



**Diseño e implementación de un sistema automatizado para el proceso de calibración
“Water Draw” de la empresa METROLOGIC S.A.**

Ayala Coba, Michael Jose

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica,
Automatización y Control

Ing. Sotomayor Cárdenas, Danny Alexander, Msc.

18 de marzo del 2021



Document Information

Analyzed document	TESIS_Ayala Coba, Michael Jose.pdf (D98676051)		
Submitted	3/17/2021 6:37:00 PM		
Submitted by	DANNY ALEXANDER SOTOMAYOR CARDENAS		
Submitter email	dasotomayor@espe.edu.ec	Firmado digitalmente por DANNY ALEXANDER SOTOMAYOR CARDENAS Fecha: 2021.03.17 13:27:15 -05'00'	
Similarity	4%		
Analysis address	dasotomayor.espe@analysis.urkund.com		

Sources included in the report

W	URL: https://www.elorientec.com/articulo/la-industria-petrolera-de-ecuador/11779?gclid=E... Fetched: 3/17/2021 6:39:00 PM		1
W	URL: https://mx.omega.com/prodinfo/medidores-de-flujo.html Fetched: 3/17/2021 6:39:00 PM		1
W	URL: https://www.cenam.mx/fyv/publicaciones/probvol1.pdf Fetched: 3/17/2021 6:39:00 PM		4
W	URL: https://www.cenam.mx/fyv/publicaciones/calibraci%C3%B3n%20de%20probadores.pdf Fetched: 3/17/2021 6:39:00 PM		1



Firma:

Firmado electrónicamente por:
DANNY ALEXANDER
SOTOMAYOR CARDENAS

Sotomayor Cárdenas, Danny Alexander

DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Diseño e implementación de un sistema automatizado para el proceso de calibración “Water Draw” de la empresa METROLOGIC S.A.”** fue realizado por el señor **Ayala Coba, Michael Jose**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 17 de marzo del 2021

Firma:



Firmado electrónicamente por:
**DANNY ALEXANDER
SOTOMAYOR CARDENAS**

Sotomayor Cárdenas, Danny Alexander

C. C. 1103422471



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Ayala Coba, Michael Jose**, con cédula de ciudadanía n°1720435740, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un sistema automatizado para el proceso de calibración “Water Draw” de la empresa METROLOGIC S.A.** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 16 de marzo del 2021

Firma

Ayala Coba, Michael Jose

C.C.: 1720435740



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo **Ayala Coba, Michael Jose**, con cédula de ciudadanía n°1720435740, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un sistema automatizado para el proceso de calibración “Water Draw” de la empresa METROLOGIC S.A.** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 16 de marzo del 2021

Firma

Ayala Coba, Michael Jose

C.C.: 1720435740

Dedicatoria

Dedico este proyecto a Dios, a mi familia y a mi novia. Son aquellos que siempre me han alentado en esta larga carrera. Mis papás que siempre han estado apoyándome y sosteniéndome incondicionalmente en todo momento, mis hermanos que me han acompañado durante todo este proceso dándome su alegría y brindándome sus sonrisas. Mi novia que ha sido mi compañera, me ha hecho vivir momentos inolvidables. Y Dios, Quién me lo ha dado todo, aunque yo no lo merezca. A Él sea la gloria, y a Él sea el honor. Todo se lo debo a Él.

Ayala Coba Michael Jose

Agradecimiento

Agradezco a Dios por su gracia, su amor y su misericordia conmigo.

Agradezco al director del proyecto de investigación Ing. Danny Sotomayor, por toda la paciencia y la ayuda brindada para el desarrollo y culminación del proyecto, así como con las revisiones del mismo.

Agradezco al Ing. Hitler Trelles por darme la apertura y oportunidad de realizar este proyecto para su reconocida empresa METROLOGIC S.A.

Agradezco al Ing. Darío Pazmiño por su gentil ayuda y soporte durante el desarrollo de este proyecto.

Agradezco a mis amigos de facultad por siempre ayudarme y apoyarme en todo momento.

Ayala Coba Michael Jose

Índice de Contenido

Certificado del director del proyecto	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Índice de Contenido	8
Índice de figuras	15
Resumen	19
Abstract	20
Capítulo I	21
Introducción	21
Antecedentes	21
Justificación e Importancia	25
Alcance del Proyecto	28
Objetivos	33
General	33
Específicos	33
Capítulo II	34
Marco Referencial	34
Controladores Lógicos Programables	34

	9
Programación en Ladder _____	34
Grafcet _____	38
Guía Gemma _____	46
PLC _____	51
Normativa para el Diseño de Interfaces Hombre-Máquina (ISA 101) _____	58
Gestión del Sistema HMI _____	58
Ingeniería de factores humanos (HFE) y Ergonomía _____	60
Diseño Funcional de Elementos y Estructura General de la HMI _____	63
Interacción del usuario _____	76
Rendimiento y Capacitación _____	78
Instrumentos de Medición _____	78
Calibración de instrumentos de medida _____	82
Medidores de Flujo _____	86
Water Draw Pipe Provers _____	94
Probadores Bidireccionales _____	94
Calibración Water Draw Volumétrica _____	99
Calibración Water Draw Gravimétrica _____	104
Waterdraw Volumétrico vs Gravimétrico _____	105
Normas de Referencia _____	106
Capítulo III _____	108
Aplicación de Metodología QFD _____	108
Casa de la Calidad _____	108
Voz del Usuario _____	108
Análisis de los QUÉ _____	109
Cómo implantar esas necesidades _____	110

	10
Relación entre los QUÉ y CÓMO _____	112
Análisis de los CÓMO _____	113
Especificación de requerimientos de la empresa _____	115
Análisis funcional _____	117
Módulo 1: Reemplazar la válvula Manual con un variador de frecuencia ____	118
Módulo 2: Montar el sistema Waterdraw con el probador bidireccional ____	119
Módulo 3: Programación del controlador _____	120
Módulo 4: Programación HMI _____	121
Módulo 5: Controlar el variador de frecuencia _____	121
Módulo 6: Controlar las válvulas _____	122
Matriz morfológica _____	122
Módulo 1: Reemplazar la válvula manual con un variador de frecuencia ____	123
Módulo 3: Programación del controlador _____	125
Módulo 4: Programación HMI _____	125
Módulo 5: Controlar el variador de frecuencia _____	126
Módulo 6: Controlar las válvulas _____	126
Matriz de criterios ponderados _____	127
Módulo 1: Reemplazar la válvula Manual con un variador de frecuencia ____	127
Módulo 2: Montar el sistema Waterdraw con el probador bidireccional ____	128
Módulo 3: Programación del controlador _____	128
Módulo 4: Programación HMI _____	129
Módulo 5: Controlar el variador de frecuencia _____	130
Módulo 6: Controlar las válvulas _____	130
Solución final _____	131
Módulo 1: Reemplazar la válvula Manual con un variador de frecuencia ____	131

	11
Módulo 2: Montar el sistema Waterdraw con el probador bidireccional _____	131
Módulo 3: Programación del controlador _____	131
Módulo 4: Programación HMI _____	132
Módulo 5: Controlar el variador de frecuencia _____	132
Módulo 6: Controlar las válvulas _____	132
Capítulo IV _____	133
Diseño _____	133
Definición del Proyecto _____	133
Especificaciones generales de los equipos del sistema de medición y calibración _____	134
Diagramas Eléctricos _____	136
Diagramas de Control _____	137
Diseño y programación PLC _____	138
Tabla de asignación de recursos _____	138
Grafcet _____	141
Guía Gemma _____	147
Diseño HMI _____	147
Pantalla de Inicio Usuario _____	148
Pantalla de Modo de Operación _____	149
Pantalla de Proceso automático _____	150
Pantalla de Proceso semiautomático _____	152
Capítulo V _____	154
Implementación _____	154

	12
Simulación	156
PLC	156
Registro de Datos	159
Montaje físico	162
Diagrama de Potencia	163
Diagrama de Control	163
Evidencias	164
Puesta en marcha	168
Capítulo VI	169
Pruebas y Resultados	169
Pruebas	169
Protocolo de pruebas	169
Análisis de resultados de las pruebas preliminares	171
Tiempos	172
Presupuesto	173
Exactitud y error	174
Trabajos futuros	175
Capítulo VII	176
Conclusiones y Recomendaciones	176
Conclusiones	176
Recomendaciones	177
Referencias bibliográficas	179

Anexos	188
---------------	------------

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Unidades Básicas en el SI</i> _____	79
Tabla 2 <i>Unidades Derivadas en el SI</i> _____	80
Tabla 3 <i>Comparación entre Waterdraw Volumétrico y Gravimétrico</i> _____	106
Tabla 4 <i>Lista de los QUÉ del usuario</i> _____	108
Tabla 5 <i>Lista de los CÓMO</i> _____	111
Tabla 6 <i>Especificación de los requerimientos de la empresa</i> _____	115
Tabla 7 <i>Evaluación de los criterios Módulo 1</i> _____	127
Tabla 8 <i>Evaluación de los criterios Módulo 2</i> _____	128
Tabla 9 <i>Evaluación de los criterios Módulo 3</i> _____	128
Tabla 10 <i>Evaluación de los criterios Módulo 4</i> _____	129
Tabla 11 <i>Evaluación de los criterios Módulo 5</i> _____	130
Tabla 12 <i>Evaluación de los criterios Módulo 6</i> _____	130
Tabla 13 <i>Tabla de asignación de entradas del PLC</i> _____	138
Tabla 14 <i>Tabla de asignación de salidas del PLC</i> _____	138
Tabla 15 <i>Tabla de asignación de marcas del PLC</i> _____	139
Tabla 16 <i>Tabla de asignación de etapas del automatismo del PLC</i> _____	140
Tabla 17 <i>Tabla de asignación de caudal a salida digital del variador</i> _____	145
Tabla 18 <i>Presupuestos empleados en el montaje físico</i> _____	162
Tabla 19 <i>Objetivos del protocolo de pruebas</i> _____	169

Índice de figuras

Figura 1 <i>Probador de tubería Bidireccional (Bidirectional Pipe Prover)</i>	23
Figura 2 <i>Principio de funcionamiento de un probador bidireccional</i>	25
Figura 3 <i>Proceso Anterior de Calibración Water Draw Volumetric</i>	27
Figura 4 <i>Diagrama del proceso de calibración automatizado “Water Draw Volumetric”</i>	29
Figura 5 <i>Diagrama del proceso de calibración automatizado “Water Draw Gravimetric”</i>	30
Figura 6 <i>Lógica de Escalera</i>	35
Figura 7 <i>Latch</i>	37
Figura 8 <i>Lógica de Programación en Ladder</i>	38
Figura 9 <i>Simbología de una etapa</i>	39
Figura 10 <i>Acciones asociadas a una etapa de forma literal y simbólica</i>	40
Figura 11 <i>Acciones condicionales e incondicionales</i>	41
Figura 12 <i>Transición</i>	42
Figura 13 <i>Arco Ascendente</i>	43
Figura 14 <i>Saltos Condicionales</i>	44
Figura 15 <i>Convergencia</i>	45
Figura 16 <i>Divergencia</i>	45
Figura 17 <i>Guía Gemma con sus 5 Macro-Estados</i>	47
Figura 18 <i>Guía Gemma</i>	50
Figura 19 <i>Componentes de un PLC</i>	53
Figura 20 <i>PLC nano y compacto</i>	55
Figura 21 <i>PLC modular</i>	55
Figura 22 <i>Ciclo de operación de un PLC</i>	57
Figura 23 <i>Ciclo de una HMI</i>	58
Figura 24 <i>Ejemplo del mal y buen uso de los colores en una HMI</i>	63

	16
Figura 25 <i>Tabla de colores para el diseño de una HMI</i>	64
Figura 26 <i>Uso del color azul oscuro para valores de procesos</i>	65
Figura 27 <i>Representación de las alarmas</i>	66
Figura 28 <i>Pestaña de alarma desplegada</i>	67
Figura 29 <i>Cambios de color para animaciones</i>	68
Figura 30 <i>Cambios de color para válvulas</i>	68
Figura 31 <i>Elementos de un indicador analógico</i>	69
Figura 32 <i>Gráficos de Tendencias correctamente utilizados</i>	70
Figura 33 <i>Gráfico de un indicador de nivel con tendencia</i>	71
Figura 34 <i>Gráfico del control de temperatura de un tanque</i>	72
Figura 35 <i>Representación correcta de tablas de una HMI</i>	73
Figura 36 <i>Botones de comando y navegación</i>	74
Figura 37 <i>Niveles Jerárquicos de pantallas de una HMI</i>	75
Figura 38 <i>Esquema de Trazabilidad Metrológica</i>	85
Figura 39 <i>Tuvo Venturi</i>	87
Figura 40 <i>Rotámetro</i>	88
Figura 41 <i>Flujómetro Electromagnético</i>	89
Figura 42 <i>Sensor de Caudal Ultrasónico</i>	90
Figura 43 <i>Caudalímetro Vortex</i>	91
Figura 44 <i>Flujómetro tipo turbina</i>	92
Figura 45 <i>Flujómetro tipo Coriolis</i>	93
Figura 46 <i>Medidores de flujo por desplazamiento positivo</i>	94
Figura 47 <i>Estructura de un probador bidireccional</i>	95
Figura 48 <i>Desplazador de tipo esfera</i>	97
Figura 49 <i>Sección de Volumen Calibrado</i>	98

Figura 50 <i>Calibración de un Prover Bidireccional usando el método Waterdraw Volumétrico</i>	100
Figura 51 <i>Medidas Volumétricas Patrón</i>	103
Figura 52 <i>Análisis de la voz del usuario</i>	109
Figura 53 <i>Análisis de los CÓMO</i>	112
Figura 54 <i>Objetivos Técnicos</i>	114
Figura 55 <i>Nivel 0 - Análisis funcional de la automatización del sistema</i>	117
Figura 56 <i>Nivel 1 - Análisis Funcional de la automatización del sistema</i>	118
Figura 57 <i>Matriz morfológica Módulo 1: Reemplazar la válvula con un variador de frecuencia</i>	123
Figura 58 <i>Matriz morfológica Módulo 2: Montar sistema Waterdraw con el probador</i> .	124
Figura 59 <i>Matriz morfológica Módulo 3: Programación del controlador</i>	125
Figura 60 <i>Matriz morfológica Módulo 4: Programación del HMI</i>	125
Figura 61 <i>Matriz morfológica Módulo 5: Controlar el variador de Frecuencia</i>	126
Figura 62 <i>Matriz morfológica Módulo 6: Controlar las válvulas</i>	126
Figura 63 <i>Diagrama P&ID del proceso</i>	134
Figura 64 <i>Diagrama de potencia del Sistema Waterdraw</i>	136
Figura 65 <i>Diagrama de Control del Sistema Waterdraw</i>	137
Figura 66 <i>Diagrama Jerárquico del Grafcet</i>	141
Figura 67 <i>G0: Grafcet de Seguridad</i>	142
Figura 68 <i>G1: Grafcet de Modos de operación</i>	143
Figura 69 <i>G2: Grafcet del Modo automático</i>	144
Figura 70 <i>G4: Grafcet de movimiento</i>	145
Figura 71 <i>G3: Grafcet del Modo semiautomático</i>	146
Figura 72 <i>Guía GEMMA del sistema Waterdraw volumétrico</i>	147

Figura 73 <i>Diagrama de navegación de pantallas</i>	148
Figura 74 <i>Pantalla de Inicio-Usuario</i>	149
Figura 75 <i>Pantalla de Selección de modo de operación</i>	150
Figura 76 <i>Pantalla del Proceso automático</i>	152
Figura 77 <i>Pantalla del Proceso semiautomático</i>	153
Figura 78 <i>PLC SIEMENS S7 1200 12 12 AC DC RLY</i>	154
Figura 79 <i>Variador de frecuencia WEG CFW300 3HP</i>	155
Figura 80 <i>PLC SIM</i>	156
Figura 81 <i>Simulación de entradas del PLC</i>	157
Figura 82 <i>WinCC RunTime Advanced: Inicio</i>	158
Figura 83 <i>WinCC Run Time Advanced: Proceso Automático</i>	159
Figura 84 <i>Registro de datos en Excel</i>	160
Figura 85 <i>VB Script para el registro de datos en Excel</i>	161
Figura 86 <i>Implementación del Variador de frecuencia y el PLC</i>	164
Figura 87 <i>Armario de Control</i>	165
Figura 88 <i>Sistema Waterdraw</i>	166
Figura 89 <i>Conexiones del sistema Waterdraw</i>	167
Figura 90 <i>Tratamiento estadístico de los datos</i>	170
Figura 91 <i>Incertidumbre de la medida</i>	171
Figura 92 <i>Análisis de resultados de tiempos</i>	172
Figura 93 <i>Análisis de resultados del presupuesto</i>	173
Figura 94 <i>Análisis de resultados de exactitud y error</i>	174

Resumen

El continuo crecimiento del sector de hidrocarburos en el Ecuador ha generado que varias empresas se enfoquen en este nuevo nicho de mercado. Por lo que existe una alta competitividad en las licitaciones que el estado oferta. Actualmente, existen varias empresas enfocadas en el sector metrológico ya que han descubierto que este mercado tiene una alta rentabilidad. Algunas empresas realizan calibración de medidores de flujo, pero solamente dos realizan la calibración de calibradores de medidores de flujo. Una de ellas es METROLOGIC S.A. que tiene más de 7 años realizando calibraciones de probadores por el método Waterdraw volumétrico. Su competencia los ha obligado a optimizar su sistema móvil Waterdraw, y el presente proyecto detalla dicha optimización.

Se diseña e implementa la automatización del sistema Waterdraw volumétrico para probadores bidireccionales donde su principal controlador es un PLC. El objetivo principal de esta automatización es reducir los errores manuales del operador, reducir la incertidumbre de los instrumentos, eliminar los golpes de ariete, y monitorear todo el proceso desde una HMI. Este sistema recibe las señales del probador para poder medir su volumen calibrado, actuando sobre una válvula para el llenado de este volumen en medidas volumétricas o para continuar con la realimentación. Así también, se realiza el control del flujo del proceso usando un variador de frecuencia. Una vez implementado se reducen los costos, los tiempos y el sistema de calibración se vuelve más atractivo para los clientes.

Palabras Clave:

- **DESPLAZAMIENTO DE AGUA**
- **PROBADORES BIDIRECCIONALES**
- **CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO**
- **AUTOMATIZACIÓN**

Abstract

The continuous growth of the hydrocarbon sector in Ecuador has generated that several companies focus on this new market niche. Therefore, there is high competitiveness in the bids that the state offers. Currently, there are several companies focused on the metrological sector since they have discovered that this market has a high profitability. Some companies perform flow meter calibration, but only two perform flow meter calibrator calibration. One of them is METROLOGIC S.A. that has more than 7 years performing calibrations of testers by the volumetric Waterdraw method endorsed by the SAE. Their competition has forced them to optimize their Waterdraw mobile system, and this project details such optimization.

The automation of the volumetric Waterdraw system has been designed and implemented for bidirectional provers where its main controller is a PLC. The main objective of this automation is to reduce manual operator errors, reduce instrument uncertainty, eliminate water hammer, and monitor the entire process from an HMI. This system receives signals from the tester to be able to measure its calibrated volume, acting on a valve to fill this volume in volumetric measurements or to continue with feedback. Likewise, the process flow control is carried out using a frequency inverter. Once implemented, costs and times are reduced, and the calibration system becomes more attractive to customers.

Keywords:

- **WATER DRAW**
- **BIDIRECTIONAL PIPE PROVERS**
- **FLOWMETER'S CALIBRATION**
- **AUTOMATION**

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

La empresa METROLOGIC S.A. es una entidad que realiza su actividad en el ámbito industrial, dedicada a la provisión de servicios técnicos de calibración en las magnitudes de presión, temperatura, volumen, flujo volumétrico , flujo másico e inspección de medidores de flujo dinámicos tipo desplazamiento positivo; tipo turbina, y tipo Coriolis con profesionales calificados con experiencia, imparcialidad y criterio técnico, proporcionando a sus clientes resultados confiables, confidenciales y reproducibles, con un tiempo de respuesta de acuerdo a los compromisos establecidos, respetando el medio ambiente y asegurando la seguridad y salud de sus colaboradores. (EMIS, 2020)

El Oriente, (2019) afirma que, en el Ecuador, en los años 70 “pasó de ser un país rural y de producción agrícola, a uno dedicado a la industria petrolera con crecimiento de clase media y una economía con un desarrollo acelerado, impulsado por las terceras mayores reservas de petróleo de Suramérica”. Sin embargo, en el último año 2020 la producción petrolera del país se ha reducido en un 58% como resultado de la fractura del Oleoducto de Crudos Pesados y del Sistema de Oleoducto Transecuatoriano. (El Comercio, 2020)

En ingeniería, la precisión se torna un factor sumamente importante en las mediciones, más aún si se trabaja en el entorno de una industria petrolera, manejando grandes volúmenes del líquido vital de la civilización actual. Se manejan varias herramientas e instrumentos para que la pérdida de materia prima sea mínima. Medir

bien no significa solamente medir con cuidado o con los instrumentos adecuados, sino que las unidades de medida deben ser equivalentes y estandarizadas. (Creus, 2009)

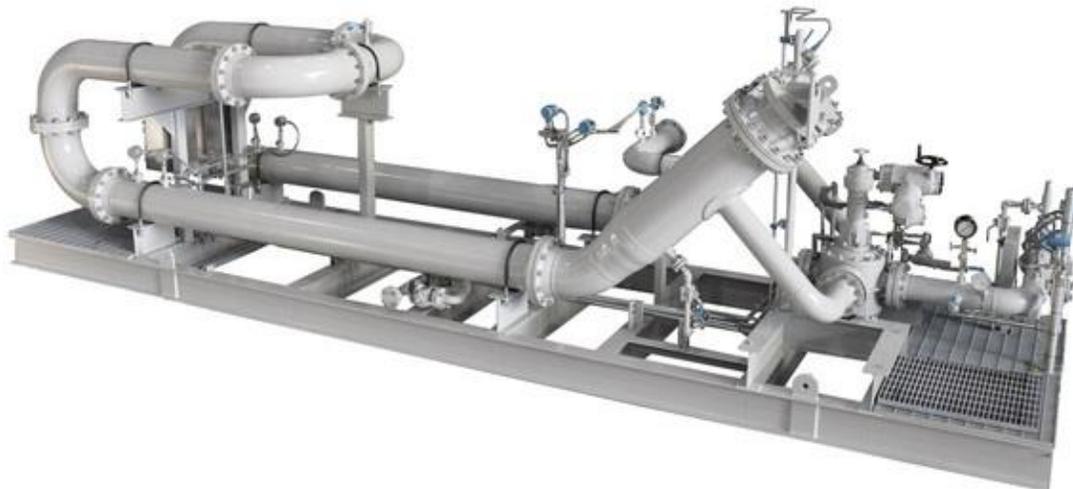
El enfoque de los manuales de medición de petróleo según las normas API es reducir la incertidumbre y mejorar la precisión de todas las mediciones de petróleo. Avances recientes en el pesaje de equipos e investigaciones realizadas por varios expertos en hidrocarburos han mejorado la precisión y exactitud de las calibraciones de flujo y volumen, las cuales han permitido reducir en gran medida los errores y han proporcionado mayor confianza en calibraciones. (Cohrs, 2018)

Dentro de esta industria los medidores de caudal son muy utilizados ya que diariamente se procesan miles de toneladas de crudo y sus derivados como gasolina, Diesel y metano. No es sorpresa que se ocupen estos instrumentos para garantizar el manejo y estandarización del caudal de estos fluidos a través de varias tuberías. Estos equipos son usados para medir el caudal lineal, no lineal, de masa o volumétrico de un líquido o un gas. (OMEGA, 2015)

Con el paso del tiempo y uso constante los medidores de flujo tienden a desgastarse y presentar fallas de calibración. Sin embargo, existen sistemas como los probadores de tuberías bidireccionales que contribuyen a realizar tareas de calibración. (Fallas, 2000)

Figura 1

Probador de tubería Bidireccional (Bidirectional Pipe Prover)



Nota. En la figura 1 se muestran los probadores, también conocidos como pipe provers, se definen como equipos de medición usados para llevar a cabo la calibración automatizada de las instalaciones de medición de flujo, sean de tipo turbina o de desplazamiento positivo. Así también brindan una medición sostenible, un adecuado cumplimiento de los requisitos de precisión y repetibilidad, y un riesgo fiscal más reducido. Tomado de (EMERSON Electric Co., 2020).

Generalmente, estos equipos se instalan de forma permanente en las estaciones de medición en poliductos para realizar la calibración de los equipos de medición de volumen de hidrocarburos, de acuerdo con los requerimientos y períodos de tiempo demandados, de este modo se mantiene la trazabilidad al patrón nacional y se logra un nivel de incertidumbre idóneo en las mediciones de volumen. Tradicionalmente, la determinación del volumen base de los probadores bidireccionales se realiza aplicando el método de desplazamiento de agua o también llamado “Water Draw”. (Romero, 2001)

La medición precisa es crítica durante la asignación o control de procesos, de la misma manera que reducir la incertidumbre en las mediciones y el consiguiente impacto en el resultado final de la operación con servicios de calibración expertos. Por esta razón y por regulaciones actuales, se necesita un proceso de calibración confiable y eficiente. (EMERSON, 2017)

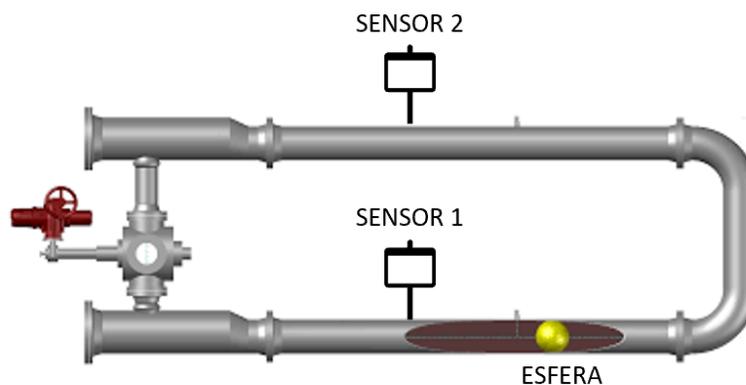
La empresa METROLOGIC S.A. dispone de una estación móvil para la calibración de instrumentos en industrias dedicadas al petróleo, especialmente para realizar la calibración “Water Draw” de probadores bidireccionales.

Existen 2 métodos convencionales para la calibración por desplazamiento de agua: Water Draw Volumetric que es un procedimiento que se utiliza para determinar el volumen de un probador al desplazar el agua de este a medidas de prueba estándar de campo, y Water Draw Gravimetric que igualmente determina el volumen de un pipe prover o probador, desplazando el agua contenida en el mismo a una balanza estandarizada. (Kareem, 2018)

METROLOGIC S.A. realiza las calibraciones de pipe provers utilizando el sistema de calibración Water Draw Volumetric. Para realizar las calibraciones, la empresa se basa en el principio de funcionamiento de pipe provers usando el método de desplazamiento de agua, los equipos constan de una porción de tubería en donde se instalan los sensores que determinan el volumen del probador; el espacio interior definido entre los sensores es conocido como volumen calibrado. (Romero, 2001)

Figura 2

Principio de funcionamiento de un probador bidireccional.



Nota. En la figura 2 se observa un probador bidireccional y a lo largo de este, e impulsada por el propio fluido, se desliza la esfera que acciona los sensores de inicio y paro que determinan el volumen del probador. De esta manera, la calibración del probador hace alusión a la determinación del volumen contenido entre los sensores. Tomado de (READYFLO, 2015).

Justificación e Importancia

Water Draw es un proceso de calibración que se utiliza para determinar el volumen de un probador (prover), desplazando el agua del prover a tanques con medidas patrón o balanzas estandarizadas. Es muy importante que los probadores estén calibrados ya que estos son los encargados de calibrar medidores de flujo, sean de tipo turbina o de desplazamiento positivo. (EMERSON, 2017)

La calibración por desplazamiento de agua es muy utilizada en la industria petrolera internacional, ya que se requiere que el volumen de los provers sea exacto con un porcentaje de error inferior al 0.1%. Se recomienda calibrar los probadores

maestros cada 3 meses, los pequeños o móviles cada 3 años y los pipe provers instalados permanentemente o los provers de tanques instalados permanentemente cada 5 años. (Cohrs, 2018)

Ante tal demanda, varias empresas metrológicas a nivel mundial se han abierto campo en este tipo de calibraciones volumétricas. En el Ecuador METROLOGIC S.A. se ha constituido como la única compañía nacional que realiza este tipo de ajuste. METROLOGIC S.A. realiza la calibración volumétrica de probadores de gasto de tubo tipo unidireccional, bidireccional, compacto por el método de empuje de agua de acuerdo con normas y estándares nacionales e internacionales para obtener el volumen a condiciones base utilizando medidas volumétricas certificadas y con trazabilidad a Patrón primario. (EMIS, 2020)

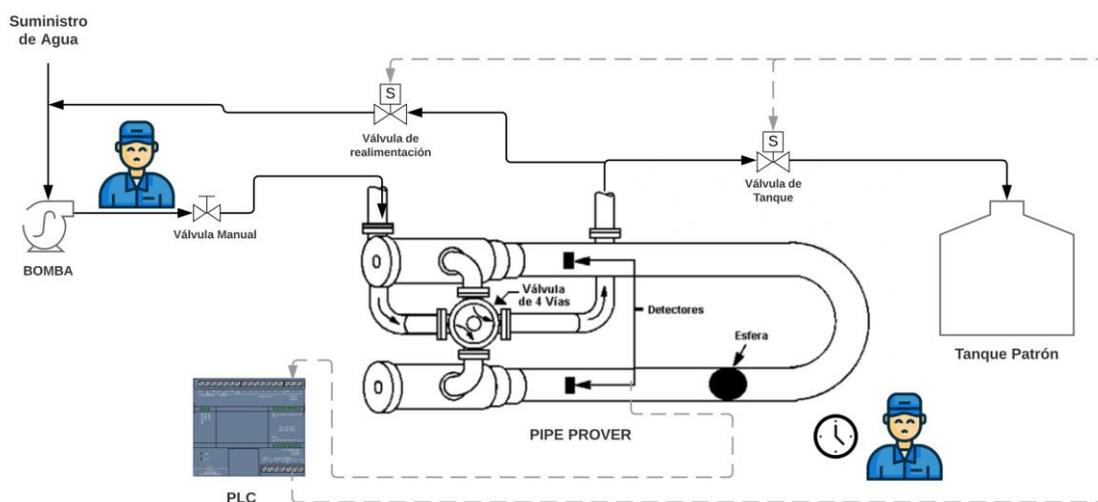
METROLOGIC S.A. comparte el mercado ecuatoriano con FUJISAN SURVEY, una institución de metrología mexicana que se encarga de realizar muchos de los mismos mantenimientos y calibraciones que METROLOGIC S.A. desarrolla. FUJISAN SURVEY posee todas las certificaciones necesarias, al igual que METROLOGIC S.A. para competir en el área de calibración. Muchos de los contratos que FUJISAN SURVEY gana es debido a que muchos de sus procesos de calibración se encuentran automatizados y pueden ser controlados desde una HMI, donde se puede ver el sinóptico del proceso en tiempo real. Factor que ha generado un gran impacto en los clientes.

FUJISAN SURVEY gana aproximadamente un 40 % de los contratos relacionados con la calibración Water Draw de pipe provers. Anualmente se realizan aproximadamente 10 calibraciones de estos probadores. Si el costo de calibración de cada prover ronda entre los \$20.000,00, significa que METROLOGIC S.A. pierde

prácticamente \$80.000,00 anuales ante FUJISAN SURVEY. METROLOGIC S.A. tiene el 60% del mercado de calibración de provers, pero pierde contratos al no contar con la automatización de su sistema Water Draw. Actualmente este proceso es realizado de manera manual y muchas veces la incertidumbre es mayor a la estándar.

Figura 3

Proceso Anterior de Calibración Water Draw Volumetric



Nota. En la figura 3 se presenta el esquema del actual sistema de calibración Water Draw Volumétrico de la empresa. Primero un operario se encarga de encender la bomba a su máxima capacidad, lo cual acorta significativamente la vida de esta, adicionalmente opera una válvula manual para regular el flujo, generando golpes de ariete por el abrupto e impreciso control del flujo de agua. Además, se encarga de operar manualmente una válvula de cuatro vías para determinar el sentido de flujo del probador mientras otro operador se encarga de tomar los tiempos de llenado del prover (tiempo desde la activación del primer sensor al segundo) utilizando un cronómetro. Para la salida se toman en cuenta dos electroválvulas, una para realimentación y la restante para llenado del tanque patrón. Se puede observar que existe un PLC que se encuentra subutilizado

para la apertura y cierre de estas, ya que el solenoide de realimentación se cierra y la de llenado del tanque se abre cuando la boya activa el primer sensor. Cuando se activa el segundo sensor se cierra la válvula del tanque y se abre la de realimentación. Si el sentido del flujo se invierte, entonces se activará primero el sensor 2 y luego el 1, y el control de las electroválvulas también se invertirá. Tomado de (Ayala, 2021).

El proceso y las condiciones de calibración mencionadas son sumamente antiguas, por lo tanto, no se adaptan a las condiciones de operación actuales generando pérdidas de contratos y riesgos en los operarios, además de no generar exactitud en la toma de tiempos debido al error por factor humano. Aproximadamente la empresa pierde 2 días realizando pruebas preliminares, lo que significa una pérdida económica. Sin embargo, el desarrollo tecnológico alcanzado en los últimos años, teniendo como soporte a la electrónica y computación ha permitido alcanzar niveles de automatización, precisión y velocidad de respuesta muy superiores a los ejecutados por la neumática y electromecánica.

Por tales razones, se ha determinado automatizar este sistema para mejorar su proceso, reducir tiempos y errores, asegurando la calidad y la experiencia de las personas que participan en conjunto de la calibración de los provers. Así también, con el monitoreo en tiempo real del proceso se podrá brindar mayor seguridad a los clientes que supervisan esta actividad.

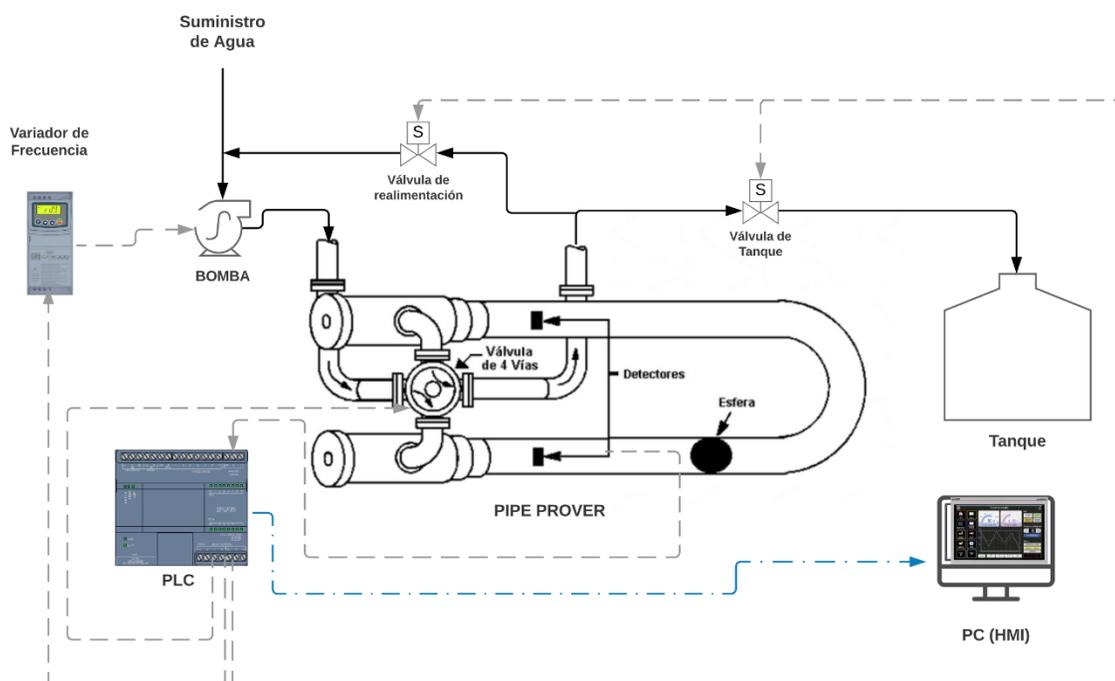
Alcance del Proyecto

La empresa METROLOGIC S.A. requiere de la automatización del sistema “Water Draw Volumetric” para calibrar los provers bidireccionales de sus clientes. Para

ello se utilizará un controlador lógico programable para la adquisición de datos, control de la apertura de válvulas y el control del flujo del sistema. También se integrará una interfaz HMI para la visualización y control del proceso. Adicionalmente se diseñará una adecuación para que este mismo sistema pueda realizar la calibración por desplazamiento de agua gravimétrica y la empresa pueda ampliar su mercado a provers más pequeños. No obstante, es importante mencionar que el resultado alcanzado por el sistema automatizado depende enormemente de la precisión y exactitud entregada por los instrumentos de medición escogidos. (Cepeda, 2005)

Figura 4

Diagrama del proceso de calibración automatizado “Water Draw Volumetric”

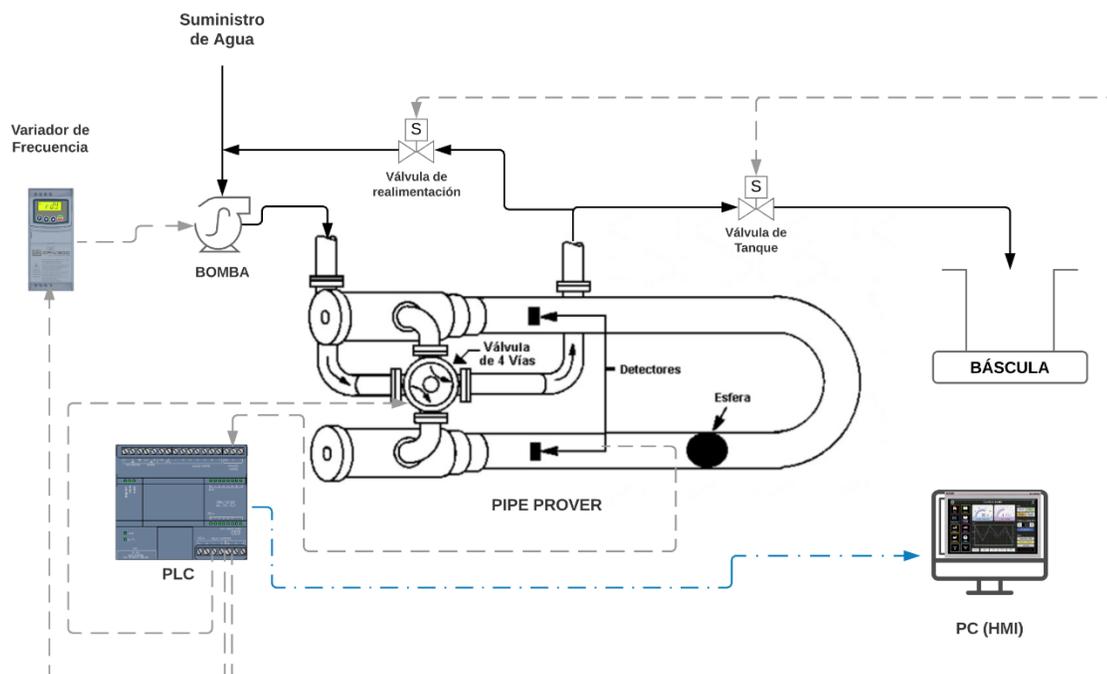


Nota. En la figura 4 se puede observar el esquema de la calibración de un prover convencional a través del sistema automatizado Water Draw Volumetric que se implementará. El prover bidireccional tiene como componente una válvula de 4 vías, una

esfera y dos detectores. Todo equipo adicional es parte del sistema automatizado Water Draw. Tomado de (Ayala, 2020).

Figura 5

Diagrama del proceso de calibración automatizado “Water Draw Gravimetric”



Nota. La adecuación del sistema Water Draw para que pueda variar de volumétrico a gravimétrico consiste únicamente en cambiar el tanque patrón por una balanza estandarizada para poder pesar el agua y determinar su volumen. Este cambio se puede observar en la figura 5. Tomado de (Ayala, 2020).

Los elementos que se pueden distinguir son:

- La bomba encargada de suministrar agua al Prover.
- El variador de frecuencia, el cual regula el caudal de la bomba.
- El Pipe Prover bidireccional del cliente.

- La válvula de 4 vías para determinar el sentido de flujo del prover controlada desde el PLC.
- El tanque patrón para medir el volumen del prover o la balanza estandarizada para pesar el fluido y determinar su volumen.
- PLC, el cual se encargará del control de las 3 válvulas y el variador de frecuencia, y de la adquisición de los datos (tiempo).
- La HMI donde se configuran los parámetros de calibración y donde se visualiza en tiempo real el sinóptico de esta.
- Los 2 detectores (Switches) que se encargan de empezar y finalizar la medición del volumen del prover.
- La esfera encargada de activar los detectores.
- 2 electroválvulas para la realimentación o llenado del tanque.

El trabajo se dividirá en las siguientes etapas:

La primera etapa será un estudio del arte sobre todos los equipos, elementos y procesos que se ven involucrados en el sistema de calibración Water Draw para generar dominio sobre el proceso a automatizar, y garantizar su correcto desarrollo y funcionamiento. Dentro de este estudio se buscará información detallada sobre Water Draw Volumetric y Gravimetric para determinar cuál es el calibrador de provers óptimo para METROLOGIC S.A. Así mismo, se realizará una investigación profunda sobre los estándares que rigen el diseño de interfaces hombre-máquina tal como la norma ISA 101.

La segunda etapa consiste en generar un estudio de viabilidad para garantizar que la automatización de este sistema sea factible. Dentro de este estudio se realizará un análisis de requerimientos, un análisis técnico, las cotizaciones de los equipos a

implementar y un análisis costo/beneficio de la implementación del nuevo sistema automatizado. En esta sección es imprescindible realizar el análisis de factibilidad de Water Draw Gravimetric para evitar inversiones innecesarias.

La tercera etapa es el diseño del automatismo, realizando los diagramas esquemáticos, P&ID, GEMMA y Graficet del proceso. Estos esquemas serán la base de la programación en Ladder para el control y adquisición de datos que se realizará para el PLC. Así mismo, en este apartado se diseñará la HMI para visualizar y controlar el proceso en tiempo real. La normativa que se utilizará como guía será principalmente la norma ISA 101. En este periodo se realizará la simulación del proceso automatizado antes de su puesta en marcha para poder verificar que el proceso funcione correctamente y cumpla con los estándares y objetivos que la empresa ha especificado.

La cuarta etapa consiste en la implementación del sistema acoplando todos los diseños realizados anteriormente y los equipos seleccionados que se pueden observar en la figura 4 y 5. El PLC controla el sentido de la válvula de 4 vías, la apertura de 2 válvulas solenoides y utilizando salidas digitales selecciona una de las cuatro velocidades ya establecidas en el variador de frecuencia. En esta sección se realizará la comunicación entre el PLC y la HMI mediante el protocolo ETHERNET .

Finalmente, en la última parte se realizará pruebas de campo del sistema automatizado a fin de mostrar su eficiencia a los usuarios, además se pondrá a prueba su funcionamiento en una calibración real de un prover, y de ser necesario se realizarán correcciones menores en el diseño para garantizar su puesta en marcha. Se debe mencionar que se evaluarán los resultados obtenidos y se verificará que la automatización cumpla su propósito de reducir tiempos y obtener resultados más fiables. Además, se realizará la entrega de un manual de usuario para que los operarios

puedan controlar adecuadamente el proceso, y puedan realizar los mantenimientos necesarios que aseguren la vida útil de cada uno de los componentes.

Objetivos

General

- Diseñar e implementar un sistema automatizado para el proceso de calibración "Water Draw" de la empresa METROLOGIC S.A.

Específicos

- Definir el proceso de calibración Water Draw, para el buen desarrollo de su automatización, garantizando el correcto funcionamiento de esta.
- Analizar la factibilidad de la automatización del proceso de calibración Water Draw mediante la aplicación de la ingeniería concurrente.
- Comparar el desempeño de los sistemas Water Draw Volumétrico y Water Draw Gravimétrico
- Evaluar el desempeño del proceso de calibración automatizado Water Draw para cuantificar: reducción de tiempos y exactitud.

Capítulo II

Marco Referencial

Controladores Lógicos Programables

La ingeniería en control ha evolucionado con el paso de los años. En el pasado, el ser humano era el único o principal método para controlar un sistema. Con la aparición de la máquina de vapor surgió el control mecánico y con la aparición de la electricidad brotó el control eléctrico, el cual se basaba en relés principalmente. Estos relés permiten encender y apagar la energía sin la necesidad de un interruptor mecánico, su principio de funcionamiento se basó en controlar el switch de un dispositivo utilizando el campo magnético que producía el voltaje inducido en una bobina. El uso de relés era muy común ya que se utilizaba para realizar simples decisiones de control lógicas, pero no podían realizar la toma de decisiones mucho más complejas.

Modernos sistemas de control aún utilizan relés, pero son raramente usados para lógicas complejas. Con la tercera revolución industrial y con el rápido avance de la Electrónica apareció el controlador lógico programable (PLC) que desterró a los relés. Desde que el PLC fue creado se ha convertido en la opción más común para el Control Industrial debido a sus ventajas como costo/beneficio, robustez y flexibilidad. (Jack, 2007, págs. 20-21)

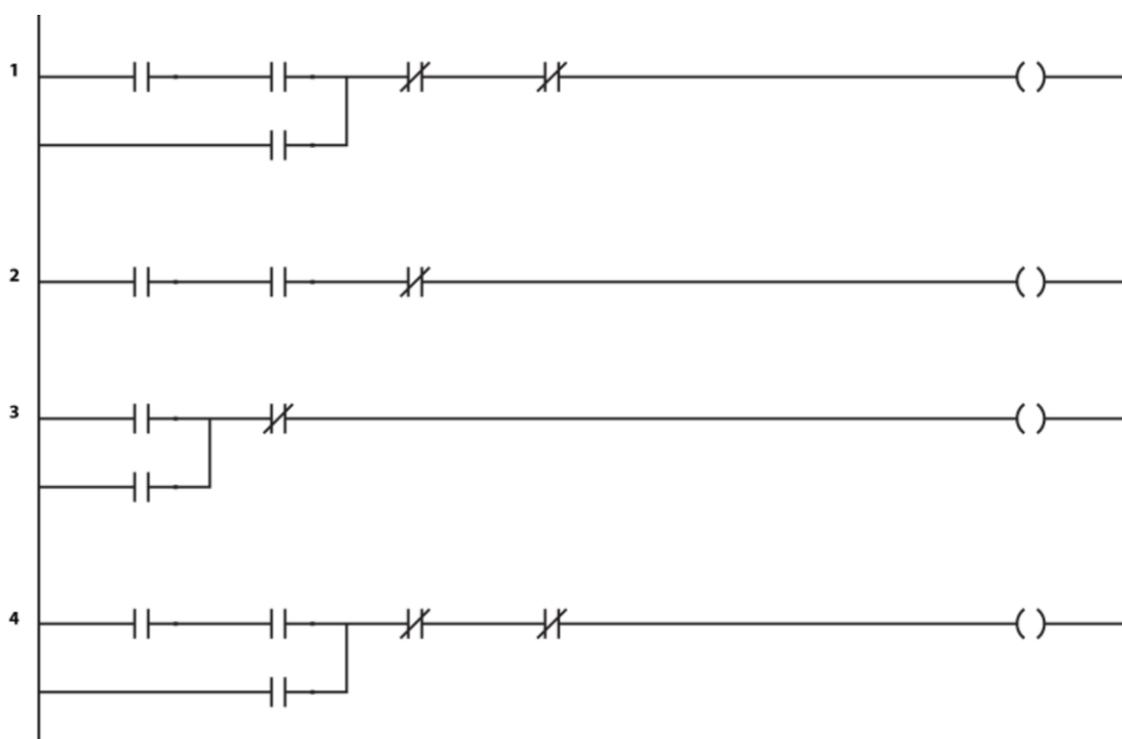
Programación en Ladder

La lógica Ladder o de escalera (también conocida como Diagrama Ladder o DL) es el lenguaje o método de programación más utilizado para PLCs. Es un lenguaje de

programación gráfico que expresa operaciones lógicas con notaciones simbólicas. Este lenguaje fue creado para imitar la lógica de los circuitos eléctricos de los relés, de forma que los ingenieros o técnicos puedan dominarlo en poco tiempo. (Jack, 2007, págs. 20-25)

Figura 6

Lógica de Escalera



Nota: Se conoce como lógica de escalera ya que toda la lógica se realiza entre 2 líneas verticales, y se dibujan conexiones horizontales entre estas dos líneas. Cada una de estas conexiones se conoce como peldaño (rung) y cada uno de estos renglones se ejecuta en orden, y uno a la vez; es decir, ejecuta la primera línea, después la segunda, la tercera y así sucesivamente. En la figura 6 se puede observar que toda la lógica tiene la forma de una escalera real. Tomado de (PLC ACADEMY, 2017).

Al igual que en todos los lenguajes de programación existen instrucciones y ya que este lenguaje es gráfico nuestras instrucciones se llamarán símbolos. Es necesario hacer mención que las instrucciones y variables utilizadas son estrictamente booleanas.

A continuación, se presentan las instrucciones más comunes utilizadas en Ladder y sus símbolos según la norma NEMA:

Entradas

- **Contacto normalmente abierto:** $\neg \uparrow$

El contacto permanecerá inactivo a menos de que su valor lógico sea 1.

- **Contacto normalmente cerrado:** $\neg \downarrow$

El contacto permanecerá activo a menos de que su valor lógico sea 1.

- **Flanco positivo:** $\neg \uparrow \uparrow$

Se activa cuando el estado lógico de un contacto pasa de 0 a 1.

- **Flanco negativo:** $\neg \downarrow \downarrow$

Se activa cuando el estado lógico de un contacto pasa de 1 a 0.

Salidas

- **Bobina normalmente abierta:** $\neg \uparrow$

Cuando se active pondrá el valor lógico 1 a la bobina.

- **Bobina normalmente cerrada:** $\neg \downarrow$

Cuando se active pondrá el valor lógico 0 a la bobina.

- **Enclavar Bobina:** -(S)

Cuando se active pondrá el valor lógico 1 a la bobina y aunque las condiciones de entrada cambien, la bobina permanecerá activada.

- **Resetear Bobina:** -(R)

Cuando se active pondrá el valor lógico 0 a la bobina y aunque las condiciones de entrada cambien, la bobina permanecerá desactivada.

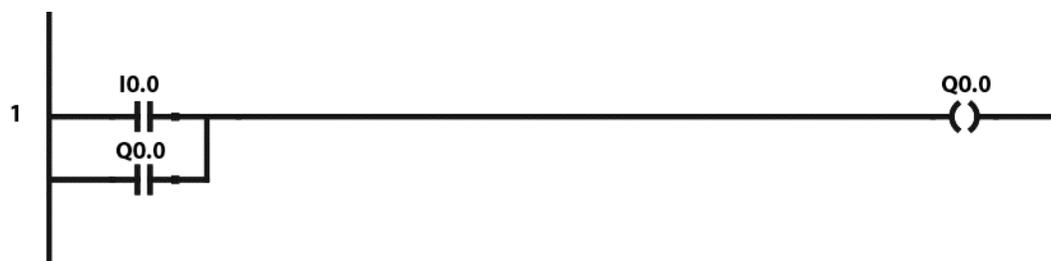
(Contaval, 2016)

Latches

Como se mencionó anteriormente, cada rung o escalón dentro del ladder es independiente y se lee en orden. Pero existen conexiones llamadas latches las cuales pueden colocarse paralelamente a cada rung para brindar múltiples combinaciones de las entradas para activar una o varias salidas.

Figura 7

Latch

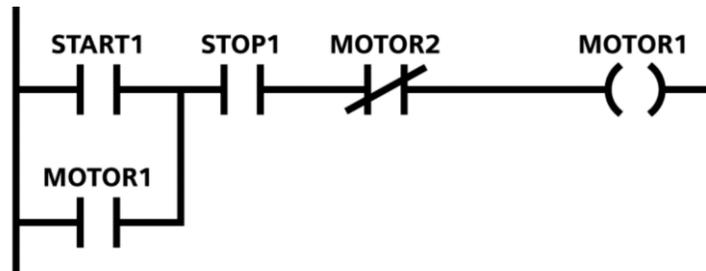


Nota: Se puede observar en la figura 7 que si el contacto I0.0 está activado, entonces la salida Q0.0 también se activará, pero se ha usado un latch para añadir la opción si el contacto Q0.0 está activado, ya no es necesario que I0.0 lo esté. Se podría comparar a

un latch con la operación lógica OR ya que la salida podría activarse si cualquiera de los dos contactos está activado. Tomado de (PLC ACADEMY, 2017).

Figura 8

Lógica de Programación en Ladder



Nota: Se podría comparar la operación lógica AND cuando las instrucciones se dibujen horizontalmente una después de la otra como se observa en la figura 8. Si se activa START O MOTOR1, es necesario que también se active STOP y que MOTOR2 no se active para que la salida MOTOR1 pueda activarse. Tomado de (PLC ACADEMY, 2017).

Es importante volver a mencionar que el PLC ejecuta la lógica ladder una instrucción (rung) a la vez, de arriba hacia abajo. Por ende, si una instrucción activa una salida y en la instrucción de abajo la desactiva, el valor lógico final de la salida será 0 ya que el último rung ejecutado indicó dicho estado.

Grafcet

Grafcet es un método gráfico para la modelación de sistemas o procesos de control secuenciales. Su nombre proviene de las siglas en francés Graphe de Comands Etape/Transition, en español es Gráfico de Control Etapa/Transición. Su definición más

acertada lo describe como una herramienta de representación gráfica de comportamientos sucesivos de un sistema lógico previamente definido por sus entradas y salidas. (JDoTec, 2006)

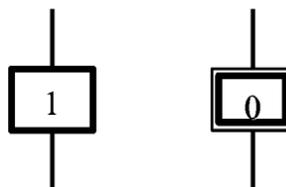
Cualquier Grafcet está compuesto por un conjunto de etapas o estados que tienen acciones asociadas, transiciones que tienen sus condiciones y uniones orientadas que se encargan de unir a las etapas con sus transiciones. Es una gran herramienta de diseño para la programación de distintos controladores, especialmente para controladores lógicos programables. A continuación, se explicará cada uno de los elementos que forman al Grafcet.

Etapas

El despliegue de un Grafcet está formado por una secuencia de etapas que representan cada uno de sus estados, cada etapa tendrá asociada una o varias acciones a realizarse dentro del proceso. Las etapas son representadas por un cuadro y un número o símbolo en su interior como identificación, este número indica el orden que ocupa cada etapa dentro del Grafcet. La entrada y salida de una etapa aparece en la parte superior e inferior respectivamente. (GENIA, 2016, págs. 2-3)

Figura 9

Simbología de una etapa.



Nota: La etapa inicial del proceso es representada con un cuadro doble y las demás etapas únicamente con un cuadro como se observa en la Figura 9. Es importante

mencionar que la etapa inicial se activa de forma incondicional. Tomado de (*Formación PLC Madrid, 2013*).

Acción Asociada

Son una o múltiples acciones a realizarse dentro del proceso cuando la etapa a la que están asociadas se encuentra activada. Estas acciones están escritas de forma literal o simbólica dentro de uno o varios rectángulos conectados a la parte derecha de su respectiva etapa. Si la etapa se encuentra desactivada, todas sus acciones lo estarán igualmente. (Formación PLC Madrid, 2013, pág. 33)

Figura 10

Acciones asociadas a una etapa de forma literal y simbólica.



Nota: En la figura 10 se pueden observar las acciones asociadas a una etapa. En la parte izquierda se observa la acción descrita de forma literal mientras que en la derecha se presenta de manera simbólica (debe existir una tabla que relacione los símbolos con las acciones a ejecutarse). Tomado de (*GENIA, 2016*).

Las acciones asociadas son divididas en dos etapas:

- **Incondicionales:** acciones que se ejecutarán siempre y cuando su etapa este activada.
- **Condicionales:** acciones que se ejecutarán cuando su etapa este activada y solo sí se cumple una condición específica.

Figura 11

Acciones condicionales e incondicionales.



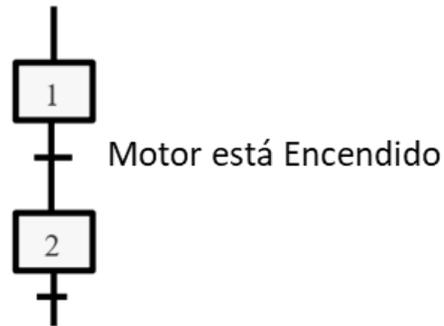
Nota: En la figura 11 se puede apreciar que la acción Activar Motor1 se realizará cuando la etapa 1 este activada, mientras que la acción Activar Motor2 se ejecutará solo si la etapa 1 esta activada y se cumple la condición de que A este activada igualmente. Tomado de *(Formación PLC Madrid, 2013)*.

Transición

El Grafcet de un proceso es la secuencia de varias etapas unidas por transiciones. Se puede definir a una transición como aquella condición que determina si se puede evolucionar o avanzar hacia la etapa siguiente. Esta condición no es nada más que una función lógica llamada receptividad que puede ser verdadera o falsa. Cada transición será aprobada siempre y cuando su etapa anterior esté activada y que su receptividad sea verdadera. Es decir, únicamente se podrá pasar de una etapa a la siguiente o siguientes si la función lógica de su transición se cumple. (GENIA, 2016, pág. 5)

Figura 12

Transición

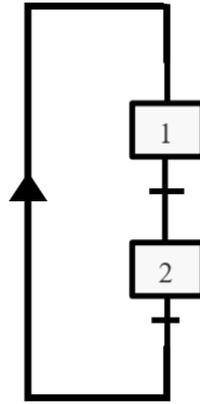


Nota: Una transición está representada con una línea perpendicular a las uniones entre etapas tal y como se puede observar en la figura 12. De esta ilustración se puede concluir que la etapa 1 pasará a la etapa 2 solo si su transición es aprobada y esta solamente se aprobará si la receptibilidad es verdadera, es decir, si el motor está encendido pasará a la etapa 2. Tomado de (*Formación PLC Madrid, 2013*).

Es importante mencionar que cuando la transición franquea o es aprobada, la etapa o las etapas siguientes inmediatas se activarán y la anterior o anteriores precedentes inmediatas se desactivarán.

Uniones Orientadas

Son aquellas líneas rectas que unen a las etapas con sus transiciones y viceversa, pero nunca entre 2 elementos iguales. Estas uniones también llamadas arcos pueden ser verticales u horizontales.

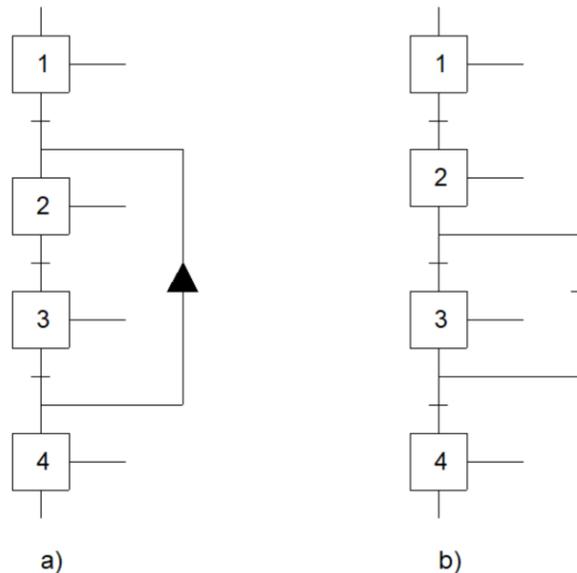
Figura 13*Arco Ascendente*

Nota: Las uniones se dibujan desde la parte inferior de la etapa hacia la transición y desde la transición hacia la parte superior de la siguiente etapa. En el caso de que se desee conectar alguna transición con alguna etapa superior, es necesario indicar el sentido ascendente con una flecha tal y como se observa en la figura 13. Tomado de (Ayala, 2021).

No es estrictamente necesario que se conecte una transición con una sola etapa, o viceversa. También se puede conectar una transición a varias etapas o una etapa a varias transiciones, siempre y cuando se cumpla la regla de que no pueden interconectarse 2 transiciones entre sí o 2 etapas entre sí.

Figura 14

Saltos Condicionales



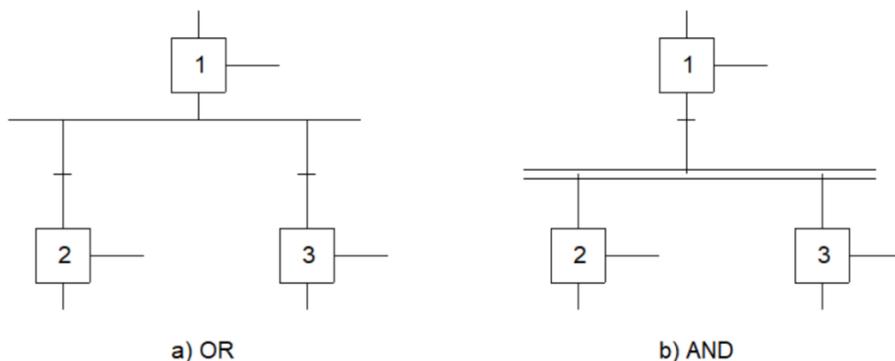
Nota: La figura 14 muestra saltos condicionales entre etapas. La imagen a) indica que después de la transición de la etapa 3 puede avanzar a la etapa siguiente (4) o que también podría regresar a la etapa 2. La imagen b) indica que después de la etapa 2 tiene dos transiciones con la cual podrá avanzar a la etapa 3 o 4 dependiendo de las condiciones que se cumplan respectivamente. Tomado de (Ayala, 2021).

Existen procesos secuenciales, los cuales están formados por etapas que se activan una después de la otra siempre que las condiciones de sus transiciones sean cumplidas. Igualmente, existen procesos en los que es indispensable que varias acciones y etapas sean activadas al mismo tiempo con una única transición, esta secuencia es conocida como paralela. Aquellos procesos que parten de varias etapas (a través de una o varias transiciones) hasta llegar a una etapa se los conoce como Convergencia, y aquellos procesos que parten de una etapa (a través de una o varias

transiciones) hasta llegar a varias etapas se los conoce como Divergencia. (Formación PLC Madrid, 2013, págs. 37-49)

Figura 15

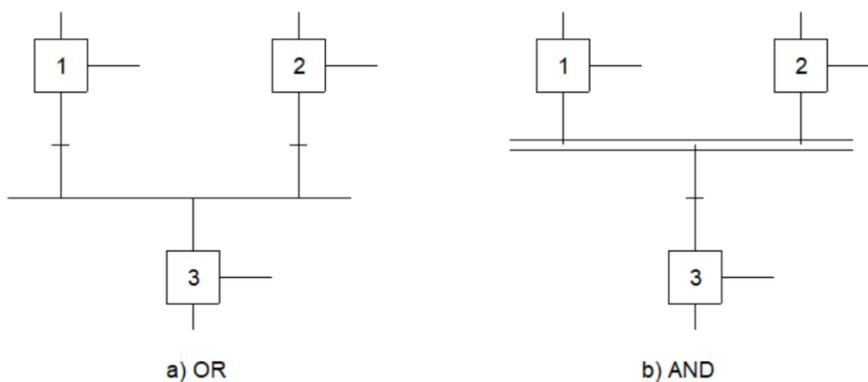
Convergencia



NOTA: La figura 15 ilustra la estructura de convergencia. Convergencia en OR indica que la etapa 1 puede transicionar a la etapa 2 o 3, dependiendo de que receptibilidad sea verdadera, mientras que la Convergencia en AND indica que la etapa 1 transicionará a la etapa 2 y 3 a la vez cuando su receptibilidad sea verdadera. Tomado de (Ayala, 2021).

Figura 16

Divergencia



Nota: La figura 16 ilustra la estructura de convergencia. Divergencia en OR indica que las etapas 1 o 2 pueden transicionar a la etapa 3, dependiendo de que receptibilidad sea verdadera, mientras que la Divergencia en AND indica que la etapa 1 y 2 deberán transicionar a la etapa 3 a la vez, cuando su receptibilidad sea verdadera. Tomado de (Ayala, 2021).

Guía Gemma

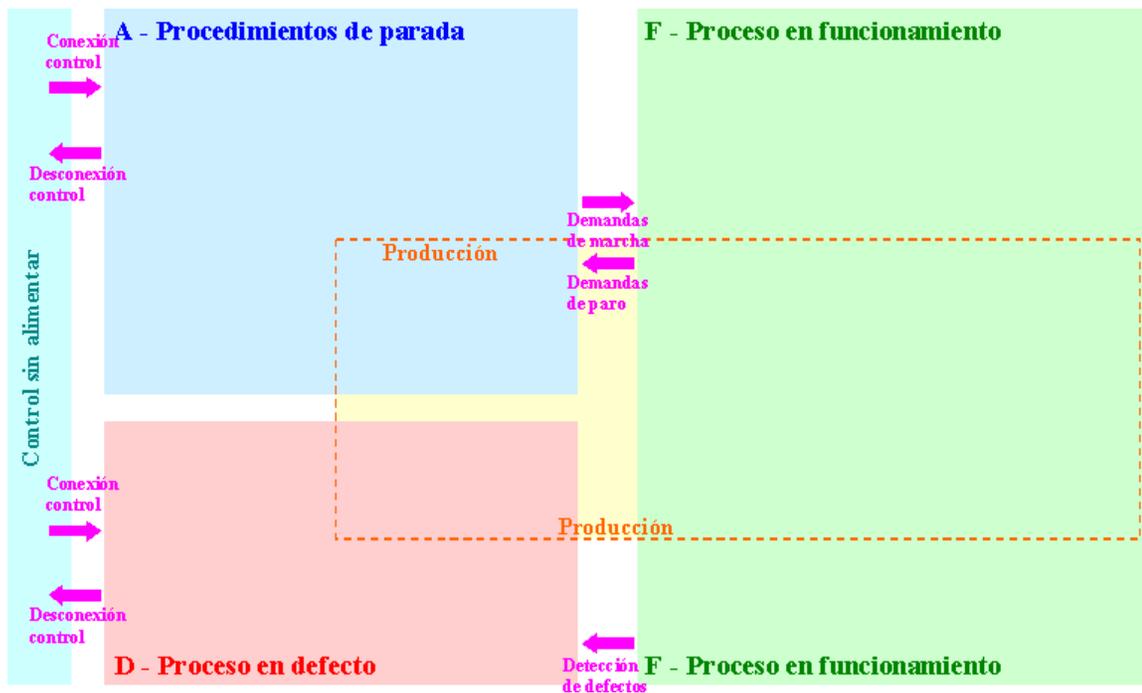
Es una herramienta de diseño con la cual se consigue presentar de una forma sencilla y legible, los distintos estados de un proceso de producción automatizado, así como las condiciones necesarias para poder transicionar de un estado a otro. Su nombre al igual que le Grafcet proviene de sus siglas en francés Guide d'Etudes des Modes de Marches et d'Arrêts, en español significa una Guía de Estudio de los Modos de Marcha y Parada. (Universidad de Sevilla, 2001)

El sistema de producción y el control de este (controlador) son las partes fundamentales de un automatismo. El sistema de producción puede estar o no estar produciendo, y puede encontrarse en estas tres situaciones:

- **En Funcionamiento:** funciona correctamente, significa que está en producción.
- **En Parada:** está en proceso de paro.
- **En defecto:** circunstancias en las cuales el producto o el proceso no funciona correctamente. (Universidad de Oviedo, 2002)

Figura 17

Guía Gemma con sus 5 Macro-Estados



Nota: La figura 17 muestra las situaciones (control sin alimentar, proceso en funcionamiento, en parada y en defecto) con rectángulos de varios colores y un quinto rectángulo, limitado por líneas discontinuas, que ilustra que el proceso productivo está en producción. Tomado de (*Universidad Politécnica de Cataluña, 2000*).

Cada una de estas situaciones puede subdividirse y formar 17 estados de funcionamiento posibles. No es necesario que todos los procesos contemplen todos los 17 estados. Así mismo, la guía Gemma también oferta las principales vías para pasar de un estado a otro. A continuación, se detallan los estados dentro de cada una de las tres situaciones mencionadas anteriormente.

Grupo F: Procedimientos de funcionamiento

Dentro de este grupo tenemos a los estados de Funcionamiento normal (F1 – F3) y los estados de Prueba y Verificación (F4 – F6).

- **F1 Producción normal:** es el estado más importante donde se realizan las tareas de producción, la máquina produce normalmente.
- **F2 Marcha de preparación:** son las acciones requeridas para que el proceso empiece con su producción.
- **F3 Marcha de cierre:** fase de vaciado y/o limpieza que se debe realizar en las máquinas antes de la parada o antes del cambio de ciertas características del producto.
- **F4 Marchas de verificación sin orden:** el operario puede ordenar al proceso realizar ciertas o predeterminas acciones. Se lo conoce como control manual.
- **F5 Marchas de verificación con orden:** el proceso completa su ciclo de funcionamiento a un ritmo fijado por un operador. Utilizado en tareas de mantenimiento y verificación o incluso en producción. Se lo conoce como control semiautomático.
- **F6: Marchas de prueba:** utilizada para mantenimiento y ajuste preventivo. (Universidad de Oviedo, 2002)

Grupo A: Procedimientos de parada y puesta en marcha

Este grupo corresponde a todas las paradas causadas por agentes externos al proceso. Los modos A1 y A4 corresponden a Parado, los modos A2 y A3 llevan a la

parada del sistema y los modos A5 y A7 permiten pasar de un estado en defecto a un estado de parada.

- **A1 Parada en el estado inicial:** es el estado normal de reposo o la etapa inicial representado con un rectángulo doble.
- **A2 Parada pedida a final de ciclo:** un estado transitorio en el que el proceso deberá volver a su estado inicial una vez finalizado el ciclo actual.
- **A3 Parada pedida en un estado determinado:** un estado transitorio en el que el proceso deberá parar en un punto determinado.
- **A4 Parada obtenida:** es un estado de reposo, pero distinto del inicial.
- **A5 Preparación para la puesta en marcha después del defecto:** fase de vaciado, limpieza o puesta en orden realizada después de algún desperfecto.
- **A6 Puesta del sistema en el estado inicial:** el sistema vuelve a su estado inicial (A1) por accionamiento manual o semiautomático.
- **A7 Puesta del sistema en un estado determinado:** el sistema retorna a un estado distinto de inicial para su puesta en marcha. (Universidad de Sevilla, 2001)

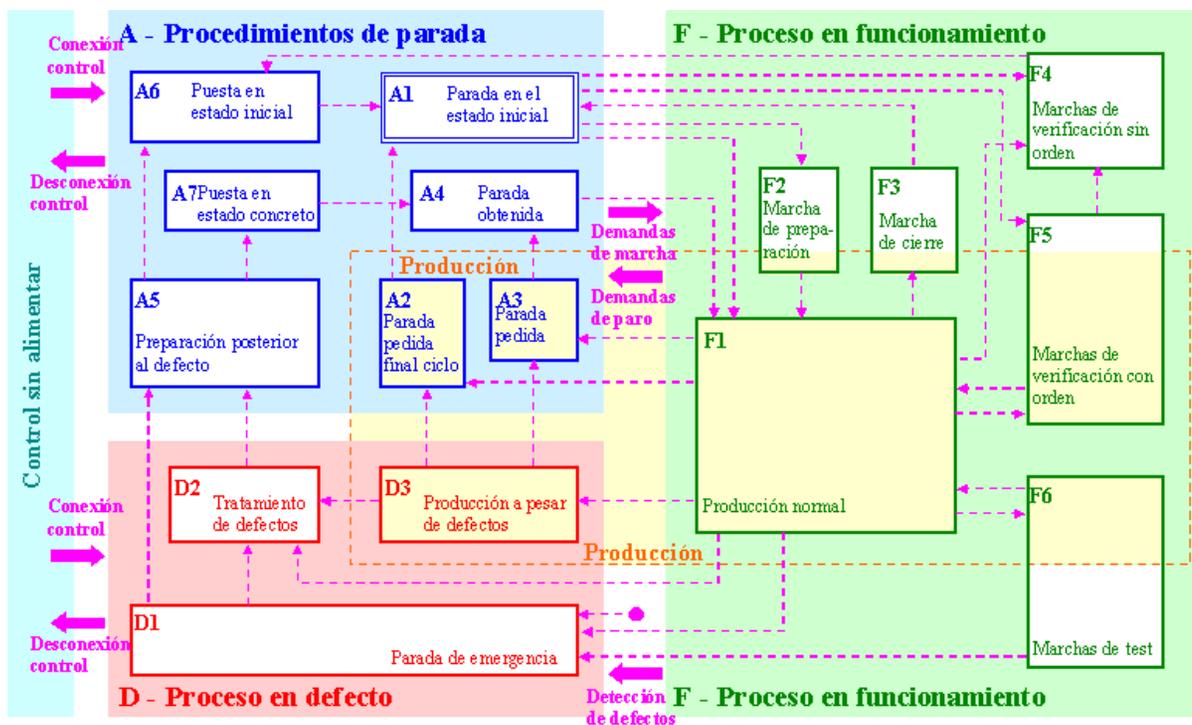
Grupo D: Procedimientos de defecto

Este grupo corresponde a todas las paradas causadas por agentes internos del proceso. El modo D3 corresponde al sistema en defecto en producción, el modo D1 si está en parada y D2 si está en fase de diagnóstico o tratamiento de fallas.

- **D1 Parada de emergencia:** son todas las acciones que se requieren para poder llevar el sistema a una parada segura. Se puede acceder a este estado desde cualquier otro.
 - **D2 Diagnóstico y/o tratamiento de los defectos:** determina las causas del error y/o las elimina sin o con ayuda del operador.
 - **D3 Producción a pesar de los defectos:** en este estado se deberá continuar con la producción, aunque el sistema trabaje incorrectamente.
- (Universidad de Sevilla, 2001)

Figura 18

Guía Gemma



Nota: La figura 18 muestra cada uno de los estados en los cuales un proceso puede funcionar, adicionalmente se puede observar los caminos más usuales (líneas

entrecortadas) que existen para ir de un estado a otro. Tomado de (*Universidad Politécnica de Cataluña, 2000*).

Esta guía indica que primero se deberán estudiar todos los estados necesarios que el proceso a automatizar requiera, después se deberán trazar todos los caminos indispensables entre estados, y finalmente, se deberán indicar todas las condiciones que se necesiten en cada uno de estos caminos. (Universidad de Oviedo, 2002)

PLC

Un controlador lógico programable es un procesador o computador utilizado en la automática industrial para la automatización de procesos mecánicos, eléctricos y electrónicos. Obtiene su nombre de sus siglas en inglés PLC (Programmable Logic Controller). La Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA, 2005) lo define como un “Instrumento electrónico, que utiliza memoria programable para guardar instrucciones sobre la implementación de determinadas funciones, como operaciones lógicas, secuencias de acciones, especificaciones temporales, contadores y cálculos para el control mediante módulos de E/S analógicos o digitales sobre diferentes tipos de máquinas y de procesos”.

El PLC surgió por la necesidad de dispositivos de control que sean robustos. Es decir, que soporten condiciones adversas como altas y bajas temperaturas, humedad, que sean inmunes al ruido eléctrico y que sean resistentes a vibraciones e impactos. Adicionalmente, estos autómatas fueron diseñados para ser flexibles, confiables y precisos en el control de procesos; y para abarcar múltiples señales de entrada y salida.

Tiene varias ventajas respecto a otros controladores, una de ellas es que puede realizar el control y monitoreo de operaciones en tiempo real gracias a su rápida respuesta. Además, es capaz de adaptarse fácilmente a nuevas tareas debido a la flexibilidad en su programación, reduciendo significativamente costos innecesarios en la elaboración de proyectos. Otra característica favorable que poseen los PLCs es su comunicación inmediata con otro tipo de controladores y computadores e inclusive pueden realizar operaciones a nivel de red. Su única desventaja tal vez es que estos equipos requieren de mano de obra especializada para su correcto funcionamiento. (UNED, 2014, págs. 4-5)

Componentes

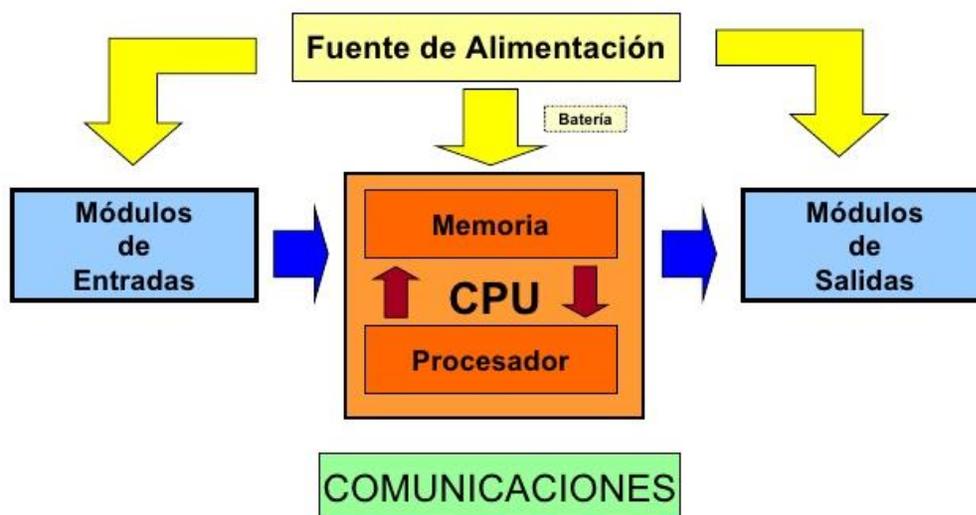
Existen muchas configuraciones o elementos que conforman un PLC indistintamente su marca. Pero, en cada PLC existen componentes y conceptos comunes. Los componentes más esenciales son:

- **Fuente de Poder:** puede estar construida dentro del PLC o como una unidad externa. Garantiza los voltajes de operación internos del controlador y sus bloques, sus voltajes más comunes son $\pm 5V$, $\pm 12V$ y $\pm 24V$.
- **CPU (Unidad Central de Procesamiento):** es el ordenador donde se guarda y procesa toda la lógica Ladder. Está basado en un microprocesador que utiliza aritmética y operaciones lógicas para controlar distintas funciones. (Jack, 2007, pág. 36)
- **Memoria:** se divide en dos, la memoria permanente (PM) donde se ejecuta el sistema operativo del PLC, y la memoria RAM donde se guarda y ejecuta el programa diseñado.

- **Módulos I/O (Entradas/Salidas):** son módulos de señal que organizan la entrada y salida de las señales, con las internas del PLC. Pueden ser digitales (DI, DO) y analógicas (AI, AO). Las entradas provienen de sensores o interruptores y las salidas van hacia actuadores.
- **Buses de Comunicaciones:** existen 4 tipos de buses para la comunicación. El bus de datos transfiere datos entre los componentes individuales. El bus de direcciones transfiere datos entre celdas de memoria. El bus de control transfiere las señales de control entre los componentes internos. Y el bus de sistema conecta los puertos con los módulos I/O. (UNED, 2014, págs. 9-10).

Figura 19

Componentes de un PLC



Nota: La figura 19 ilustra de forma gráfica como está constituido un PLC, desde sus módulos de entrada, pasa por el CPU y mediante los buses de comunicaciones finalmente

llega a los módulos de salida. Todo esto mientras el PLC y sus puertos están siendo alimentado por su fuente de poder. Tomado de (SMC, 2012).

Clasificación

Los PLC puede ser clasificados de diferentes formas, por su tamaño, forma, número de entradas y salidas, etc. La clasificación más general los divide en tres categorías:

- **PLC Nano:** es un PLC compacto (tiene integrados la Fuente, el CPU y los módulos I/O). Posee un número reducido de entradas y salidas digitales.
- **PLC Compacto:** más grande que el nano, tiene integrado en el mismo equipo la fuente, el CPU y los módulos I/O. Pueden manejar hasta unas 500 entradas y salidas, además posee varios módulos especiales como: I/O análogos, contadores rápidos, etc.
- **PLC Modular:** está compuesto por varios elementos que lo conforman. Estos son: el rack, la fuente de poder, el CPU y los módulos I/O. (Jack, 2007)

Figura 20

PLC nano y compacto



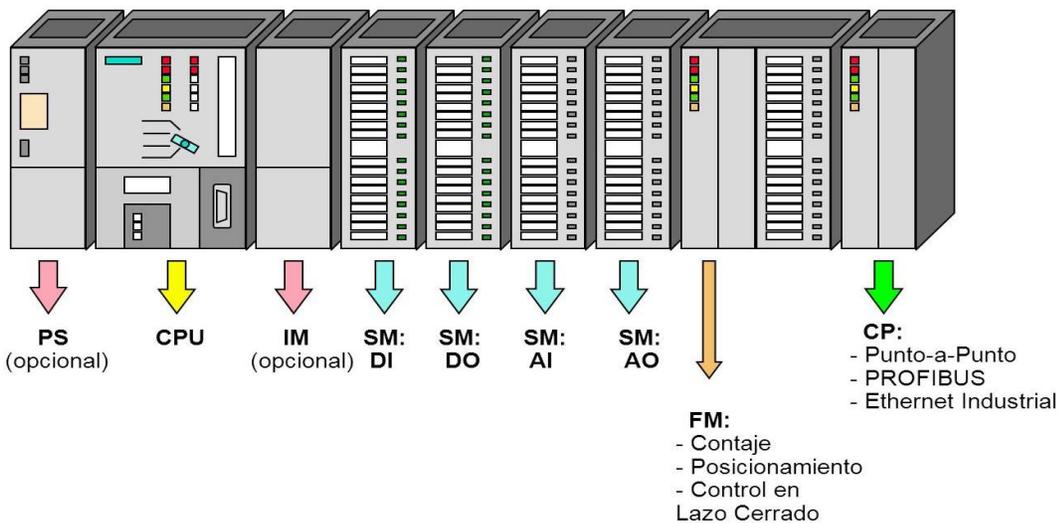
a) Nano

b) Compacto

Nota: En la figura 20 se pueden observar 2 tipos de PLC que tienen integrados todos sus componentes en un mismo equipo. En la imagen a) poder observar un PLC nano, que es relativamente pequeño en comparación con el PLC compacto de la imagen b). Tomado de (SIEMENS, 2020).

Figura 21

PLC modular



Nota: En la figura 21 se puede observar al PLC Modular S7 300. Se pueden observar sus componentes en cada módulo. La fuente de alimentación (PS), el CPU, el módulo de interfaz (IM), los módulos de entrada digitales (DI) y analógicos (AI), los módulos de salida digitales (DO) y analógicos (AO), el módulo funcional (FM) y el procesador de comunicación (CP). Tomado de (*AUTOMATISMO Profe. Paul, 2011*)

Principio de Funcionamiento

El PLC funciona cíclicamente, recibiendo y transfiriendo señales eléctricas para expresar variables físicas. Por eso los módulos de señales en las entradas y salidas son esenciales. Existen 3 tipos de señales en un PLC:

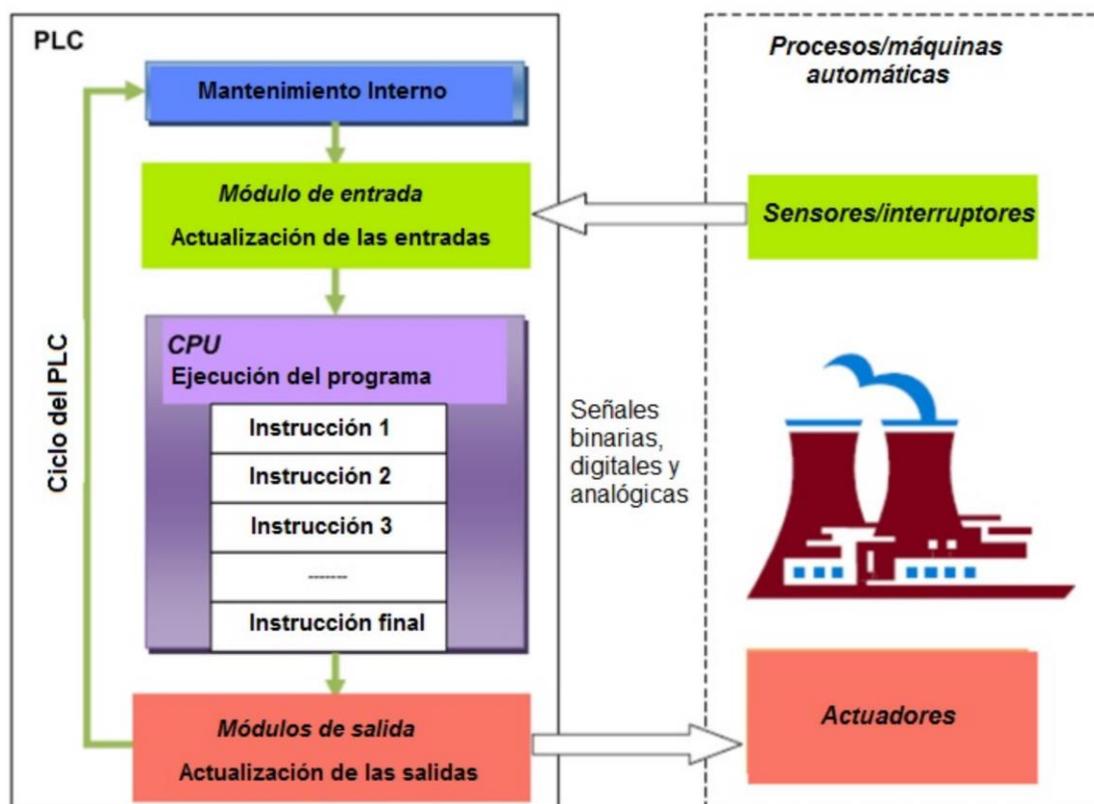
- **Binarias:** es una señal de un bit con dos únicos valores lógicos (“0” – falso) para (-5, -12 y -24 Vdc) y (“1” – verdadero) para (+5, +12 y +24 Vdc).
- **Digitales:** es una secuencia de señales binarias considerada como una misma. Cada posición de esta señal digital se conoce como bit. Los formatos más utilizados son *byte* – 8 bits, *word* – 16 bits, *double word* – 32 bits y *double long word* – 64 bits.
- **Analógicas:** señales que poseen valores continuos, en otras palabra significa que en un rango de voltaje o corriente existe un número infinito de valores que serán representados mediante un número finito de bits. Los rangos más comunes son 0 – 10 Vdc y 4 – 20 mA.

Cada ciclo del PLC comienza con un mantenimiento como control de memoria o diagnóstico. Después, el PLC realiza la actualización de sus entradas y salidas, estas

señales son leídas, convertidas en bits y almacenadas en la memoria. Posteriormente, el CPU ejecuta el programa que se ha cargado en su memoria (secuencialmente se ejecuta cada instrucción). Durante la ejecución del programa se crean nuevas señales de salida. Finalmente, se actualizan y escriben las señales de salida para luego ser convertidas en señales acopladas (binaria, digital o analógica) para los actuadores. Al culminar el ciclo empieza uno nuevo. (Jack, 2007, págs. 17-19)

Figura 22

Ciclo de operación de un PLC



Nota: En la figura 22 se puede observar el ciclo y principio de funcionamiento de un PLC, puede variar mínimamente entre los modelos de distintas empresas. Tomado de (Jack, 2007).

Normativa para el Diseño de Interfaces Hombre-Máquina (ISA 101)

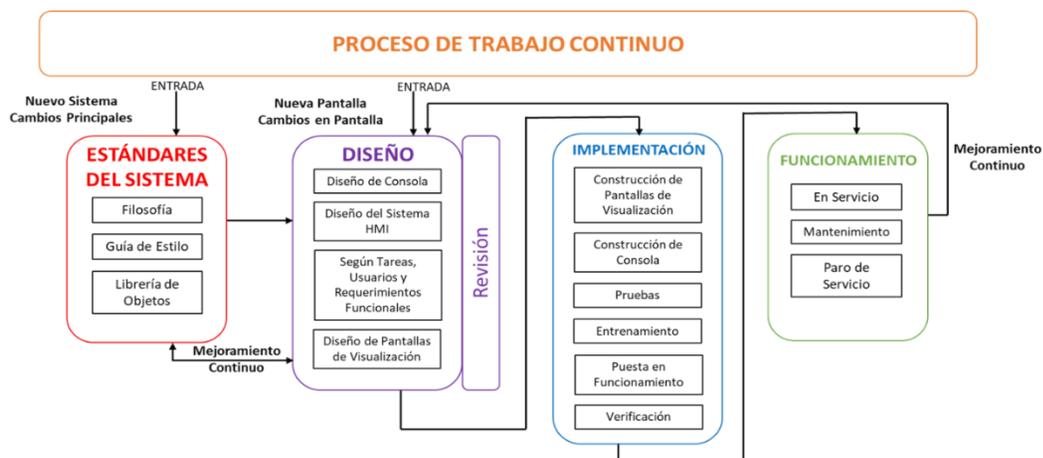
El propósito de la norma ISA 101 es abordar toda la filosofía de diseño, implementación, operación y mantenimiento de interfaces hombre-máquina (HMI) para sistemas de automatización de procesos. Este estándar es una guía para diseñar, construir, operar y mantener HMIs, de manera que se obtenga mayor seguridad, efectividad y eficiencia en los sistemas de control de procesos en cualquier condición de funcionamiento. (ANSI/ISA-101, 2015, pág. 9).

Gestión del Sistema HMI

La HMI debe ser desarrollada y gestionada utilizando un modelo cíclico como el que se puede apreciar en la figura 23.

Figura 23

Ciclo de una HMI



Nota: El ciclo de una HMI se divide en 5 etapas que siempre están en mejora continua. Los estándares de los sistemas abarcan la filosofía, la guía de estilos y herramientas. La etapa de diseño y revisión se subdivide en el diseño de consola, el diseño del sistema

HMI, los requerimientos del usuario o del proceso y el diseño de la pantalla. La etapa de implementación se basa en la construcción de la consola y pantalla, además de las pruebas, entrenamiento, puesta en marcha y verificación. La operación abarca los temas como en funcionamiento, mantenimiento y desmantelamiento. Los procesos de trabajo continuos también pueden observarse con la gestión de cambio, auditorías y validación. Tomado de *(ANSI/ISA-101, 2015)*.

Etapa 1: Estándares del Sistema

Esta etapa comprende el desarrollo de: la filosofía, la guía de estilos y las herramientas de una HMI.

Etapa 2: Proceso de Diseño

La etapa del proceso de diseño incluye 4 apartados: diseño de consola, diseño del sistema HMI, usuarios, tareas y análisis funcionales; y diseño de pantalla (display).

Etapa 3: Implementación

En la etapa de implementación del ciclo de un HMI, se construye la HMI tanto en software como en hardware en base a los diseños y estándares obtenidos en las dos etapas anteriores. El proceso se divide en 6 actividades: Construir la pantalla, construir la consola, probar, entrenar, poner en servicio y verificar.

Etapa 4: Operación

Una vez que la HMI haya sido puesta en servicio y verificada, se traslada a la etapa de operación. Este capítulo comprende 3 actividades: en servicio, mantenimiento y desmantelamiento.

Etapa 5: Procesos de trabajo continuo

Los procesos de trabajo continuo se despliegan a lo largo de todo el ciclo del HMI para resaltar la naturaleza continua de estas actividades que se dividen en tres: Gestión de Cambio, auditoría y validación.

Ingeniería de factores humanos (HFE) y Ergonomía

Principios Generales para el diseño de HMI

La correcta aplicación de los principios HFE garantizan un diseño efectivo de una HMI. El diseño debe concentrarse principalmente en ayudar al usuario a monitorear y controlar las principales tareas del proceso. Existen 4 principios fundamentales que deben considerarse durante el diseño de una HMI:

- La HMI es una herramienta efectiva para el seguro y eficiente control de procesos.
- La HMI ayuda en la temprana detección, diagnóstico y apropiada respuesta de situaciones anormales.
- LA HMI está estructurada para ayudar al operador a priorizar la respuesta a importantes y simultáneas alteraciones del sistema.
- La falla del display o elementos de este son inmediatamente evidentes para el operador.

La HMI debe tener una apariencia y funcionamiento coherente en relación con los conceptos de diseño para la visualización de la información y la interacción del usuario. Su diseño debe estar basado en los requerimientos del proceso, en las

necesidades del operador y debe responder eficientemente en cualquier modo de operación (incluso en condiciones anormales). Es imprescindible que el usuario pueda operar la HMI de forma intuitiva y que toda la información necesaria y los controles del proceso estén plasmados en esta. En otras palabras, la información debe presentarse en un formato apropiado y de fácil acceso para el usuario (esto incluye a la terminología usada).

Es necesario que tanto la HMI como los usuarios estén conscientes del estado actual y futuro del proceso de tal manera que los accidentes debido al error humano sean mínimos. Cuando el proceso esté funcionando como se lo esperaba, la HMI no debe presentar estímulos sensoriales al usuario; pero a medida que el proceso de desvíe de lo requerido, la HMI deberá alertar visual y/o audiblemente al usuario para que actúe apropiadamente.

Limitaciones sensoriales y cognitivas del usuario

El diseño de HMIs debe incorporar principios ergonómicos basados en las limitaciones sensoriales de los usuarios. El brillo de pantalla de la HMI debe ser el adecuado dependiendo de la iluminación del ambiente en que se encuentre. Para prevenir el dolor o resequedad de ojos la guía recomienda evitar el excesivo uso de contrastes. El uso de color debe usarse únicamente para enfatizar información clave como alarmas, condiciones anormales o elementos dinámicos para evitar distracciones del usuario, pero sobre todo para combatir las deficiencias respecto al color como daltonismo, ceguera de color, etc. Por ello, se deben evitar los contrastes rojo-verde, verde-amarillo y blanco-celeste.

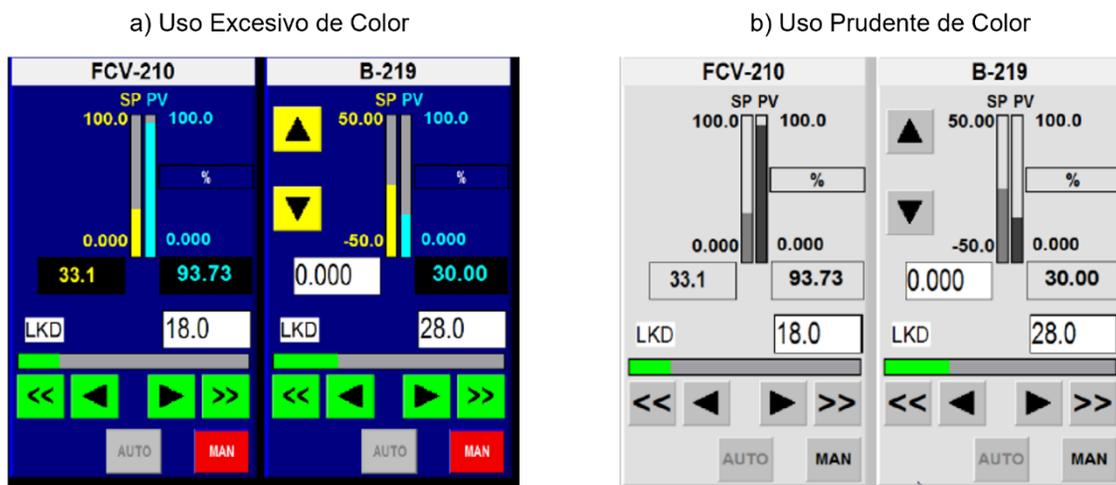
El fondo del display debe ser de un color no saturado o neutral como un gris claro, para prevenir las distorsiones cromáticas y asegurar la relevancia de la información mostrada, evitando información innecesaria. El primer plano y el fondo deben generar el contraste suficiente independientemente de las condiciones de iluminación. El contenido de una pantalla dependerá de la función o propósito y se deberá considerar proveer únicamente la información relevante y si es necesario, dividir el contenido de la pantalla en múltiples displays.

Se debe usar un límite de colores si se desea un diseño efectivo de una HMI, y se deben usar coherentemente dinámicas visuales como movimiento, parpadeos y cambios de color para atraer la atención del operador, cuidando de no usarlos en demasía ya que pueden generar distracción. Solamente se debe utilizar alarmas audiovisuales para identificar alarmas prioritarias, si no, visualmente se puede observar alarmas no prioritarias.

Para que el usuario pueda procesar la información eficazmente se recomienda agrupar todos los datos y elementos de una manera consistente, de tal forma que sean procesados cognitivamente como un solo objeto, haciendo un grupo mental, generando rapidez en la respuesta del operador. (ANSI/ISA-101, 2015, págs. 35-39).

Figura 24

Ejemplo del mal y buen uso de los colores en una HMI



Nota: En la figura 24 se puede apreciar 2 imágenes, una que presenta un uso desmedido del color (utilizando demasiados colores brillantes en el fondo y en todos sus elementos), y otra donde se puede apreciar un uso coherente del color (fondo gris claro que contrasta correctamente con los otros colores de los procesos, y donde únicamente lleva color verde que muestra un porcentaje importante). Tomado de (Hawrylo, 2016).

Diseño Funcional de Elementos y Estructura General de la HMI

Tal y como se menciona en el HFE, se debe usar los colores más llamativos como un diferenciador que llame la atención al usuario sobre situaciones fuera de lo común. Los displays que representen los sinópticos de procesos no deben llevar colores muy saturados, y los colores de las alarmas deben ser únicamente usados para ello.

Figura 25

Tabla de colores para el diseño de una HMI

Color	RGB	Muestra	Uso
Gris	213, 213, 213		Fondo General
Blanco	255, 255, 255		Resaltar elementos pequeños
Gris claro	243, 243, 243		Indicación de ENCENDIDO para equipos
Gris	136, 136, 136		Indicación de APAGADO para equipos
Gris oscuro	74, 74, 74		Ciertos textos, líneas de procesos secundarias
Negro	0, 0, 0		Textos y etiquetas, líneas principales de procesos, contorno de equipos
Azul oscuro	0, 0, 215		Valores de proceso, salidas y modos del controlador, línea de tendencia única.
Verde oscuro	0, 128, 0		Setpoints del controlador y entradas del operador, línea de tendencia de setpoint
Verde claro	153, 255, 102		Posible "verde tenue" para resaltamiento específico
Azul claro	187, 224, 227		Rangos o condiciones de operación deseados
Cyan	0, 255, 255		Tiras de nivel para recipientes, líneas de tendencia
Café	204, 102, 0		Líneas de tendencia, indicador de posición
Rosado	255, 153, 204		Posible "rojo tenue" para indicaciones específicas
Rojo	255, 0, 0		Nivel más alto, Alarma prioridad 1
Amarillo	255, 255, 0		Alarma prioridad 2
Naranja	255, 102, 0		Alarma prioridad 3
Magenta	255, 0, 255		Alarma prioridad 4 o diagnóstico
Magenta oscuro	204, 0, 102		Líneas de tendencia

Nota: En la figura 25 se puede observar el código de colores que la norma ANSI/ISA101 recomienda usar para el diseño de la HMI. Tomado de (*Chapter 15 Human Machine Interface, 2016*).

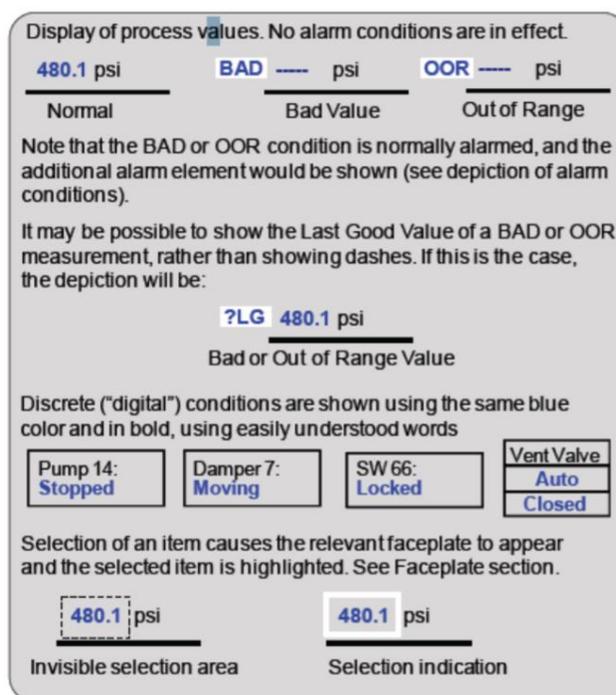
Representación de valores en procesos

Tal y como lo indica la

Figura 25, el color asignado a la representación de valores es el color azul oscuro (en negrilla muchas veces) ya que debe mostrarse de una forma diferente al texto estático que usualmente ocupa el color negro, y porque contrasta con el fondo de color gris claro. No se muestran los ceros iniciales con excepción de valores menores a uno (ej. 0,50), el valor mostrado dependerá de la precisión requerida por el proceso. Las unidades de medida de los valores del proceso se presentarán como texto estático normal. (ACS, 2016)

Figura 26

Uso del color azul oscuro para valores de procesos



Nota: En la figura 26 se ilustra la representación del valor de los procesos, se debe recalcar que únicamente se deben mostrar los valores de los procesos más importantes y no todos. Tomado de (*Chapter 15 Human Machine Interface, 2016*).

Representación de alarmas

Todas las alarmas deben ser representadas según su prioridad (color / forma / texto). En la figura 25 se observan los colores asignados a las alarmas, estos colores no pueden ser utilizados en algún otro elemento. Cuando el valor de un proceso o un objeto llega a la condición de alarma, un indicador comienza a parpadear junto a este al mismo tiempo que aparece la prioridad de la alarma. Este indicador permanecerá visible mientras la condición de alarma este activada. De esta forma el operador puede detectar la alarma a través del indicador que se muestra intermitentemente. (ACS, 2016)

Figura 27

Representación de las alarmas

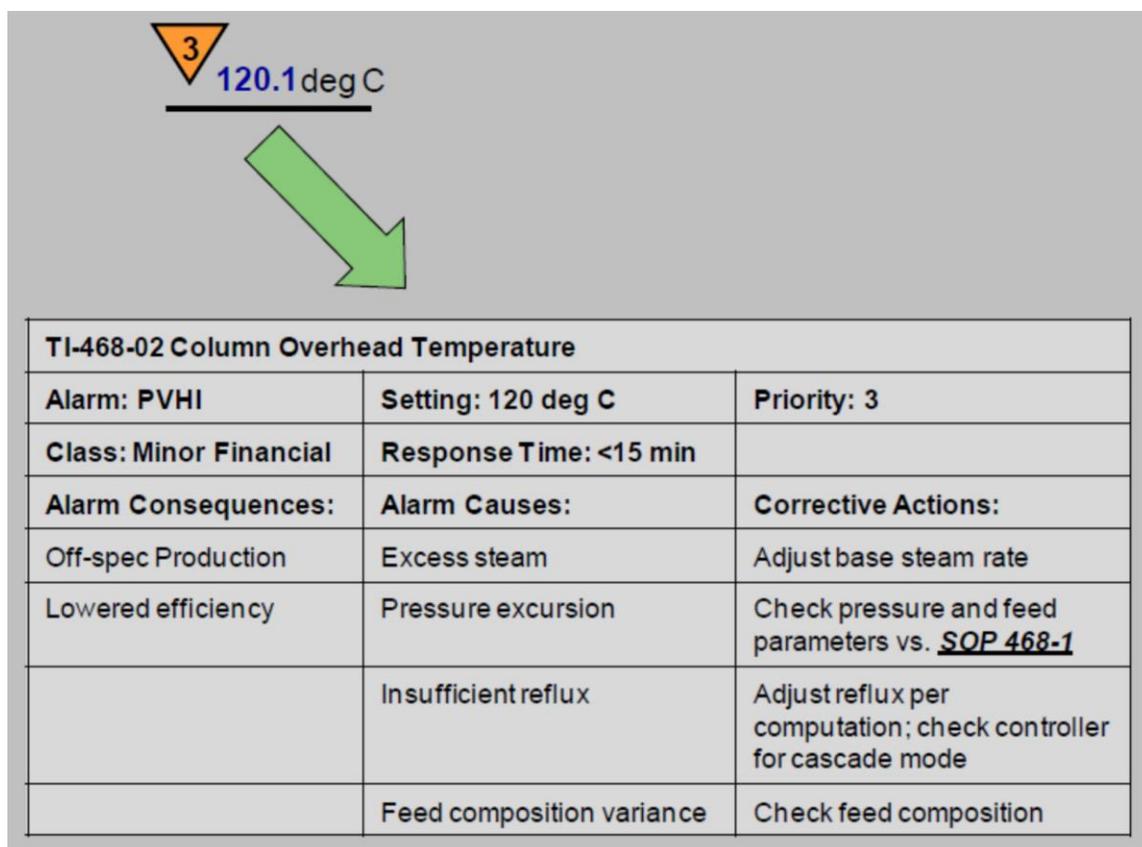


Nota: Se puede apreciar en la figura 27 que cada indicador de alarma tiene una forma y color distinto que no puede ser usado para ningún otro elemento. Tomado de (Bartels, 2011).

Es importante que cuando aparezca un indicador de alarma, simplemente con un click en ella se pueda abrir una pestaña con toda la información de la alarma causada por una situación anormal. Esta pestaña debe contener las causas, las consecuencias y las acciones correctivas ante esta situación.

Figura 28

Pestaña de alarma desplegada



Nota: La figura 28 muestra un claro ejemplo del despliegue de una alarma de temperatura con prioridad 3 con su indicador y la información respectiva. Tomado de (ACS, 2016).

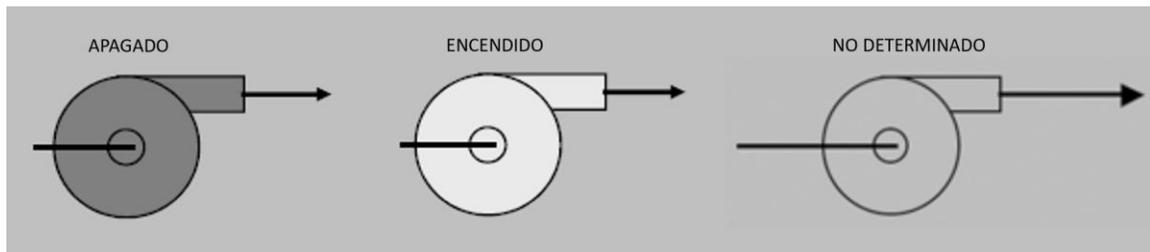
Representación de animaciones

Para poder representar animaciones se utilizan movimientos, parpadeos o cambios de color. Para representar que un equipo está encendido se utiliza un color

más claro que el fondo (e.g. gris claro) y para simular que están apagados un color más oscuro que el fondo (e.g. gris oscuro). Si el dispositivo detecta un estado determinado del equipo, se incluirá el equipo en el diagrama de forma transparente al fondo. Se recuerda que los indicadores de alarmas deberán ser visibles y parpadear únicamente cuando la condición de alarma este activada. (ACS, 2016)

Figura 29

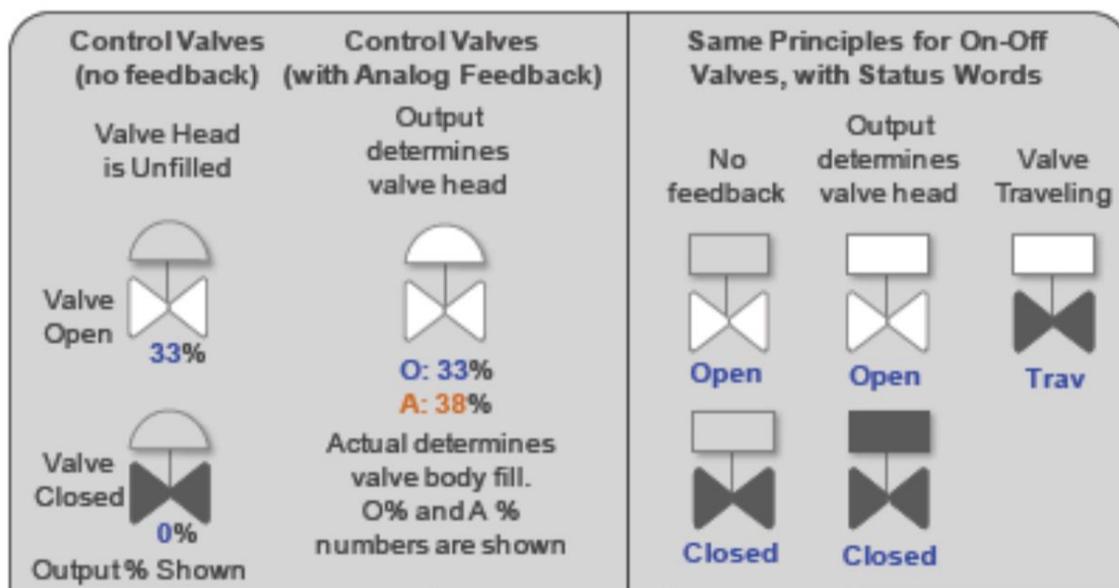
Cambios de color para animaciones



Nota: La figura 29 muestra claramente como el cambio de color de una bomba puede generar animación. La bomba más oscura está apagada, la más clara está encendida y aquella igual al color del fondo tiene su estado indeterminado. Tomado de (Ayala, 2021).

Figura 30

Cambios de color para válvulas



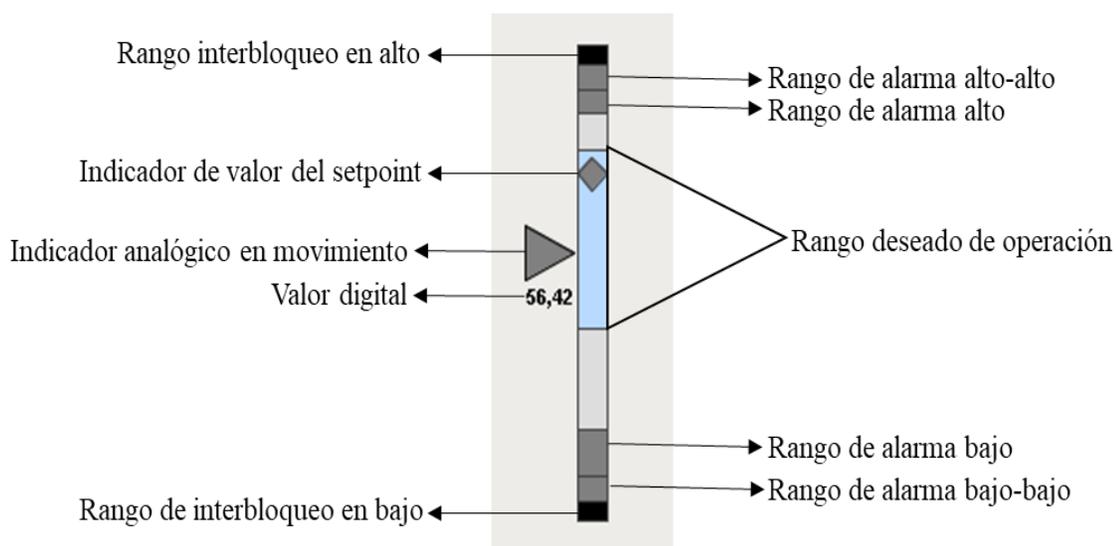
Nota: En la figura 30 se puede apreciar otro ejemplo del uso de color para la animación, las válvulas tendrán un color gris claro cuando estén abiertas, un color gris oscuro cuando estén cerradas y un color transparente cuando no se exista feedback. Tomado de (Chapter 15 Human Machine Interface, 2016).

Representación de Indicadores analógicos

En lugar de escribir todos los valores de procesos de forma numérica o digital, se recomienda presentarlos utilizando indicadores analógicos ya que pueden ser reconocidos mucho más rápida y fácilmente por el operador. También facilita el entrenamiento a nuevos usuarios y hace mucho más sencilla detección de situaciones anormales, incluso antes de que la alarma sea activada.

Figura 31

Elementos de un indicador analógico



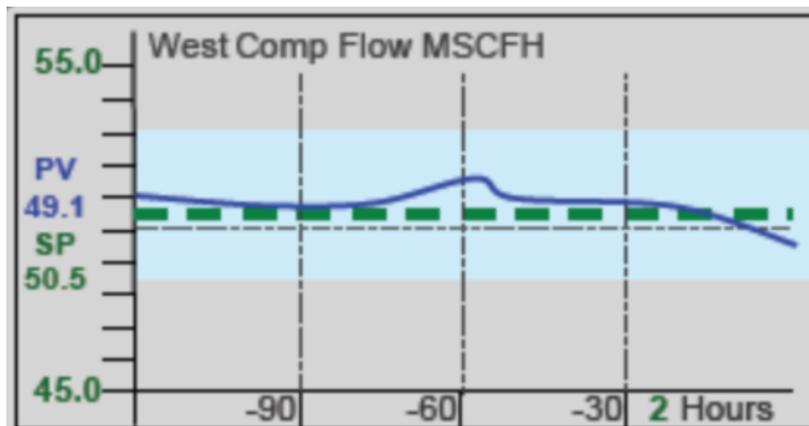
Nota: LA figura 31 muestra un ejemplo de un indicador analógico. Se observa el rango deseado en color azul claro, el rango bajo y alto de interbloqueo en negro, los rangos de operación permisibles en gris claro, los rangos de alarma en gris oscuro (pero pueden cambiar dependiendo de la alarma, e.g. amarillo o rojo), también se puede observar un indicador del valor de setpoint e igualmente un indicador del valor analógico en gris oscuro y el valor digital del proceso escrito con color negro. Tomado de (*Chapter 15 Human Machine Interface, 2016*).

Representación de tendencias

La deficiencia más grande de una HMI es la falta de tendencias correctamente implementadas ya que se siempre se encuentran subutilizadas. Todos los gráficos de procesos tienen uno o más valores que podrían ser entendidos de mejor manera si se los presentara en gráficos de tendencias. Los gráficos de tendencias deberían aparecer siempre en la pantalla general o específica del proceso sin la necesidad de tener que dar algunos clics para que estos aparezcan, y deberían incorporar los elementos que abarquen tanto los rangos de valores de las condiciones normales como anormales.

Figura 32

Gráficos de Tendencias correctamente utilizados

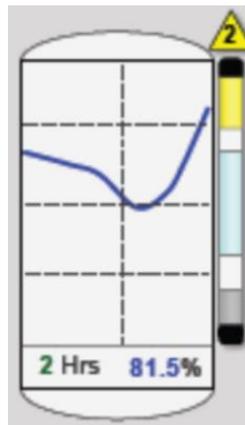


Nota: La figura 32 muestra un gráfico de tendencias del flujo de un proceso. El gráfico presenta los datos de hace 2 horas donde el set point se representa con una línea verde entrecortada, el valor del flujo es representado por una línea continua azul, el rango de valores admisibles del flujo se encuentra sombreado con color celeste y los valores de condiciones anormales con el mismo color del fondo. Tomado de (*Chapter 15 Human Machine Interface, 2016*).

Las tendencias deberían aplicarse incluso en los mismos equipos como contenedores y tanques reemplazando a las animaciones que saturan con muchos colores. Es mucho más acertado utilizar un trend y un indicador análogo con sus rangos, de tal manera que el operador pueda identificar cuando la línea de tendencia está dentro de sus rangos admisibles.

Figura 33

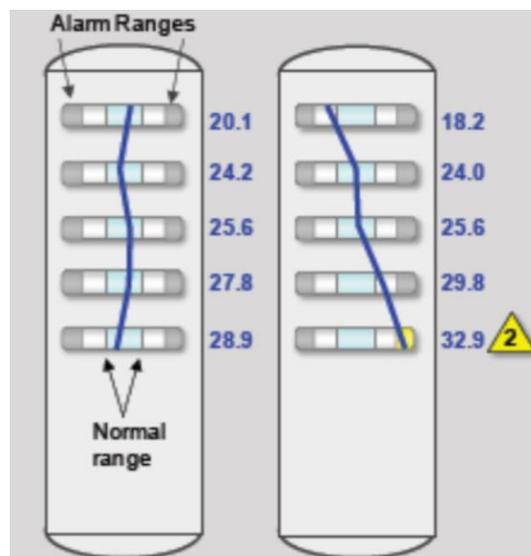
Gráfico de un indicador de nivel con tendencia



Nota: La figura 33 demuestra que la combinación de gráficos de tendencias e indicadores analógicos son la mejor opción para representar el nivel de un tanque, ya que, si la línea de tendencia se sale del rango admisible celeste, entonces el indicador de una alarma se activará. De esta forma, el operador puede incluso detectar alguna anomalía y prevenir de que el proceso marché hacia una condición anormal. Tomado de (*Chapter 15 Human Machine Interface, 2016*).

Figura 34

Gráfico del control de temperatura de un tanque



Nota: La figura 34 demuestra que los gráficos de tendencias con los indicadores analógicos son fáciles y rápidos de entender. En este proceso se puede observar la temperatura medida a lo largo de un contenedor, la línea recta vertical azul representa homogeneidad de temperatura, mientras que la recta inclinada representa una temperatura baja en la parte inferior del tanque, activando una alarma. Tomado de (*Chapter 15 Human Machine Interface, 2016*).

Representación de tablas

Incluso en las tablas y listas se deben aplicar los conceptos de color y no saturar la HMI con colores muy brillantes. Se utilizará el color negro para texto estático, color azul oscuro para valores o textos variables del proceso, color gris claro para equipos encendidos y gris oscuro para equipos apagados, también se utilizarán indicadores de alarma para facilidad del operario.

Figura 35

Representación correcta de tablas de una HMI

HPHMI Equipment Status Table			
Air Comp	Status	Mode	Diagnostic
C #1	RUNNING	AUTO	OK
C #2	STOPPED	MAN	OK
C #3	RUNNING	AUTO	OK
C #4	STOPPED	AUTO	FAULT 

Another Better Practice Status Table			
Pump Status			
A2 CWP	 2	A2 HWP	C2 HWP
ON	ON	ON	A2BFPT
B2 CWP	B2 HWP	SUBFP	 3
ON	OFF	ON	B2BFPT
			ON

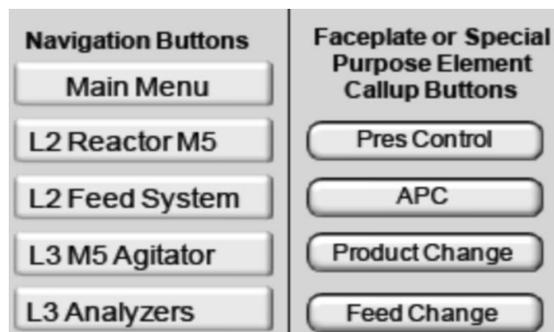
Nota: La figura 35 muestra la practica correcta para el diseño de una tabla, considerando los colores e indicadores respectivos para el fácil entendimiento del operador. Tomado de (*Chapter 15 Human Machine Interface, 2016*).

Representación de comandos y botones de navegación

Los botones de navegación deben ser imprescindibles en todas las pantallas, ya que a través de estos se puede acceder a las demás pantallas a las que el usuario tenga acceso. Los botones de navegación deben ser idénticos y estar situados en la parte inferior o inferior derecha de la pantalla, y deben diferenciarse de los botones de comando.

Figura 36

Botones de comando y navegación



Nota: La figura 36 muestra el diseño de los botones de navegación y comando, indicando que su diseño debe ser distinto entre sí, para su diferenciación. Tomado de (*Chapter 15 Human Machine Interface, 2016*).

Estilo y Visualización

El estilo de pantalla de una HMI está basado en los requisitos funcionales determinados en el proceso de diseño, esto hace referencia a la forma en cómo se presenta la información en la pantalla. Cada estilo varía en función de la posición, tamaño del monitor, interacción del usuario y cantidad de información a ser manejada por el mismo.

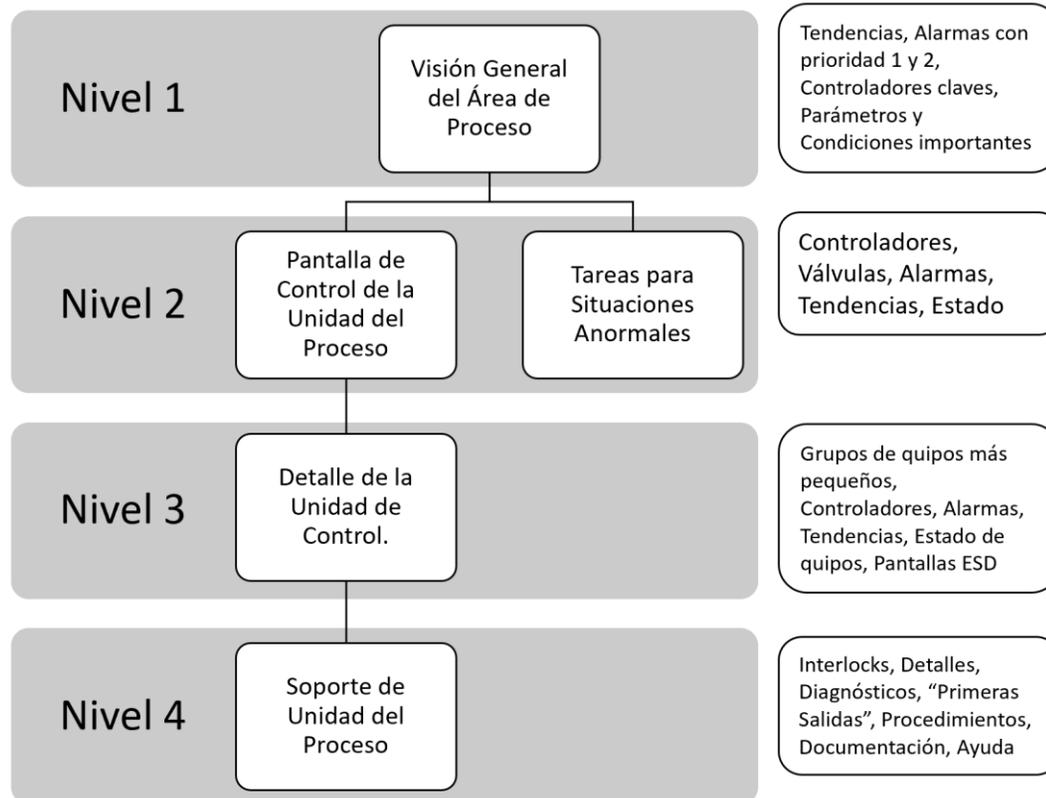
Todos los gráficos deben ser colocados consistentemente, en juego con el flujo del proceso y no idénticamente a la localización física de los elementos. El diseño debe permitir al usuario entender el proceso de forma natural, para ello, el flujo del proceso deberá ir de izquierda a derecha y es recomendable desde arriba hacia abajo, evitando el cruce de líneas de flujo del proceso. (Moya, Características del Estándar aNSI/ISA-101.01-2015: Interfaces Humano-Máquina para Sistemas de Automatización de Procesos, 2019).

Jerarquía

Es indispensable tener jerarquía en las pantallas para que el operador pueda tener una vista estructurada de todo el proceso a su alcance. Cada nivel de jerarquía permitirá profundizar la información en detalle y en funcionalidad de control. La guía recomienda diseñar una jerarquía de máximo 4 niveles, donde el nivel 1 tiene el contenido más amplio y el nivel 4 tiene el más específico. (ANSI/ISA-101, 2015).

Figura 37

Niveles Jerárquicos de pantallas de una HMI



Nota: En la figura 37 se puede ver un diagrama jerárquico de los niveles de pantallas de un HMI, empezando desde el nivel 1 con una visión general del proceso, el nivel 2 con tareas ante situaciones anormales y una pantalla de control de unidad de proceso, el nivel 3 con el detalle de la unidad de control y finalmente el nivel 4 con el soporte de la unidad del proceso. Tomado de (*Chapter 15 Human Machine Interface, 2016*).

Interacción del usuario

La metodología usada en software y los dispositivos usados en hardware son aquellos que permiten la interacción entre el usuario y la HMI. Esta metodología incluye a la entrada de datos, navegación, prevención de errores y seguridad de acceso. La

interacción Usuario-HMI debe ser diseñada consistentemente de forma que la respuesta del operario sea más rápida. Existen ciertos principios para este diseño consistente:

- Los números deben presentarse bajo una resolución de formato especificada por los requerimientos de los usuarios para las distintas tareas.
- El texto debe tener justificación hacia la dirección de lectura normal.
- Se deben evitar las abreviaturas y acrónimos, excepto si estos forman parte del lenguaje común del operador.
- El subrayado debe ser únicamente utilizado para hipervínculos, y no para generar énfasis.
- Absolutamente todos los efectos y entradas de un comando dado deben ser claramente visibles y reconocibles para el usuario.
- El texto de las etiquetas de los botones debe ser evidente y debe estar asociado con su botón para poder confirmar su ejecución.
- Las ventanas emergentes no deben cubrir ni ocultar ninguna parte vital de la pantalla de la HMI.
- Técnicas de prevención de errores deben ser considerados de tal forma que no obstaculicen notoriamente la capacidad de respuesta del operador.
- El diseño HMI puede contar con un sistema de seguridad como: restricción de acceso y contenido, inicio de sesión temporal, múltiples roles y privilegios, firmas electrónicas, acceso biométrico, etc.

- El tamaño de la pantalla de una HMI depende de la cantidad de datos mostrados, la ubicación física de la consola y de los métodos de entrada de datos.

Existe una gran variedad de dispositivos de interacción tal como: teclados, ratones, pantallas táctiles, entrada de voz, lectores RFID y de barras, cámaras, pulsadores, entre otros.

Navegación

La navegación del sistema entre pantalla debe ser coherente, organizada y consistente de forma que el usuario pueda operarla intuitivamente. Los métodos de navegación pueden incluir símbolos gráficos en la pantalla, botones de teclado y de la barra de herramientas, pestañas, hipervínculos, entradas de menú, árboles de pestañas y menús contextuales.

Rendimiento y Capacitación

La forma en que las pantallas son estructuras determina la efectividad de una aplicación HMI. El desempeño general del proceso está delimitado por la complejidad del mismo, el alcance de responsabilidad del operador, el sistema de gestión de alarmas y otros factores. Usualmente estas interfaces proporcionan comportamientos y tiempos de respuesta repetibles y predecibles. Es necesario que la actualización de pantallas sea breve, ya que el suministro de información debe ser permanente por cualquier emergencia o condición anormal. Normalmente, una pantalla se presenta y completa con todos sus datos en vivo en un periodo de 3 a 5 segundos.

Se requiere capacitar a los usuarios (operadores, ingenieros, administradores y de gestión) para que puedan usar efectivamente una HMI. Se deben capacitar en la interacción con los objetos HMI, en identificar e interactuar con alarmas, en interpretar símbolos gráficos, en manipular elementos, en eventos del proceso y secuenciación, en navegar por las pantallas y lo que el diseñador crea necesario. (Moya, 2019).

Instrumentos de Medición

Para poder definir un instrumento de medición, primero se debe tener claro el concepto de medición, magnitud y unidad de medida.

Según la (Encyclopaedia Britannica, 2020), la medición es “el proceso a través del cual se asocia un número a cantidades y fenómenos físicos”. En otras palabras, se compara la medida de un objeto o elemento con la medida de un patrón físico, el cual tendrá asignados distintos valores numéricos.

Una magnitud es toda aquella característica o propiedad de un objeto o fenómeno físico que puede ser medida o definida numéricamente, en una escala y con instrumentos adecuados. (UTP Colombia, 2000).

Para poder medir una magnitud es necesario de un patrón o de una unidad de medida, con la cual se pueda medir la cantidad de unidades o patrones que quepan en el fenómeno a ser medido. Ya que se utilizaban distintos patrones y sistemas de unidades a nivel mundial, se decidió crear un sistema internacional de medidas, llamado sistema métrico o Sistema Internacional, con sus unidades de medida fundamentales siendo el metro, el segundo y el kilogramo.

Tabla 1*Unidades Básicas en el SI*

Magnitud	Nombre	Símbolo
Longitud	Metro	m
Masa	Kilogramo	kg
Tiempo	Segundo	s
Temperatura	Kelvin	K
Intensidad de corriente eléctrica	Ampere	A
Intensidad luminosa	Candela	cd
Cantidad de sustancia	Mol	mol

Nota: En la tabla 1 se pueden observar a todas las magnitudes fundamentales del Sistema Internacional. Tomado de (Carvajal, 2014).

Tabla 2*Unidades Derivadas en el SI*

Magnitud	Nombre	Símbolo
Aceleración	Metro por segundo al cuadrado	m/s^2
Aceleración angular	Radián por segundo al cuadrado	rad/s^2
Calor específico	Joule por kilogramo kelvin	$J/kg K$
Capacidad eléctrica	Faradio	$F = A s/V$
Carga eléctrica	Culombio	$C = A s$
Caudal	Metro cúbico por segundo	m^3/s
Densidad	Kilogramo por metro cúbico	kg/m^3
Flujo de inducción magnética	Weber	$Wb = V s$
Flujo luminoso	Lumen	$lm = cd sr$
Frecuencia	Hertz	Hz
Fuerza	Newton	$N = kg m/s^2$
Iluminación	Lux	$lx = lm/m^2$
Inducción magnética	Tesla	$T = Wb/m^2$
Inductancia	Henrio	H
Intensidad de campo eléctrico	Voltio por metro	V/m
Intensidad de campo magnético	Ampere por metro	A/m
Luminancia	Candela por metro cuadrado	cd/m^2
Potencia	Watt	$W = J/s$
Presión	Pascal	$Pa = N/m^2$
Resistencia eléctrica	Ohmio	$\Omega = V/A$
Superficie	Metro cuadrado	m^2
Tensión eléctrica	Voltio	$V = W/A$
Trabajo, energía, cantidad de calor	Joule	$J = N m$
Velocidad	Metro por segundo	m/s
Velocidad angular	Radian por segundo	rad/s
Volumen	Metro cúbico	m^3

Nota: En la tabla 2 se pueden observar las unidades de medida derivadas del Sistema Internacional. Tomado de (Carvajal, 2014).

Se crearon instrumentos de medida para poder realizar las mediciones tanto de las unidades fundamentales como de las derivadas con mayor precisión y fiabilidad. Los instrumentos de medición tienen las siguientes características:

- **Rango:** son valores entre el límite superior e inferior.
- **Error:** es la diferencia entre el valor medido y el valor real.
- **Repetibilidad:** es la capacidad de reproducir los mismos valores de medición bajo las mismas condiciones.

- **Resolución:** es el mínimo valor confiable que puede medir un instrumento.
- **Exactitud:** son lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida.
- **Precisión:** es la concordancia de valores entre varias mediciones realizadas bajo las mismas condiciones, también se la conoce como el coeficiente de variación o desviación estándar relativa.
- **Incertidumbre:** es la distribución estadística de los resultados obtenidos que se atribuyen al valor real de la magnitud a medirse.
- **Sensibilidad:** es el cambio de respuesta frente a variaciones.
- **Histéresis:** es la diferencia máxima entre los valores indicados por el instrumento para este mismo valor.
- **Linealidad:** es la aproximación más inmediata a su curva de calibración.
- **Rangeabilidad:** es la relación del valor más al alto al más bajo en el que el instrumento tiene un desempeño aceptable.
- **Tiempo de respuesta:** tiempo necesario para obtener una medida aceptable. (Moya, Conceptos Básicos: Características de los Instrumentos de Medición, 2018)

Calibración de instrumentos de medida

El Diccionario de Instrumentación, Sistemas y Automatización de la norma ISA, (2005) define a la calibración como “una prueba durante la cual valores conocidos del mensurando son aplicados a él transductor, bajo condiciones específicas, y sus

correspondientes lecturas de salida son registradas”. Otros autores definen a la calibración como la comparación documentada de un equipo o sistema con un instrumento de referencia trazable (patrón) bajo pruebas en distintos puntos del rango de un instrumento, tanto ascendente como descendentemente.

Un instrumento calibrador o un patrón de laboratorio tiene características superiores (e.g. exactitud y precisión) que el instrumento de medida a ser calibrado, y por tales características su precio es mucho más alto. Su trazabilidad hace referencia a patrones nacionales e internacionales (e.g. Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN), a través de una cadena continua de comparaciones tomando en cuenta todas las incertidumbres determinadas. En otras palabras, el estándar de referencia debió ser calibrado bajo un estándar mucho más alto y estricto. Los estándares ISO 9001 e ISO 17025 indican que se necesita una alta trazabilidad en las calibraciones. (Hernandez, 2018).

Se calibran los equipos para verificar su buen funcionamiento, para poder responder a los requisitos establecidos en las normas de calidad y para garantizar la trazabilidad y fiabilidad de todas sus medidas. Los equipos o instrumentos de medición deben ser calibrados regularmente, para que sus muestras siempre sean exactas, precisas y con una tolerancia de error aceptable. Además, los instrumentos de medida deben calibrarse bajo condiciones específicas de humedad y temperatura dentro de un laboratorio de calibración acreditado. (Wikiwand, 2020).

El proceso de calibración consiste en comparar el patrón con el instrumento a ser calibrado, de donde se obtiene el error del instrumento y la incertidumbre de calibración. Estos valores son requeridos para determinar si el instrumento se encuentra

entre los límites de tolerancia aceptables establecidos por un proceso determinado. (CALTEX, 2020).

Si el error de calibración entra dentro del rango admisible por la empresa, o por el laboratorio, o por el fabricante, la calibración del instrumento será aprobada. Caso contrario, el instrumento de medida deberá ser ajustado hasta que el error entre dentro de los límites.

Los resultados que se obtienen en cada calibración son registrados y homologados a través de un certificado de calibración que contiene la identificación del equipo, fecha de calibración, las condiciones de calibración, el método utilizado, los resultados, las incertidumbres y la firma de la institución acreditada a cargo de la calibración. (BEAMEX, 2021)

Existen una serie de términos que son primordiales dentro del campo metrológico, tales como patrón, trazabilidad, ajuste, incertidumbre de medida, TAR, TUR; los cuales se explicarán a continuación.

Incertidumbre de medida

El (VIM, 2012) la define como un “parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a una magnitud a ser medida”. Mientras que la Guía para la expresión de la incertidumbre en mediciones dice que aunque se hayan aplicado todas las correcciones, siempre existirá una incertidumbre al final. Además determinó que la metodología para evaluar y expresar una incertidumbre deber ser universal, consistente y transferible. (ISO/IEC 98-3, 2008)

Patrón

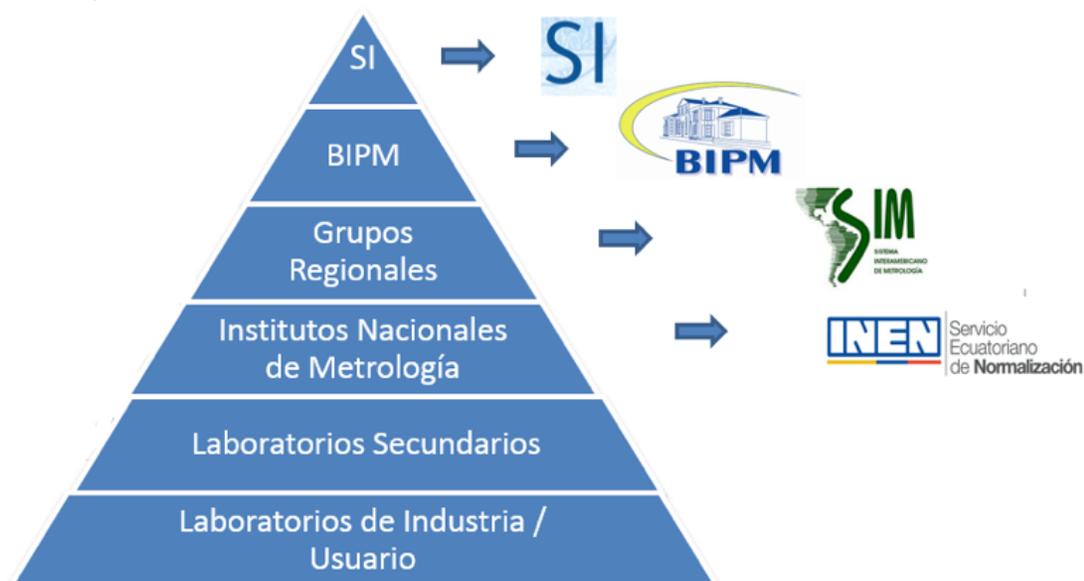
El (VIM, 2012) dice que un patrón es la “realización de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada, tomada como referencia”. Es decir, se añade un valor numérico determinado y una incertidumbre típica a una magnitud que será tomada como referencia (e.g. patrón de masa de 1Kg, con una incertidumbre típica asociada de 3 μg).

Trazabilidad

El (VIM, 2012) define a la trazabilidad metrológica como la “propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida”.

Figura 38

Esquema de Trazabilidad Metrológica



Nota: En la figura 38 se puede observar cómo funciona la trazabilidad en el Ecuador. El patrón más grande, preciso y exacto se encuentra en la cima de la pirámide (SI). Este se encarga de calibrar a los patrones internacionales como el BIPM, el cual a su vez se encarga de calibrar a los patrones regionales como el SIM, el cual se encarga de calibrar al INEN. El Instituto Ecuatoriano de Normalización se encarga de aprobar y calibrar los patrones de laboratorios metrológicos nacionales. Tomado de (*Validación y Certificación INEN, 2016*).

Ajuste

Cuando se realiza una calibración y se comparan dos equipos (el equipo calibrador y el equipo a calibrarse), se notará una pequeña diferencia entre ambos. El proceso en el que se configura un equipo para reducir la diferencia con su patrón se lo conoce como ajuste. Muchas veces el proceso de calibración de un dispositivo incluye el ajuste de este. (BEAMEX, 2021).

TAR/TUR

Generalmente, se utilizan las relaciones de incertidumbre (TUR) y de exactitud (TAR) para determinar la diferencia entre el equipo a calibrarse y su estándar de referencia. Comúnmente se utiliza la relación TAR 4 a 1 (el patrón de referencia es cuatro veces más exacto que el equipo a calibrarse (DUT) para garantizar que el estándar sea más que aceptable para cumplir su objetivo. (BEAMEX, 2021).

Medidores de Flujo

Los instrumentos de medición de flujo o caudal también conocidos como flujómetros o caudalímetros pueden realizar mediciones volumétricas de un líquido o un gas, pueden medir su caudal lineal, no lineal o incluso su masa (caudal másico). Exactamente se encargan de medir la cantidad de fluido que pasa por unidad de tiempo sobre la sección transversal de un línea de transmisión (e.g. tubería, canal abierto, río). En este capítulo se explicarán los más utilizados. (SUHISSA, 2017).

Presión Diferencial

Estos instrumentos se basan en el principio de Bernoulli, se calcula el caudal midiendo el diferencial o la caída de presión que existe entre un punto donde se restringe el paso al flujo y en puntos posteriores al flujo. La ecuación de Bernoulli es: $dp = \frac{\rho v^2}{2}$, donde el diferencial de presión es igual a la densidad del fluido por la velocidad del fluido al cuadrado sobre 2. (The Engineering ToolBox, 2003).

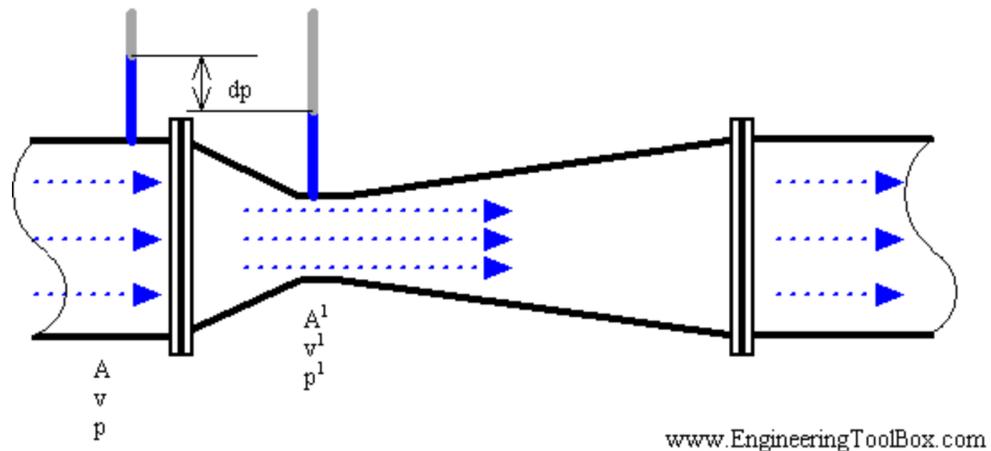
Su tiempo de respuesta es veloz y su exactitud es alta pero no se recomienda usarlo con partes móviles y con otros fluidos que no sean agua o gases. (SUHISSA, 2017).

- **Área Constante (Tubo Venturi)**

Su característica principal es el aprovechar el incremento entre la energía cinética y la disminución de la presión que se produce reduciendo el área del flujo.

Figura 39

Tubo Venturi



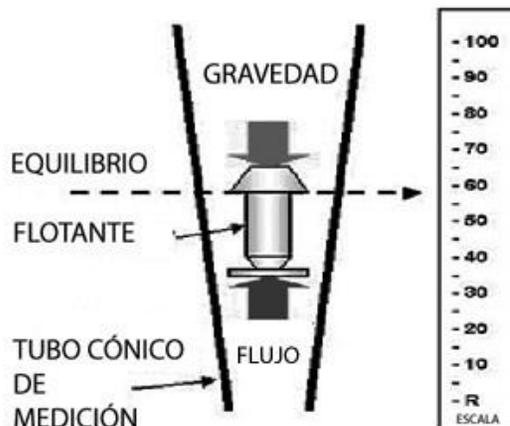
Nota: La Figura 39 indica como se acopla un tubo de Venturi a una tubería para poder medir su diferencial de presión. Tomado de (The Engineering ToolBox, 2003).

- **Área Variable o Rotámetros**

Se lo conoce como flujómetro de área variable ya que arrastra un flotador esférico dentro sí. Tiene la forma de un cono transparente invertido que posee líneas o marcas de una escala, las cuales indican la velocidad del fluido. El movimiento y rapidez del flujo hacen subir y bajar a la esfera que pronto se estabilizará. Se utilizan para medir gases sin mucha precisión. (The Engineering ToolBox, 2003).

Figura 40

Rotámetro



Nota: La figura 40 muestra la estructura de un rotámetro y su principio de funcionamiento, donde su flotador está en equilibrio al ser sometido por la fuerza de gravedad y la del flujo. Tomado de (NIKRON, 2020).

Velocidad

Se determina el caudal midiendo la velocidad en varios puntos del flujo e integrando esta velocidad sobre el área del flujo. (The Engineering ToolBox, 2003).

- ***Electromagnéticos***

Funciona gracias a la ley de inducción magnética (Faraday), se inducirá un voltaje entre dos puntos del fluido cuando este se mueva a través o perpendicular al campo magnético creado por bobinas energizadas. El voltaje producido resulta ser directamente proporcional a la velocidad del flujo. El consumo eléctrico de estos equipos es muy alto y solo son utilizados para fluidos conductores. (The Engineering ToolBox, 2003).

Figura 41

Flujómetro Electromagnético



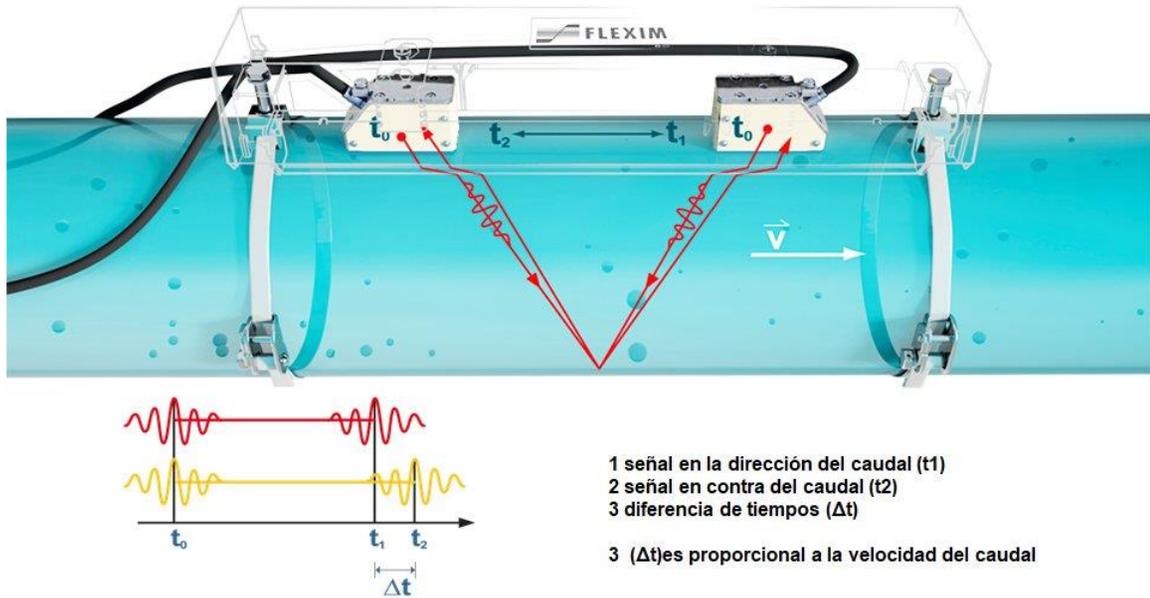
Nota: La figura 41 ilustra el funcionamiento de un flujómetro electromagnético. Tomado de (Cero Grados, 2020).

- **Ultrasónicos**

Son considerados los caudalímetros con tecnología más avanzada y mayor versatilidad y precisión del mercado, ya que no generan pérdidas de presión ni obstruyen la trayectoria del flujo; pero no se los recomienda usarlos en aplicaciones con caudales bajos. Se basa en la medición del cambio de frecuencia de una señal ultrasónica enviada a través del fluido. Existen varios tipos de flujómetros ultrasónicos como el Doppler que emplea una aireación o partícula al fluido como reflector para poder medir la velocidad, o de tránsito que emplea un líquido limpio para poder medir la diferencia de frecuencias tanto directa como inversamente y lograr determinar la velocidad del flujo. (SUHISSA, 2017).

Figura 42

Sensor de Caudal Ultrasónico



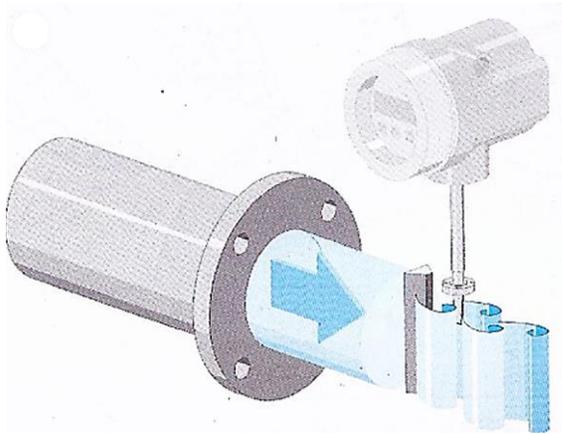
Nota: En la figura 42 se puede apreciar el principio de funcionamiento de un caudalímetro ultrasónico Doppler, y como se calcula la velocidad con la diferencia de tiempos en dirección y en contra del caudal. Tomado de (Lana Sarrate, 2020).

- **Vórtice**

Basa su funcionamiento en la generación de vórtices. Un cuerpo que atraviesa un fluido se convierte en una obstrucción al flujo y genera vórtices más debajo de este. Estos vórtices causan diferenciales de presión que son registrados por un cristal piezoeléctrico. La frecuencia de formación de los vórtices es proporcional a la velocidad del flujo. Su mantenimiento es sencillo y disponen de buena precisión. (López, 2011)

Figura 43

Caudalímetro Vortex



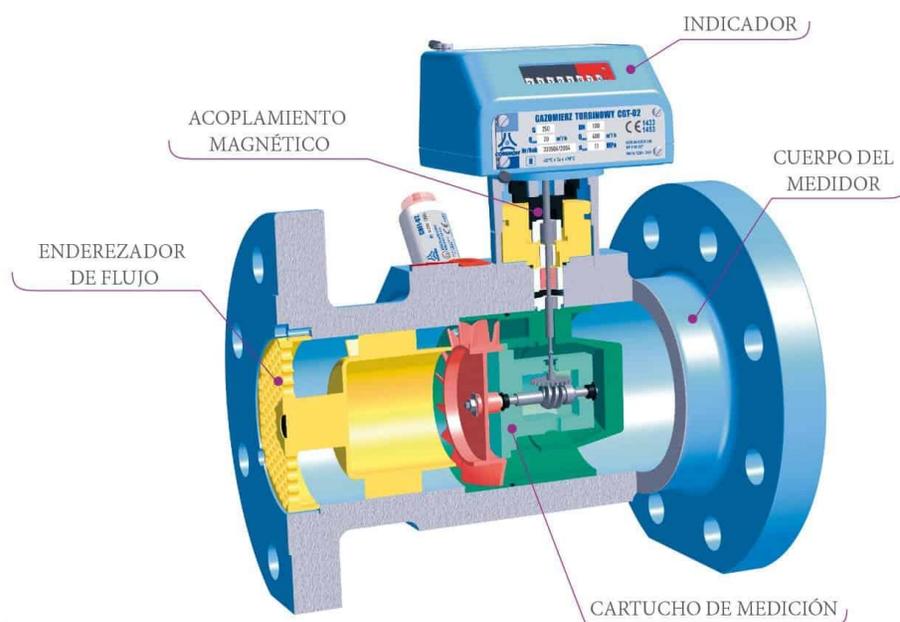
Nota: La figura 43 muestra la generación de vórtices que genera la obstrucción al flujo del caudalímetro vortex. Tomado de (Torres, 2003).

- **Turbina**

Basan su funcionamiento en el uso de piezas rotatorias que son impulsadas por la corriente del fluido. La frecuencia de los pulsos que el rotor genere a través de los sensores ópticos es proporcional a la velocidad del fluido. No se recomienda usarlos en fluidos altamente viscosos, con partículas o con un caudal muy bajo ya que sus partes móviles tienden a dañarse o a atascarse. (SUHISSA, 2017)

Figura 44

Flujómetro tipo turbina



Nota: Se puede observar la estructura y el principio de funcionamiento del flujómetro tipo turbina en la figura 44. Tomado de (Villajulca, 2010).

Másicos (Coriolis)

Miden el caudal másico y la densidad de los fluidos. Es decir, miden la masa que circula por unidad de tiempo. Basan su funcionamiento en el efecto Coriolis, donde el fluido atravesará un tubo en forma de U que vibrará bajo una oscilación armónica angular provocando una deformación en los tubos producida por la fuerza de Coriolis, por lo que se deberá añadir un componente de vibración adicional que provoca un cambio de fase en algunos puntos de los tubos, los cuales pueden ser medidos con sensores.

Son considerados como medidores de flujo universales ya que su precisión muy alta ($\pm 0.1\%$) y porque la medición másica no es susceptible a los cambios de presión, temperatura, viscosidad o densidad, además de que pueden medir líquidos, lodos o gases. (The Engineering ToolBox, 2003)

Figura 45

Flujómetro tipo Coriolis



Nota: La figura 45 ilustra la variedad de modelos de flujómetros másicos tipo Coriolis.

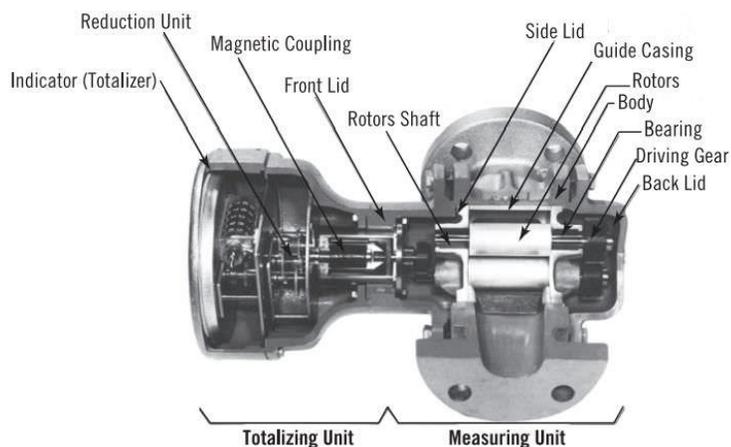
Tomado de (EMERSON, 2020).

Desplazamiento Positivo

Se encarga de medir el caudal del fluido utilizando rotores ajustados con precisión. El proceso de medición consiste en que los volúmenes fijos y conocidos se desplazan entre estos rotores, donde la rotación de los rotores es directamente proporcional al volumen del fluido desplazado. Un transmisor de pulso integral se encarga de convertir las rotaciones del rotor en volumen y caudal. Existen varios tipos según la construcción de su rotor (e.g. pistón, engranajes, discos, paletas). Es muy utilizado para fluidos no abrasivos con una precisión de hasta 0.1%.

Figura 46

Medidores de flujo por desplazamiento positivo



Nota: En la figura 46 se puede observar un flujómetro por desplazamiento positivo y sus parte internas. Tomado de (*DIRECT INDUSTRY, 2020*).

Water Draw Pipe Provers

Probadores Bidireccionales

Son equipos de medición usados para la calibración de instrumentos medidores de flujo de tipo turbina o de desplazamiento positivo. Estos dispositivos consisten en una tubería industrial en forma de U que es resistente a la corrosión y fricción, y que normalmente funcionan como un patrón de trabajo. Usualmente se coloca una resina epóxica dentro de las paredes del probador para garantizar y alargar la vida útil de este. (ECOPETROL, 2013)

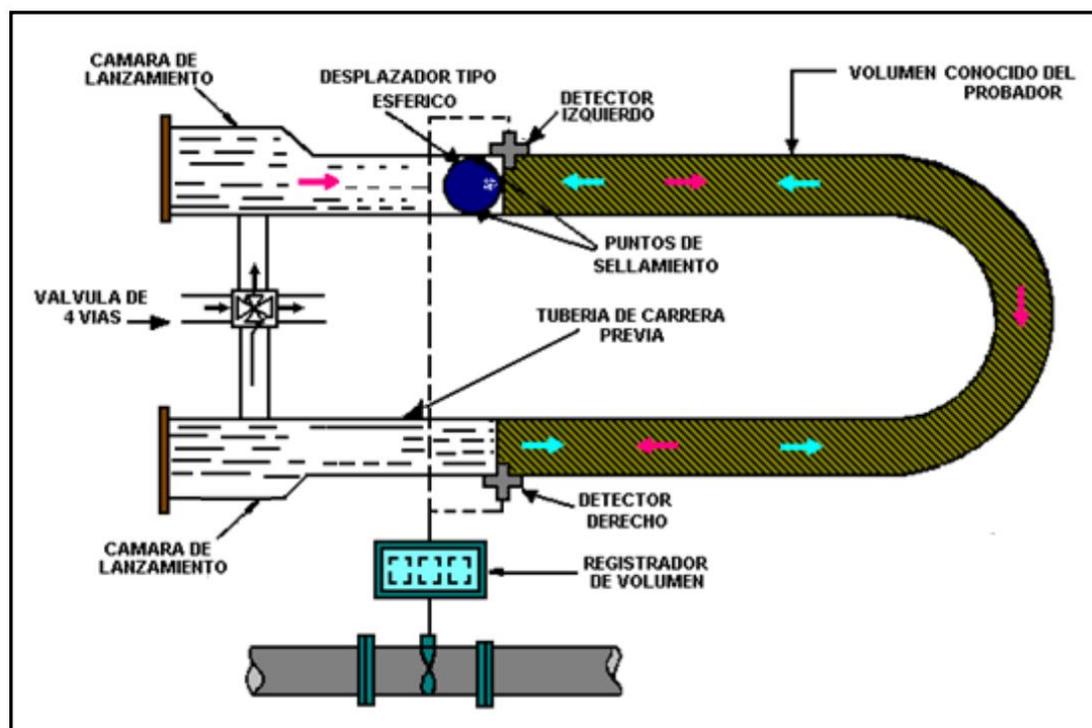
Estos equipos son instalados permanentemente en las estaciones de medición de poliductos para periódicamente poder garantizar la correcta calibración de los instrumentos medidores de flujo y volumen de hidrocarburos (oil & gas), asegurar la trazabilidad y reducir su incertidumbre. Son muy utilizados ya que no se interrumpe el

flujo del fluido y además porque un prover puede realizar sus pruebas en paralelo al proceso real por lo que puede probarse bajo las condiciones reales de flujo, presión, temperatura, viscosidad y densidad del proceso. (Arias R, INCERTIDUMBRE EN LA CALIBRACIÓN DE UN PROBADOR VOLUMÉTRICO BIDIRECCIONAL, 2001)

Es más común usar su nombre en inglés “Bidirectional-Pipe Prover”, o en pocas ocasiones también puede ser llamado “Probador convencional de desplazamiento mecánico”. Sus partes principales son una cámara de lanzamiento, válvulas, un desplazador, interruptores detectores, una sección de volumen calibrado y una sección de carrera previa. (ECOPETROL, 2013)

Figura 47

Estructura de un probador bidireccional



Nota: En la figura 47 se puede observar el esquema de un probador bidireccional y cada uno de sus componentes. Tomado de (ECOPETROL, 2013).

Detectores Interruptores

Son dispositivos que se instalan en la parte externa del probador. Cuentan con un mecanismo preciso para la detección de la entrada o salida de un desplazador que delimita la sección calibrada. Su repetibilidad debe ser precisa ya que de eso depende de la longitud mínima de la sección calibrada, caso contrario se deberá calibrar el prover. Pueden ser detectores mecánicos que activan un interruptor mecánico u ópticos que activan interruptores fotoeléctricos.

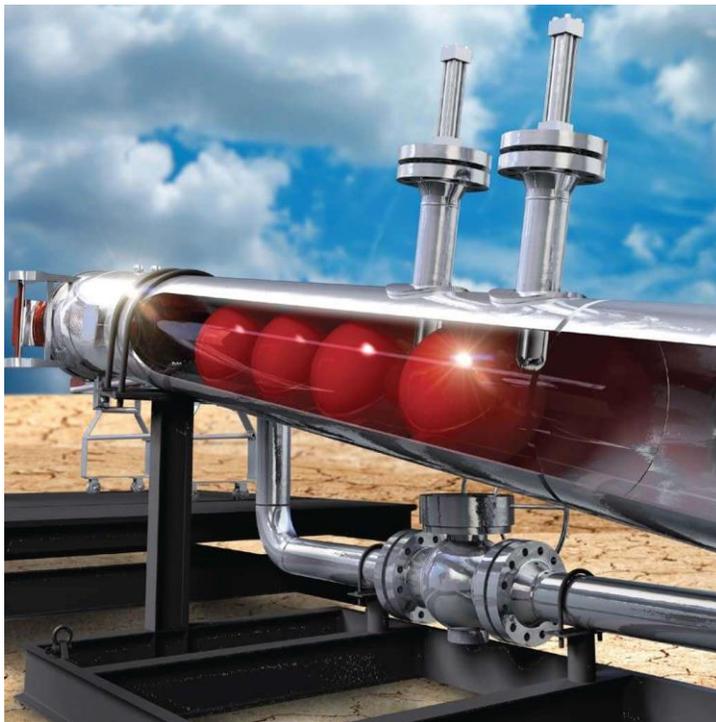
Desplazadores

Son dispositivos que se insertan dentro de la tubería creando un sello mecánico móvil dentro del probador. Estos desplazadores son los encargados de activar los interruptores de los detectores para delimitar la entrada y salida de la sección de volumen calibrado. El tipo más común de desplazador es el de esfera.

- **De esfera:** Son esferas inflables fabricadas de material elástico (e.g. neopreno, nitrilo y poliuretano). El material de la esfera dependerá mucho del tipo de fluido y de las condiciones ambientales que se utilicen. Generalmente se llenan de agua, o una mezcla entre glicol y agua para evitar el congelamiento de la esfera. Es imprescindible que no exista aire dentro de la esfera para que no se deforme. Se deben sobre inflar entre un 2 y 5 % más que el diámetro interno del probador para garantizar el sello perfecto.

Figura 48

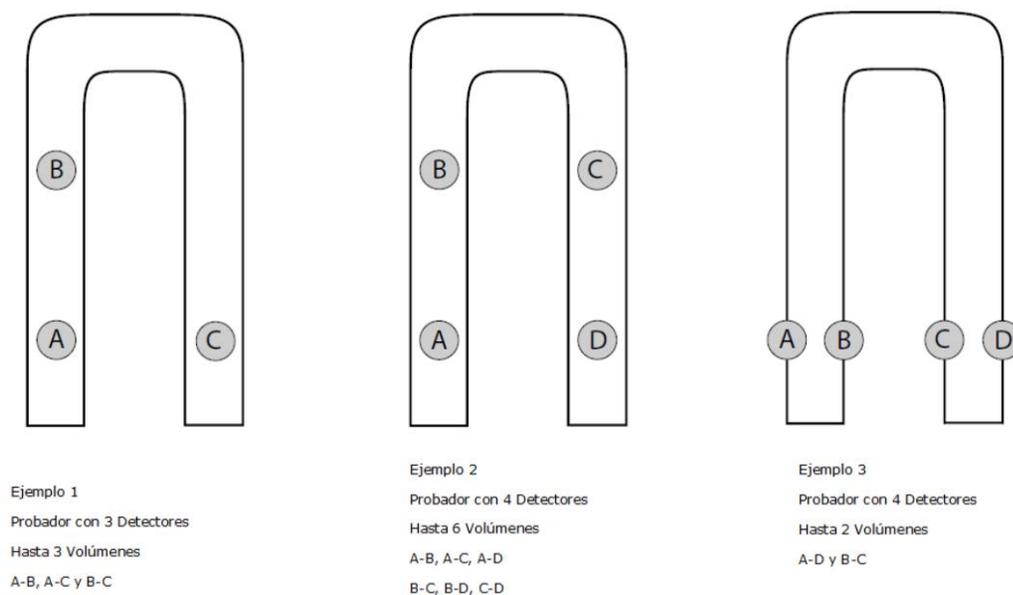
Desplazador de tipo esfera



Nota: En la figura 48 se pueden observar los desplazadores de tipo esfera de color rojo dentro de un probador. Tomado de (SYNCRONESS, 2017).

Sección de Volumen Calibrado

Esta sección del prover tiene un volumen establecido y conocido, y está delimitado generalmente por dos detectores. La cantidad de fluido que se desplace entre estos detectores es el volumen de la sección calibrada. En esta sección no puede existir ningún accesorio aparte de las esferas. Se puede calibrar esta sección por el método de drenado de agua (Water Draw), medidor maestro (Master Meter) o gravimétrico.

Figura 49*Sección de Volumen Calibrado*

Nota: Se puede observar la sección del volumen calibrado en la figura 49. Además, se puede apreciar que pueden existir más de dos detectores en un prover. Tomado de (ECOPETROL, 2013).

Cámaras de Lanzamiento

Sección ubicada a cada extremo del probador con un diámetro por lo menos dos veces mayor al de la sección calibrada. Se encargan de disminuir la velocidad de la esfera hasta que pare, la acomoda y permite que el fluido continúe con su curso. Y también se encarga de empujar a la esfera hacia la sección calibrada.

Sección de Carrera Previa

Aquella sección que se encuentra en las cámaras de lanzamiento y la sección calibrada que se encarga de garantizar el tiempo suficiente para que todos los

mecanismos de inversión del flujo terminen su operación y se consiga un sello perfecto antes que el desplazador active el primer detector de la sección calibrada.

Válvulas

Existe una válvula de drenaje que se encarga de realizar el correcto desfogue del del fluido. También posee un válvula de 4 vías que permite direccionar el sentido del fluido en el probador. El tiempo de giro de esta válvula debe ser menor al tiempo que se demora la esfera en ir desde la cámara de lanzamiento hasta el detector más próximo. (ECOPETROL, 2013)

En resumen, el fluido empuja la esfera dentro del probador mientras esta realiza un sello totalmente hermético móvil. Cuando la esfera entra a la sección del volumen calibrado activa un detector que activa un interruptor que abre una compuerta electrónica que admite y cuenta los pulsos emitidos por el medidor de flujo que se está calibrando. Una vez que la esfera sale de la sección calibrada, otro detector activa otro interruptor que cierra la compuerta y finaliza el conteo de pulsos. Se realizan los ajustes y correcciones respectivas por temperatura y presión, y se comparan los pulsos totales acumulados tanto ascendente como descendentemente contra el volumen base del probador. (Arias R, 2003)

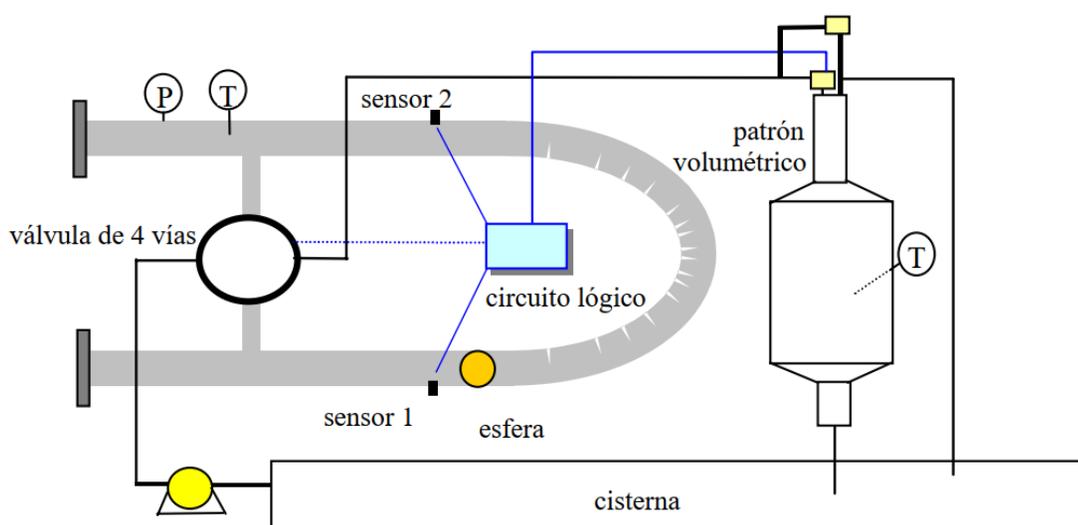
Calibración Water Draw Volumétrica

Todos los volúmenes de los probadores usados como patrón para los medidores de flujo deben ser determinados por calibración y no por cálculos teóricos. Los

probadores bidireccionales, compactos, de tanque y maestros deben ser calibrados constantemente por su uso continuo en la industria de hidrocarburos donde la precisión y exactitud deben ser altas y la incertidumbre por debajo de lo permitido. Para conseguir este acometido se utilizan patrones de referencia volumétricos de cuello graduado con una capacidad adecuada. (API MPMS 4.9.2, 2015)

Figura 50

Calibración de un Prover Bidireccional usando el método Waterdraw Volumétrico



Nota: La figura 50 ilustra la calibración de un probador bidireccional utilizando el método Waterdraw utilizando un patrón de referencia volumétrico de cuello graduado. Tomado de (Arias R, 2003).

La norma API MPMS 4.9.2 da una serie de recomendaciones a seguir para la determinación del volumen de probadores de tipo tanque y de desplazamiento por el método de calibración Waterdraw. Los primeros procedimientos por realizarse deben ser las actividades de mantenimiento y preparación, después se realiza la calibración ensayo y verificación.

Mantenimiento y Preparación

Se recomienda iniciar con una inspección visual general para identificar fallas, realizar un mantenimiento preventivo al equipo a calibrarse y limpiarlo externamente. El proceso puede variar en mínimos aspectos dependiendo de la construcción del prover, del tipo de válvula de 4 vías y de los detectores de la esfera.

Se deben cerrar las válvulas conectadas al probador desde las líneas de medición, purgar el producto almacenado en este, colocar placas de bloqueo entre las conexiones de las líneas de medición, inundar el prover con Diesel (si el probador es usado con crudo) y desengrasante. Después se purgará el Diesel y se inundará nuevamente con agua y desengrasante. Finalmente se realizará la limpieza utilizando un sistema de bombeo que recirculará el agua por el probador hasta que esta no contenga ningún resto de hidrocarburo y se purgará todo el contenido del prover.

Se debe verificar el estado de la válvula de 4 vías, reemplazar sus sellos para que no exista ninguna pérdida y limpiar internamente la misma. Así mismo se realiza la verificación del recubrimiento interno del probador y el cambio de los o-rings de las bridas. Si es posible se desarmará el probador, se cambiará el recubrimiento interno si este estuviese deteriorado y se realizará la limpieza de este (si es necesario con agua a presión) para proceder con su montaje en la posición de trabajo.

Adicionalmente, se deben desmontar los detectores de paso de esfera para ser limpiados e inspeccionados. Después se deberá reemplazarlos si presentan desperfectos y se volverá a montarlos. Se armará el probador nuevamente, se retirarán las conexiones del equipo de limpieza y se lo conectará al equipo Waterdraw.

Por último, se colocarán las placas de bloqueo en las purgas del probador y se lo inundará con agua limpia, clara, y libre de sedimentos (e.g. agua potable). Se recirculará el agua para comprobar que no exista espuma generada por residuos de desengrasante. Una vez que se compruebe que no existe espuma ni otros contaminantes se determina que el probador está listo para ser calibrado. En ese momento se elaborará un informe de mantenimiento que se comparará con el informe preliminar a estos procedimientos. (API MPMS 4.9.2, 2015)

Calibración Ensayo y Verificación

Es importante recalcar que el proceso de calibración no puede iniciar sin asegurar que los procedimientos de mantenimiento y preparación antes mencionados hayan sido realizados exitosamente. Se revisarán los informes de mantenimiento y preliminar con el fin de obtener toda la información relevante para realizar la calibración.

El primer paso es verificar que el diámetro de la esfera sea mayor que el diámetro interno del probador entre 2 y 5 %. Se nivela el equipo juntamente con las medidas patrón (volumétricas de cuello graduado) y se determina la cantidad de medidas que se utilizarán. En otras palabras, si el probador posee un flujo base de 500 litros por hora se deberá ocupar un patrón volumétrico de 500 galones o 2 patrones de 250 litros, o el número de medidas volumétricas necesarias para coincidir con el volumen base del probador.

Figura 51*Medidas Volumétricas Patrón*

Nota: La figura 51 muestra medidas volumétricas patrón de cuello graduado. Tomado de (INDIAMART, 2011).

Se toma la hora de inicio antes de comenzar el ensayo y se llena el prover, el circuito y la piscina del equipo con agua limpia, se la recircula hacia ambos lados de las cámaras para estabilizar la temperatura y para desgasificar el circuito. En el caso de que se utilice más de una medida, se debe realizar el llenado de la medida antes de terminar el enrase de la medida anterior, manteniendo la presión constante durante el cruce y apertura de válvulas para no variar la velocidad de desplazamiento constante de la esfera.

Se leerá en litros o galones (en unidad que se solicite) la cantidad acumulada en la medida volumétrica patrón y se la apuntará en el registro de trabajo. Posteriormente se purgará a la medida y se tomará la temperatura de esta antes que se desfogue. Igualmente, todos estos datos serán escritos en el registro mientras se van llenando las

medidas hasta completar la carrera. Al finalizar la carrera se toma la hora exacta. Para invertir el sentido del flujo se realiza el giro de la válvula de 4 vías, y se repite el proceso de llenado y medición.

La norma API MPMS 4.9.2 recomienda realizar la toma de mediciones entre cada par de carreras con una diferencia del 25 % de caudal entre los 4 pares de carreras. Es decir, deben realizarse las pruebas con el 25%, 50%, 75% y 100% del caudal tanto en sentido horario como antihorario para hallar las desviaciones porcentuales. Si las desviaciones no se encuentran dentro del rango aceptable, se deberá volver a realizar los procedimientos de mantenimiento y preparación. Caso contrario, si las desviaciones están en el rango admisible, se emitirá un certificado de calibración aprobada del probador. (API MPMS 4.9.2, 2015)

Calibración Water Draw Gravimétrica

La calibración por el método Waterdraw gravimétrico es muy similar al volumétrico mencionado en el apartado anterior. Los procedimientos de mantenimiento y preparación son idénticos al método volumétrico. El proceso de calibración ensayo y verificación varían únicamente en el método utilizado.

Al igual que en el método gravimétrico se toma la hora de inicio antes de comenzar el ensayo y se llena el prover, el circuito y la piscina del equipo con agua limpia, se la recircula hacia ambos lados de las cámaras para estabilizar la temperatura y para desgasificar el circuito. Pero en vez de usar medidas volumétricas patrón utilizan básculas electrónicas de alta resolución junto al recipiente que contendrá al fluido medido.

Entonces se toma el tiempo desde que inicia la carrera hasta finaliza mientras el fluido es depositado en el recipiente que se encuentra en la báscula (en cero). Una vez la lectura de la báscula se haya estabilizado se procede a anotar el valor medido en el registro. Para invertir el sentido del flujo se realiza el giro de la válvula de 4 vías, y se repite el proceso de llenado y medición. Para este método es muy importante determinar la densidad del aire, la presión atmosférica y la altitud a las cuales será sometida la balanza.

La norma API MPMS 4.9.4 recomienda igualmente realizar la toma de mediciones entre cada par de carreras con una diferencia del 25 % de caudal entre los 4 pares de carreras. Si las desviaciones no se encuentran dentro del rango aceptable, se deberá volver a realizar los procedimientos de mantenimiento y preparación. Caso contrario, si las desviaciones están en el rango admisible, se emitirá un certificado de calibración aprobada del probador.

Es importante recalcar que la calibración por desplazamiento de agua (Waterdraw) gravimétrico es usada para probadores pequeños ya que el método volumétrico aumenta su incertidumbre mientras las medidas volumétricas patrón son más pequeñas (hasta 168 galones). (API MPMS 4.9.4, 2016)

Waterdraw Volumétrico vs Gravimétrico

Se ha realizado una tabla comparativa para verificar que método de calibración es mejor:

Tabla 3

Comparación entre Waterdraw Volumétrico y Gravimétrico

INDICADOR	VOLUMÉTRICO	GRAVIMÉTRICO
Calibra provers bidireccionales	SI	SI
Calibra provers unidireccionales	SI	SI
Calibra provers compactos	NO	SI
Exactitud en provers bidireccionales	ALTA	ALTA
Exactitud en provers unidireccionales	ALTA	ALTA
Exactitud en provers compactos	BAJA	ALTA
Presupuesto	BAJO	ALTO
Duración de calibración	ALTA	MEDIA
Movilidad de unidades	ALTA	BAJA
Flexibilidad en volúmenes	ALTA	BAJA

Nota: De esta comparación se puede determinar que la calibración volumétrica funciona perfectamente para provers no compactos, y la gravimétrica debe usarse únicamente para provers compactos ya que el precio de la balanza de precisión y de las medidas volumétricas es más económico para volúmenes pequeños.

Normas de Referencia

API MPMS Chapter 4. Proving Systems – Section 2. Conventional Pipe Provers

API MPMS Chapter 4. Proving Systems – Section 7. "Field Standard Test Measures"

API MPMS Chapter 4. Proving Systems – Section 8. "Operation of Proving Systems"

API MPMS Chapter 4. Proving Systems – Section 9. Methods of Calibration for Displacement and Volumetric Tank Provers – Part 2. Determination of the Volume Displacement and Tank Provers by the Waterdraw Method of Calibration

API MPMS Chapter 4. Proving Systems – Section 9. Methods of Calibration for Displacement and Volumetric Tank Provers – Part 4. Determination of the Volume Displacement and Tank Provers by the Gravimetric Method of Calibration

API MPMS Chapter 11.4.1: Density of water and water volumetric correction factors for water calibration of volumetric provers

API MPMS Chapter 12 "Calculation of Petroleum Quantities" - Section 2: "Calculation of Petroleum Quantities Using Dynamics Measurements Methods and Volumetric correction Factors"

ANSI-ISA-101.01-2015: Interfaces Humano Máquina para Sistemas de Automatización de Procesos

Guide d'Etude des Modes de Marches et d'Arrets (GEMMA)

Gráfico Funcional de Control de Etapas y Transiciones (GRAF CET)

PTT_MLOGIC_DME_020

Capítulo III

Aplicación de Metodología QFD

Casa de la Calidad

Es una metodología utilizada en la ingeniería de la calidad para desarrollar productos o servicios que se adapten a los requerimientos, necesidades y gustos de los usuarios. Se realiza un estudio de la situación actual del producto en relación con la competencia y se priorizan ciertas características para aumentar la competitividad en base a las necesidades del usuario. (Bernal, 2012)

Para el presente proyecto se ha analizado la calibración de probadores bidireccionales por el método Waterdraw volumétrico. Todo el despliegue de la casa de la calidad de este tema se encuentra adjuntada en el ANEXO 1.

Voz del Usuario

También es conocida como la lista de los Qué, ya que incluyen todos los aspectos que los usuarios esperan del producto o servicio en este caso particular.

Tabla 4

Lista de los QUÉ del usuario

QUÉ
Qué duré menos tiempo
Qué tenga flujo exacto (%)
Qué no genere golpes de ariete
Qué se localice donde se encuentra la esfera
Qué los tiempos sean precisos
Qué el control de las válvulas sea exacto
Qué sea fidedigno
Qué tenga repetibilidad
Qué calibre probadores compactos

QUÉ

Qué calibre probadores unidireccionales
 Qué calibre probadores bidireccionales
 Qué se apruebe la calibración
 Qué tenga buena trazabilidad
 Qué sea regido por la norma API MPMS 4,11 y 12
 Qué estén acreditados por el SAE
 Qué calibren varias opciones de volúmenes
 Qué sea móvil

Nota: En la tabla 4 se puede observar la lista de los requerimientos del usuario sobre la calibración de los provers por el método Waterdraw.

Análisis de los QUÉ

Se analiza la voz del usuario para determinar cuáles son las características a las cuáles se debe prestar mayor atención para mejorar e incrementar la competitividad.

Figura 52

Análisis de la voz del usuario

QUÉ...	Importancia para el usuario (1-5)	METROLOGIC S.A. (1-5)	FUJISAN SURVEY (1-5)	Objetivo (1-5)	Radio de mejora	Argumento de venta	Ponderación absoluta	Ponderación relativa (%)	Orden de Importancia
Dure menos tiempo	4	3	3	3,5	1,17	1,50	7,00	5,57	7
Tenga flujo exacto (%)	4	3	4	4	1,33	1,30	6,93	5,52	8
No genere golpes de ariete	4	3	4	4	1,33	1,20	6,40	5,09	12
Se localice donde se encuentra la esfera	3	1	3	3,5	3,50	1,30	13,65	10,86	1
Los tiempos sean precisos	5	3	3	5	1,67	1,50	12,50	9,95	2
El control de las válvulas sea exacto	5	5	4	5	1,00	1,50	7,50	5,97	4
Sea fidedigno	4	4	3	4	1,00	1,40	5,60	4,46	14
Tenga repetibilidad	5	4	3	5	1,25	1,50	9,38	7,46	3
Calibre probadores compactos	3	2	4	4	2,00	1,10	6,60	5,25	9
Calibre probadores unidireccionales	3	2	4	4	2,00	1,10	6,60	5,25	10
Calibre probadores bidireccionales	5	5	4	5	1,00	1,50	7,50	5,97	5
Se apruebe la calibración	5	4	4	4	1,00	1,30	6,50	5,17	11
Tenga buena trazabilidad	4	5	4	5	1,00	1,40	5,60	4,46	15
Sea regida por la norma API MPMS 4,11 y 12	5	5	5	5	1,00	1,50	7,50	5,97	6
Estén acreditados por el SAE	4	5	1	5	1,00	1,50	6,00	4,77	13
Calibren varias opciones de volúmenes	4	4	3	4	1,00	1,30	5,20	4,14	16
Sea móvil	4	4	3	4	1,00	1,30	5,20	4,14	17
							125,66	100,00	

Nota: En la figura 52 se observa el análisis de la voz del usuario que demuestra que la exactitud y precisión son las características a las cuales se debe prestar más atención.

Se realiza el análisis tomando en cuenta aspectos como la importancia que el usuario asigna a cada característica y se los compara con la empresa y su competencia. Se asigna cual es el objetivo al que la empresa quiere llegar en cada ítem y se genera un radio de mejora y un argumento de venta para poder determinar el orden de importancia de cada uno de los QUÉ del cliente.

De este análisis se determina que la localización de la esfera es la más relevante y se debe adjuntar dentro del procedimiento. La exactitud, precisión y repetibilidad de las mediciones debe mejorar continuamente para garantizar la aprobación de la calibración. Se deben reducir los tiempos y realizar un control más riguroso del flujo para evitar golpes de ariete. Las acreditaciones y normas no deben ser dejadas de lado ya que son una parte esencial de la calibración. Adicionalmente se recomienda tener una estación móvil con la capacidad de calibrar distintos volúmenes de probadores compactos, uni y bi-direccionales.

Cómo implantar esas necesidades

Son los requisitos técnicos que se emplearán para que las necesidades de la voz del usuario puedan ser cumplidas.

Tabla 5*Lista de los CÓMO*

CÓMO
Duración pruebas preliminares (h)
Duración ensayo de calibración (h)
Exactitud válvula manual de entrada (%)
Exactitud variador de frecuencia (%)
Sinóptico del ensayo de calibración (si/no)
Exactitud cronómetro manual (%)
Exactitud reloj interno del controlador (%)
Programación en controlador para apertura de válvulas (si/no)
Se realizan ajustes para aprobación (si/no)
Error en provers pequeños (%)
Incertidumbre (%)
Error de trazabilidad (%)
Estándares API MPMS actualizados (si/no)
Acreditación actual SAE (si/no)
Capacidad medidas volumétricas (gal)
Remolque móvil (si/no)

Nota: La tabla 5 contiene la lista de los requisitos técnicos que se emplearán para cumplir con los requerimientos del usuario.

Relación entre los QUÉ y CÓMO

Figura 53

Análisis de los CÓMO

CÓMO	Duración pruebas preliminares (h)	Duración ensayo de calibración (h)	Exactitud válvula manual de entrada (%)	Exactitud variador de frecuencia (%)	Sinóptico del ensayo de calibración (si/no)	Exactitud cronómetro manual (%)	Exactitud reloj interno del controlador (%)	Programación en controlador para apertura de válvulas (si/no)	Se realizan ajustes para aprobación (si/no)	Error en provers pequeños (%)	Incertidumbre (%)	Error de trazabilidad (%)	Estándares API MPMS actualizados (si/no)	Acreditación actual SAE (si/no)	Capacidad medidas volumétricas (gal)	Remolque móvil (si/no)
Dure menos tiempo	●	●						○							○	○
Tenga flujo exacto (%)	○	○	●	●				○							○	
No genere golpes de ariete			●	●				○								
Se localice donde se encuentra la esfera					●			○								
Los tiempos sean precisos					○	●	●								○	
El control de las válvulas sea exacto	○	○	○	○			●	●		○	○					
Sea fidedigno			○	○	○	○	○	○	●		○	○	○	○	○	
Tenga repetibilidad	○	○	○	○		○	○	○	○	○					○	
Calibre probadores compactos	○	○	○	○		○	○	○		●			○	○	○	
Calibre probadores unidireccionales	○	○	○	○		○	○	○					○	○	○	
Calibre probadores bidireccionales	○	○	○	○		○	○	○					○	○	○	
Se apruebe la calibración									●	○	●	●	○			
Tenga buena trazabilidad											○	●			○	
Sea regida por la norma API MPMS 4,11 y 12													●			
Estén acreditados por el SAE													●	●		
Calibren varias opciones de volúmenes	○	○								○	○	○			●	
Sea móvil	○	○														●

Nota: La figura 53 indica el grado de relación entre los QUÉ y los CÓMO, teniendo en cuenta que el símbolo “●” representa relación alta, el símbolo “○” representa relación media y el espacio en blanco simboliza la relación baja.

Es esta matriz en la cual se relacionan los QUÉ con los CÓMO, se determina si existe una relación medible alta, media o baja entre las necesidades del cliente y los requerimientos técnicos.

Análisis de los CÓMO

La parte final de la casa de la calidad, donde se calculan los objetivos técnicos que se implementarán para cumplir con las especificaciones del servicio. El primer paso es fijar la orientación deseada para determinar si más es mejor o peor. Es decir, si conviene que los requerimientos técnicos aumenten se representará con una flecha ascendente o si conviene que disminuyan se representará con una flecha descendente (e.g. es mejor que la duración de la calibración más corta).

Se realiza un análisis de comparación entre los QUÉ y los CÓMO para hallar el orden de importancia de los requerimientos técnicos, y se desarrolla la valoración técnica de cada uno de estos aspectos comparándolos con la competencia para poder determinar cuál será el objetivo de cada uno de estos requerimientos.

Figura 54

Objetivos Técnicos

CÓMO	Duración pruebas preliminares (h)	Duración ensayo de calibración (h)	Exactitud válvula manual de entrada (%)	Exactitud variador de frecuencia (%)	Sinóptico del ensayo de calibración (si/no)	Exactitud cronómetro manual (%)	Exactitud reloj interno del controlador (%)	Programación en controlador para apertura de válvulas (si/no)	Se realizan ajustes para aprobación (si/no)	Error en provers pequeños (%)	Incertidumbre (%)	Error de trazabilidad (%)	Estándares API MPMS actualizados (si/no)	Acreditación actual SAE (si/no)	Capacidad medidas volumétricas (gal)	Remolque móvil (si/no)
Dure menos tiempo	•	•						○							○	○
Tenga flujo exacto (%)	○	○	•	•				○							○	
No genere golpes de ariete			•	•				○								
Se localice donde se encuentra la esfera					•			○								
Los tiempos sean precisos					○	•	•								○	
El control de las válvulas sea exacto	○	○	○	○			•	•		○	○					
Sea fidedigno			○	○	○	○	○	○	•		○	○	○	○	○	○
Tenga repetibilidad	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
Calibre probadores compactos	○	○	○	○		○	○	○		•			○	○	○	○
Calibre probadores unidireccionales	○	○	○	○		○	○	○					○	○	○	○
Calibre probadores bidireccionales	○	○	○	○		○	○	○					○	○	○	○
Se apruebe la calibración									•	○	•	•	○			
Tenga buena trazabilidad											○	•			○	
Sea regida por la norma API MPMS 4,11 y 12													•			
Estén acreditados por el SAE													•	•		
Calibren varias opciones de volúmenes	○	○								○	○	○			•	
Sea móvil	○	○														•
Orientación deseada	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	○
Ponderación absoluta	232	232	254	254	216	236	284	258,6	192	187	179	194	238	180	241	144
Ponderación relativa	6,6	6,6	7,2	7,2	6,1	6,7	8,1	7,342	5,4	5,3	5,1	5,5	6,8	5,1	6,8	4,1
Orden de importancia	9	8	4	3	10	7	1	2	12	13	14	11	6	15	5	16
Valoración técnica	h	h	%	%	si/no	%	%	si/no	si/no	%	%	%	si/no	si/no	gal	si/no
METROLOGIC S.A.	16	4	90	0	no	96	99.99	si	si	7	0.02	0.05	si	si	400	si
FUJISAN SURVEY	12	4	90	0	no	96	98.99	si	si	8	0.02	0.05	si	no	400	si
Objetivo técnico	4	4	100	100	si	99.9	99.99	si	no	2	0.02	0.05	si	si	400	si

Nota: La figura 54 indica cual es el orden de importancia de cada uno de los aspectos técnicos del servicio de calibración, ocupando los primeros lugares la exactitud y programación del controlador, del variador de frecuencia y de las válvulas. La capacidad de las medidas volumétricas, el uso de los estándares API, la duración de la calibración y el sinóptico del proceso son requisitos importantes y no pueden ser pasados por alto. Así también, se plantea el objetivo técnico donde la duración de las pruebas preliminares, los errores e incertidumbres se reducen notoriamente.

Especificación de requerimientos de la empresa

La empresa METROLOGIC S.A ha solicitado optimizar el sistema de calibración de probadores bidireccionales por el método Waterdraw, sus requerimientos se detallan en la tabla 6.

Tabla 6

Especificación de los requerimientos de la empresa

ESPECIFICACIONES				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Estándar	17/02/2021	Técnico	R	Regirse por la norma API MPMS 4.9.2
Probadores	17/02/2021	Técnico	R R	Calibración de volúmenes de 4 – 450 gal Calibración de probadores compactos, uni y bi-direccionales
Puesta en Marcha	17/02/2021	Gerente General	R	Debe estar implementado y funcionando antes de la próxima calibración
Costo	17/02/2021	Gerente General	R	Máximo 2000 USD
Vida Útil	17/02/2021	Técnico	D	2 años sin necesidad de reprogramar
Pantalla	17/02/2021	Técnico	R R	Visualizar en una pantalla (HMI o PC) la Posición de la esfera dentro del prover Controlar y monitorear todo el proceso desde la pantalla
Tiempo	17/02/2021	Gerente General	R	Reducir el tiempo de las pruebas preliminares y del ensayo de calibración a una jornada laboral
Flujo	17/02/2021	Técnico	R	Reemplazar la válvula manual del ingreso de agua por un variador de frecuencia para generar flujos exactos y evitar golpes de ariete (Nota: el variador debe ser compatible con una Bomba de 3 Hp)
Errores	17/02/2021	Calidad	R	Reducir los errores manuales y la incertidumbre provocados por los instrumentos análogos

ESPECIFICACIONES				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Veracidad	17/02/2021	Gerente General	D	Almacenar los datos obtenidos en una hoja de Excel para evitar que los operarios realicen alteraciones a las medidas y se genere un certificado de calibración fraudulento
	17/02/2021	Técnico	R	Tiempo de respuesta menor a 0.1 s
Controlador	17/02/2021	Técnico	R	Detectar la activación de los interruptores del volumen calibrado del probador
	17/02/2021	Técnico	R	Controlar la apertura de la válvula de llenado de medidas volumétricas cuando se active el primer switch y la válvula de realimentación cuando se active el segundo
	17/02/2021	Técnico	R	Tomar los tiempos exactos entre la activación del primer y segundo switch
	17/02/2021	Técnico	R	Controlar el variador de frecuencia para regular el flujo
Condiciones Ambientales	17/02/2021	Técnico	R	El controlador y los equipos utilizados deben ser robustos para tolerar humedad y temperaturas altas
Modo de Operación	17/02/2021	Técnico	R	El proceso debe funcionar de forma correcta en el modo manual para realizar cualquier ajuste y en el modo semiautomático para agilizar el control
Operario	17/02/2021	Técnico	R	El control y monitoreo del proceso debe ser de fácil entendimiento para el operario

Nota: La tabla 6 detalla cada uno de los requerimientos que la empresa METROLOGIC S.A., especifica para el desarrollo del proyecto. El símbolo “R” hace referencia a requisito y “D” a deseo.

Análisis funcional

Las funciones principales de esta automatización es reducir los tiempos de las pruebas preliminares y del ensayo de calibración, generar un flujo exacto, reducir errores y visualizar en un pantalla el sinóptico en tiempo real del proceso.

Figura 55

Nivel 0 - Análisis funcional de la automatización del sistema



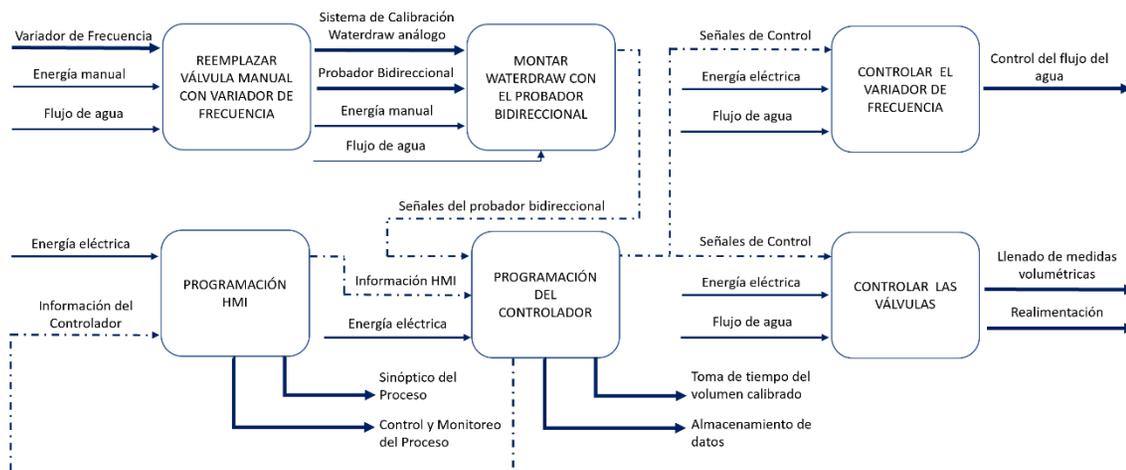
Nota: La figura 55 ilustra el nivel 0 del análisis funcional de la automatización del sistema.

Las funciones generales que se realizarán para poder obtener la automatización del proceso se detallan a continuación:

- Reemplazar válvula manual por el variador de frecuencia
- Montar el Sistema de Calibración Waterdraw con el Probador
- Programación del Controlador
- Programación de la HMI
- Controlar el variador de frecuencia
- Controlar las válvulas

Figura 56

Nivel 1 – Análisis Funcional de la automatización del sistema



Nota: La figura 56 detalla los 6 módulos funcionales del presente proyecto.

Módulo 1: Reemplazar la válvula Manual con un variador de frecuencia

Este módulo se subdivide en 3 funciones:

- **Desmontar la válvula manual:**

Existen 2 soluciones para su desmontaje:

- Desmontarla completamente del sistema Waterdraw
- Reubicarla al inicio de todo el proceso (después de la bomba)

- **Montar el Variador de Frecuencia:**

Existe 1 alternativa para su montaje:

- Montarlo con rieles de sujeción dentro del armario de control

- **Acoplar las conexiones eléctricas entre el variador de frecuencia y el controlador**

Existe 1 opción para su acople:

- Acoplar usando cables y borneras

Módulo 2: Montar el sistema Waterdraw con el probador bidireccional

Este módulo se subdivide en 4 funciones:

- **Realizar las conexiones de tubería entre el sistema Waterdraw y la entrada y salida del prover**

Existen 2 soluciones para realizar las conexiones:

- Realizar las conexiones con acoples rápidos
- Realizar las conexiones con acoples roscados
- **Acoplar la entrada y salida de realimentación de agua hacia el tanque**

Existen 2 alternativas para realizar estos acoples:

- Realizar las conexiones con acoples rápidos
- Realizar las conexiones con acoples roscados
- **Acoplar la salida del flujo del sistema Waterdraw al sistema de medida**

Existen 2 opciones para realizar estos acoples:

- Acoplar a las medidas volumétricas
- Acoplar a un sistema gravimétrico
- **Realizar las conexiones eléctricas entre el controlador del sistema Waterdraw y el prover usando borneras**

Existe 1 sola elección para la conexión:

- Acoplar usando cables y borneras

Módulo 3: Programación del controlador

Este módulo se subdivide en 3 funciones:

- **Controlador**

Existen 2 soluciones para el controlador:

- Utilizar un PLC como controlador
- Utilizar un Relé programable como controlador

- **Lenguaje de controlador**

La solución más común es:

- Utilizar lenguaje KOP (Escalera)

- **Almacenar los datos**

Existe 1 alternativas para el almacenamiento:

- Grabar los datos en un documento.

Módulo 4: Programación HMI

Este módulo se subdivide en 2 funciones:

- **Realizar la comunicación entre la pantalla y el controlador**

Existen 2 soluciones para realizar la comunicación:

- Utilizar un Switch y usar una topología tipo Bus
- Utilizar un cable Ethernet y utilizar una topología punto-punto

- **Tipo de HMI a utilizar**

Existen 2 alternativas recomendables para la HMI:

- Utilizar una pantalla HMI
- Utilizar una PC como pantalla HMI

Módulo 5: Controlar el variador de frecuencia

Este módulo se subdivide en 1 única función:

- **Enviar las señales de control al variador de frecuencia**

Existen 2 opciones para realizar el envío de estas señales:

- Enviar una señal analógica para determinar el flujo
- Enviar un par de señales digitales para determinar el flujo

Módulo 6: Controlar las válvulas

Este módulo se subdivide en 1 función:

- **Apertura y cierre de válvulas de realimentación y llenado del sistema de medida**

Existen 2 opciones para realizar su control:

- Utilizar una señal de control para abrir la válvula de llenado y reusar la misma señal, pero con un inversor para cerrar la válvula de realimentación.
- Utilizar dos señales distintas para el control de ambas válvulas.

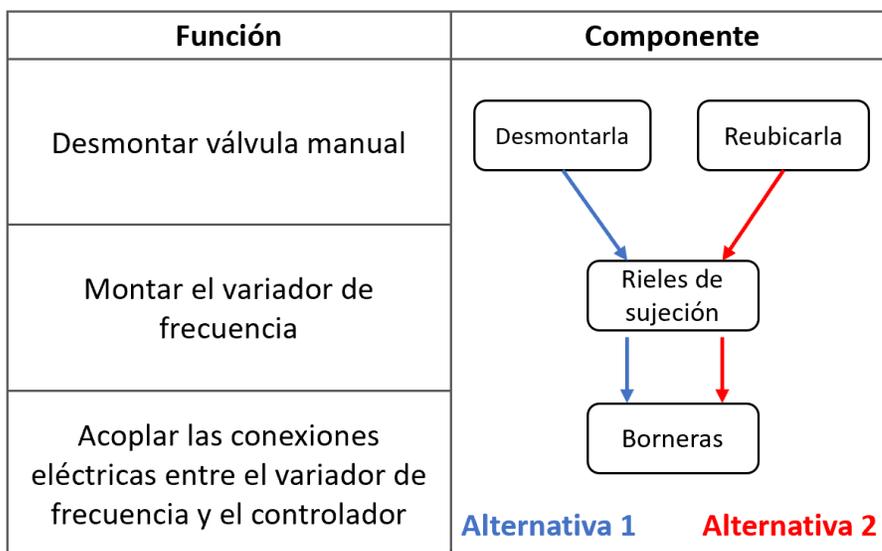
Matriz morfológica

Es una herramienta que permite determinar las diferentes alternativas para cada una de las funciones de los módulos. Es necesario que todas las combinaciones sean compatibles.

Módulo 1: Reemplazar la válvula manual con un variador de frecuencia

Figura 57

Matriz morfológica Módulo 1: Reemplazar la válvula con un variador de frecuencia



Nota: La solución para el Módulo 1: Reemplazar la válvula manual con variador de frecuencia se detalla en la figura 57.

Módulo 2: Montar el sistema Waterdraw con el probador bidireccional

Figura 58

Matriz morfológica Módulo 2: Montar sistema Waterdraw con el probador

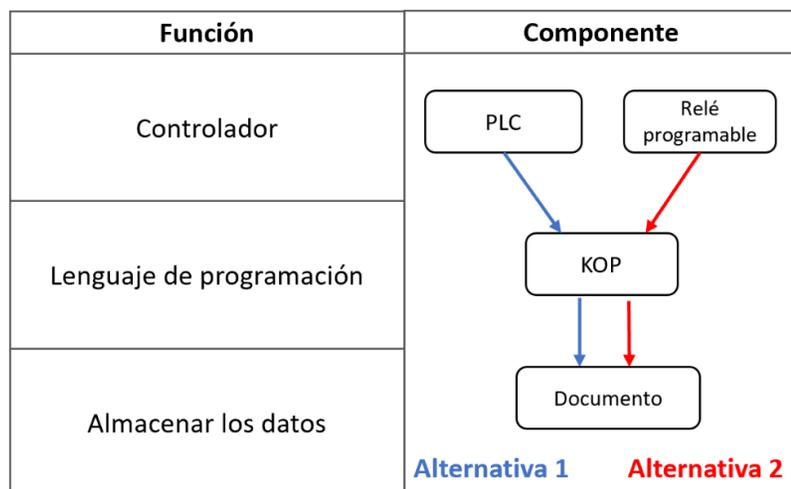
Función	Componente
Conexiones de tubería entre el sistema Waterdraw y el prover	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Acoples rápidos</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Acoples roscados</div> </div>
Conexiones de tubería entre el sistema Waterdraw y el tanque	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Volumétrico</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Gravimétrico</div> </div>
Sistema de medida	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Borneras</div> </div>
Acoplar las conexiones eléctricas entre el controlador y el prover	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="color: blue; font-weight: bold;">Alternativa 1</div> <div style="color: red; font-weight: bold;">Alternativa 2</div> </div>

Nota: La solución para el Módulo 2: Montar el sistema Waterdraw con el probador bidireccional se detalla en la figura 58.

Módulo 3: Programación del controlador

Figura 59

Matriz morfológica Módulo 3: Programación del controlador

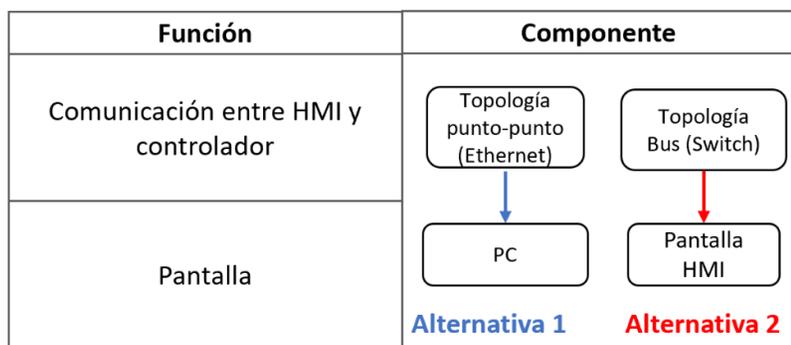


Nota: La solución para el Módulo 3: Programación del controlador se detalla en la figura 59. Es necesario indicar que OPC Server necesita de un Switch para su comunicación.

Módulo 4: Programación HMI

Figura 60

Matriz morfológica Módulo 4: Programación del HMI



Nota: La solución para el Módulo 4: Programación del HMI se detalla en la figura 60.

Módulo 5: Controlar el variador de frecuencia

Figura 61

Matriz morfológica Módulo 5: Controlar el variador de Frecuencia

Función	Componente				
Enviar señales de control	<table border="0"> <tr> <td data-bbox="883 726 1052 814">Señales Analógicas</td> <td data-bbox="1078 726 1253 814">Señales Digitales</td> </tr> <tr> <td data-bbox="873 827 1039 856">Alternativa 1</td> <td data-bbox="1094 827 1263 856">Alternativa 2</td> </tr> </table>	Señales Analógicas	Señales Digitales	Alternativa 1	Alternativa 2
Señales Analógicas	Señales Digitales				
Alternativa 1	Alternativa 2				

Nota: La solución para el Módulo 5: Controlar el variador de frecuencia se detalla en la figura 61.

Módulo 6: Controlar las válvulas

Figura 62

Matriz morfológica Módulo 6: Controlar las válvulas

Función	Componente				
Apertura y cierre de válvulas de llenado y realimentación	<table border="0"> <tr> <td data-bbox="889 1486 1068 1575">Una señal de control</td> <td data-bbox="1110 1486 1295 1575">Dos señales de control</td> </tr> <tr> <td data-bbox="873 1587 1055 1617">Alternativa 1</td> <td data-bbox="1117 1587 1302 1617">Alternativa 2</td> </tr> </table>	Una señal de control	Dos señales de control	Alternativa 1	Alternativa 2
Una señal de control	Dos señales de control				
Alternativa 1	Alternativa 2				

Nota: La solución para el Módulo 6: Controlar las válvulas se detalla en la figura 62.

Matriz de criterios ponderados

Para determinar la mejor solución se utiliza el método de criterios ponderados.

Módulo 1: Reemplazar la válvula Manual con un variador de frecuencia

Tabla 7

Evaluación de los criterios Módulo 1

Criterios	Peso	(Alternativa 1) Desmontar válvula	(Alternativa 2) Reubicar válvula
Subutilización de la válvula	4	9	3
Dentro del presupuesto	9	10	10
Control preciso del flujo	9	10	10
Fácil instalación	7	10	7
Funciona aunque el controlador se desconfigure	6	1	7
Fácil montaje y desmontaje del variador	5	10	10
Seguridad	7	8	10
Facilidad de realizar conexiones eléctricas	6	10	10
Fácil control y manejo	7	10	10
		528	533
		88,00%	88,83%

Nota: La tabla 7 detalla la evaluación de criterios del Módulo 1: Reemplazar la válvula manual con variador de frecuencia. Se observa que la alternativa 2 (reubicar la válvula) es la solución más óptima.

Módulo 2: Montar el sistema Waterdraw con el probador bidireccional

Tabla 8

Evaluación de los criterios Módulo 2

Criterios	Peso	(Alternativa 1) Volumétrico	(Alternativa 2) Gravimétrico
Resistencia a fugas	10	8	9
Fácil instalación	7	10	8
Rapidez al acoplar	7	10	8
Capacidad de medir volúmenes grandes	8	10	7
Exactitud al medir volúmenes pequeños	5	7	9
Presupuesto	9	10	8
Precisión sistema de medida	9	8	10
Facilidad de realizar conexiones eléctricas	5	10	9
Fácil control y manejo	7	10	10
		617	580
		92,09%	86,57%

Nota: La tabla 8 detalla la evaluación de criterios del Módulo 2: Montar el sistema Waterdraw con el probador bidireccional. Se observa que la alternativa 1 (utilizar acoples roscados y el sistema de medida volumétrico) es la solución que se destaca.

Módulo 3: Programación del controlador

Tabla 9

Evaluación de los criterios Módulo 3

Criterios	Peso	(Alternativa 1) PLC	(Alternativa 2) Relé programable
Licencias	9	7	6
Fácil programación	7	8	8
Seguridad	7	10	8
Flexibilidad	8	10	7
Exactitud	8	9	8
Precisión reloj interno controlador	9	10	8
Presupuesto	9	8	8

Criterios	Peso	(Alternativa 1)	(Alternativa 2)
		PLC	Relé programable
Compatibilidad con HMI	9	8	8
Compatibilidad con otros programas	7	9	6
Comunicación	8	9	5
Almacenamiento de datos	7	8	8
Entradas digitales	9	10	8
Salidas digitales	9	10	7
Salidas analógicas	3	10	1
		976	778
		89,54%	71,38%

Nota: La tabla 9 detalla la evaluación de criterios del Módulo 3: Programación del controlador. Se observa que la alternativa 1 (PLC) es la solución más conveniente.

Módulo 4: Programación HMI

Tabla 10

Evaluación de los criterios Módulo 4

Criterios	Peso	(Alternativa 1)	(Alternativa 2)
		PC	Pantalla HMI
Licencias	9	7	7
Fácil programación	7	8	8
Seguridad	7	8	8
Flexibilidad	8	8	8
Velocidad de comunicación	8	9	9
Presupuesto	9	8	5
Compatibilidad con PLC	9	8	8
Tamaño Pantalla	7	9	6
Comunicación	8	9	7
		590	526
		81,94%	73,06%

Nota: La tabla 10 detalla la evaluación de criterios del Módulo 4: Programación del HMI.

Se observa que la alternativa 1 (PC) es la solución más conveniente.

Módulo 5: Controlar el variador de frecuencia

Tabla 11

Evaluación de los criterios Módulo 5

Criterios	Peso	(Alternativa 1) Señal Digital	(Alternativa 2) Señal Análoga
Precisión	9	8	9
Flujos Específicos	7	8	9
Presupuesto	7	9	6
Complejidad	8	9	7
		263	242
		84,84%	78,06%

Nota: La tabla 11 detalla la evaluación de criterios del Módulo 5: Controlar el variador de Frecuencia. Se observa que la alternativa 1 (Señales digitales) es la mejor solución.

Módulo 6: Controlar las válvulas

Tabla 12

Evaluación de los criterios Módulo 6

Criterios	Peso	(Alternativa 1) 1 señal	(Alternativa 2) 2 señales
Independencia de señales	9	5	9
Ahorro de salidas del controlador	7	9	8
Presupuesto	7	9	8
Complejidad	8	8	7
		235	249
		75,81%	80,32%

Nota: La tabla 12 detalla la evaluación de criterios del Módulo 6: Controlar las válvulas. Se observa que la alternativa 2 (2 señales de control) es la solución indicada.

Solución final

Como resultado del análisis de evaluación de criterios ponderados se tiene las siguientes opciones para cada módulo:

Módulo 1: Reemplazar la válvula Manual con un variador de frecuencia

Reubicar la válvula manual, montar el variador de frecuencia sobre rieles de sujeción y acoplar las conexiones eléctricas entre el variador de frecuencia y el controlador usando borneras.

Módulo 2: Montar el sistema Waterdraw con el probador bidireccional

Realizar las conexiones de tubería entre el sistema Waterdraw, el prover y el tanque utilizando acoples rápidos, utilizar el sistema de medida volumétrico y acoplar las conexiones eléctricas entre el controlador y el prover.

Módulo 3: Programación del controlador

Utilizar como controlador principal un PLC, realizar la programación en el lenguaje KOP (Ladder) y almacenar los datos en un documento.

Módulo 4: Programación HMI

Usar una PC como HMI, utilizar topología punto – punto y el protocolo de comunicación Ethernet.

Módulo 5: Controlar el variador de frecuencia

Controlar el Variador de frecuencia enviando señales de control digitales desde el controlador.

Módulo 6: Controlar las válvulas

Controlar la apertura y cierre de válvulas de llenado y de realimentación utilizando dos señales independientes de control y utilizar una señal de control para el control del sentido del flujo de la válvula de 4 vías si el cliente lo permite.

Capítulo IV

Diseño

Definición del Proyecto

El proyecto a realizarse es la automatización del sistema de calibración de probadores bidireccionales por el método Waterdraw. La solución planteada para el sistema se detalla en el apartado 3.6.

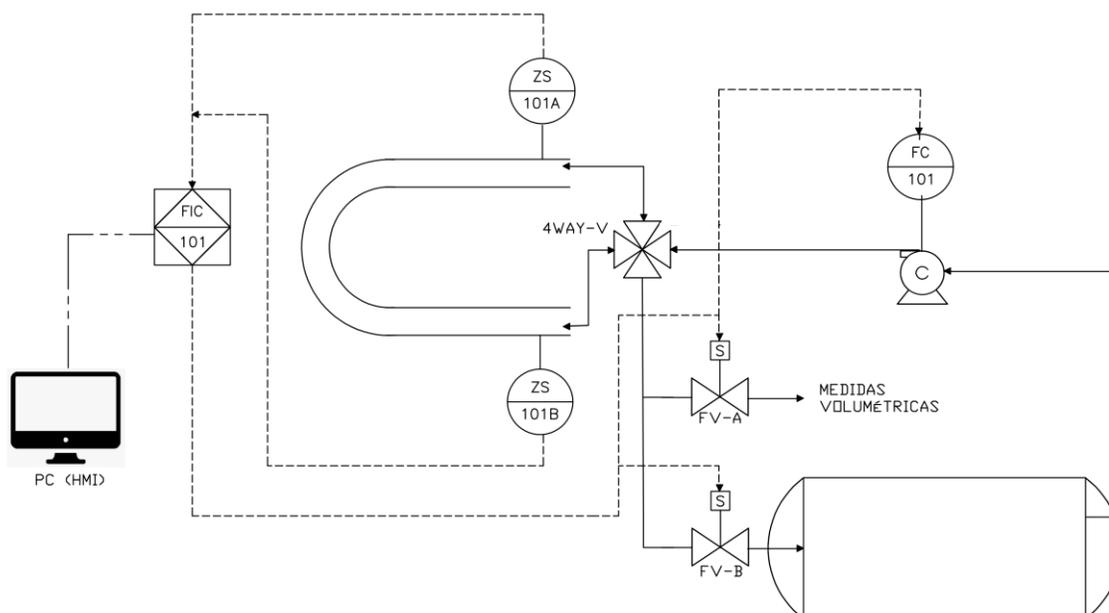
Se utiliza un PLC como controlador principal de todo el proceso. Sus principales señales de entrada son los 2 detectores interruptores del probador del cliente, switches de selección del modo de operación y sentido del flujo, botones de inicio, stop y bypass que el PLC lee, y mediante su programación envía las señales de control hacia las dos válvulas solenoides de llenado y realimentación. A su vez el PLC envía las señales digitales al variador de frecuencia que controla el flujo de la bomba y hacia una sirena. En un inicio se planteó el controlar la válvula de 4 vías del probador para determinar el sentido del flujo, pero el cliente lo descartó irremediablemente.

Se usa una PC como Interfaz Humano-Máquina para el control y monitoreo del proceso. Se podrá observar el sinóptico en tiempo real del proceso. Es decir, se podrá visualizar la posición estimada de la esfera dentro del prover. Así mismo, se observarán todas las entradas y salidas activas del proceso, y los tiempos del volumen calibrado del probador.

Todo el proceso se puede detallar en el diagrama P&ID del sistema que se ilustra en la figura 63.

Figura 63

Diagrama P&ID del proceso



Nota: Se puede observar el proceso general del sistema automatizado en la figura 63. Los símbolos FIC corresponden al PLC, ZS a los detectores interruptores, FC al variador de frecuencia. FV-A a la electroválvula de llenado, FV-B a la electroválvula de realimentación y 4WAY-V a la válvula de 4 vías.

Especificaciones generales de los equipos del sistema de medición y calibración

La empresa METROLOGIC S.A. ha restringido la divulgación de las especificaciones de sus equipos debido a un acuerdo de confidencialidad. Por lo que únicamente se enlistarán los equipos utilizados.

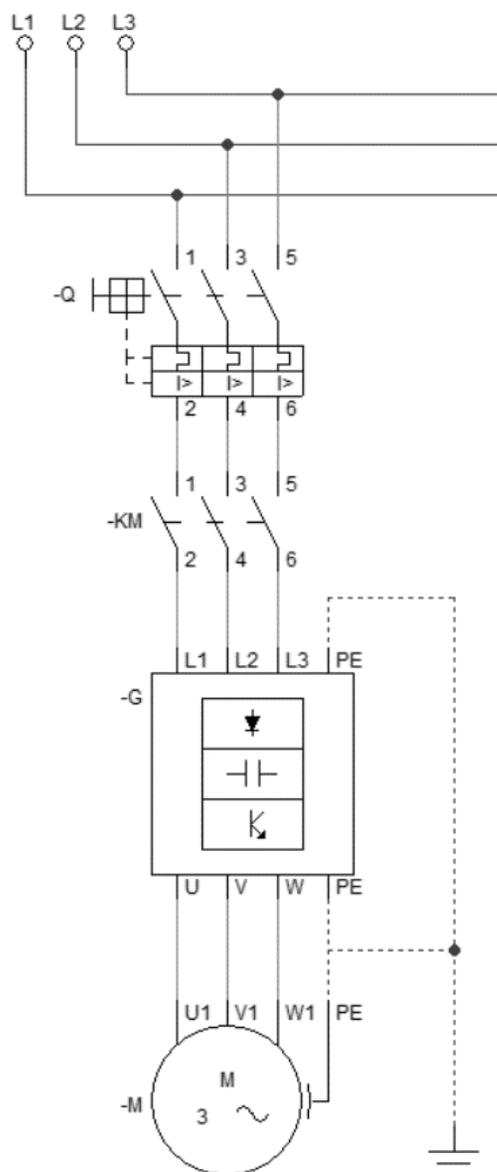
- 1 motor trifásico de 3 Hp.

- 1 bomba trifásica de 3 Hp.
- Electroválvulas
- Medidas volumétricas de múltiples volúmenes.
- Tuberías varias
- Mangueras varias
- Acoples rápidos
- Válvulas manuales
- Tanque o piscina
- Botones
- Selectores
- 1 sirena
- Luces indicadoras
- Variador de frecuencia de 3 Hp
- PLC
- PC
- Cables
- Borneras
- Armario de Control
- Cable Ethernet
- Excel
- Otros

Diagramas Eléctricos

Figura 64

Diagrama de potencia del Sistema Waterdraw

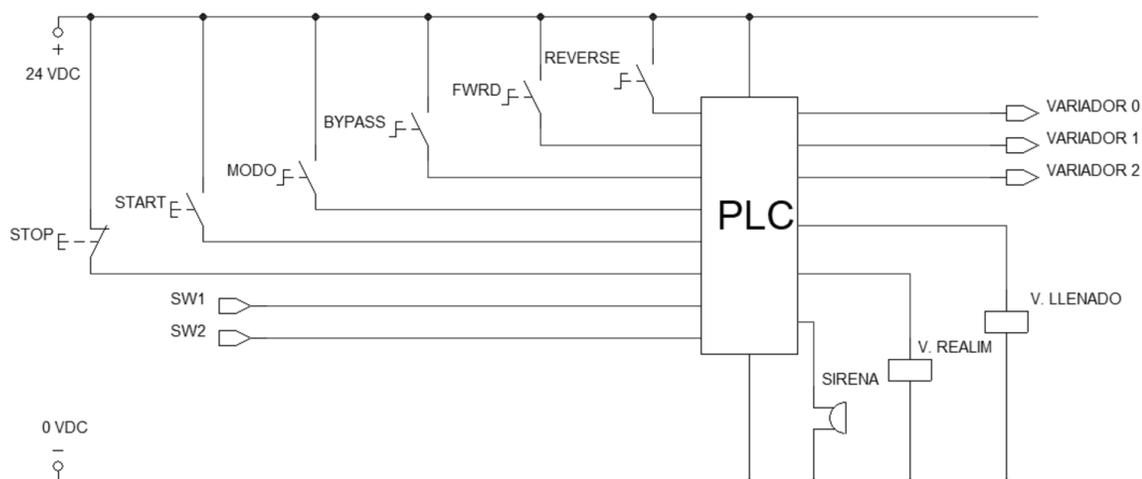


Nota: En la figura 64 se observa las conexiones de potencia de la bomba. Primero se conecta un interruptor electromagnético a las 3 fases, después un contactor, el variador de frecuencia y finalmente la bomba.

Diagramas de Control

Figura 65

Diagrama de Control del Sistema Waterdraw



Nota: La figura 65 ilustra el diagrama de control del sistema Waterdraw, se puede observar que posee 8 entradas físicas digitales que son: Stop, Start, Modo de Operación, Bypass, Sentido (Forward y Reverse) y las dos señales de los interruptores detectores del prover. Así también, se ilustra 6 salidas digitales que son: la sirena, las electroválvulas de llenado y realimentación, y las 3 señales de control del variador para regular la velocidad de la bomba.

Diseño y programación PLC

Tabla de asignación de recursos

Tabla 13

Tabla de asignación de entradas del PLC

Entradas				
Num	Descripción	Símbolo	Dirección	Tipo
1	Selector del sentido anti-horario	SENTIDO_0	I0.0	Bool
2	Selector del sentido horario	SENTIDO_1	I0.1	Bool
3	Interruptor selector del prover #1	SW1	I0.2	Bool
4	Interruptor selector del prover #2	SW2	I0.3	Bool
5	Pulsador de inicio	START	I0.4	Bool
6	Pulsador de paro de emergencia	STOP	I0.5	Bool
7	Selector de modo de operación	MODO	I0.6	Bool
8	Selector de encendido de Bypass	BYPASS	I0.7	Bool
9	Interruptor de sentido virtual	SENTIDO_V	M50.1	Bool
10	Botón de inicio virtual	START_V	M50.2	Bool
11	Botón de paro de emergencia virtual	STOP_V	M50.3	Bool
12	Botón de modo automático virtual	M_AUTO_V	M50.4	Bool
13	Botón de modo semiautomático virtual	M_SEMI_V	M50.5	Bool
14	Interruptor de encendido de Bypass virtual	BYPASS_V	M50.6	Bool

Nota: La tabla 13 detalla la asignación de las entradas del PLC.

Tabla 14

Tabla de asignación de salidas del PLC

Salidas				
Num	Descripción	Símbolo	Dirección	Tipo
1	Electroválvula de llenado de medidas volumétricas	V_LLENADO	Q0.0	Bool
2	Electroválvula de realimentación	V_REALIM	Q0.1	Bool
3	Entrada digital 0 del variador	VARIADOR_0	Q0.2	Bool
4	Entrada digital 1 del variador	VARIADOR_1	Q0.3	Bool
5	Entrada digital 2 del variador	VARIADOR_2	Q0.4	Bool
6	Bocina indicadora de volumen calibrado	SIRENA	Q0.5	Bool
7	Electroválvula de llenado de medidas volumétricas virtual	V_LLENADO_V	M60.0	Bool

Salidas				
Num	Descripción	Símbolo	Dirección	Tipo
8	Electroválvula de realimentación virtual	V_REALIM_V	M60.1	Bool

Nota: La tabla 14 detalla la asignación de las salidas del PLC.

Tabla 15

Tabla de asignación de marcas del PLC

Marcas				
Num	Descripción	Símbolo	Dirección	Tipo
	System_Byte		MB0	Byte
1	FirstScan	FirstScan	M0.0	Bool
2	Marca de paro de emergencia	I_STOP	M60.2	Bool
3	Marca de inicio	I_START	M60.3	Bool
4	Marca de modo automático	I_AUTO	M60.4	Bool
5	Marca de modo semiautomático	I_SEMI	M60.5	Bool
6	Marca de flujo	I_FLUJO	M60.6	Bool
7	Marca auxiliar	AUX_MODO	M80.0	Bool
8	Marca auxiliar	AUX_HMI	M80.1	Bool
9	Marca de sentido horario	HORARIO	M80.2	Bool
10	Marca de sentido anti-horario	ANTIHORARIO	M80.3	Bool
11	Reset de Contador	RST_CONT	M80.4	Bool
12	Reset de Timer	RST_TIME	M80.5	Bool
13	Marca auxiliar	AUX_TIME	M80.6	Bool
14	Marca auxiliar	AUX_TIME_V	M80.7	Bool
15	Valor enteros asignados a la velocidad del variador	VARIADOR	MW81	Int
16	Marca auxiliar	AUX_MOV	M83.0	Bool
17	Contador de corridas	COUNTER	MW84	Int
18	Tiempo entre activación de switches del prover	TIMER	MD86	Time
19	Volumen en Barriles	BARRIL	MD90	Real
20	Volumen en Galones	GALON	MD94	Real
21	Caudal en galones x segundo	CAUDAL	MD98	Real
22	Caudal máximo en gal/s	CAUDAL_MAX_GxS	MD102	Real
23	Tiempo entre activación de switches del prover en Entero	TIMER_INT	MD106	DInt
24	Tiempo entre activación de switches del prover en segundos	TIMER_SEG	MD110	Real

Marcas				
Num	Descripción	Símbolo	Dirección	Tipo
25	Marca de segundos	SEGUNDOS	MD114	Real
26	Marca de minutos	MINUTOS	MW118	Int
27	Marca auxiliar	MINUTOS_AUX	MW120	Int
28	Tiempo estimado de calibración	T_ESTIMADO	MD122	Real
29	Tiempo estimado de movimiento	T-SEG	MD126	Real
30	Tiempo estimado de movimiento en Entero	T_ACT	MD130	DInt
31	Marca auxiliar de movimiento	CONT_MOV	MW134	Int

Nota: La tabla 15 detalla la asignación de las marcas del PLC.

Tabla 16

Tabla de asignación de etapas del automatismo del PLC

Etapas				
Num	Descripción	Símbolo	Dirección	Tipo
	Etapas de Proceso Automático		MB10-11	Byte
1	Etapas 0	E0	M10.0	Bool
2	Etapas 1	E1	M10.1	Bool
3	Etapas 2	E2	M10.2	Bool
4	Etapas 3	E3	M10.3	Bool
5	Etapas 4	E4	M10.4	Bool
6	Etapas 5	E5	M10.5	Bool
7	Etapas 6	E6	M10.6	Bool
8	Etapas 7	E7	M10.7	Bool
9	Etapas 8	E8	M11.0	Bool
10	Etapas 9	E9	M11.1	Bool
11	Etapas 10	E10	M11.2	Bool
12	Etapas 11	E11	M11.3	Bool
	Etapas de Proceso Semi-Automático		MB20-21	Byte
13	Etapas 20	E20	M20.0	Bool
14	Etapas 21	E21	M20.1	Bool
15	Etapas 22	E22	M20.2	Bool
16	Etapas 23	E23	M20.3	Bool
17	Etapas 24	E24	M20.4	Bool
18	Etapas 25	E25	M20.5	Bool
19	Etapas 26	E26	M20.6	Bool
20	Etapas 27	E27	M20.7	Bool

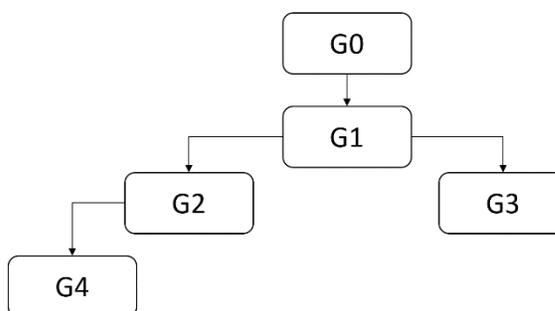
Num	Descripción	Etapas		
		Símbolo	Dirección	Tipo
21	Etapa 28	E28	M21.0	Bool
	Etapas de Seguridad	MB30	Byte	
22	Etapa 30	E30	E30.0	Bool
23	Etapa 31	E31	E30.1	Bool
24	Etapa 32	E32	E30.2	Bool
	Etapas de Modos de Operación	MB40	Byte	
25	Etapa 40	E40	M40.0	Bool
26	Etapa 41	E41	M40.1	Bool
27	Etapa 42	E42	M40.2	Bool
28	Etapa 43	E43	M40.3	Bool
29	Etapa 44	E44	M40.4	Bool
	Etapas de Movimiento	MB70	Byte	
30	Etapa 50	E50	M70.0	Bool
31	Etapa 51	E51	M70.1	Bool
32	Etapa 52	E52	M70.2	Bool
33	Etapa 53	E53	M70.3	Bool
34	Etapa 54	E54	M70.4	Bool

Nota: La tabla 16 detalla la asignación de las etapas del automatismo del PLC.

Grafcet

Figura 66

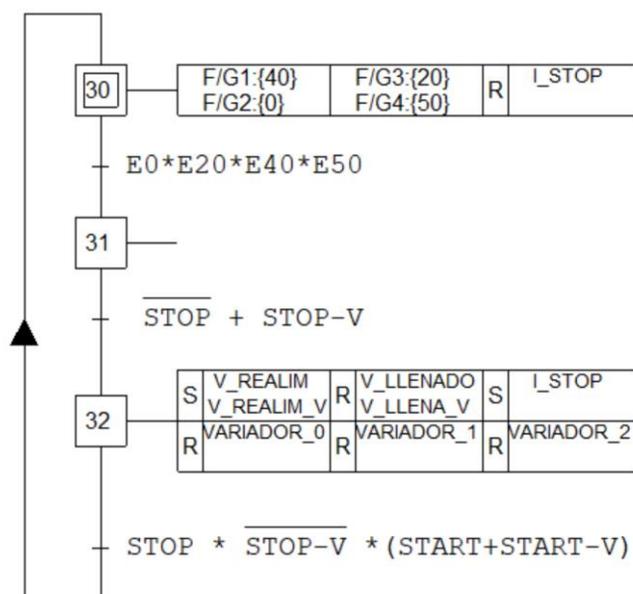
Diagrama Jerárquico del Grafcet



Nota: La figura 66 ilustra el diagrama jerárquico del Grafcet, donde G0 corresponde al Grafcet de Seguridad, G1 al de Modos de operación, G2 al Modo automático, G3 al Modo semiautomático y G4 al Grafcet de movimiento.

Figura 67

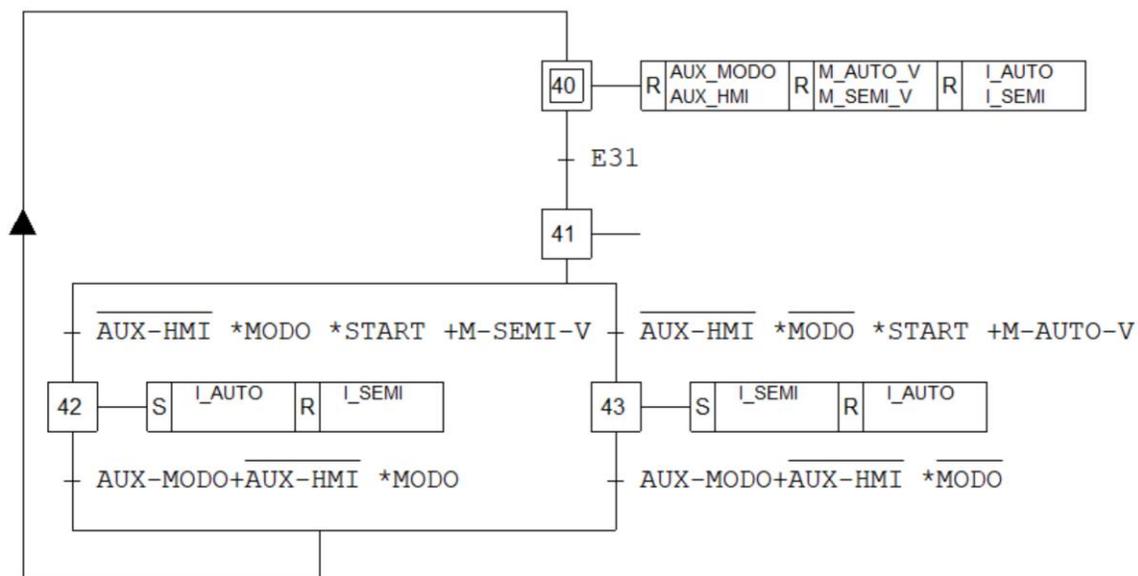
G0: Grafcet de Seguridad



Nota: La figura 67 ilustra el Grafcet de Seguridad que empieza en la etapa 30.

Figura 68

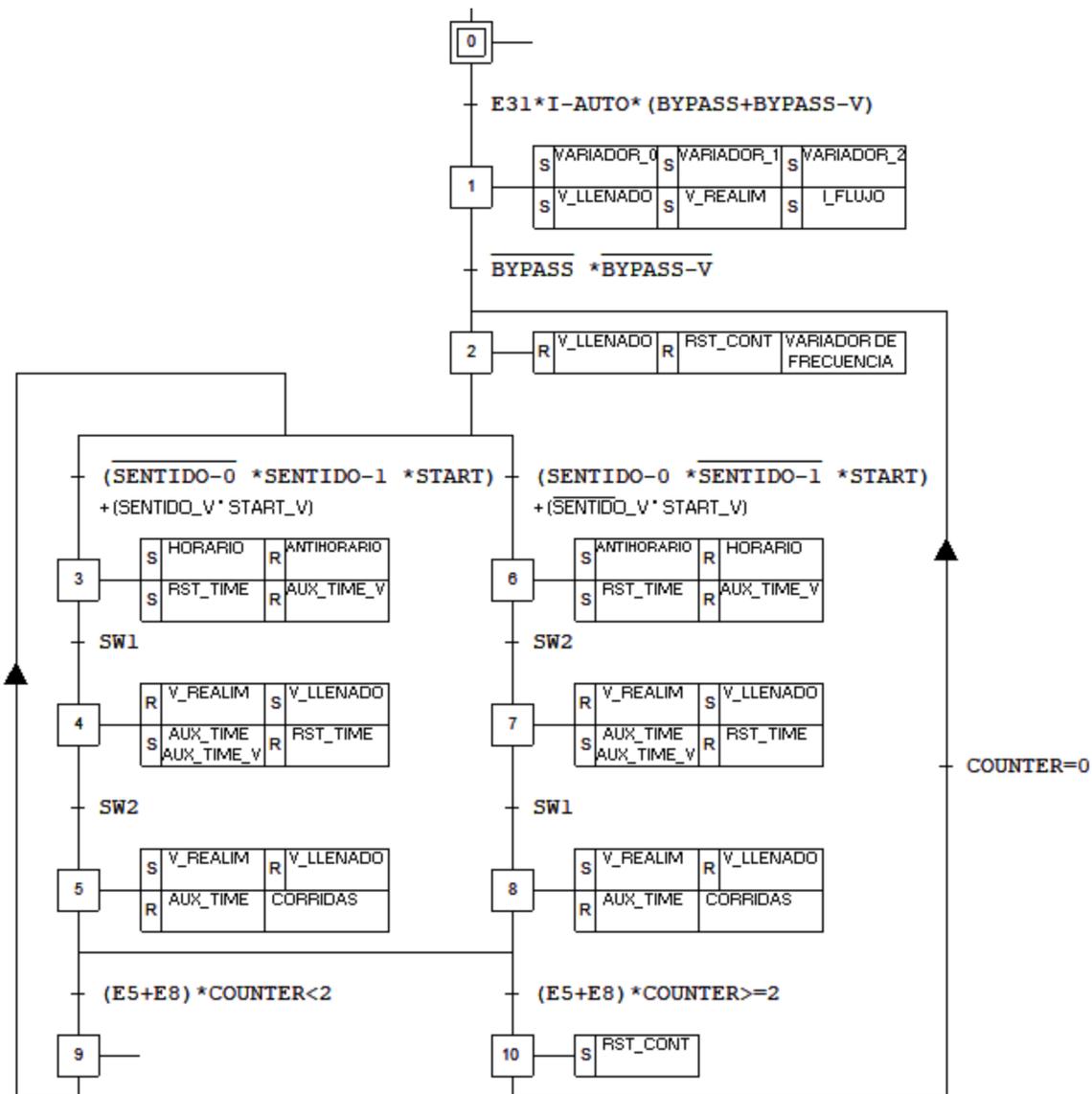
G1: Grafcet de Modos de operación



Nota: La figura 68 ilustra el Grafcet de Modos de operación que empieza en la etapa 40.

Figura 69

G2: Grafcet del Modo automático



Nota: La figura 69 ilustra el Grafcet del Modo automático que empieza en la etapa 0.

Es necesario indicar que la acción variador de frecuencia es la asignación de las 3 salidas digitales dependiendo del caudal escogido desde la HMI. Esto se detalla en la tabla 17.

Tabla 17

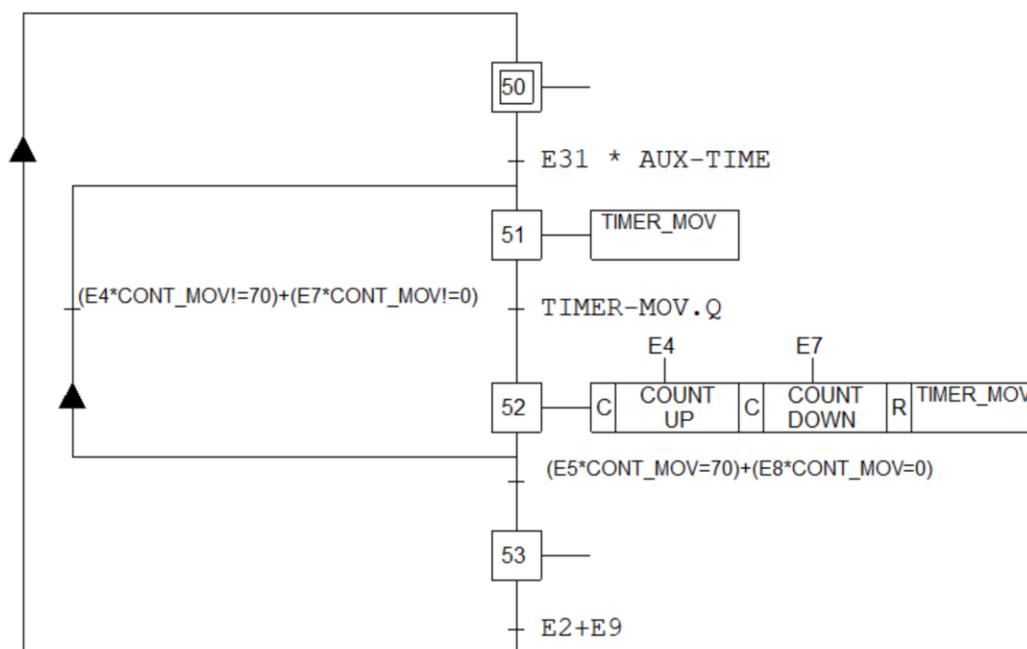
Tabla de asignación de caudal a salida digital del variador

Caudal	VAR_0	VAR_1	VAR_2	Frecuencia
0 %	0	0	0	0.3 Hz
25 %	0	1	0	15 Hz
50 %	1	0	0	30 Hz
75 %	1	1	0	45 Hz
100 %	1	1	1	60 Hz

Nota: La tabla 17 indica la correspondiente asignación de bits de salida del variador de frecuencia dependiendo del porcentaje de caudal escogido.

Figura 70

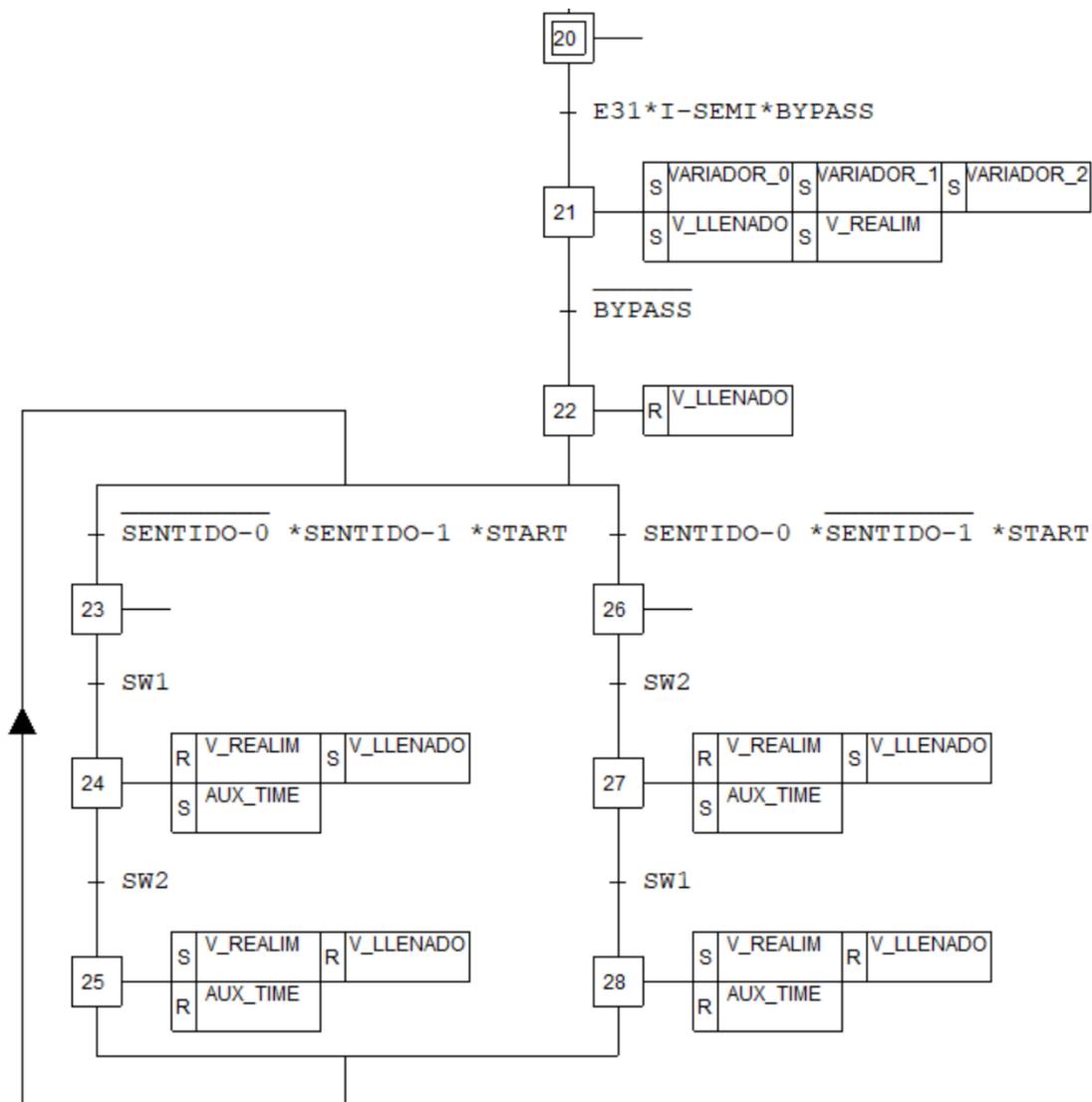
G4: Grafcet de movimiento



Nota: La figura 70 ilustra el Grafcet de movimiento que empieza en la etapa 50.

Figura 71

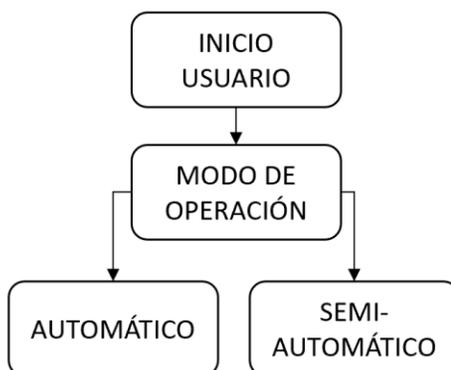
G3: Grafcet del Modo semiautomático



Nota: La figura 71 ilustra el Grafcet del Modo semiautomático que empieza en la etapa 20.

Figura 73

Diagrama de navegación de pantallas



Nota: Se han desarrollado 4 pantallas para este sistema, las cuales se muestran en la figura 73.

Pantalla de Inicio Usuario

Es el primer display con el que el proceso empieza, se encarga de validar el inicio de sesión a trabajadores de la empresa autorizados. Se ha utilizado el logo de la empresa METROLOGIC S.A., y como solicitud de su parte se ha realizado el cuadro de inicio de sesión en color azul. El botón “Ingresar” abrirá el diálogo de inicio de sesión y si la validación es correcta, se redirigirá a la página de selección de modo de operación. Caso contrario, si la validación es incorrecta la página de Inicio se refrescará. También, el botón “Salir” detendrá la ejecución de la HMI (run Time) y cerrará el programa automáticamente. Adicionalmente, se ha colocado la fecha y la hora en la parte inferior izquierda en esta y todas las pantallas.

Figura 74*Pantalla de Inicio-Usuario*

Nota: La figura 74 muestra la pantalla de inicio del sistema HMI. Es importante mencionar que la norma ISA 101 no recomienda usar el color azul en estos casos, pero la empresa solicitó específicamente el fondo negro y el color azul.

Pantalla de Modo de Operación

Es la segunda pantalla del proceso, se encarga de seleccionar el modo automático o semiautomático. Esta pantalla al igual que todas las demás está diseñada con una plantilla que tiene el logo de la empresa, la hora, fecha, y botones “Salir” y “Usuario” que es el encargado de regresar a la pantalla de Inicio Usuario. Está diseñada bajo las recomendaciones de la norma ISA 101 y HPHMI por lo que usa un fondo gris,

textos oscuros, y botones de navegación grises oscuros distintos de los de control grises claros.

Figura 75

Pantalla de Selección de modo de operación



Nota: La figura 75 muestra la pantalla de selección del modo de operación bajo los estándares de la norma ISA 101.

Pantalla de Proceso automático

Esta pantalla aparece cuando se selecciona el modo automático en la pantalla de modo de selección. Está diseñada con la misma plantilla, por lo que sus colores y elementos de navegación son similares. Se añaden dos botones de navegación, “Regresar” que retorna a la pantalla anterior y “Guardar” que almacena los datos

(tiempo, sentido, volumen en galones y caudal en galones/segundo) en un documento de Excel.

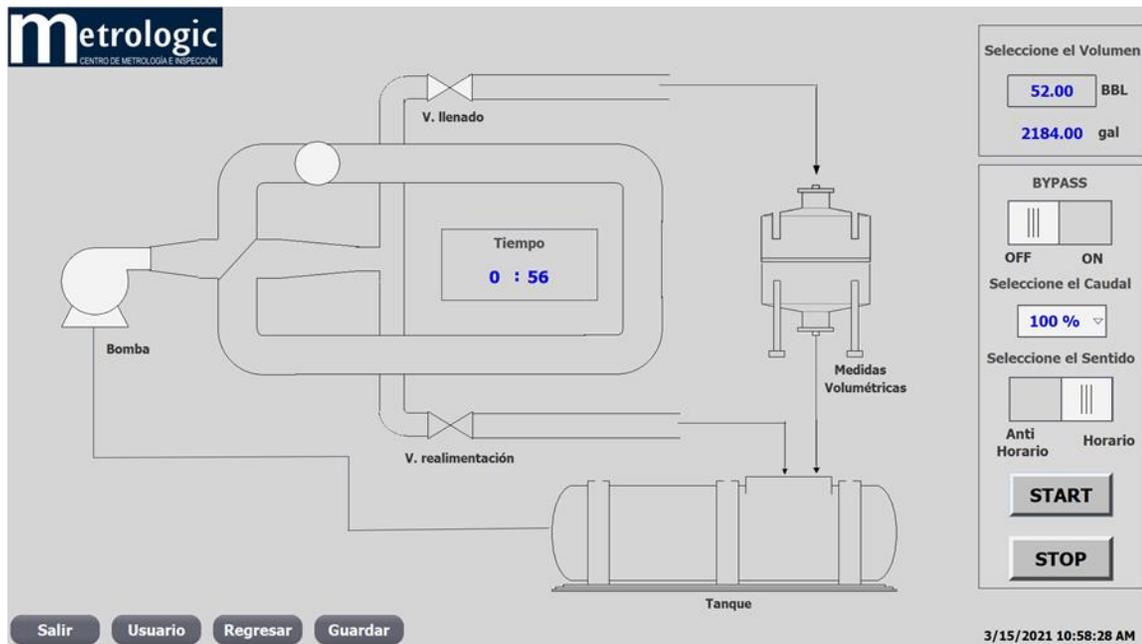
En la parte derecha del display se observan los mandos de control:

- Seleccionar Volumen: se escribe el volumen en barriles y se devuelve en galones.
- Bypass: Si se activa se abren todas las válvulas y se manda al variador el 100% del caudal para quitar el aire en las tuberías. Si se desactiva se cierra la válvula de llenado.
- Seleccionar Caudal: Se selecciona el porcentaje del caudal (25%, 50%, 75% y 100%).
- Seleccionar Sentido: Se escoge entre el sentido horario y antihorario.
- Start: Botón de Inicio para empezar las corridas.
- Stop: Botón paro de emergencia.

En la parte izquierda y central se puede observar al sinóptico del proceso, y cuando se encienda la bomba o las electroválvulas tomarán un color gris blanquecino. Del mismo color se encuentra la esfera que se mueve de acuerdo al sentido del flujo.

Figura 76

Pantalla del Proceso automático



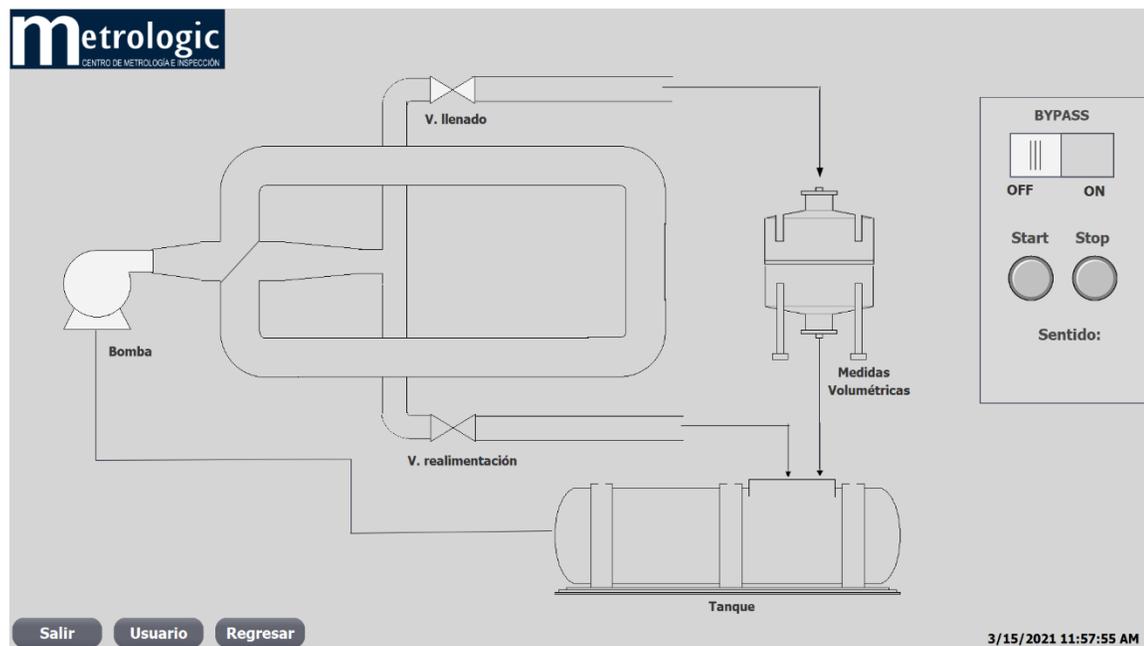
Nota: La figura 76 ilustra la pantalla del proceso automático bajo el estándar ISA 101.

Pantalla de Proceso semiautomático

Esta pantalla es muy similar al proceso automático, pero no se puede realizar el control desde la HMI, por lo que únicamente se pueden observar las entradas y salidas de este proceso en el display. Igualmente, usa la misma plantilla por lo que tiene los mismo comandos de navegación.

Figura 77

Pantalla del Proceso semiautomático



Nota: La figura 77 muestra la pantalla del modo semiautomático bajo las recomendaciones del estándar ISA101.

Capítulo V

Implementación

La empresa METROLOGIC S.A. realizó la adquisición previa del PLC SIEMENS S7 1200 1212 AC/DC/RLY y del variador de frecuencia WEG CFW300 trifásico de 3HP. Por lo que estrictamente ha indicado que se utilicen estos equipos en la implementación. Se ha verificado que los equipos impuestos sean compatibles con el diseño realizado y con las características del sistema Waterdraw.

El PLC posee 8 entradas digitales tipo relé, 2 entradas analógicas y 6 salidas digitales tipo relé; el diseño realizado posee el mismo número de entradas y salidas digitales por lo que su dimensionamiento fue el adecuado. Así mismo su reloj interno es menor a 100 ms, que era el tiempo de respuesta mínimo para este proceso. Su precio fue de \$320.00, por lo que el presupuesto establecido por gerencia lo contempla. (SIEMENS, 2021)

Figura 78

PLC SIEMENS S7 1200 1212 AC DC RLY



Nota: En la figura 78 se observa el PLC utilizado. Tomado de (SIEMENS, 2021).

El variador de frecuencia posee 4 entradas digitales programables y 2 entradas analógicas para su control de frecuencia, además funciona con una red trifásica a 220V, con una potencia máxima de 3Hp y 10 A de corriente nominal. El diseño implementado únicamente usara 3 entradas digitales para su control, la bomba es trifásica de 3Hp, con una corriente máxima de 9.6 A en 220V y de 4.8 A en 480 V. Se determina que su dimensionamiento fue preciso. Finalmente, su precio fue de \$385.00 por lo que el presupuesto establecido por gerencia lo contempla. (WEG, 2019)

Figura 79

Variador de frecuencia WEG CFW300 3HP



Nota: En la figura 79 se puede observar el variador de frecuencia utilizado en el proyecto. Tomado de (WEG, 2019).

Simulación

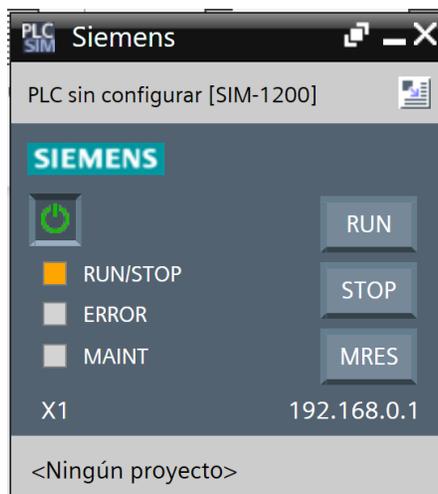
Para la simulación y programación del PLC se ha utilizado el entorno de programación TIA PORTAL V15.

PLC

Se ha utilizado PLC SIM para simular el PLC implementado al igual que toda su programación. Se puede cargar el programa, y poner el PLC SIM en modo STOP o RUN.

Figura 80

PLC SIM

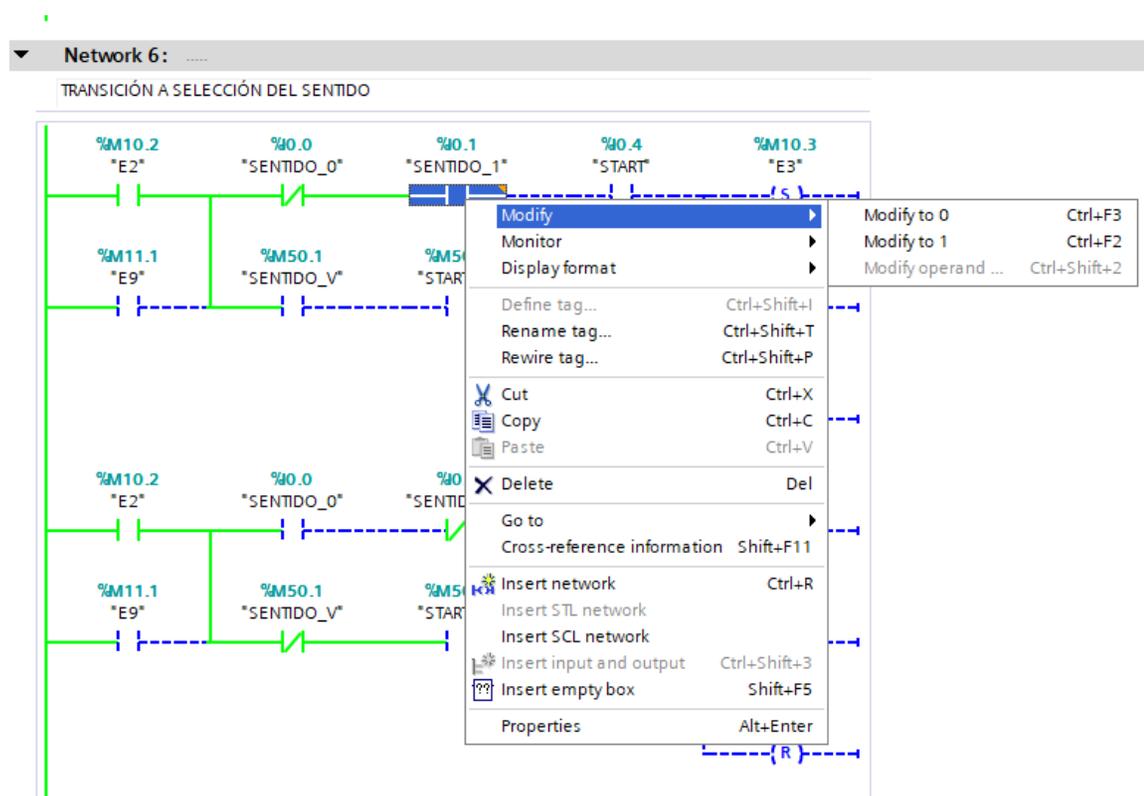


Nota: En la figura 80 se puede observar al simulador del PLC S71200 de SIEMENS y su estado (RUN/STOP).

Se puede simular las entradas físicas del PLC, desde el entorno TIA PORTAL, se pone al PLC y a su programación ONLINE, se controla y monitorea todos los procesos del PLC.

Figura 81

Simulación de entradas del PLC



Nota: En la figura 81 se puede apreciar el entorno de programación del TIA PORTAL V15, específicamente se observa el diagrama ladder del modo automático. Se puede simular la activación de las entradas dando clic derecho y modificando el valor booleano a "1" o "0" según corresponda.

HMI

Se ha utilizado WinCC RunTime Advanced para simular la HMI directamente desde el PC. Las siguientes figuras ilustran sus principales pantallas.

Figura 82

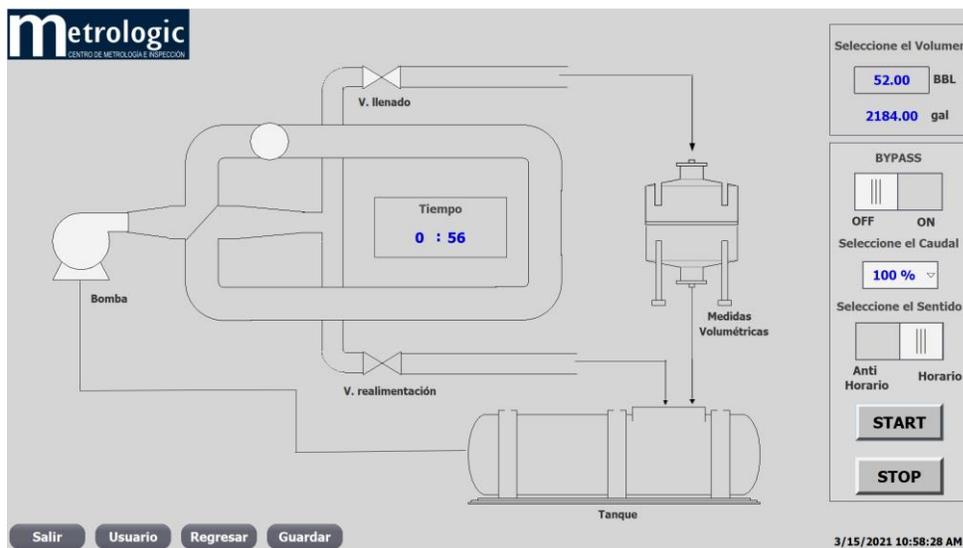
WinCC RunTime Advanced: Inicio



Nota: Se puede observar en la figura 82 que gracias a WinCC se puede validar el ingreso de usuarios al control del proceso.

Figura 83

WinCC Run Time Advanced: Proceso Automático



Nota: La figura 83 indica todo el control, monitoreo y simulación de la calibración en modo automático, incluyendo los mandos de navegación.

Registro de Datos

Gracias al entorno de programación de WinCC, se puede añadir un VB Script con el que se puede generar un archivo de registro de datos en Excel. Los datos se registrarán en el modo automático cada vez que se presione el botón guardar. Los registros que se documentarán son: volumen (gal), caudal (%), sentido (Horario / Antihorario) y tiempo del volumen calibrado (min y s).

Figura 84*Registro de datos en Excel*

	A	B	C	D	E
1	Volumen (gal)	Caudal (gal/s)	Sentido	Minutos	Segundos
2	210	0,75	HORARIO	6	32
3	210	0,75	ANTIHORARIO	6	32
4	210	0,5	HORARIO	9	28
5	210	0,5	ANTIHORARIO	9	29
6	210	0,25	HORARIO	18	16
7	210	0,25	ANTIHORARIO	18	17
8					
9					
10					
11					
12					

Nota: En la figura 84 se puede observar los datos registrados en Excel desde la HMI. Se nota que se han realizado 2 carreras por cada caudal.

Figura 85

VB Script para el registro de datos en Excel

```

1 Sub GuardarExcel()
2
3 'Definir variable de script
4 Dim Folderway, Objectway, FileName, File, FileExist, Apendix, Row, Sentido
5
6 'Definir direccion de carpeta
7 Folderway = "C:\Users\Documents\WATERDRAW"
8
9 'Crear el objeto dentro de la carpeta
10 Set Objectway = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
11
12 'Si la carpeta no existe, se crea
13 If Not Objectway.FolderExists(Folderway) Then
14     Objectway.CreateFolder Folderway
15 End If
16
17 'Definir nombre de archivo
18 FileName = "Prueba1.csv"
19
20 'Crear un nuevo objeto para controlar la existencia del archivo
21 Set File = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
22
23 'Chequear si el archivo existe en la carpeta
24 FileExist = File.FileExists(Folderway & "\" & FileName)
25
26 If FileExist = False Then
27
28     'Crear archivo
29     File.CreateTextFile(Folderway & "\" & FileName)
30
31     'Configurar titulos de columnas
32     Set Apendix = File.OpenTextFile(Folderway & "\" & FileName,8)
33     Apendix.WriteLine(" Volumen (Gal) ; Caudal (g) ; Sentido ; Minutos ; Segundos ")
34     Apendix.Close
35
36     'Clear Objet
37     Set File = Nothing
38
39 End If
40
41 'Definir Sentido
42 If SmartTags("HORARIO") = True Then
43     Sentido = "HORARIO"
44 Else
45     Sentido = "ANTIHORARIO"
46 End If
47
48 'Crear contenido en columnas
49 Set File = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
50 Set Row = File.OpenTextFile(Folderway & "\" & FileName,8)
51
52 Row.WriteLine( SmartTags("GALON") & ";" & SmartTags("CAUDAL") & ";" & Sentido & ";"
53 & SmartTags("MINUTOS") & ";" & SmartTags("SEGUNDOS"))
54 Row.Close
55
56 End Sub

```

Nota: La figura 85 detalla el código desarrollado para el registro de los datos.

Montaje físico

En el montaje físico hubo que considerar presupuestos y elementos que no se habían previsto en un inicio ya que muchos elementos de la unidad móvil del Waterdraw se encontraban deteriorados u oxidados. Los elementos que se debieron añadir se detallan en la tabla 18.

Tabla 18

Presupuestos empleados en el montaje físico

Num	Descripción	Cantidad	PV Unit	PV Total
1	PLC SIEMENS S7 1212 AC DC RLY	1	\$320.00	\$320.00
2	Variador de Frecuencia WEG CFW300 3HP	1	\$384.00	\$384.00
3	Armario de Control 50x75x25	1	\$36.00	\$36.00
4	Selector 2 estados	2	\$3.40	\$6.80
5	Sirena	1	\$7.00	\$7.00
6	Pulsador	2	\$2.80	\$5.60
7	PC dedicado	1	\$460.00	\$460.00
8	Cable Ethernet	1	\$2.30	\$2.30
9	Electroválvula 24V	1	\$64.00	\$64.00
10	Cables	-	\$5.00	\$5.00
11	Mantenimiento estructura móvil	1	\$680	\$680
			Total	\$1970.70

Nota: En la tabla 18 se detallan los elementos empleados y sus presupuestos.

Se puede observar que el presupuesto empleado es menor al máximo impuesto por la empresa, ya que se utilizaron varios elementos que ya se encontraban implementados por lo que no se generaron problemas de gastos. Los viáticos y

dividendos entregados para el personal que realizó la implementación física corren por la empresa, y no entran en estos rubros.

Diagrama de Potencia

El diagrama de potencia bajo la norma ACE_IEC se encuentra adjuntada en el anexo 2.

Diagrama de Control

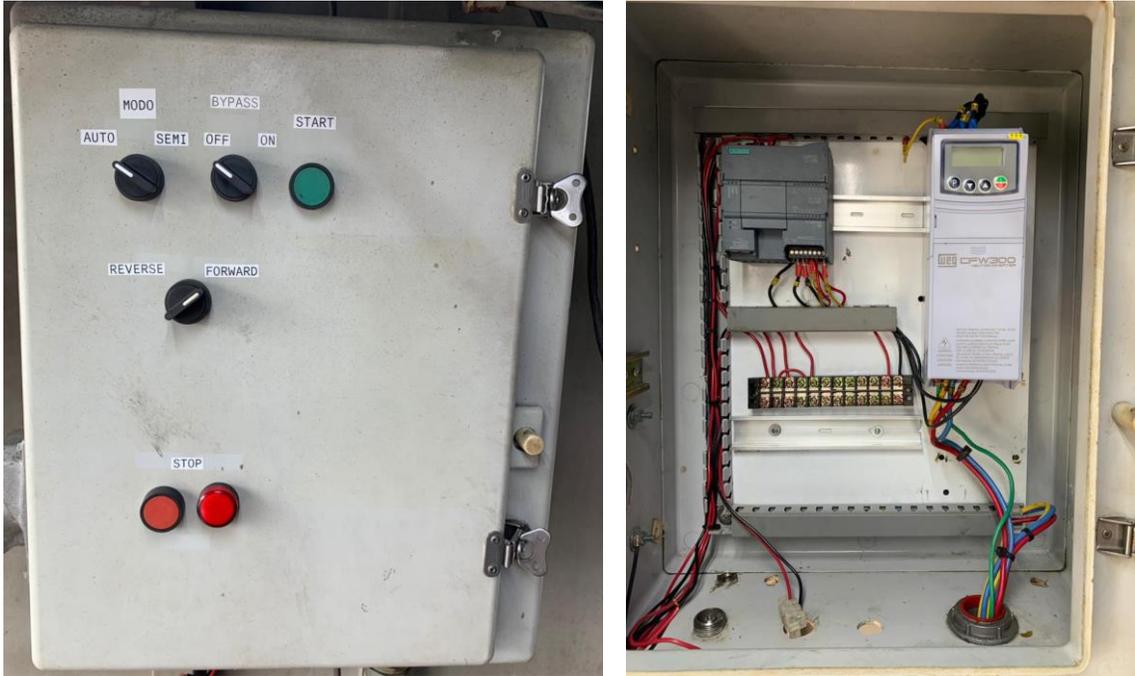
El diagrama de control bajo la norma ACE_IEC se encuentra adjuntada en el anexo 3.

Evidencias**Figura 86**

Implementación del Variador de frecuencia y el PLC



Nota: En la figura 86 se observa el antiguo tablero de control siendo reemplazado por uno nuevo.

Figura 87*Armario de Control*

Nota: En la figura 87 se puede observar el armario de control y sus controles (Modo, Bypass, Start, Sentido y Stop). Dentro del armario se encuentra el PLC y el variador de frecuencia en los rines de anclaje o rieles de sujeción, y todos los cables colocados ordenada y correctamente.

Figura 88*Sistema Waterdraw*

Nota: En la figura 88 se puede observar la estación móvil del sistema Waterdraw. En el fondo se observa el armario de control y la HMI. Las tuberías se encuentran en la parte superior y tienen derivaciones hacia las medidas volumétricas a través de las electroválvulas de llenado.

Figura 89*Conexiones del sistema Waterdraw*

Nota: En la figura 89 se puede apreciar la bomba encargada de suministrar de agua a todo el sistema Waterdraw. Se observa que se ha realizado el acople de las mangueras, al sistema utilizando acoples rápidos.

Puesta en marcha

La puesta en marcha del sistema automatizado Waterdraw Volumétrico comprende el instructivo de usuario (detallado en el anexo 4), y la comprobación de su funcionamiento que se detalla en el apartado 6.1.1.

Por políticas de confidencialidad de la empresa METROLOGIC S.A. no se puede detallar a precisión el modo de operación del sistema Waterdraw, esto incluye los elementos y los pasos específicos del proceso detallados en el documento PTT_MLOGIC_DME_020.

Capítulo VI

Pruebas y Resultados

Pruebas

Protocolo de pruebas

El objetivo de realizar un protocolo de pruebas es realizar la validación del procedimiento de calibración de probadores bidireccionales por el método Waterdraw que se detalla en el documento PTT_MLOGIC_DME_020 para determinar si dicho método es apto para realizar los servicios de calibración.

Los parámetros del protocolo de pruebas son:

- Repetibilidad del método
- Reproducibilidad del método
- Incertidumbre de la medida

Los objetivos de validación se han determinado en base al alcance del procedimiento y se lo detalla en la tabla 19.

Tabla 19

Objetivos del protocolo de pruebas

Parámetro		Objetivo establecido
Repetibilidad y reproducibilidad	Si %R&R \leq 15%	Método aceptado
	Si %R&R \leq 30%	Método aceptado, pero necesita mejoras
	Si %R&R \geq 30%	Método no aceptado
Selector 2 estados	U \leq exactitud prover	Método aceptado
	U \geq exactitud prover	Método no aceptado

Nota: La tabla 19 detalla cuales son los parámetros del protocolo que deben ser aprobados.

Para este ensayo se utilizó un probador bidireccional de 380.4415 litros a una temperatura de 15 °C. Todos los instrumentos de medición se encontraban calibrados. Se realizaron 6 corridas por cada técnico tomando en cuenta la recomendación de la norma API 4.9.2 de que cada par de corridas (sentido horario y antihorario) debe existir una diferencia del 25% del caudal entre ellas.

La empresa METROLOGIC S.A. detalla el tratamiento estadístico en su procedimiento PG_MLOGIC_007, el cual no puede ser divulgado de ninguna manera por un acuerdo de confidencialidad. Por ende, solo se publican los resultados obtenidos en las figuras 90 y 91:

Figura 90

Tratamiento estadístico de los datos

Sentido Horario Promedio: 190.075 litros			Sentido Antihorario Promedio: 190.216 litros			Volumen total 380,291 litros		
% Repetibilidad	% Reproducibilidad	%R&R	% Repetibilidad	% Reproducibilidad	%R&R	% Repetibilidad	% Reproducibilidad	%R&R
9.1	3	9.5	12.3	7.5	13.8	8.6	1.7	8.8

Nota: El porcentaje de repetibilidad y reproducibilidad (%R&R = 8.8%) para el volumen total está bajo los límites, por lo que el sistema es aceptado. Es necesario recordar que el objetivo de la calibración es determinar el volumen total (1 corrida en sentido horario y otra en antihorario).

Figura 91*Incertidumbre de la medida*

Volumen total (380,291 litros)		
Incertidumbre U (litros)	Exactitud prover (litros)	$U \leq \text{Exactitud}$
0.061	0.18	Aceptado

Nota: La incertidumbre obtenida en la calibración (0.061) es inferior a la exactitud del probador (0.18). Por tales características se aprueba al método aplicado.

Según el protocolo de pruebas, se aprueba el sistema Waterdraw diseñado e implementado en el presente escrito.

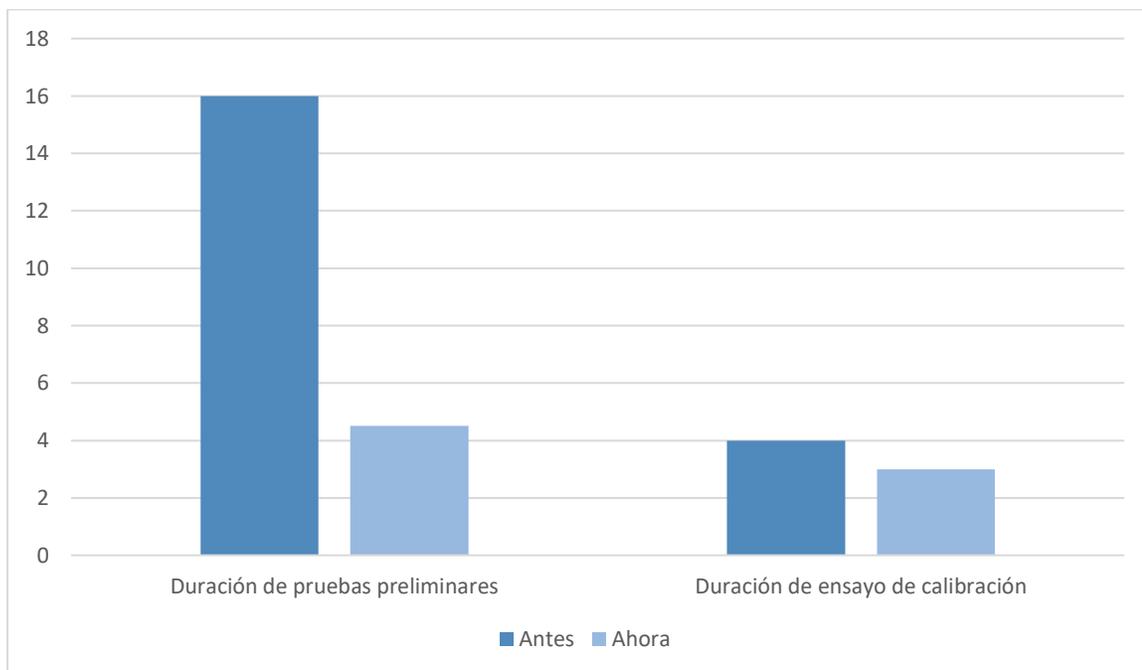
Análisis de resultados de las pruebas preliminares

Los resultados del nuevo sistema automatizado Waterdraw han sido analizados bajo 3 parámetros principalmente, se los ha comparado con el sistema anterior. Estos parámetros son los tiempos de las pruebas, los gastos, y la incertidumbre y error.

Tiempos

Figura 92

Análisis de resultados de tiempos

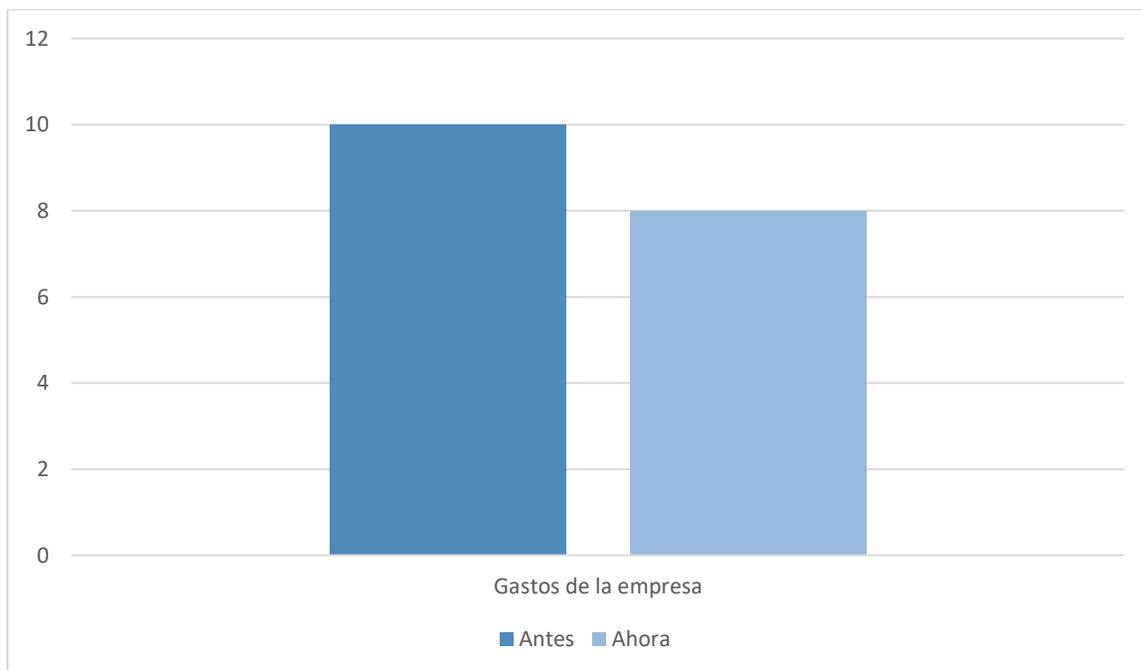


Nota: En la figura 92 se puede apreciar que los tiempos se redujeron hasta en una tercera parte. Antes se necesitaban de 20 horas laborables (3 días) para realizar las pruebas preliminares y los ensayos de calibración. Ahora, únicamente se necesita de 8 horas (1 día laborable) para dichas pruebas. Esto no es alentador únicamente para METROLOGIC S.A., sino también para sus clientes que podrán reducir el tiempo de fuera de servicio del probador. De esta forma, METROLOGIC S.A. marca la diferencia con su competencia.

Presupuesto

Figura 93

Análisis de resultados del presupuesto

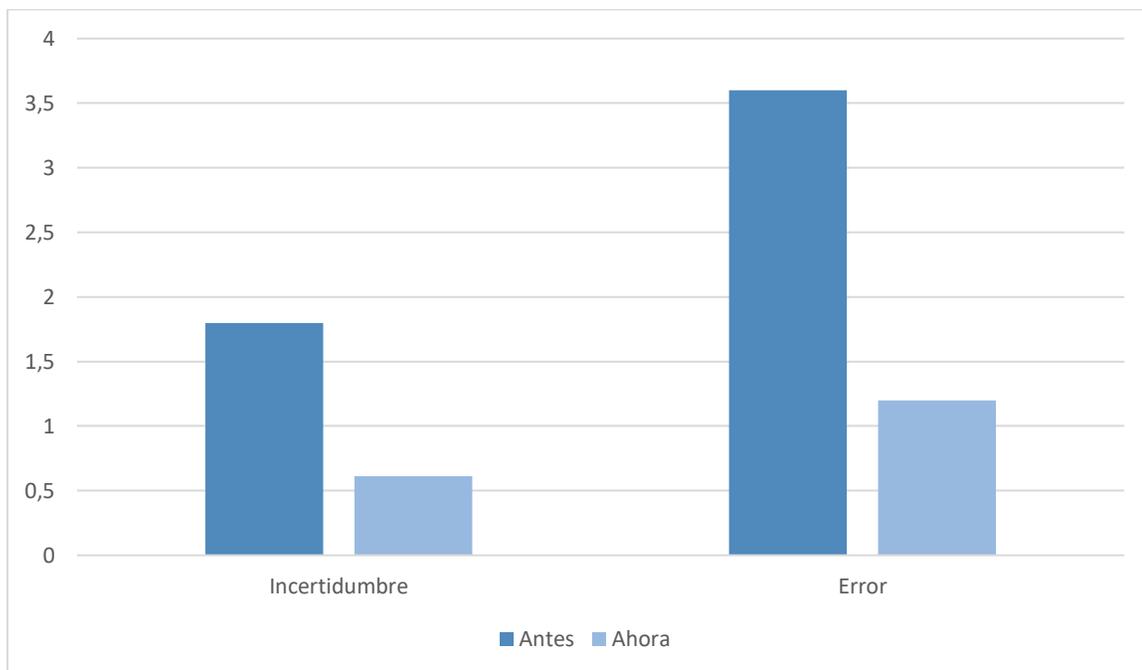


Nota: La figura 93 muestra de forma gráfica la reducción de costos que el sistema automatizado Waterdraw Volumetric ha brindado a METROLOGIC S.A. Al reducir los tiempos de entrega, los gastos se reducen en más del 20% y se puede ofrecer un descuento al cliente. Si los tiempos de calibración y los costos se reducen, y si se añade el control, monitoreo y sinóptico del proceso de calibración, entonces el sistema de calibración ofertado por la empresa METROLOGIC S.A. resulta más atractivo por lo que tendrá mayores beneficios en las licitaciones.

Exactitud y error

Figura 94

Análisis de resultados de exactitud y error



Nota: Se puede distinguir en la figura 94 que la incertidumbre y error han disminuido. Esto se debe a que se suprime la incertidumbre del cronómetro y de la válvula manual de control de caudal, y el error humano al momento del control y de la toma de tiempos. En vez de estos, se añade la incertidumbre y el error del PLC implementado que, por lejos resulta ser más exacto y preciso.

Trabajos futuros

A futuro, se puede realizar la implementación de un transmisor de flujo para garantizar el flujo, se puede adquirir su información y se puede observar su comportamiento en la HMI.

Así también, se puede montar un panel de control con la HMI en el tablero situado localmente de la estación móvil para garantizar la conexión con el PLC todo el tiempo.

Se puede realizar las adecuaciones para incluir el sistema Waterdraw gravimétrico para volúmenes pequeños de medidores de flujo másicos, desplazamiento positivo y probadores; analizando si la demanda del mercado justifica la inversión.

Capítulo VII

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Se demuestra que la aplicación de la norma API MPMS 4.9.2 dicta las directrices para el diseño de la automatización del sistema de calibración Waterdraw.

La aplicación de la metodología QFD o despliegue de la calidad, permite analizar y encontrar una solución óptima para la implementación del sistema Waterdraw basándose en las recomendaciones del usuario, en las solicitudes del cliente y en las especificaciones de la empresa.

El protocolo de pruebas garantiza que la calibración sea fidedigna, validando que los parámetros de reproducibilidad, repetibilidad e incertidumbre cumplan con los objetivos planteados.

El sistema de calibración Waterdraw volumétrico debe ser usado únicamente para probadores con un volumen superior a los 60 litros ya que en este método la incertidumbre de medición es inversamente proporcional al volumen del probador.

El sistema de calibración Waterdraw gravimétrico debe implementarse con probadores compactos o de volúmenes inferiores a 60 litros, ya que posee una gran precisión y exactitud, pero su inversión incrementa a medida que el volumen de los provers aumenta.

En base al diseño de automatización y a su implementación, se reduce hasta 2 días el tiempo total de la calibración, lo que genera que los gastos de la empresa disminuyan en un 20% aproximadamente.

La implementación del sistema automatizado Waterdraw volumétrico disminuye el error y la incertidumbre en un 50%.

El error y la incertidumbre de una medición en el proceso de calibración de probadores, siempre están presentes y no se los puede eliminar, pero si reducir.

La automatización de este sistema genera grandes ventajas competitivas a la empresa METROLOGIC S.A., otorgando beneficios a sus clientes tales como: menor tiempo fuera de servicio de los probadores, mayor exactitud y visualización del proceso de calibración en tiempo real.

Recomendaciones

Se recomienda realizar un análisis de requerimientos profundo en base al despliegue de la calidad donde se analice la voz del usuario (petroleras), sus recomendaciones y restricciones, y las especificaciones y limitaciones de la empresa METROLOGIC S.A.

Se debe realizar el análisis QFD del sistema Waterdraw volumétrico antes de comenzar el diseño para poder garantizar la viabilidad y factibilidad del proyecto a automatizarse.

Para garantizar el correcto funcionamiento del sistema automatizado Waterdraw se debe realizar la verificación y validación del método, evaluando los parámetros de repetibilidad, reproducibilidad, incertidumbre y veracidad.

Se recomienda analizar los resultados de la implementación del sistema Waterdraw utilizando los indicadores de tiempo, presupuesto y error.

Se recomienda calcular el presupuesto del proyecto tomando en cuenta cada uno de los equipos y materiales a utilizarse, así como los servicios que deben estar detallados en el despliegue de la calidad.

Para prevenir la oxidación y evitar el mantenimiento correctivo los elementos o de la estación móvil en sí, se recomienda evitar que la lluvia ingrese cerrando y envolviendo a toda la estación en una carpa. Así mismo, se debe realizar mantenimiento preventivo y predictivo para garantizar que el agua no se filtre a ninguna zona.

Referencias bibliográficas

- ACS. (2016). *The New High Performance HMI*. Retrieved from <https://www.pnws-awwa.org/uploads/PDFs/conferences/2016/Technical%20Sessions/Friday/High%20Performance%20HMI.pdf>
- ANSI/ISA-101. (2015). *Human Machine Interfaces for Process Automation Systems*. North Carolina: American National Standard.
- API MPMS 4.9.2. (2015). *Proving Systems - Methods of Calibration for Displacement and Volumetric Tank Provers - Determination of the Volume Displacement and Tank Provers by the Waterdraw Method of Calibration*. API MPMS.
- API MPMS 4.9.4. (2016). *Proving Systems - Methods of Calibration for Displacement and Volumetric Tank Provers - Determination of the Volume Displacement and Tank Provers by the Gravimetric Method of Calibration*. API. Retrieved from API.
- Arias R, R. (2001, Abril). *INCERTIDUMBRE EN LA CALIBRACIÓN DE UN PROBADOR VOLUMÉTRICO BIDIRECCIONAL*. Retrieved from CENAM: <https://www.cenam.mx/fyv/publicaciones/probvol1.pdf>
- Arias R, R. (2003). *CALIBRACIÓN DINÁMICA DE UN PROBADOR BI-DIRECCIONAL*. Retrieved from CENAM: <https://www.cenam.mx/fyv/publicaciones/calibraci%C3%B3n%20de%20probadores.pdf>
- AUTOMATISMO Profe. Paul. (2011, Agosto 8). *PLC Modular*. Retrieved from <http://profesorpaul.blogspot.com/2011/08/plc-modular.html>

- Ayala, M. (2020). *Esquemático del Sistema de Calibración Water Draw*. METROLOGIC, Quito, Ecuador.
- Ayala, M. (2021). *Diagramas Varios*. METROLOGIC, Quito.
- Bartels, N. (2011, Agosto 15). *The Ultimate HMI*. Retrieved from <https://www.controlglobal.com/articles/2011/the-ultimate-hmi/>
- BEAMEX. (2021). *¿Qué es la calibración?* Retrieved from <https://www.beamex.com/es/recursos/que-es-la-calibracion/>
- Bernal, J. J. (2012, Octubre 18). *Despliegue de la función calidad (QFD): Guía de uso. Para qué sirve el QFD y cómo realizarlo*. Retrieved from PDCAhome: <https://www.pdcahome.com/1932/qfd-despliegue-calidad/>
- CALTEX. (2020). *¿Qué es la Calibración de un Instrumento?* Retrieved from <https://www.caltex.es/que-es-la-calibracion-de-un-instrumento/>
- Carvajal, E. (2014). *Unidades Fundamentales y Derivadas*. Retrieved from <https://edwicarval.wixsite.com/fisicaondasyelectro/unidades-derivadas>
- CEM. (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*. Retrieved from <https://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>
- Cepeda, C. A. (2005). *Automatización y control de un sistema de calibración y medición de flujo de petróleo en la estación central del campo Shushufindi*. Quito: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Cero Grados. (2020, Abril 1). *Sensor de flujo electromagnético*. Retrieved from Revista Cero Grados: <https://0grados.com.mx/sensor-de-flujo-electromagnetico/>

- Chapter 15 Human Machine Interface*. (2016). Retrieved from <https://docplayer.net/43652970-Chapter-15-human-machine-interface.html>
- Cohrs, G. (2018, Febrero). *The Uncertainty of a Waterdraw Calibration*. Retrieved from Flow Management Devices: <https://pronto-core-cdn.prantomarketing.com/2/wp-content/uploads/sites/1716/2018/04/Water-Draw-Uncertainty-WP-02-18-1.0.pdf>
- Contaval. (2016, Enero 21). *Programación tipo ladder*. Retrieved from Contaval: <https://www.contaval.es/programacion-tipo-ladder/>
- Creus, A. (2009). Generalidades, Características de los Instrumentos de Medición. In *Instrumentos Industriales, su ajuste y calibración* (pp. 3-6). Barcelona: Marcombo.
- DIRECT INDUSTRY. (2020). *POSITIVE DISPLACEMENT FLOW METER*. Retrieved from <https://www.directindustry.com/prod/golden-mountain-enterprise/product-33181-1436309.html>
- ECOPETROL. (2013, 07 19). *MANUAL DE MEDICIÓN DE HIDROCARBUROS Y BIOCOMBUSTIBLES CAPÍTULO 4 - SISTEMAS PROBADORES*. Retrieved from <https://es.scribd.com/doc/70557861/Manual-de-Medicion-de-Hidrocarburos>
- El Comercio. (2020, Abril 10). *Ecuador bajó la producción petrolera por rotura de oleoductos*. Retrieved from El Comercio: <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador-produccion-petrolera-reduccion-oleoductos.html>
- El Oriente. (2019, Mayo 20). *La Industria Petrolera de Ecuador*. Retrieved from El Oriente: <https://www.eloriente.com/articulo/la-industria-petrolera-de->

ecuador/11779?gclid=EAlaIQobChMI0YGAs-
b86wIVA4bICh30UQSjEAAYASAAEgLtrPD_BwE

EMERSON. (2017). *Mobile Prover Calibration Service*. Retrieved from EMERSON Electric Co.: <https://www.emerson.com/en-us/catalog/daniel-daniel-lifecycle-services-mobile-prover>

EMERSON. (2020). *Caudalímetros Coriolis ELITE de Micro Motion*. Retrieved from <https://www.emerson.com/es-es/automation/measurement-instrumentation/micro-motion/elite-coriolis-flow-meters>

EMERSON Electric Co. (2020). *Bi-Directional Pipe provers*. Retrieved from EMERSON Electric Co.: <https://www.emerson.com/es-es/catalog/emerson-bi-directional-pipe-provers-es-es>

EMIS. (2020, Enero 13). *In, on and for Engineering Markets*. Retrieved from EMIS: https://www.emis.com/php/company-profile/EC/Metrologic_SA_es_3968190.html

Encyclopaedia Britannica. (2020). *Measurement*. Retrieved from <https://www.britannica.com/technology/measurement>

Fallas, D. S. (2000). Prueba de Turbinas usando Probador Bidireccional. *Instituto Tecnológico de Costa Rica*. Retrieved from Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Formación PLC Madrid. (2013). *Programación de Autómatas-Introducción al Grafset*. Retrieved from Autómatas Programables: <https://www.yumpu.com/es/document/read/14073196/introduccion-al-grafset-plc-madrid-formacion>

- GENIA. (2016). *Resumen sobre Grafcet*. Retrieved from
http://isa.uniovi.es/docencia/iea/teoria/grafcet_resumen.pdf
- Hawrylo, M. E. (2016). *Applying ISA101 Concepts to Existing HMI Applications*. Retrieved from http://wilmingtonisa.org/files/Download/ISA-Applying-ISA101-to-Existing-HMIs_MikeHawrylo.pdf
- Hernandez, I. (2018). *Calibración*. Retrieved from Curso Instrumentación y Control:
<http://cursoinstrumentacionycontrol.blogspot.com/2016/11/calibracion.html#:~:text=De%20acuerdo%20al%20diccionario%20de,lecturas%20de%20salida%20son%20registradas.>
- INDIAMART. (2011). *Prover Tank Calibration Services*. Retrieved from
<https://www.indiamart.com/proddetail/prover-tank-calibration-services-6498772891.html>
- ISA. (2005). *The Automation, Systems, and Instrumentation Dictionary, 4th Edition*. ISA.
- ISO/IEC 98-3. (2008). *Guide to the expression of uncertainty in measurements*. Retrieved from
http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103%3A391%3A0%3A%3A%3A%3AP391_PUB_ID%2CP391_LANG%3A11961
- Jack, H. (2007). Automating Manufacturing Systems with PLCs. In *Programmable Logic Controllers* (p. 20).
- JDoTec. (2006). *Définition du Grafcet*. Retrieved from JDoTec:
<http://www.jdotec.net/s3i/Automatique/Sequentiel/Grafcet1.php>

- Kareem, N. (2018, Enero 19). *Guidelines For Water Draw Calibration*. Retrieved from LinkedIn: <http://linkedin.com/pulse/guideline-water-draw-calibration-naji-kareem#:~:text=Water%20Draw%20Calibration%3A%20is%20a,into%20field%20standard%20test%20measures.&text=1-%20The%20required%20repeatability%20for,within%20the%20range%20of%200.02%20%25>
- Lana Sarrate. (2020, Septiembre 11). *Medición de caudal en centrales hidroeléctricas: estudio de rendimiento*. Retrieved from <https://www.lanasarrate.es/blog/medicion-de-caudal-en-centrales-hidroelectricas-estudio-del-rendimiento/>
- López, J. R. (2011, Septiembre). *Calibración de instrumentos de medición de flujo para conductos cerrados*. Retrieved from USAC: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3300_C.pdf
- Moya, S. (2018, Mayo 01). *Conceptos Básicos: Características de los Instrumentos de Medición*. Retrieved from ISA México: <https://www.isamex.org/intechmx/index.php/2018/05/01/conceptos-basicos-caracteristicas-de-los-instrumentos-de-medicion/>
- Moya, S. (2019, Febrero 12). *Características del Estándar aNSI/ISA-101.01-2015: Interfaces Humano-Máquina para Sistemas de Automatización de Procesos*. Retrieved from México Intech Automatización: <https://www.isamex.org/intechmx/index.php/2019/02/12/caracteristicas-del-estandar-ansi-isa-101-01-2015-interfaces-humano-maquina-para-sistemas-de-automatizacion-de-procesos/>

- NEMA. (2005). *Programmable Controllers (PLC)*. NEMA.
- NIKRON. (2020). *CAUDALÍMETROS DE ÁREA VARIABLE*. Retrieved from <https://nikron.com.ar/automacion/productos/caudalimetro-area-variable/>
- OMEGA. (2015). *Introducción a los medidores de flujo*. Retrieved from OMEGA Engineering Inc: <https://mx.omega.com/prodinfo/medidores-de-flujo.html>
- PLC ACADEMY. (2017, Septiembre 4). *PLC Ladder Logic Programming Tutorial* . Retrieved from PLC ACADEMY: <https://www.plcacademy.com/ladder-logic-tutorial/>
- READYFLO. (2015). *Bi-Directional Flow Provers*. Retrieved from READYFLO SYSTEMS LLC: https://www.readyflo.com/assets/files/Bi-Directional-Provers_ISHM2015-Presentation.pdf
- Romero, R. A. (2001). *Incertidumbre en la calibración de un probador volumétrico bidireccional*. México D.F.: El Marqués.
- SIEMENS. (2020). *SIMATIC CONTROLLERS*. Retrieved from <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc.html>
- SIEMENS. (2021, 01 17). *1212 AC/DC/RLAY DATASHEET*. Retrieved from https://media.automation24.com/datasheet/nl/6ES72121BE400XB0_en.pdf
- SMC. (2012, Abril 21). *PLC Básico*. Retrieved from <https://es.slideshare.net/aucega/plc-basico-1>
- Sons, W. J. (2006). Safe Design and Operation of Process Vents and Emission control systems. In *Appendix I* (p. 297). New Jersey.

- SUHISSA. (2017, Septiembre 4). *FLUJÓMETRO: TIPOS DE MEDIDORES DE FLUJO Y APLICACIONES*. Retrieved from <https://suhissa.com.mx/flujo-metro-tipos-de-medidores-de-flujo-y-aplicaciones-parte-1/>
- SYNCRONESS. (2017). *AUTO PIG LAUNCHER*. Retrieved from <https://www.syncroness.com/case-studies/automated-tool-launching-device/>
- The Engineering ToolBox. (2003). *Types of Fluid Flow Meters*. Retrieved from https://www.engineeringtoolbox.com/flow-meters-d_493.html#:~:text=An%20introduction%20to%20different%20types,Doppler%2C%20Ultrasonic%2C%20Thermal%2C%20Coriolis&text=Flow%20is%20classified%20into%20open%20channel%20flow%20and%20closed%20conduit%20flow.
- Torres, S. (2003). *SENSORES DE FLUJO, PRINCIPIOS DE MEDICIÓN*. Retrieved from *EL ABC DE LA AUTOMATIZACIÓN*: <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/sensores-de-flujo.pdf>
- UNED. (2014). *Controladores Lógicos Programables*. Retrieved from Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control: http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_ISE6_1_1.pdf
- Universidad de Oviedo. (2002). *Modos de marcha y parada-La Guía Gemma*. Retrieved from Gemma Telemecanique: <http://isa.uniovi.es/~vsuarez/Download/GemmaTelemecanique.PDF>
- Universidad de Sevilla. (2001). *Guía Gemma*. Retrieved from <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4553/fichero/08+-+Gu%C3%ADa+GEMMA.pdf>

- Universidad Politécnica de Cataluña. (2000). *Guía Gemma*. Retrieved from <https://recursos.citcea.upc.edu/grafcet/gemma/descrip.html>
- UTP Colombia. (2000). *Magnitudes Físicas y Unidades de Medición*. Retrieved from <http://univirtual.utp.edu.co/pandora/recursos/2000/2359/2359.pdf>
- Validación y Certificación INEN. (2016, Julio 01). *METROLOGÍA INEN*. Retrieved from <http://inenmetrologia.blogspot.com/2016/07/trazabilidad-metrologica-tipos-de.html>
- Villajulca, J. C. (2010, Septiembre 27). *Contadores de caudal por turbina: exactitud, exactitud y exactitud*. Retrieved from https://instrumentacionycontrol.net/wp-content/uploads/2010/09/Contadores_caudal_turbina_exactitud_exactitud_exactitud.jpg
- VIM. (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología*. Retrieved from <https://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>
- WEG. (2019, 06). *Convertidor de Frecuencia CFW300*. Retrieved from <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h54/hce/WEG-convertidor-de-frecuencia-CFW300-50066668-catalogo-es.pdf>
- Wikiwand. (2020). *Calibración*. Retrieved from <https://www.wikiwand.com/es/Calibraci%C3%B3n>

Anexos