0,1);
64   lcd1.print("Flujo: "); lcd1.print(flujo,1); lcd1.print("L/m");
65   lcd1.print(valvulaEstado ? "ON" : "OFF");
66   ..
67   // --- LCD2: % Válvula, Presion, Setpoint VDF ---
68   lcd2.setCursor(0,0);
69   lcd2.print("Valv: "); lcd2.print(valvulaPorcentaje,0); lcd2.print("%");
70   ..
71   lcd2.setCursor(0,1);
72   lcd2.print("Pres: "); lcd2.print(presion,2); lcd2.print("bar");

```

Fuente: Software Arduino IDE.

Figura 2-28 Código para lectura de datos del OMNI y compartir hacia HMI.

En la figura 2-29 se observa la etapa final del programa se realiza la visualización y supervisión completa de las variables del proceso, junto con el control de los indicadores del sistema. En primer lugar, se actualiza la información mostrada en las pantallas LCD, donde se presentan parámetros como temperatura, flujo y estado de la válvula en una de ellas, mientras que en la segunda se visualizan el porcentaje de apertura, la presión y el setpoint del variador de

frecuencia. Paralelamente, se ejecuta el control de los indicadores luminosos, activando los LEDs en función del estado de la válvula y de la condición de operación del variador, específicamente cuando la frecuencia supera un valor determinado. Adicionalmente, se envían los datos del proceso a través del monitor serial, permitiendo su visualización y registro en tiempo real. Finalmente, se establece un retardo de un segundo entre cada ciclo de ejecución, asegurando una actualización periódica y estable de la información del sistema.

```

72  lcd2.print("Pres: "); lcd2.print(presion,2); lcd2.print(" bar ");
73  lcd2.print(setpointVDF,1); lcd2.print(" Hz");
74
75  // --- LEDs ---
76  digitalWrite(ledValvula, valvulaEstado ? HIGH : LOW);
77  digitalWrite(ledVDF, setpointVDF>50 ? HIGH : LOW);
78
79  // --- Monitor serial ---
80  Serial.print("Temp: "); Serial.print(temperatura,1);
81  Serial.print(" C | Flujo: "); Serial.print(flujo,1);
82  Serial.print(" L/min | Valvula: "); Serial.print(valvulaEstado ? "ON" : "OFF");
83  Serial.print(" | %Valvula: "); Serial.print(valvulaPorcentaje,0);
84  Serial.print(" | Presion: "); Serial.print(presion,2);
85  Serial.print(" bar | Setpoint VDF: "); Serial.println(setpointVDF,1);
86
87  delay(1000); // Actualización cada 1 segundo
88  }

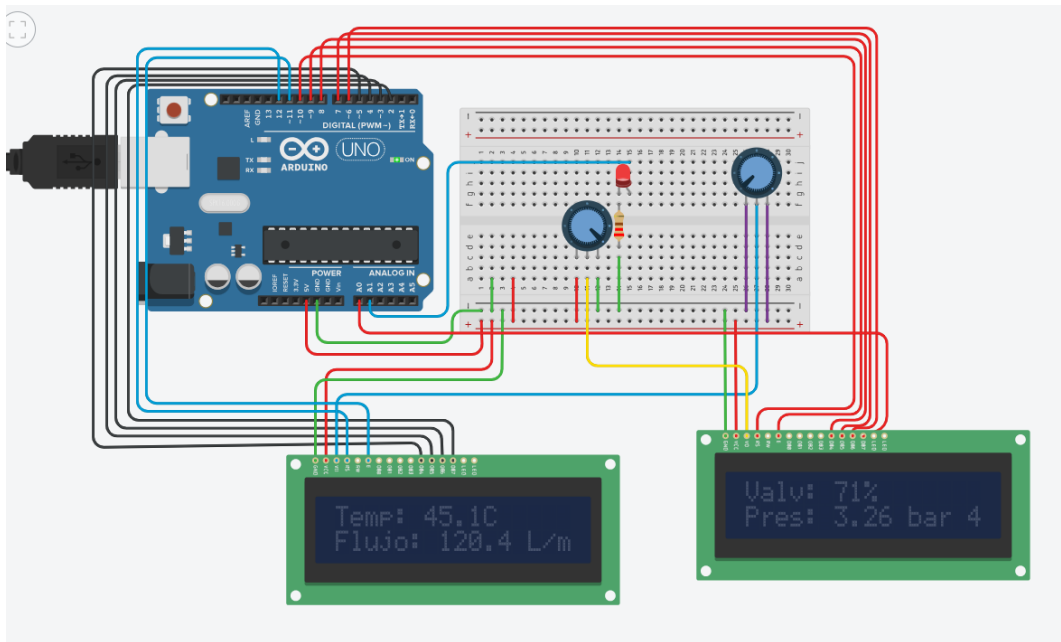
```

Fuente: Software Arduino IDE.

Figura 2-29 Código para lectura de datos del OMNI y compartir hacia HMI.

2.5.2 Simulación de lectura de datos desde el OMNI

En la siguiente figura 2-30 se observa la simulación de la adquisición de datos desde el controlador OMNI, donde la información del proceso es transmitida mediante comunicación RS-485 hacia un Arduino. En este esquema, se observa la correcta recepción de las variables por parte del Arduino, permitiendo disponer de los datos para su posterior procesamiento y visualización en la HMI, lo que valida el flujo de información dentro del sistema propuesto.



Fuente: Software Tinkercad.

Figura 2-30 simulación de registro de datos desde el OMNI.

2.6 PROCEDIMIENTO Y SECUENCIA DE CALIBRACIÓN.

Con el fin de garantizar una adecuada estructuración y documentación del procedimiento experimental, en la tabla 2-4 se resume las etapas del proceso de calibración de caudal, así como las acciones asociadas a cada una de ellas. Esta representación establece una secuencia lógica y ordenada de las actividades, asegurando la trazabilidad del proceso, la repetibilidad de las mediciones y el control de las condiciones operativas durante el desarrollo del ensayo.

Tabla 2-4 Procedimiento y secuencia de calibración.

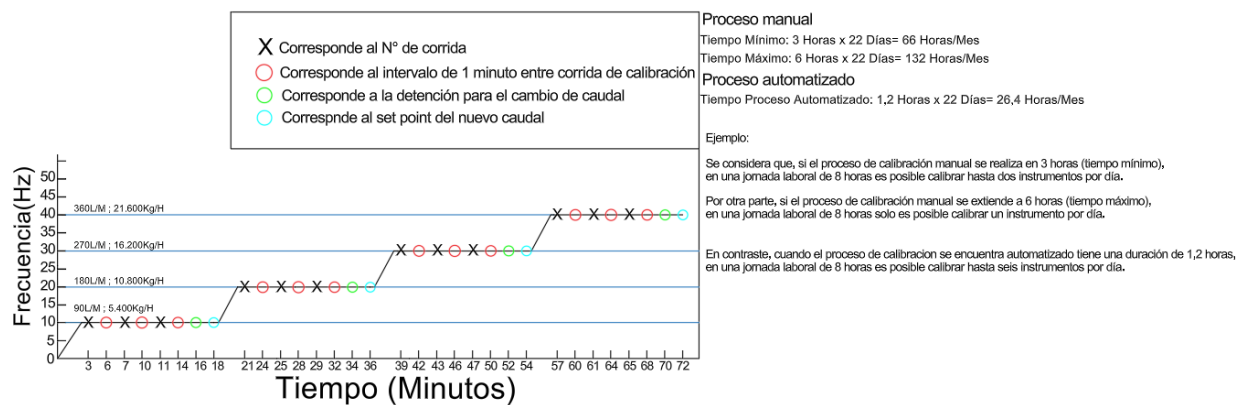
Pasos del proceso	Acciones
1-. Inicio del Proceso	Se energiza el sistema completo.
2-. Selección del punto de operación	Se define el primer Setpoint de caudal a evaluar.
3-. Ajuste de caudal	El variador de frecuencia regula la velocidad de la bomba hasta alcanzar el caudal objetivo establecido.

4-. Estabilización en el sistema	Se mantiene el sistema en operación durante 3 minutos para asegurar condiciones de flujo estable.
5-. Inicio de calibración	Se inicia el registro de caudal medido por el instrumento.
6-. Medición	Se registran los datos de caudal durante un periodo de 3 minutos.
7-. Corrida de calibración	Se almacena la medición obtenida.
8-. Intervalo de tiempo entre mediciones	Se espera 1 minuto antes de iniciar la siguiente corrida, evitando interferencias entre mediciones.
9-. Repetición de medición	Se realizan 3 mediciones por cada setpoint de caudal definido. (4 setpoint de caudal)
10-. Se cumplen las 3 mediciones	Una vez completada las 3 mediciones, se consolidan y validan datos obtenidos.
11-. Cambio de punto de operación	Se define un nuevo setpoint de caudal para continuar con la calibración.
12-. Repetición del ciclo	Se repite el procedimiento completo para cada setpoint de caudal seleccionado.
13-. Ciclo completado del proceso	Se detiene el sistema.
14-. Fin del proceso	Se consolidan todos los datos para su análisis posterior.

Fuente: Elaboración propia en Word.

En la figura 2-31 se presenta la evolución temporal de la frecuencia de operación durante el proceso de calibración, donde se identifican claramente las corridas, los intervalos entre cada medición, las detenciones para el cambio de caudal y la transición entre los distintos setpoint. El procedimiento manual requiere un tiempo mínimo de 3 horas y un máximo de 6 horas por el proceso de calibración, lo que, considerando una jornada laboral de 20 días al mes, representa

entre 60 y 120 horas mensuales para calibrar los instrumentos. En contraste, el proceso automatizado presenta una duración de 1,2 horas por medición, lo que permite reducir el tiempo total mensual a aproximadamente 26,4 horas. Esto implica una disminución en el tiempo de calibración, optimizando la eficiencia y permitiendo calibrar un mayor número de instrumentos en el mismo período laboral.



Fuente: Elaboración propia en AutoCAD.

Figura 2-31 Secuencia de calibración de medidores de flujo.

2.7 CÁLCULOS DE SETPOINT DEL PROCESO

En sistemas de bombeo centrífugo controlados mediante variadores de frecuencia, el comportamiento del caudal puede aproximarse a partir de las leyes de afinidad, las cuales establecen que el caudal es proporcional a la velocidad de rotación y, por ende, a la frecuencia de operación del motor.

Esta relación se expresa como:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{f_1}{f_2}$$

Donde:

- Q_1, Q_2 : caudales del sistema (l/min)
- f_1, f_2 : frecuencias de operación (Hz)

Considerando una condición nominal de operación con un caudal máximo de $Q_{max} = 450$ L/mina una frecuencia máxima de $f_{max} = 50$ Hz, se obtiene la siguiente relación aproximada:

$$Q = Q_{max} \cdot \frac{f}{f_{max}}$$

Sustituyendo los valores:

$$Q = 450 \cdot \frac{f}{50} \text{ al simplificar nos queda } Q = 9f$$

Donde Q es el caudal en l/min y f la frecuencia en Hz. Esta ecuación permite determinar el caudal para cualquier frecuencia dentro del rango de operación del sistema.

A modo de referencia, se presentan algunos valores calculados:

- Para $f = 10$ Hz $Q = 9 \times 10 = \mathbf{90[l/m]}$
- Para $f = 20$ Hz $Q = 9 \times 20 = \mathbf{180[l/m]}$
- Para $f = 30$ Hz $Q = 9 \times 30 = \mathbf{270[l/m]}$
- Para $f = 40$ Hz $Q = 9 \times 40 = \mathbf{360[l/m]}$
- Para $f = 50$ Hz $Q = 9 \times 50 = \mathbf{450[l/m]}$

No obstante, esta relación representa una simplificación del comportamiento real del sistema. En la práctica, el caudal entregado por una bomba no depende únicamente de la frecuencia de operación, sino también de la interacción entre la bomba y el sistema hidráulico al cual se encuentra conectada.

Esta interacción define el denominado punto de operación, el cual se obtiene a partir de la intersección entre la curva característica de la bomba y la curva del sistema.

La curva de la bomba, proporcionada por el fabricante, describe la relación entre la altura o carga hidráulica (H) y el caudal (Q), evidenciando que, a mayor caudal, menor es la altura disponible.

Esta relación puede aproximarse mediante:

$$H = H_0 - kQ^2$$

Por otra parte, la curva del sistema representa la resistencia hidráulica de la instalación, compuesta por la altura estática y las pérdidas por fricción, las cuales aumentan con el caudal:

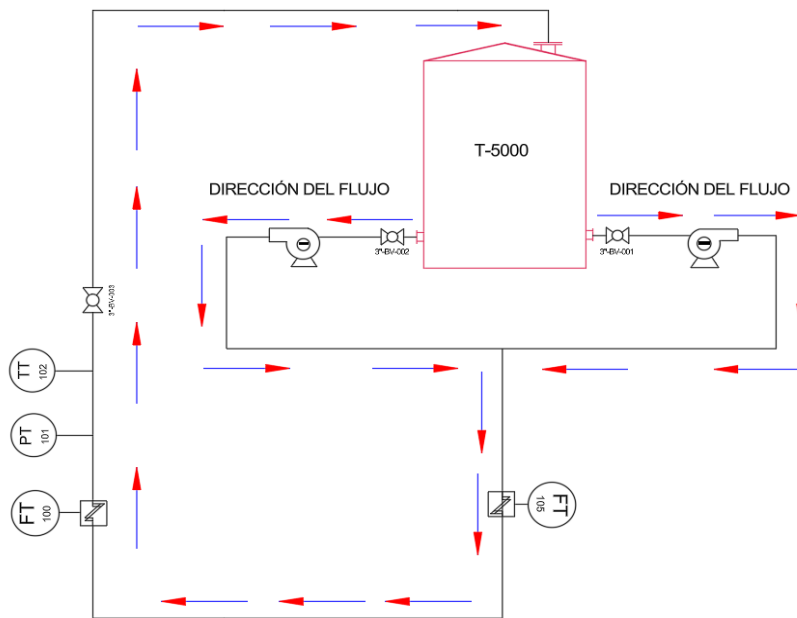
$$H = H_e + k_s Q^2$$

El punto de operación se determina al igualar ambas expresiones, estableciendo así el caudal real de funcionamiento del sistema.

En este contexto, si bien la ley de afinidad permite estimar el comportamiento del caudal en función de la frecuencia, el valor real de operación está condicionado por las características hidráulicas del sistema. En el presente trabajo, debido a la falta de información de la curva del sistema, no es posible determinar analíticamente el punto de operación, por lo que el análisis se realiza de forma conceptual.

2.8 PLANO P&ID DEL SISTEMA ACTUAL

En la figura 2-32 se puede apreciar el presente diagrama P&ID actual del skid de calibración, se representa de manera clara el funcionamiento del sistema y la disposición de los equipos que conforman el skid de proceso. Se identifican los instrumentos de medición, tales como los transmisores de flujo, temperatura y presión, ubicados estratégicamente para el monitoreo continuo de las variables operativas. Asimismo, se observan válvulas manuales cuya función es permitir el ajuste y control de los puntos de caudal dentro del sistema. El proceso de recirculación del fluido es realizado por dos bombas, las cuales garantizan el movimiento continuo del líquido a lo largo del circuito.

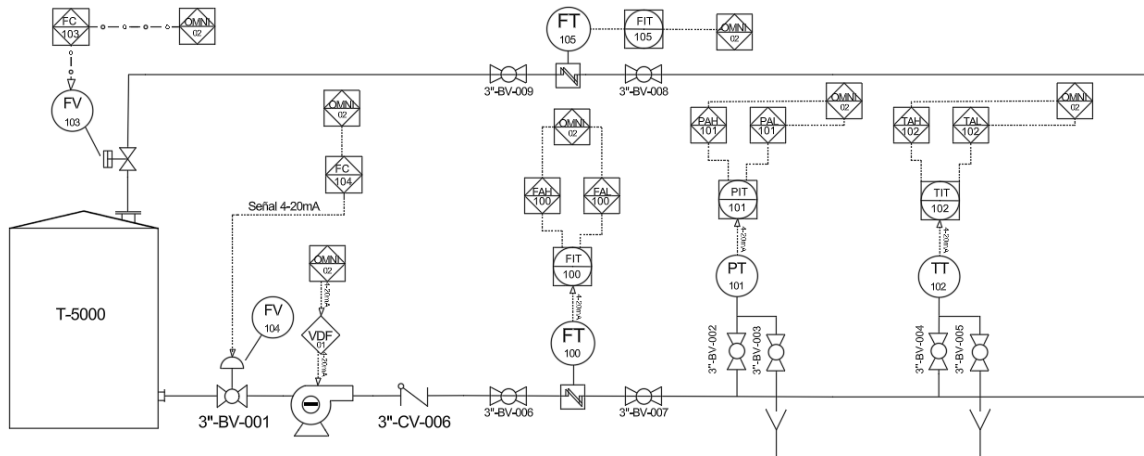


Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

Figura 2-32 Plano actual del skid

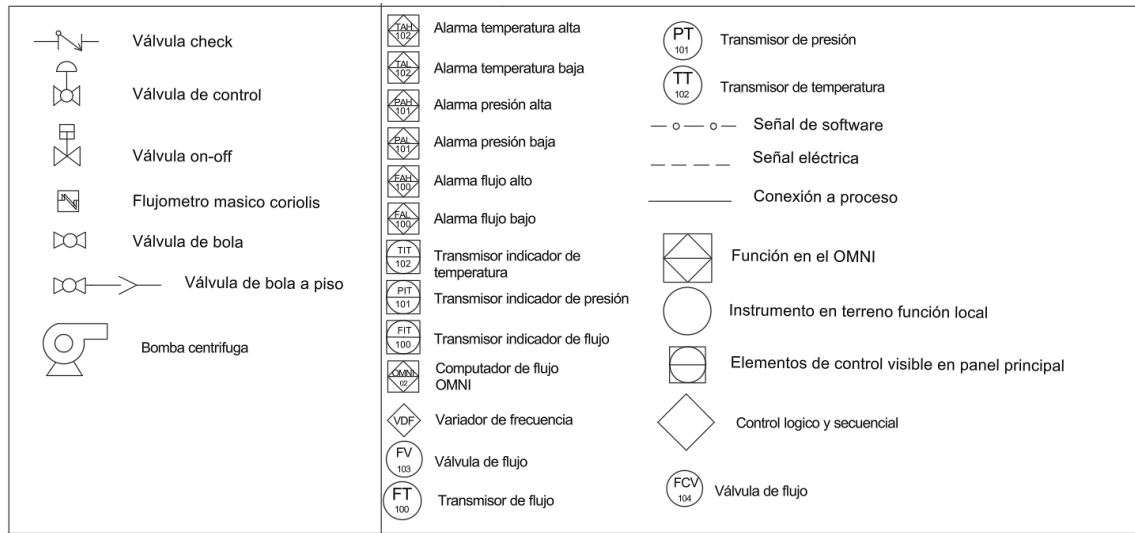
2.9 PLANO P&ID DEL SKID PROYECTADO

En la figura 2-33 se muestra el diagrama P&ID del skid proyectado con la incorporación de elementos orientados a la automatización y mejora del control del proceso. Se observa la integración de válvulas de control, las cuales permiten regular de manera precisa las variables operativas, así como la adición de una bomba adicional que contribuye a optimizar la recirculación del fluido dentro del sistema. Asimismo, se incluye un variador de frecuencia (VDF), encargado de ajustar la velocidad de operación de la bomba en función de las condiciones del proceso, posibilitando un control automático y eficiente. En conjunto, estos componentes permiten una operación más flexible, estable y controlada del sistema. Adicionalmente, se dispone de una imagen complementaria que presenta la simbología empleada en el plano, facilitando la correcta interpretación de los elementos e instrumentos representados.



Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

Figura 2-33 Plano P&ID proyectado del skid.



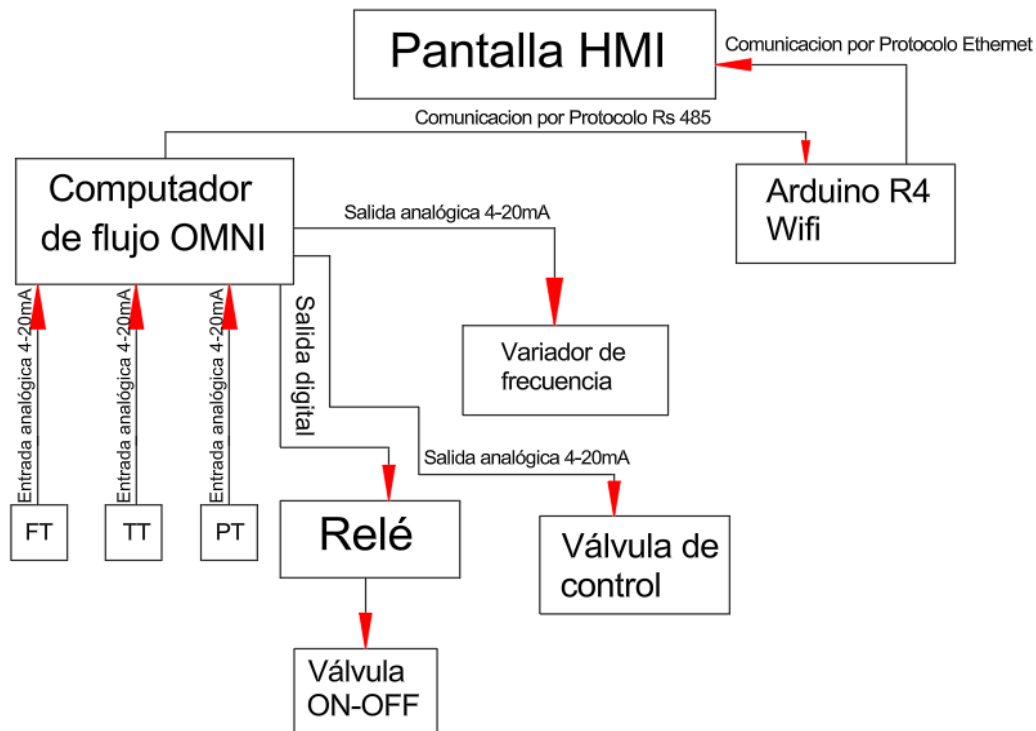
Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

Figura 2-34 Simbología plano P&ID.

2.10 ESQUEMA DE COMUNICACIÓN DE LOS EQUIPOS

La figura 2-35 muestra el esquema de comunicación, en el cual se ilustra la arquitectura del sistema de control. En este, el computador de flujo OMNI centraliza la adquisición de señales analógicas de 4–20 mA provenientes de los transmisores de temperatura, presión y caudal. A

partir de esta información, dicho equipo envía una señal analógica al variador de frecuencia para regular la velocidad de la bomba y controla las válvulas ON–OFF mediante salidas digitales que accionan un relé. Asimismo, gobierna la válvula de control a través de una salida analógica adicional. De manera paralela, el OMNI transmite los datos del proceso mediante comunicación RS-485 hacia un Arduino UNO R4 WiFi, el cual actúa como pasarela y retransmite la información hacia la HMI a través de un gateway Ethernet.



Fuente: Elaboración propia en AutoCAD.

Figura 2-35 Esquema de comunicaciones de los equipos.

2.11 COMUNICACIÓN Y PROTOCOLO DE CADA EQUIPO

A continuación, en la tabla 2-5 se observará la comunicación de los equipos, la cual consiste en la interacción de diferentes señales y protocolos industriales que permiten el funcionamiento coordinado del sistema.

Tabla 2-5. Comunicación de los Transmisores.

Equipo	Tipo de señal	Protocolo	Dirección	Función
Transmisor de presión (PT)	4-20 mA	analógico	TRANSMISORES→OMNI	Lectura de presión del circuito para registro.
Transmisor de Temperatura (TT)	4-20mA	analógico	TRANSMISORES→OMNI	Medición de temperatura para registro
Transmisor de Flujo (FT)	Pulsos o 4-20mA	analógico y Digital	TRANSMISORES→OMNI	Proporciona caudal instantáneo y totalizadores

Fuente: Elaboración propia con datos de los instrumentos y equipos

En la tabla 2-5 se puede observar que la comunicación de los equipos se basa en la transmisión de señales analógicas y digitales que permiten al computador de flujo OMNI recibir y procesar las variables principales del sistema. Los transmisores de presión y temperatura envían su información mediante señales estandarizadas de 4–20 mA, asegurando una lectura precisa y continua de estas magnitudes. En el caso del transmisor de flujo, la comunicación puede realizarse mediante señal analógica 4–20 mA o por pulsos, lo que permite entregar tanto el caudal instantáneo como los valores totalizados. Toda esta información es dirigida hacia el OMNI, donde es interpretada para la supervisión, registro y control general del proceso.

Tabla 2-6.Comunicación de OMNI con Arduino uno R4 Wifi

Comunicación	Protocolo	Dirección	Uso
Datos de procesos.	Modbus Rs485	OMNI → Arduino uno R4 Wifi	Trazabilidad y Registro de corridas de calibración.

Fuente: Elaboración propia con datos de los instrumentos y equipos

En la tabla 2-6 se observa los datos de comunicación entre el computador de flujo OMNI y el Arduino Uno R4 Wifi, se realiza mediante el protocolo Modbus Rs485, permitiendo una transmisión confiable de datos en tiempo real. A través de este enlace, el microcontrolador Arduino recibe información de las variables medidas, asegurando una transmisión completa y confiable hacia la HMI.

Tabla 2-7.Comunicación de Arduino con HMI

Comunicación	Protocolo	Dirección	Uso
Trazabilidad y Registro de corridas de calibración.	Pasarela Ethernet	Arduino uno R4 Wifi → HMI	visualización de los datos del proceso.

Fuente: Elaboración propia con datos de los instrumentos y equipos

En la tabla 2-7 se observa los datos de comunicación entre el Arduino Uno R4 Wifi y la pantalla HMI, se realiza mediante una pasarela o Gateway de Rs485 a Ethernet así permitiendo una transmisión confiable de datos en tiempo real. A través de este enlace, el microcontrolador Arduino recibe información de las variables medidas, asegurando una transmisión completa y confiable hacia la HMI.

Tabla 2-8.Comunicación de OMNI con VDF

Señal	Comunicación	Dirección	Función
Estado de Frecuencia del VDF	Señal Analógica 4-20mA	OMNI→VDF	Ingresa una frecuencia Hz.
Estado de Operación del VDF [RUN/STOP]	Señal Digital	OMNI→VDF	Operación del VDF.

Fuente: Elaboración propia con datos de los instrumentos y equipos

En la tabla 2-8 se observa la comunicación entre el variador de frecuencia (VDF) y el computador de flujo, se establece mediante señal analógica para setear una frecuencia en tiempo real para el funcionamiento de la bomba. Por otro lado, a través de comunicación digital será para manejar el RUN Y EL STOP del VDF. Esta comunicación asegura que el operador mantenga un control adecuado sobre el desempeño del sistema de bombeo y la operación del variador de frecuencia.

Tabla 2-9.Comunicación de OMNI con Válvulas ON-OFF

Equipo	Señal	Protocolo	Dirección	Función
Válvula ON-OFF comando abrir	24VDC (Digital)	Señal Discreta	OMNI→VÁLVULA	Orden de apertura mediante salida digital (DO)
Válvula ON-OFF comando cerrar	24VDC (Digital)	Señal Discreta	OMNI→VÁLVULA	Orden de cierre mediante salida digital (DO)

Fuente: Elaboración propia con datos de los instrumentos y equipos

En la tabla 2-9 se observa la comunicación entre el computador de flujo OMNI y las válvulas ON-OFF se realiza mediante señales digitales de 24 VDC que permiten ejecutar órdenes directas de apertura y cierre. A través de salidas discretas (DO), el OMNI envía los comandos necesarios para posicionar la válvula según la secuencia de operación establecida. Este tipo de comunicación asegura una respuesta rápida y confiable, fundamental en maniobras donde se requiere habilitar o interrumpir el paso del fluido de forma inmediata

Tabla 2-10 Comunicación de OMNI con válvula de control

Equipo	Señal	Protocolo	Dirección	Función
Válvula de control Señal de Apertura	4-20mA	Analógico	OMNI→válvula	Indica la posición (0-100%)

Fuente: Elaboración propia con datos de los instrumentos y equipos

En la tabla 2-10 se observa la comunicación entre el computador de flujo OMNI y la válvula de control se basa en señales analógicas de 4–20 mA que permiten regular y supervisar su posición de manera continua. El OMNI envía la señal de apertura que define el porcentaje de posición requerido por el proceso, operando el actuador entre 0 y 100% según las demandas del lazo de control.

2.12 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO

El sistema de automatización del skid de calibración se estructura en torno a un computador de flujo OMNI, el cual actúa como unidad central de adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos operacionales. Este equipo recibe y gestiona las señales provenientes de los distintos instrumentos de campo instalados en el sistema. En particular, el transmisor de temperatura (TT) y el transmisor de presión (PT) envían información al controlador mediante señales analógicas normalizadas de 4–20 mA, mientras que el transmisor de flujo (FT) entrega su información a través de una señal en formato de pulsos, correspondiente al estándar de salida de contaje utilizado en medidores de flujo volumétrico o másicos.

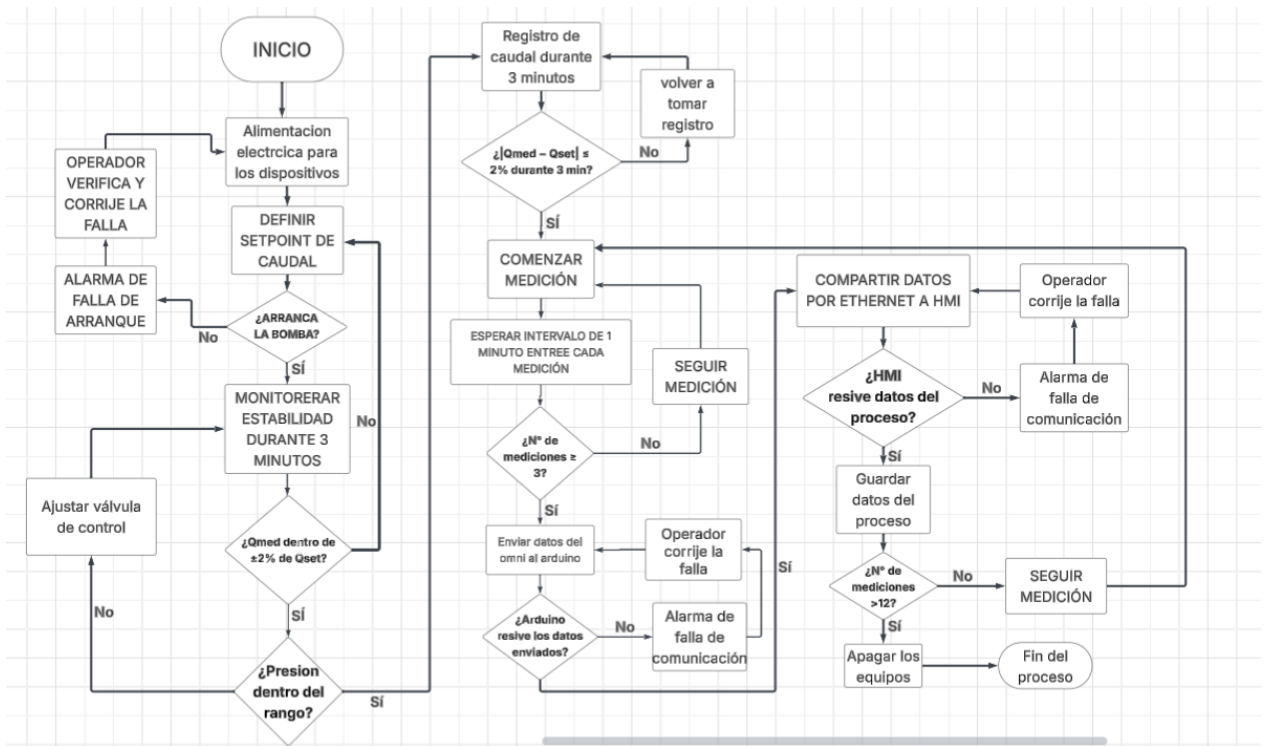
Para la circulación del fluido a través del circuito hidráulico, el skid incorpora una bomba centrífuga, la cual constituye el elemento primario de impulsión. El accionamiento de esta bomba se realiza mediante un variador de frecuencia (VDF). Dicho VDF se encuentra integrado al sistema de control mediante una entrada analógica que recibe desde el OMNI una señal de mando, también en el rango de 4–20 mA. A través de esta señal, el OMNI establece la frecuencia de operación del variador, permitiendo un control proporcional y continuo del régimen de giro de la bomba. Esta arquitectura de control posibilita regular el caudal del circuito de manera

automatizada, garantizando un flujo estable y reproducible durante las distintas etapas del proceso de calibración.

Adicionalmente, el skid está equipado con una válvula de control modulante, ubicada en la sección de ingreso del fluido al circuito principal. Esta válvula recibe desde el OMNI una señal analógica de 4–20 mA que determina su grado de apertura, lo cual permite ajustar de forma precisa la contrapresión del sistema, posibilitando alcanzar los niveles de presión requeridos en los procedimientos de calibración. Junto con ello, se han dispuesto diversas válvulas de tipo ON–OFF, cuya activación se realiza por medio de señales digitales enviadas desde las salidas discretas del controlador. Esto facilita la sectorización, el aislamiento y la reconfiguración del proceso de acuerdo con las etapas operativas definidas.

Toda la información generada durante la operación del sistema es almacenada en la memoria interna del computador de flujo OMNI. Este dispositivo no solo guarda los valores instantáneos de los instrumentos, sino que también registra eventos, tendencias, totales integrados y parámetros de configuración relevantes para el proceso. Con el fin de integrar estos datos en un sistema de supervisión local, el OMNI se comunica con una unidad basada en Arduino mediante una pasarela de comunicación RS485, que permite la transferencia fiable de datos bajo el protocolo industrial correspondiente.

Una vez recibida la información, el Arduino ejecuta rutinas de ordenamiento, filtrado y procesamiento de los datos provenientes del OMNI. Posteriormente, los valores depurados son enviados a la interfaz hombre-máquina (HMI) a través de una conexión Ethernet, permitiendo su visualización en tiempo real. Esta arquitectura de comunicación garantiza que el operador pueda monitorear de forma continua las variables críticas del proceso durante la calibración, mejorando la trazabilidad, repetibilidad y confiabilidad del sistema. En la figura 2-36 se puede observar el diagrama de flujo del proceso.



Fuente: Diseñado en Lucidchart.

Figura 2-36 Diagrama de flujo del proceso

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS ECONÓMICO

3 EVALUACIÓN ECONÓMICA Y ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DEL PROYECTO

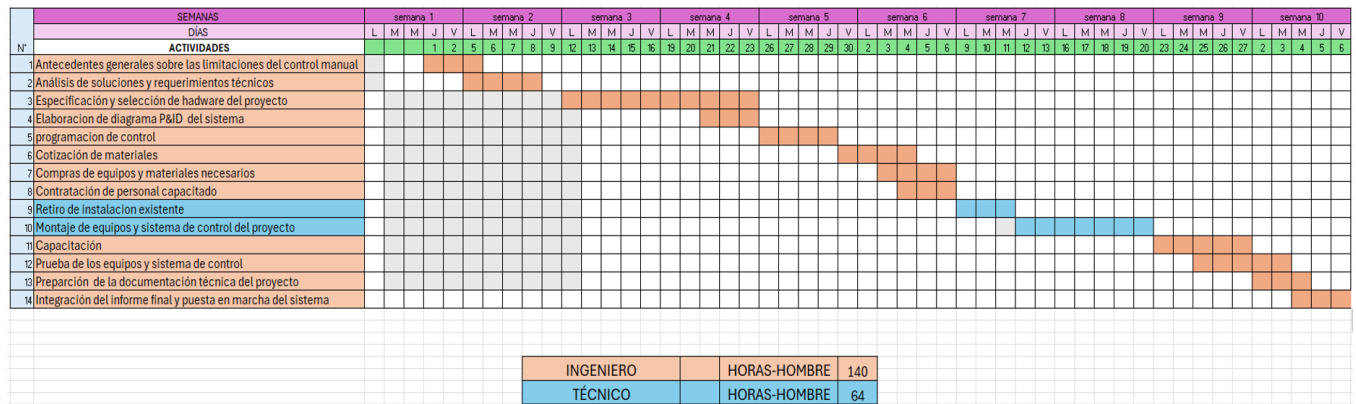
En el presente capítulo se desarrolla la planificación del proyecto, abordando su estructura organizativa y la estimación del plazo de ejecución requerido para su implementación. Asimismo, se lleva a cabo un análisis económico que considera las proyecciones de rentabilidad, evaluando tanto los potenciales beneficios como las posibles pérdidas asociadas al proyecto.

De igual forma, se identifican y clasifican los distintos tipos de costos involucrados, incluyendo costos directos e indirectos, con el objetivo de determinar su impacto en la viabilidad global. Finalmente, se presenta un desglose detallado de los costos asociados a los recursos necesarios para la ejecución, tales como herramientas, mano de obra y materiales, permitiendo así establecer una base sólida para la evaluación técnico-económica del proyecto.

3.1 CARTA GANTT

La carta Gantt constituye una herramienta fundamental para la planificación y programación de proyectos, permitiendo organizar y visualizar de manera estructurada las actividades a desarrollar, junto con sus respectivas fechas de inicio y término. Esta herramienta facilita el control y seguimiento del avance del proyecto, asegurando una adecuada coordinación de las tareas involucradas.

En la imagen 3-1 se presenta la carta Gantt elaborada para la planificación y desarrollo del proyecto abordado en la presente tesis.



Fuente: Elaboración propia en Excel.

Figura 3-1 Carta Gantt.

3.2 COSTOS DE MATERIALES

Los materiales constituyen uno de los componentes fundamentales dentro de la estructura de costos de un proyecto. Estos corresponden a los insumos y suministros necesarios para la ejecución de las actividades, por lo que resulta esencial determinar con precisión tanto las cantidades requeridas como sus respectivos valores de mercado.

En el contexto del presente proyecto, los materiales considerados incluyen los instrumentos y equipos destinados al control y monitoreo de las variables del proceso, así como los elementos necesarios para la calibración de medidores de flujo. Adicionalmente, se contemplan los componentes asociados a la infraestructura de comunicación requerida para la supervisión y adquisición de datos del sistema.

En la figura 3-2 se presenta el detalle de las cantidades y costos de los materiales necesarios para el desarrollo del proyecto.

Items	Insumos	Cantidad	Valor unitario	Valor total	Costo en UF
1	Computador de flujo, OMNI 6000	1	\$3.000.000	\$3.000.000	75
2	Variador de frecuencia FR-D740-080-NA de Mitsubishi Electric	1	\$529.940	\$529.940	13
3	Bomba pedrollo CP 220B	1	\$1.356.892	\$1.356.892	34
4	Transmisor de presión rosemount 3051	1	\$1.505.338	\$1.505.338	38
5	Transmisor de flujo proline promass 84f	1	\$1.905.360	\$1.905.360	48
6	Transmisor de temperatura rosemount 3144p	1	\$1.379.116	\$1.379.116	35
7	Pantalla HMI Siemens SIMATIC KTP700 Basic.	1	\$1.292.080	\$1.292.080	32
8	Pasarela Serial RS485 a Ethernet Modbus	1	\$79.338	\$79.338	2
9	Fuente de poder de 220(v) a 24(v).	1	\$31.000	\$31.000	1
10	Válvula ON-OFF.	1	\$700.000	\$700.000	18
11	Válvula de control Cla-Val CPC 138.	1	\$1.350.000	\$1.350.000	34
12	Válvulas de bola manual	8	\$107.715	\$861.720	22
			PESO CHILENO		VALOR EN UF
Valor neto			\$13.236.779		351

Fuente: Elaboración propia en Excel.

Figura 3-2 Costos de materiales.

3.3 COSTOS DE MANO DE OBRA

La mano de obra corresponde al esfuerzo físico y mental aplicado por el personal durante la ejecución de las actividades necesarias para la materialización de un proyecto. En el ámbito empresarial, este concepto se asocia al costo total derivado de la participación de los trabajadores en las distintas etapas del proceso.

En el presente proyecto, las actividades han sido distribuidas entre distintos perfiles de trabajo, abarcando las etapas de diseño, montaje y puesta en marcha de los sistemas, así como la integración de sus componentes para cumplir con los requisitos establecidos.

La evaluación de la mano de obra se realiza en función de la cantidad de horas-hombre (HH) requeridas para el desarrollo de cada actividad. El detalle de estas se presenta en la figura 3-3. Posteriormente, se asigna el valor monetario correspondiente a cada trabajador según su función.

Tarea del proceso	Encargado	HORAS DE TRABAJO
Antecedentes generales sobre las limitaciones del control manual	INGENIERO	6
Análisis de soluciones y requerimientos técnicos	INGENIERO	8
Especificación y selección de hardware del proyecto	INGENIERO	40
Elaboración de diagrama P&ID del sistema	INGENIERO	9
programación de control	INGENIERO	12
Gestión de adquisiciones y contratación de recursos	INGENIERO	25
Pruebas y documentación final del proyecto	INGENIERO	40
	HORAS HOMBRE	140
Retiro de instalación existente	TÉCNICO	16
Montaje de equipos y sistema de control del proyecto	TÉCNICO	48
	HORAS HOMBRE	64

	HORAS DE TRABAJO	PRECIO HORAS HOMBRE	VALOR FINAL
INGENIERO	140	\$35.000	\$4.900.000
TÉCNICO	64	\$18.000	\$1.152.000
PRECIO TOTAL	PESO CHILENO	PRECIO EN UF	
	\$6.052.000	152	

Fuente: Elaboración propia en Excel.

Figura 3-3 Valor de horas hombre.

3.4 COSTOS TOTALES

El costo total del proyecto se calcula a partir del costo base, el cual considera la suma de los materiales y la mano de obra (horas-hombre), incluyendo los impuestos correspondientes. A este monto se le agrega un porcentaje adicional por concepto de imprevistos, con el objetivo de cubrir posibles variaciones o gastos no considerados durante la ejecución.

De esta forma, se obtiene un valor más realista de la inversión total requerida para el proyecto. En la figura 3-7 se presenta el detalle de estos costos, junto con el total general, expresado tanto en pesos chilenos como en unidades de fomento (UF), lo que permite una mejor referencia económica en el tiempo.

DETALLES	VALOR PESOS CHILENOS	VALOR EN UF
MATERIALES	\$13.990.784	351.17
MANO DE OBRA	\$6.052.000	152.00
MANTENCIÓN	\$5.000.000	125.50
TOTAL+IVA	\$25.042.784	628.57
TOTAL NETO	\$20.042.784	503.07
IMPREVISTOS 20% NETO	\$4.008.557	100.61
TOTAL GENERAL	\$29.051.341	729.18

Fuente: Elaboración propia en Excel.

Figura 3-4 Costos totales del proyecto.

3.5 INCREMENTO DE EFICIENCIA DEL PROCESO

El análisis cuantitativo demuestra que la implementación del proceso de calibración automatizada genera beneficios significativos en términos de productividad y eficiencia. Permite calibrar un mayor número de instrumentos en menor tiempo, optimizando el uso de los recursos humanos y técnicos, y reduciendo la carga laboral. Asimismo, la mayor velocidad y precisión del método automatizado mejora la calidad y consistencia de las calibraciones, disminuyendo errores y retrabajos. En conjunto, el proyecto fortalece la competitividad y sostenibilidad del proceso, justificando su adopción en entornos industriales.

Se consideran las siguientes premisas para los cálculos:

- Jornada laboral diaria $t_{jornada} = 8$ horas
- Días laborales por semana $d_{semana} = 5$ días
- Días laborales por mes $d_{mes} = 22$ días
- Meses laborales por año $m_{año} = 12$ meses
- Tiempo por calibración manual mínimo $t_{man,min} = 3$ h/instrumento
- Tiempo por calibración manual máximo $t_{man,max} = 6$ h/instrumento
- Tiempo por calibración automatizada $t_{auto} = 1,2$ h/instrumento
- Licencias médicas = 5 días
- Feriados = 10 días
- Vacaciones = 15 días
- Mantención = 4 días

En el proceso manual de calibración, el tiempo requerido por instrumento varía entre 3 y 6 horas, dependiendo de las condiciones de operación. En el caso más favorable, con una duración de 3 horas por instrumento, es posible calibrar hasta 2 instrumentos dentro de una jornada laboral de

8 horas. Sin embargo, en condiciones menos favorables, donde el proceso se extiende hasta 6 horas por instrumento, solo es posible calibrar 1 instrumento en el mismo periodo de tiempo.

3.5.1 Número de instrumentos calibrados por día

$$\text{Nº instrumento por día} = \frac{\text{Hora jornada laboral}}{\text{Tiempo calibración}}$$

Proceso manual de 3 horas:

$$\text{Nº instrumento por día} = \frac{8}{3} = 2,67 \approx \textbf{Máximo 2 instrumentos/día}$$

Proceso manual de 6 horas:

$$\text{Nº instrumento por día} = \frac{8}{6} = 1,33 \approx \textbf{Mínimo 1 instrumentos/día}$$

Proceso automatizado:

$$\text{Nº instrumento por día} = \frac{8}{1,2} = 6,67 \approx \textbf{6 instrumentos/día}$$

3.5.2 Número de instrumentos calibrados al mes

$\text{Nº instrumentos calibrado por mes} = \text{Nº instrumento po día} \times \text{dias de trabajo al mes}$

Manual mínimo:

$$\text{Nº máximo calibrado por mes} = 2 \times 20 = \textbf{40 instrumentos/mes}$$

Manual máximo:

$$\text{Nº mínimo calibrado por mes} = 1 \times 20 = \textbf{20 instrumentos/mes}$$

Automatizado:

$$\text{Nº estimado calibrado por mes} = 6 \times 20 = \textbf{120 instrumentos/mes}$$

3.5.3 Número de instrumentos calibrados al año

$$\text{N}^\circ \text{ instrumentos calibrados por año} = \text{N}^\circ \text{ de instrumentos por mes} \times 12 \times 0,87$$

Manual máximo:

$$\text{N}^\circ \text{ máximo de calibrados por año} = 40 \times 12 \times 0,87 = \text{Máximo } 417 \text{ instrumentos/año}$$

Manual mínimo:

$$\text{N}^\circ \text{ mínimo de calibrados por año} = 22 \times 12 \times 0,87 = \text{Mínimo } 200 \text{ instrumentos/año}$$

Automatizado:

$$\text{N}^\circ \text{ estimado de calibrados por año} = 120 \times 12 \times 0,87 = 1.252 \text{ instrumentos/año}$$

3.5.4 Total, de horas dedicadas al mes por el proceso de calibración

$$\text{Horas dedicadas al mes} = \text{N}^\circ \text{ instrumentos mes} \times \text{tiempo calibración}$$

Manual mínimo:

$$\text{Horas dedicadas al mes} = 44 \times 3 = 132 \text{ horas/mes}$$

Manual máximo:

$$\text{Horas dedicadas al mes} = 22 \times 6 = \mathbf{132 \text{ horas/mes}}$$

Automatizado:

$$\text{Horas dedicadas al mes} = 132 \times 1,2 = \mathbf{158,4 \text{ horas/mes}}$$

3.5.5 Total, de horas anual por proceso de calibración

$$\text{Horas calibración por año} = \text{N}^\circ \text{ de instrumentos al año} \times \text{Tiempo calibración}$$

Manual mínimo:

$$\text{Horas calibración por año} = 528 \times 3 = \mathbf{1.584 \text{ horas/año}}$$

Manual máximo:

$$\text{Horas calibración por año} = 264 \times 6 = \mathbf{1.584 \text{ horas/año}}$$

Automatizado:

$$\text{Horas calibración por año} = 1,584 \times 1.2 = \mathbf{1.900 \text{ horas/año}}$$

BENEFICIOS AL IMPLEMENTAR LA AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO				
CONCEPTO	PROCESO MANUAL (3 HORAS)	PROCESO MANUAL (6 HORAS)	PROCESO AUTOMATIZADO (1.2HORAS)	BENEFICIOS DEL PROYECTO
TIEMPO POR INSTRUMENTO	3 HORAS	6 HORAS	1,2 HORAS	ENTRE 1,4 HORAS HASTA 4,4 HORAS
OPERADORES REQUERIDOS	2 OPERADOR	2 OPERADOR	1 OPERADOR	HASTA UN 50% MENOS EN PERSONAL
INSRUMENTOS CALIBRADOS POR DÍA	2	1	6	HASTA 6 VECES MAS DE PRODUCCIÓN
INSRUMENTOS CALIBRADOS POR SEMANA	10	5	30	PRODUCTIVIDAD DE 3 A 6 VECES MÁS
INSRUMENTOS CALIBRADOS POR MES	40	20	120	PRODUCTIVIDAD DE 3 A 6 VECES MÁS
INSRUMENTOS CALIBRADOS POR AÑO	417	200	1.252	PRODUCTIVIDAD DE 3 A 6 VECES MÁS

Fuente: Elaboración propia en Excel.

Figura 3-5 Beneficios al implementar la automatización en el sistema.

3.5.6 Ahorro de horas-hombre

En la figura 3-6 se observa el análisis del ahorro en horas-hombre evidencia el impacto positivo de la automatización sobre la eficiencia operativa en el proceso de calibración de instrumentos. En comparación con el método manual, que requiere la participación simultánea de dos operadores y un tiempo considerable para completar cada calibración, el sistema automatizado reduce significativamente la dedicación de tiempo al concentrar la tarea en un único operador y disminuir la duración de cada proceso. Esta optimización no solo implica un ahorro directo en los costos de mano de obra, sino que también permite una utilización más estratégica del personal, liberando recursos humanos para otras actividades críticas dentro del área de mantenimiento y control. De este modo, se mejora la productividad general del sistema, se minimizan los tiempos improductivos y se incrementa la capacidad de calibrar un mayor número de instrumentos en periodos iguales, generando beneficios operativos y económicos sustanciales.

HORAS-HOMBRE UTILIZADAS PARA EL PROCESO			
CONCEPTO	PROCESO MANUAL (3 HORAS)	PROCESO MANUAL (6 HORAS)	PROCESO AUTOMATIZADO (1.2 HORAS)
HORAS-HOMBRE POR INSTRUMENTO	3 HORAS POR CADA OPERADOR	6 POR CADA OPERADOR	1,2 HORAS (POR SOLO 1 OPERADOR)
HORAS-HOMBRE MENSUAL	120 HORAS (60 HORAS POR CADA OPERADOR)	120 HORAS (60 HORAS POR CADA OPERADOR)	168 HORAS (POR SOLO 1 OPERADOR)
HORAS-HOMBRE ANUAL	1.251 HORAS (625,5 HORAS POR CADA OPERADOR)	1.200 HORAS (600 HORAS POR CADA OPERADOR)	1.753 HORAS (POR SOLO 1 OPERADOR)
		AHORRO ANUAL EN HORAS-HOMBRE	
		553 HORAS-HOMBRE MENOS	

Fuente: Elaboración propia en Excel.

Figura 3-6 Horas hombre utilizadas para el proceso.

3.5.7 Reducción de costos en horas-hombre

El análisis del ahorro monetario asociado a las horas-hombre evidencia el impacto económico de la implementación del sistema automatizado en el proceso de calibración. A partir de un valor de \$9.659 por hora-hombre, se determinaron los costos mensuales y anuales tanto para el proceso manual, en sus escenarios mínimo y máximo, como para el proceso automatizado. En el escenario de menor carga operativa, el proceso manual presenta un costo anual inferior al automatizado, generando una diferencia de \$3.059.971, lo cual se explica por la menor cantidad de horas

trabajadas en dicho caso. No obstante, al considerar el escenario de máxima operación, el sistema automatizado demuestra una ventaja significativa, alcanzando un ahorro anual de \$12.239.785 en comparación con el proceso manual. Estos resultados evidencian que la automatización resulta especialmente eficiente en condiciones de alta demanda, donde se optimizan los recursos, se reducen los costos operacionales y se incrementa la productividad del proceso.

Datos:

- Valor Horas-hombre: \$9.659
- Tiempo mensual del proceso mínimo de calibración: 132 horas (66 horas por operador)
- Tiempo mensual del proceso máximo de calibración: 264 horas (132 horas por operador)
- Tiempo mensual del proceso automatizado de calibración: 158,4 horas por el operador

$$\text{Costo total mensual}_{\text{Proceso de 132 horas mensual}} = \$9.659 \times 132 = \$1.274.988$$

$$\text{Costo total mensual}_{\text{Proceso de 264 horas mensual}} = \$9.659 \times 264 = \$2.549.976$$

$$\text{Costo total mensual}_{\text{Proceso de 158,2 horas mensual}} = \$9.659 \times 158,2 = \$1.528.054$$

- Tiempo anual del proceso mínimo de calibración: 1.584 horas (792 horas por operador)
- Tiempo anual del proceso máximo de calibración: 3.168 horas (1.584 horas por operador)
- Tiempo anual del proceso automatizado de calibración: 1.900,8 horas por el operador

$$\text{Costo total anual}_{\text{Proceso de 1.584 horas anual}} = \$9.659 \times 1.584 = \$15.299.856$$

$$\text{Costo total anual}_{\text{Proceso de 3.168 horas anual}} = \$9.659 \times 3.168 = \$30.599.712$$

$$\text{Costo total anual}_{\text{Proceso de 1.900,8 horas anual}} = \$9.659 \times 1.900,8 = \$18.359.827$$

$$\text{Ahorro anual}_{\text{Proceso manual mínimo vs automatizado}} = 15.299.856 - 18.359.927$$

$$= \$ - 3.059.971$$

$$\text{Ahorro anual}_{\text{Proceso manual máximo vs automatizado}} = 30.599.712 - 18.359.927$$

$$= \$ 12.239.785$$

3.5.8 Ingresos por calibración de medidores de flujos

La evaluación de los ingresos por calibración en función de la cantidad de instrumentos procesados diariamente permite evidenciar el impacto directo de la automatización en la rentabilidad del sistema. En escenarios de baja producción, como un instrumento por día, no se observan diferencias entre el proceso manual y el automatizado, ya que ambos generan ingresos equivalentes. Sin embargo, a medida que aumenta la cantidad de calibraciones diarias, el sistema automatizado demuestra una ventaja significativa, al ser capaz de incrementar progresivamente el número de instrumentos procesados sin aumentar proporcionalmente los recursos utilizados. Esto se traduce en un aumento sustancial de los ingresos mensuales y anuales, alcanzando valores considerablemente superiores al proceso manual en escenarios de mayor demanda, donde este último se ve limitado por los tiempos de operación. De esta manera, la automatización no solo optimiza la eficiencia del proceso, sino que también maximiza el potencial de generación de ingresos, consolidándose como una solución más rentable y escalable en el tiempo.

INGRESOS POR CALIBRACIÓN (1 INSTRUMENTO AL DÍA)					
PROCESO	TOTAL DE INSTRUMENTOS AL MES	VALOR DE CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTO	INGRESO MENSUAL POR CALIBRACIONES	INGRESO ANUAL POR CALIBRACIONES PESOS CHILENOS	INGRESO ANUAL POR CALIBRACIONES EN UF
MANUAL 3 HORAS	20	\$120.000	\$2.400.000	\$28.800.000	723
MANUAL 6 HORAS	20	\$120.000	\$2.400.000	\$28.800.000	723
AUTOMATIZADO	20	\$120.000	\$2.400.000	\$28.800.000	723
INGRESOS POR CALIBRACIÓN (2 INSTRUMENTOS AL DÍA)					
PROCESO	TOTAL DE INSTRUMENTOS AL MES	VALOR DE CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTO	INGRESO MENSUAL POR CALIBRACIONES	INGRESO ANUAL POR CALIBRACIONES PESOS CHILENOS	INGRESO ANUAL POR CALIBRACIONES EN UF
MANUAL 3 HORAS	40	\$120.000	\$4.800.000	\$57.600.000	1.446
MANUAL 6 HORAS	20	\$120.000	\$2.400.000	\$28.800.000	723
AUTOMATIZADO	40	\$120.000	\$4.800.000	\$57.600.000	1.446
INGRESOS POR CALIBRACIÓN (3 INSTRUMENTOS AL DÍA)					
PROCESO	TOTAL DE INSTRUMENTOS AL MES	VALOR DE CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTO	INGRESO MENSUAL POR CALIBRACIONES	INGRESO ANUAL POR CALIBRACIONES PESOS CHILENOS	INGRESO ANUAL POR CALIBRACIONES EN UF
MANUAL 3 HORAS	40	\$120.000	\$4.800.000	\$57.600.000	1.446
MANUAL 6 HORAS	20	\$120.000	\$2.400.000	\$28.800.000	723
AUTOMATIZADO	60	\$120.000	\$7.200.000	\$86.400.000	2.169

Fuente: Elaboración propia en Excel.

Figura 3-7 Ingresos por calibración de 1,2,3 instrumentos.

INGRESOS POR CALIBRACIÓN (4 INSTRUMENTOS AL DÍA)					
PROCESO	TOTAL DE INSTRUMENTOS AL MES	VALOR DE CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTO	INGRESO MENSUAL POR CALIBRACIONES	INGRESO ANUAL POR CALIBRACIONES PESOS CHILENOS	INGRESO ANUAL POR CALIBRACIONES EN UF
MANUAL 3 HORAS	40	\$120.000	\$4.800.000	\$57.600.000	1.446
MANUAL 6 HORAS	20	\$120.000	\$2.400.000	\$28.800.000	723
AUTOMATIZADO	80	\$120.000	\$9.600.000	\$115.200.000	2.892
INGRESOS POR CALIBRACIÓN (5 INSTRUMENTOS AL DÍA)					
PROCESO	TOTAL DE INSTRUMENTOS AL MES	VALOR DE CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTO	INGRESO MENSUAL POR CALIBRACIONES	INGRESO ANUAL POR CALIBRACIONES PESOS CHILENOS	INGRESO ANUAL POR CALIBRACIONES EN UF
MANUAL 3 HORAS	40	\$120.000	\$4.800.000	\$57.600.000	1.446
MANUAL 6 HORAS	20	\$120.000	\$2.400.000	\$28.800.000	723
AUTOMATIZADO	100	\$120.000	\$12.000.000	\$144.000.000	3.614
INGRESOS POR CALIBRACIÓN (6 INSTRUMENTOS AL DÍA)					
PROCESO	TOTAL DE INSTRUMENTOS AL MES	VALOR DE CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTO	INGRESO MENSUAL POR CALIBRACIONES	INGRESO ANUAL POR CALIBRACIONES PESOS CHILENOS	INGRESO ANUAL POR CALIBRACIONES EN UF
MANUAL 3 HORAS	40	\$120.000	\$4.800.000	\$57.600.000	1.446
MANUAL 6 HORAS	20	\$120.000	\$2.400.000	\$28.800.000	723
AUTOMATIZADO	120	\$120.000	\$14.400.000	\$172.800.000	4.337

Fuente: Elaboración propia en Excel.

Figura 3-8 Ingresos por calibración de 4,5,6 instrumentos.

3.6 FLUJO DE CAJA

Con el propósito de evaluar la viabilidad económica del proyecto, se desarrolla un flujo de caja que permite analizar los ingresos, egresos y beneficios asociados a la implementación del sistema automatizado a lo largo de un horizonte de tiempo determinado. En este análisis se consideran los ingresos generados por los servicios de calibración, así como la reducción de costos operacionales derivada de la optimización de las horas-hombre, junto con los egresos correspondientes a la operación del sistema. Esta herramienta permite determinar indicadores financieros relevantes, tales como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión, facilitando la toma de decisiones respecto a la conveniencia económica del proyecto. A continuación, se presentan los distintos escenarios de flujo de caja en función de la cantidad de calibraciones realizadas.

En la figura 3-9 se observa el primer escenario, la Tasa Interna de Retorno (TIR) alcanza un nivel moderado, lo que indica que el proyecto genera flujos de caja positivos de manera constante pero gradual. Esto refleja que la inversión se recupera de forma progresiva, ofreciendo estabilidad financiera bajo condiciones conservadoras y asegurando que los recursos utilizados se empleen de manera eficiente sin asumir riesgos elevados. La TIR moderada evidencia que el sistema

automatizado permite mantener control sobre los costos operativos y optimizar los tiempos de proceso, garantizando beneficios económicos sostenibles a lo largo del horizonte de análisis.

	0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
N° de ventas	0	209	209	209	209	209
Ingreso por ventas		626	626	626	626	626
Ahorro Horas Hombre		307	307	307	307	307
Total Ingresos		626	626	626	626	626
Valor del servicio		3	3	3	3	3
Costo del proyecto	-729					
Otros gastos		-125	-125	-125	-125	-125
Mantenimiento		-100	-100	-100	-100	-100
Sueldo		-461	-461	-461	-461	-461
Costos operacionales brutos		-687	-687	-687	-687	-687
Ahorro aplicado a costos		307	307	307	307	307
total de egresos		-379	-379	-379	-379	-379
Flujo de Caja descontado	-729	221	197	176	157	140
Flujo de Caja neto	-729	247	247	247	247	247
Flujo de Caja acumulado	-729	-482	-235	12	259	506
TMAR	12%	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
VAN	162	Precio	3	100%	3	
TIR	21%	Cantidad	20	100%	20	
PAYBACK	Año 3					

Fuente: Elaboración propia en Excel.

Figura 3-9 Flujo de caja anual considerando la calibración de 209 instrumento al año.

En la figura 3-10 se observa el segundo escenario, la TIR presenta un incremento significativo, lo que se atribuye a una mayor eficiencia en la operación del sistema automatizado y a un aprovechamiento más eficaz de los recursos disponibles. Esta variación indica que los flujos de caja se generan de manera más rápida y consistente, acortando el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial. La TIR más elevada demuestra que el proyecto produce un mayor retorno financiero frente a las condiciones evaluadas, evidenciando la capacidad del sistema para aumentar la productividad y maximizar los beneficios económicos de la automatización.

	0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
N° de ventas	0	261	261	261	261	261
Ingreso por ventas		783	783	783	783	783
Ahorro Horas Hombre		307	307	307	307	307
Total Ingresos		783	783	783	783	783
Valor del servicio		3	3	3	3	3
Costo del proyecto	-729					
Otros gastos		-151	-151	-151	-151	-151
Mantenimiento		-125	-125	-125	-125	-125
Sueldo		-461	-461	-461	-461	-461
Costos operacionales brutos		-737	-737	-737	-737	-737
Ahorro aplicado a costos		307	307	307	307	307
total de egresos		-430	-430	-430	-430	-430
Flujo de Caja descontado	-729	316	282	252	225	201
Flujo de Caja neto	-729	353	353	353	353	353
Flujo de Caja acumulado	-729	-376	-22	331	685	1038
TMAR	12%	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
VAN	545	Precio	3	100%	3	
TIR	39%	Cantidad	25	100%	25	
PAYBACK	Año 3					

Fuente: Elaboración propia en Excel.

Figura 3-10 Flujo de caja anual considerando la calibración de un 25% más de servicios anual.

En la figura 3-11 se observa el escenario de disminución del 10% en los servicios anuales, la Tasa Interna de Retorno (TIR) presenta una reducción respecto al escenario base, lo que se atribuye a la menor generación de ingresos producto de la disminución en la cantidad de calibraciones realizadas. Esta variación indica que los flujos de caja se generan de forma más lenta y con menor magnitud, extendiendo el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial. A pesar de esta disminución, la TIR se mantiene por sobre la tasa mínima aceptable de retorno, lo que demuestra que el proyecto continúa siendo rentable bajo condiciones menos favorables, aunque con un menor nivel de desempeño económico.

	0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
N° de ventas	0	188	188	188	188	188
Ingreso por ventas		564	564	564	564	564
Ahorro Horas Hombre		307	307	307	307	307
Total Ingresos		564	564	564	564	564
Valor del servicio		3	3	3	3	3
Costo del proyecto	-729					
Otros gastos		-113	-113	-113	-113	-113
Mantenimiento		-88	-88	-88	-88	-88
Sueldo		-461	-461	-461	-461	-461
Costos operacionales brutos		-662	-662	-662	-662	-662
Ahorro aplicado a costos		307	307	307	307	307
total de egresos		-354	-354	-354	-354	-354
Flujo de Caja descontado	-729	187	167	149	133	119
Flujo de Caja neto	-729	210	210	210	210	210
Flujo de Caja acumulado	-729	-520	-310	-101	109	319
TMAR	12%	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
VAN	26	Precio	3	100%	3	
TIR	13%	Cantidad	18	100%	18	
PAYBACK	Año 4					

Fuente: Elaboración propia en Excel.

Figura 3-11 Flujo de caja anual con un 10% menos de servicios anual.

3.6.1 Beneficio adicional

La implementación del sistema automatizado permite aumentar la cantidad de calibraciones realizadas, generando un beneficio económico adicional respecto al proceso manual.

Este beneficio se determina a partir de la utilidad neta por servicio y la cantidad de servicios adicionales que el sistema automatizado permite ejecutar. La utilidad por servicio se obtiene como un porcentaje del valor total de calibración, considerando los costos operativos asociados.

A continuación, se presenta el cálculo correspondiente:

- Precio del servicio = \$120.000
- Utilidad = 40%
- Utilidad = $\$120.000 \times 0,4 = \$48.000$
- Utilidad = \$48.000
- Servicios adicionales = (Cantidad con proyecto) – (Cantidad sin proyecto) =
Total adicional

- Servicios adicionales = $38 - 22 = 16$
- Beneficio mensual = Utilidad $\times$ Servicios adicionales
- Beneficio mensual = $\$48.000 \times 16 = \$768.000$
- Valor en uf = $\frac{768.000}{39.841} = 19 \text{ uf}$

En consecuencia, la automatización permite generar un ingreso adicional mensual de \$768.000. Este resultado demuestra que el principal beneficio del sistema es el aumento de la capacidad de servicio de calibración, lo que impacta directamente en la rentabilidad del proceso.

3.7 Análisis de Sensibilidad

En la figura 3-12 se observa un análisis de sensibilidad aplicado al flujo de caja del proyecto, donde se evalúa la variación del valor presente neto (VAN) en función de dos variables clave, la cantidad de servicios y el valor unitario del servicio. Este análisis permite identificar cómo cambios porcentuales en estos parámetros impactan directamente en la rentabilidad del proyecto, evidenciando escenarios de mayor o menor beneficio económico. La matriz de resultados, que incluye valores positivos y negativos del VAN, facilita la identificación de umbrales críticos y márgenes de seguridad, contribuyendo a la toma de decisiones fundamentadas y a la mitigación de riesgos financieros. Así, se demuestra la importancia de monitorear y controlar tanto la demanda como la fijación del precio del servicio para asegurar la viabilidad y sostenibilidad del proyecto en distintas condiciones de mercado.

		VALOR DEL SERVICIO																
		162	160%	150%	140%	130%	120%	110%	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
CANTIDAD	160%	3.684	3.323	2.961	2.600	2.239	1.878	1.516	1.155	794	432	71	-290	-651	-1.013	-1.374	-1.735	
	150%	3.323	2.984	2.645	2.307	1.968	1.629	1.291	952	613	274	-64	-403	-742	-1.080	-1.419	-1.758	
	140%	2.961	2.645	2.329	2.013	1.697	1.381	1.065	749	432	116	-200	-516	-832	-1.148	-1.464	-1.780	
	130%	2.600	2.307	2.013	1.720	1.426	1.132	839	545	252	-42	-335	-629	-922	-1.216	-1.509	-1.803	
	120%	2.239	1.968	1.697	1.426	1.155	884	613	342	71	-200	-471	-742	-1.013	-1.284	-1.555	-1.826	
	110%	1.878	1.629	1.381	1.132	884	636	387	139	-109	-358	-606	-855	-1.103	-1.351	-1.600	-1.848	
	100%	1.516	1.291	1.065	839	613	387	162	-64	-290	-516	-742	-968	-1.193	-1.419	-1.645	-1.871	
	90%	1.155	952	749	545	342	139	-64	-268	-471	-674	-877	-1.080	-1.284	-1.487	-1.690	-1.893	
	80%	794	613	432	252	71	-109	-290	-471	-651	-832	-1.013	-1.193	-1.374	-1.555	-1.735	-1.916	
	70%	432	274	116	-42	-200	-358	-516	-674	-832	-990	-1.148	-1.306	-1.464	-1.622	-1.780	-1.938	
	60%	71	-64	-200	-335	-471	-606	-742	-877	-1.013	-1.148	-1.284	-1.419	-1.555	-1.690	-1.826	-1.961	
	50%	-290	-403	-516	-629	-742	-855	-968	-1.080	-1.193	-1.306	-1.419	-1.532	-1.645	-1.758	-1.871	-1.984	
	40%	-651	-742	-832	-922	-1.013	-1.103	-1.193	-1.284	-1.374	-1.464	-1.555	-1.645	-1.735	-1.826	-1.916	-2.006	
	30%	-1.013	-1.080	-1.148	-1.216	-1.284	-1.351	-1.419	-1.487	-1.555	-1.622	-1.690	-1.758	-1.826	-1.893	-1.961	-2.029	
	20%	-1.374	-1.419	-1.464	-1.509	-1.555	-1.600	-1.645	-1.690	-1.735	-1.780	-1.826	-1.871	-1.916	-1.961	-2.006	-2.051	
	10%	-1.735	-1.758	-1.780	-1.803	-1.826	-1.848	-1.871	-1.893	-1.916	-1.938	-1.961	-1.984	-2.006	-2.029	-2.051	-2.074	

Fuente: Elaboración propia en Excel.

Figura 3-12 Análisis de sensibilidad de 209 instrumento calibrados al año.

En la figura 3-13 se observa un análisis de sensibilidad aplicado al flujo de caja del proyecto, donde se evalúa la variación del valor presente neto (VAN) en función de dos variables clave, la cantidad de servicios y el valor unitario del servicio. Este análisis permite identificar cómo cambios porcentuales en estos parámetros impactan directamente en la rentabilidad del proyecto, evidenciando escenarios de mayor o menor beneficio económico. La matriz de resultados, que incluye valores positivos y negativos del VAN, facilita la identificación de umbrales críticos y márgenes de seguridad, contribuyendo a la toma de decisiones fundamentadas y a la mitigación de riesgos financieros. Así, se demuestra la importancia de monitorear y controlar tanto la demanda como la fijación del precio del servicio para asegurar la viabilidad y sostenibilidad del proyecto en distintas condiciones de mercado.

		VALOR DEL SERVICIO															
CANTIDAD DE INSTRUMENTOS	545	160%	150%	140%	130%	120%	110%	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
	180%	4.948	4.497	4.045	3.593	3.142	2.690	2.239	1.787	1.335	884	432	-19	-471	-923	-1.374	-1.826
	150%	4.497	4.073	3.650	3.226	2.803	2.380	1.956	1.533	1.110	686	263	-161	-584	-1.007	-1.431	-1.854
	140%	4.045	3.650	3.255	2.860	2.464	2.069	1.674	1.279	884	489	93	-302	-697	-1.092	-1.487	-1.882
	130%	3.593	3.226	2.860	2.493	2.126	1.759	1.392	1.025	658	291	-76	-443	-810	-1.177	-1.544	-1.911
	120%	3.142	2.803	2.464	2.126	1.787	1.448	1.110	771	432	93	-245	-584	-923	-1.261	-1.600	-1.939
	110%	2.690	2.380	2.069	1.759	1.448	1.138	827	517	206	-104	-415	-725	-1.036	-1.346	-1.657	-1.967
	100%	2.239	1.956	1.674	1.392	1.110	827	545	263	-19	-302	-584	-866	-1.148	-1.431	-1.713	-1.995
	90%	1.787	1.533	1.279	1.025	771	517	263	9	-245	-499	-753	-1.007	-1.261	-1.515	-1.769	-2.023
	80%	1.335	1.110	884	658	432	206	-19	-245	-471	-697	-923	-1.148	-1.374	-1.600	-1.826	-2.052
70%	884	686	489	291	93	-104	-302	-499	-697	-894	-1.092	-1.290	-1.487	-1.685	-1.882	-2.080	
60%	432	263	93	-76	-245	-415	-584	-753	-923	-1.092	-1.261	-1.431	-1.600	-1.769	-1.939	-2.108	
50%	-19	-161	-302	-443	-584	-725	-866	-1.007	-1.148	-1.290	-1.431	-1.572	-1.713	-1.854	-1.995	-2.136	
40%	-471	-584	-697	-810	-923	-1.036	-1.148	-1.261	-1.374	-1.487	-1.600	-1.713	-1.826	-1.939	-2.052	-2.165	
30%	-923	-1.007	-1.092	-1.177	-1.261	-1.346	-1.431	-1.515	-1.600	-1.685	-1.769	-1.854	-1.939	-2.023	-2.108	-2.193	
20%	-1.374	-1.431	-1.487	-1.544	-1.600	-1.657	-1.713	-1.769	-1.826	-1.882	-1.939	-1.995	-2.052	-2.108	-2.165	-2.221	
10%	-1.826	-1.854	-1.882	-1.911	-1.939	-1.967	-1.995	-2.023	-2.052	-2.080	-2.108	-2.136	-2.165	-2.193	-2.221	-2.249	

Fuente: Elaboración propia en Excel

Figura 3-13 Análisis de sensibilidad para un aumento de calibraciones del 25% anual.

En la figura 3-14 se observa el análisis de sensibilidad aplicado al flujo de caja del proyecto bajo el escenario de disminución del 10% en la cantidad de servicios. En este contexto, se evalúa la variación del Valor Actual Neto (VAN) en función de la reducción en la demanda y del valor unitario del servicio. Los resultados evidencian una disminución en la rentabilidad del proyecto, reflejada en menores valores de VAN, aunque estos se mantienen positivos dentro de ciertos rangos. La matriz de resultados permite identificar los límites en los cuales el proyecto sigue siendo viable, así como los escenarios en los que podría verse comprometida su rentabilidad. De esta manera, se destaca la importancia de mantener un nivel adecuado de demanda y una

correcta estrategia de precios, con el fin de resguardar la sostenibilidad económica del proyecto frente a condiciones menos favorables.

CANTIDAD DE INSTRUMENTOS		VALOR DEL SERVICIO															
	26	160%	150%	140%	130%	120%	110%	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
	160%	3.196	2.871	2.546	2.221	1.896	1.571	1.246	920	595	270	-55	-380	-705	-1.031	-1.356	-1.681
	150%	2.871	2.566	2.262	1.957	1.652	1.347	1.042	737	433	128	-177	-482	-787	-1.092	-1.396	-1.701
	140%	2.546	2.262	1.977	1.693	1.408	1.124	839	555	270	-14	-299	-583	-868	-1.153	-1.437	-1.722
	130%	2.221	1.957	1.693	1.428	1.164	900	636	372	107	-157	-421	-685	-949	-1.213	-1.478	-1.742
	120%	1.896	1.652	1.408	1.164	920	676	433	189	-55	-299	-543	-787	-1.031	-1.274	-1.518	-1.762
	110%	1.571	1.347	1.124	900	676	453	229	6	-218	-441	-665	-888	-1.112	-1.335	-1.559	-1.782
	100%	1.246	1.042	839	636	433	229	26	-177	-380	-583	-787	-990	-1.193	-1.396	-1.600	-1.803
	90%	920	737	555	372	189	6	-177	-380	-543	-726	-909	-1.092	-1.274	-1.457	-1.640	-1.823
	80%	595	433	270	107	-55	-218	-380	-543	-705	-868	-1.031	-1.193	-1.356	-1.518	-1.681	-1.843
	70%	270	128	-14	-157	-299	-441	-583	-726	-868	-1.010	-1.153	-1.295	-1.437	-1.579	-1.722	-1.864
	60%	-55	-177	-299	-421	-543	-665	-787	-909	-1.031	-1.153	-1.274	-1.396	-1.518	-1.640	-1.762	-1.884
	50%	-380	-482	-583	-685	-787	-888	-990	-1.092	-1.193	-1.295	-1.396	-1.498	-1.600	-1.701	-1.803	-1.904
	40%	-705	-787	-868	-949	-1.031	-1.112	-1.193	-1.274	-1.356	-1.437	-1.518	-1.600	-1.681	-1.762	-1.843	-1.925
	30%	-1.031	-1.092	-1.153	-1.213	-1.274	-1.335	-1.396	-1.457	-1.518	-1.579	-1.640	-1.701	-1.762	-1.823	-1.884	-1.945
20%	-1.356	-1.396	-1.437	-1.478	-1.518	-1.559	-1.600	-1.640	-1.681	-1.722	-1.762	-1.803	-1.843	-1.884	-1.925	-1.965	
10%	-1.681	-1.701	-1.722	-1.742	-1.762	-1.782	-1.803	-1.823	-1.843	-1.864	-1.884	-1.904	-1.925	-1.945	-1.965	-1.986	

Fuente: Elaboración propia en Excel

Figura 3-14 Análisis de sensibilidad para una disminución de calibraciones del 10% anual.

CONCLUSIONES

En síntesis, el presente proyecto analiza la transición de un proceso de calibración manual hacia un esquema automatizado, destacando los beneficios potenciales asociados a esta transformación. Se plantea que la automatización permitiría mantener un caudal estable durante la operación, asegurando que las mediciones sean consistentes y repetibles, lo que constituye un aspecto crítico para la confiabilidad de los resultados y la trazabilidad del proceso. Asimismo, se considera que un sistema automatizado podría reducir significativamente las horas-hombre requeridas para realizar las calibraciones, disminuyendo la carga de trabajo sobre el personal y permitiendo optimizar la asignación de recursos humanos dentro de la operación.

Desde el punto de vista económico, la automatización proyecta un ahorro en costos operativos al disminuir el tiempo invertido por cada calibración, lo que repercute directamente en la eficiencia del proceso y en el incremento de la capacidad de producción diaria y anual. Este ahorro también se traduce en un mejor margen de utilidad por servicio prestado, permitiendo que la organización genere mayores ingresos sin incrementar proporcionalmente los costos asociados. La reducción de intervenciones manuales no solo contribuiría a disminuir riesgos de error humano, sino que también favorecería la estandarización del proceso, reforzando la consistencia en la calidad de las mediciones y facilitando la documentación y el cumplimiento de normativas vigentes.

Además, se plantea que el uso de un sistema automatizado ofrecería la posibilidad de monitorear y controlar múltiples variables en tiempo real, como caudal, presión, temperatura y apertura de válvulas, lo que permitiría una gestión más integral y eficiente de los instrumentos de medición. Esto representaría un avance en términos de trazabilidad y control del proceso, al garantizar que todos los datos relevantes estén disponibles para su análisis y auditoría, fortaleciendo los procedimientos internos y apoyando la toma de decisiones basada en información confiable.

Finalmente, la evaluación de los beneficios proyectados evidencia que la automatización del proceso podría proporcionar una combinación de eficiencia operativa, ahorro económico y mejora en la calidad del servicio, sin comprometer el cumplimiento de la normativa aplicable. Aunque la implementación total aún no se ha realizado, el análisis realizado permite inferir que la transición hacia un proceso automatizado constituye una estrategia viable y beneficiosa, con un impacto positivo en la productividad, la trazabilidad de los instrumentos y la optimización de los recursos disponibles.

BIBLIOGRAFÍA

- ISO/IEC 17025:2017. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.
- OMNI Flow Computers, Inc. OMNI 6000/7000 Series User Guide
- Rhona. (s.f.). Variador de frecuencia 5HP 3.7kW. Recuperado el 25 de marzo de 2026, de <https://rhona.cl/producto/968/variador-de-frecuencia-5hp-37kw.html>
- Escosud. (s.f.). Productos industriales (control de procesos). Recuperado el 25 de marzo de 2026, de <https://escosud.com/productos.php?prodId=23>
- Mercado Libre. (s.f.). Arduino Uno R4 WiFi. Recuperado el 25 de marzo de 2026, de <https://www.mercadolibre.cl/arduino-uno-r4-wifi/p/MLC32626335>
- Siem Supply. (s.f.). SIMATIC HMI KTP700 Basic Panel 7". Recuperado el 25 de marzo de 2026, de <https://www.siemsupply.com.mx/00072443-simatic-hmi-ktp700-basic-panel-7>
- Altronics. (s.f.). Convertidor RS485 a Ethernet Modbus. *Recuperado el 25 de marzo de 2026*, de <https://altronics.cl/convertidor-rs485-ethernet-modbus>
- DMU. (s.f.). Fuente de poder MDR-60-24 Mean Well. *Recuperado el 25 de marzo de 2026*, de <https://dmu.cl/fuente-poder-mdr-60-24-meanwell>

- *Unox. (s.f.). Válvula de control de encendido y apagado motorizada de 2 vías. Recuperado el 25 de marzo de 2026, de <https://unox.com.tr/es/valvula-de-control-de-encendido-y-apagado-motorizada-de-2-vias/>*
- *Solcov. (s.f.). Válvula de posicionamiento motorizada 4–20 mA. Recuperado el 25 de marzo de 2026, de <https://solcov.com/producto/valvula-de-posicionamiento-motorizada-4-20-ma/>*
- *Bombas Pro Services. (s.f.). Bomba Pedrollo CP 220B 4HP 380V. Recuperado el 25 de marzo de 2026, de <https://bombasproservices.cl/producto/bomba-pedrollo-cp-220b-4hp-380v/>*
- *Autodesk. (s.f.). AutoCAD. Recuperado el 25 de marzo de 2026, de <https://www.autodesk.com/products/autocad>*
- *Arduino. (s.f.). Arduino IDE. Recuperado el 25 de marzo de 2026, de <https://www.arduino.cc/en/software>*
- *Autodesk. (s.f.). Tinkercad. Recuperado el 25 de marzo de 2026, de <https://www.tinkercad.com>*
- *Emerson. (s.f.). Manual del transmisor de temperatura Rosemount™ 3144P. Emerson Process Management.*
- *Emerson. (s.f.). Manual del transmisor de presión Rosemount 3051CD. Emerson Process Management.*
- *Endress+Hauser. (s.f.). Manual del transmisor de flujo másico Coriolis Proline Promass 84F. Endress+Hauser.*

