

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y
MONITOREO CON IMPLEMENTACIÓN DE MÓDULOS DE
DETECCIÓN DE FALLAS PARA UNA PLANTA PILOTO
DESALINIZADORA DE AGUA DE MAR**

Tesis para optar el grado de
Magister en Ingeniería de Control y Automatización

Autor: Julio Martín Romero Morante

Asesor: Carlos Gustavo Pérez Zuñiga, Mg.

Miembros del Jurado:

Dr. Javier Sotomayor Moriano

Mg. Pedro Crisóstomo Romero

Mg. Carlos Pérez Zuñiga

Lima, Perú

2016





A mis amados padres, quienes con sus consejos, apoyo y gran amor, guían mi camino, y forman el gran soporte para superarme día a día.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia, por darme fuerzas en los momentos más complicados de la maestría, y por ser mi inspiración para cumplir mis metas y objetivos.

Al Concejo Nacional de Ciencia Y Tecnología (CONCYTEC), por haberme dado la oportunidad de estudiar esta maestría en calidad de becado.

A los profesores de la maestría, por los conocimientos compartidos en las aulas, y la paciencia para explicar cada tema en forma detallada y didáctica.

Deseo expresar un especial agradecimiento a mi asesor de tesis Carlos Gustavo Pérez Zuñiga por mostrar interés en mi tema de investigación, y por sus consejos, los cuales me sirvieron de guía para encaminar este trabajo.



Resumen

El objetivo principal de esta tesis fue utilizar una arquitectura de control distribuido para desarrollar la programación de módulos de detección y diagnóstico de fallas para una planta piloto desalinizadora de agua de mar.

Se estudió la dinámica de la planta tomando como base un modelo (en función de transferencia) desarrollado en otro trabajo de investigación. Este modelo sirvió para analizar el comportamiento de la planta al generarse variaciones en las variables de entrada (presión y PH).

Para asegurar que alguna falla se debe al proceso y no a un dispositivo de campo, se desarrollaron módulos de detección y diagnóstico de fallas para cada dispositivo. Cada módulo toma como base la dinámica del dispositivo asociado y los valores de los parámetros obtenidos mediante comunicación por protocolo HART.

Los módulos de detección y diagnóstico de fallas se implementan en la arquitectura de control distribuido DeltaV, el cual también permite desarrollar el sistema de supervisión de la planta, desde donde se supervisa el proceso y se accede a los módulos de detección y diagnóstico de fallas, en forma gráfica.

Para justificar el uso de una arquitectura de control distribuido, se integró el sistema de detección y diagnóstico de fallas de la planta piloto desalinizadora de agua de mar y el de la planta piloto de temperatura.

También se desarrolló un sistema de supervisión para un panel de operador, el cual se comunica con un PLC CompactLogix, de Allen Bradley. Ambos equipos instalados en el tablero de control de la planta piloto desalinizadora de agua de mar.

Para validar el desarrollo de la tesis se realizaron pruebas de campo con una planta piloto de temperatura, la cual posee dispositivos con comunicación por protocolo HART. En dicha planta se forzaron fallas en los instrumentos de campo, las cuales fueron detectadas de manera inmediata por el sistema de control distribuido empleado, y mostradas en forma detallada en la pantalla de supervisión.

Índice general

INTRODUCCIÓN

1. ESTADO DEL ARTE.....	3
1.1. Introducción.....	3
1.2. Estado del arte de las plantas desalinizadoras	3
1.2.1. Tecnologías de desalinización.....	3
1.2.2. Destilación térmica	3
1.2.3. Ósmosis inversa (RO)	5
1.2.4. Electrodialisis (ED)	6
1.2.5. Intercambio de iones (IX)	6
1.3. Automatización para plantas industriales	6
1.3.1. Introducción.....	6
1.3.2. Controlador lógico programable (PLC)	7
1.3.3. Sistemas de control distribuido (DCS).....	8
1.3.4. Protocolos de comunicación industrial	10
1.3.5. Sistemas de supervisión por computadora y SCADA.....	12
1.4. Sistemas de detección y diagnóstico de fallas	15
1.4.1. Introducción.....	15
1.4.2. Detección y diagnóstico de fallas basado en conocimientos.....	16
1.4.3. Detección y diagnóstico de fallas basado en casos	17
1.4.4. Detección y diagnóstico de fallas basado en modelos	18
1.4.5. Detección y diagnóstico de fallas basado en aprendizaje automático.....	19
1.5. Planteamiento del problema.....	20
2. ESTUDIO DE LOS DISPOSITIVOS DE CAMPO EN LA PLANTA PILOTO DESALINIZADORA DE AGUA DE MAR	22
2.1. Introducción.....	22
2.2. Estudio de la planta desalinizadora	22
2.3. Modelo de los dispositivos de campo	25
2.3.1. Dispositivos de campo.....	25
2.3.2. Transmisores.....	26
2.3.3. Actuadores	38
3. DESARROLLO DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN CON DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS	43

3.1. Introducción.....	43
3.2. Implementación del sistema de supervisión con detección y diagnóstico de fallos en el DeltaV.....	44
3.2.1. Características del Hardware de DeltaV.....	44
3.2.2. Configuración del DeltaV Explorer.....	48
3.2.3. Desarrollo de los algoritmos de detección y diagnóstico de fallas en el DeltaV Control Studio.....	54
3.2.3.1. DeltaV Control Studio.....	54
3.2.3.2. Desarrollo de los algoritmos de detección y diagnóstico de fallas.....	54
3.2.4. Desarrollo del sistema de supervisión en el DeltaV Operate.....	62
3.2.4.1. DeltaV Operate.....	62
3.2.4.2. Desarrollo del sistema de supervisión.....	62
3.3. Configuración y lectura de parámetros de los instrumentos de campo con el AMS Device Manager.....	67
3.3.1. AMS Device Manager.....	67
3.3.2. Configuración del AMS Device Manager.....	67
3.3.3. Configuración y lectura de parámetros de los instrumentos de campo.....	68
3.4. Desarrollo del sistema de supervisión para el Panel View 1500.....	69
3.4.1. Introducción.....	69
3.4.2. RSLinx.....	69
3.4.3. CompactLogix.....	70
3.4.4. Panel View 1500.....	71
3.4.5. Desarrollo del sistema de supervisión.....	72
4. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN CON DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS.....	77
4.1. Introducción.....	77
4.2. Fallas en la válvula de control proporcional neumática.....	77
4.3. Detección de fallas en el AMS.....	81
4.4. Análisis de resultados.....	82
CONCLUSIONES.....	84
BIBLIOGRAFÍA.....	85



INTRODUCCIÓN

En la actualidad, muchas regiones del planeta presentan un severo problema de escasez de agua, el cual se va incrementando debido a factores como el crecimiento poblacional, desarrollo industrial y a cambios climáticos (García-Rodríguez y Gómez-Camacho, 2001). Aproximadamente el 97.5% del agua en el planeta se encuentra localizada en los océanos, lo que representa una extensa reserva de agua, la cual puede ser aprovechada mediante diversos métodos de obtención de agua desalinizada (Cipollina A et al, 2009).

Entre los años 1960 y 1980, se comenzaron a introducir las técnicas de desalinización de agua por destilación flash multietapa (MSF), destilación multiefecto (MED) y destilación por compresión de vapor (CV). Estas técnicas se centran en evaporar el agua de mar para separar el agua dulce de la sal, lo que ocasiona un alto consumo de energía y, por lo tanto, un alto consumo de producción de agua. Es así que entre los años 1980 y 1999, se introdujo el desarrollo de la técnica de desalinización de agua por ósmosis inversa (RO), con la cual se redujo el costo de producción de agua desalinizada (Alatiqui et al, 1999).

Gracias a los avances tecnológicos del último siglo, los sistemas de control de las plantas desalinizadoras se hicieron cada vez más eficientes. Primero, se utilizaron los controladores lógicos programables (PLC), así como los controladores digitales de lazo (CDL). En la actualidad, debido al incremento de dispositivos de campo y lazos de control, la tendencia es migrar los sistemas hacia arquitecturas de control distribuido (DCS), es así que éstas representan una alternativa más eficiente para el desarrollo de sistemas de control.

Por otro lado, este crecimiento (en los sistemas de automatización para las plantas desalinizadoras), trajo grandes beneficios, por las posibilidades de control y supervisión (Siemens Energy & Automation, Inc. 2007); sin embargo, estos avances acarrearán nuevas problemáticas relacionadas a la gran cantidad de equipos e instrumentos que tienen que ser monitorizados desde un sistema principal, sobre todo cuando ocurre uno o varios fallos inesperados.

Las plantas desalinizadoras actuales cuentan con sistemas de supervisión que integran alarmas capaces de detectar algunas fallas y sus posibles causas, pero la mayoría solo se basa en señales obtenidas de sensores analógicos, por lo que su capacidad es limitada.

Para mejorar los sistemas de alarmas básicos y contrarrestar las problemáticas relacionadas a fallas de hardware es necesario integrar áreas de conocimiento como los protocolos de comunicación industrial y los sistemas de detección y diagnóstico de fallas basados en modelos capaces de identificar y diagnosticar diferentes tipos de anomalías en sensores, actuadores y en el proceso mismo (Isermann R, 2011).

En la presente tesis se propone desarrollar la programación de módulos de detección y diagnóstico de fallas que integre los datos obtenidos por modelos y por protocolo de comunicación industrial HART (asociado a cada dispositivo de campo). También, se realiza el desarrollo del sistema de supervisión por computadora, el cual integra los módulos de detección y diagnóstico de fallas. Todo esto se implementa bajo una arquitectura de control distribuido, tal que estos conocimientos puedan ser aplicados de manera sencilla en cualquier planta industrial con características similares.

El documento está organizado como sigue:

El Capítulo 1 presenta el estado del arte asociado a las tecnologías de desalinización de agua de mar más utilizadas. También presenta el estado del arte de las tecnologías automatización industrial y su evolución en el tiempo. Finalmente, se presenta el estado del arte de los sistemas de detección y diagnóstico de fallas, haciendo referencia en detalle a las diferentes metodologías utilizadas en esta área de investigación.

El Capítulo 2 presenta las relaciones existentes entre las entradas y salidas de la planta piloto desalinizadora de agua de mar, mediante el estudio y simulación de un modelo matemático (desarrollado en MATLAB). También presenta en el estudio y modelamiento dinámico de todos los dispositivos de campo utilizados en la planta piloto desalinizadora de agua de mar y la planta piloto de temperatura.

El Capítulo 3 presenta la configuración de los dispositivos de campo para el envío y recepción de datos por protocolo HART. Luego, se presenta el desarrollo de los módulos de detección y diagnóstico de fallas para los dispositivos de campo. También se desarrolla el sistema de supervisión por computadora, que incluye pantallas de supervisión para la planta piloto desalinizadora de agua de mar y para la planta piloto de temperatura. Así mismo, se desarrollaron pantallas emergentes (faceplates), que integran el comportamiento de cada dispositivo y sus fallas asociadas. Todo esto implementado en la arquitectura de control distribuido **DeltaV**.

El Capítulo 4 presenta los resultados prácticos obtenidos al forzar fallas en la válvula de control proporcional de la planta piloto de temperatura, estos resultados se muestran como un caso general, ya que todos los otros módulos funcionan de manera similar.

1. ESTADO DEL ARTE

1.1. Introducción

Las tecnologías de automatización industrial han avanzado a pasos agigantados desde la invención del transistor en 1947 en los laboratorios Bell (Riordan, Hoddeson, Herring, 1999). Si bien los procesos productivos pueden controlarse y monitorearse a grandes distancias, estos aún no se han optimizado en cuanto al uso de sistemas de detección y diagnóstico de fallas, lo que genera paradas no programadas en una planta y, por lo tanto, grandes pérdidas monetarias.

Las teorías de detección y diagnóstico de fallas comenzaron a ser bastante estudiadas desde los inicios de los años 70. Actualmente, existen muchas corrientes y teorías sobre detección y diagnóstico de fallas. Sin embargo, estas teorías aún no son muy difundidas en ciertos procesos, como el de desalinización de agua de mar.

Este capítulo realiza una introducción teórica sobre las tecnologías de plantas desalinizadoras de agua de mar, las tecnologías de automatización industrial y las principales teorías de detección y diagnóstico de fallas.

1.2. Estado del arte de las plantas desalinizadoras

1.2.1. Tecnologías de desalinización

La desalinización de agua constituye una respuesta prometedora a la escasez de agua mundial. Actualmente, muchas regiones del planeta presentan un severo problema de escases de agua, el cual se va incrementando debido a diversos factores como son el crecimiento poblacional, desarrollo industrial y cambios climáticos (García-Rodríguez and Gómez-Camacho, 2001). Es conocido también que el 98% del agua del planeta se encuentra en los océanos, los cuales son una verdadera e inagotable reserva de agua la cual puede ser aprovechada mediante diversos procesos para obtener agua desalinizada y combatir dicha escasez (Ramillo et al., 2003).

Las tecnologías de desalinización de agua de mar se pueden distribuir en cuatro grupos (Voutchkov, 2013), que son:

- Desalinización térmica (destilación).
- Ósmosis inversa (RO).
- Electrodialisis (ED).
- Intercambio de iones (IX).

1.2.2. Destilación térmica

Las tecnologías de desalinización térmica se basan en calentar el agua salada para producir vapor, el cual es luego condensado para obtener agua de baja salinidad. Dado que la energía utilizada para la evaporación de agua salada no depende del grado de salinidad del agua, este método es muy apropiado para desalinización de agua con alto grado de salinidad.

Debido a las condiciones climáticas y geográficas, aproximadamente el 75% de plantas de desalinización térmica se encuentran ubicadas en la península Arábiga y la mitad de estas en Arabia Saudita.

Dentro de las tecnologías de desalinización térmica, se distinguen tres técnicas principales que son:

- Destilación flash multietapa (MSF).
- Destilación multiefecto (MED).
- Destilación por compresión de vapor (CV).

Destilación flash Multietapa (MSF)

En esta técnica se utilizan varios recipientes de evaporación (ver Figura 1.1). Al inicio el agua salada es calentada entre 90 y 115°C para crear vapor de agua, luego este ingresa al primer recipiente de evaporación, el cual tiene una presión ligeramente menor a la de la presión de saturación del vapor, con esto el vapor de agua reduce su presión ocasionando un fenómeno conocido como flasheo. Finalmente el vapor obtenido, en los recipientes de evaporación, pasa a través de un condensador para obtener el destilado (Voutchkov, 2013)

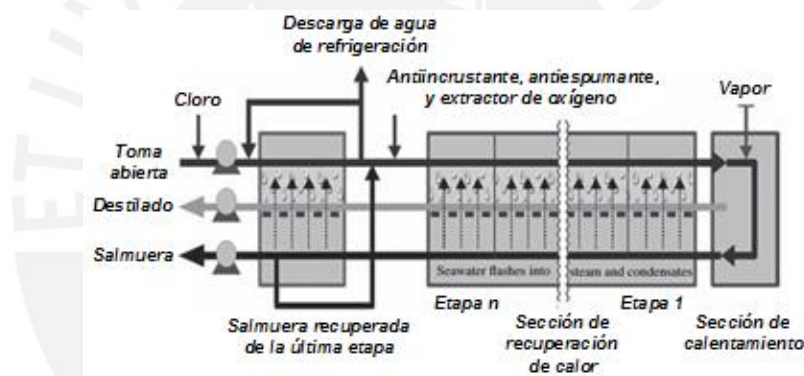


Figura 1.1. Destilación flash multietapa

Destilación multiefecto (MED)

En esta técnica el agua de alimentación no es pre-calentada (ver Figura 1.2). El agua es inyectada por medio de pulverizadores sobre un sistema de tuberías, el cual transporta el vapor de agua de alimentación en un ciclo cerrado (Voutchkov, 2013). Esta técnica opera a menores temperaturas que la MSF (62 a 75°C).

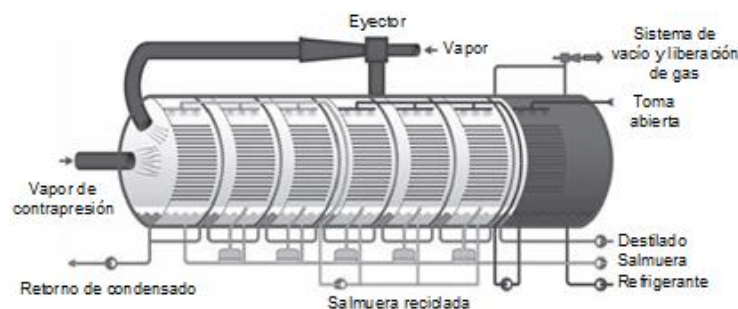


Figura 1.2. Destilación multiefecto

Destilación por compresión de vapor (CV)

En esta técnica la fuente de agua es evaporada, y el vapor es transportado a un compresor (ver Figura 1.3). Luego, el vapor es comprimido para incrementar su temperatura hasta un punto adecuado para evaporar el agua inyectada sobre un conjunto de tubos. De esta manera el vapor comprimido realiza un intercambio de temperatura con la nueva fuente de agua que ingresa al conjunto de tubos, para ser finalmente condensada (Voutchkov, 2013).

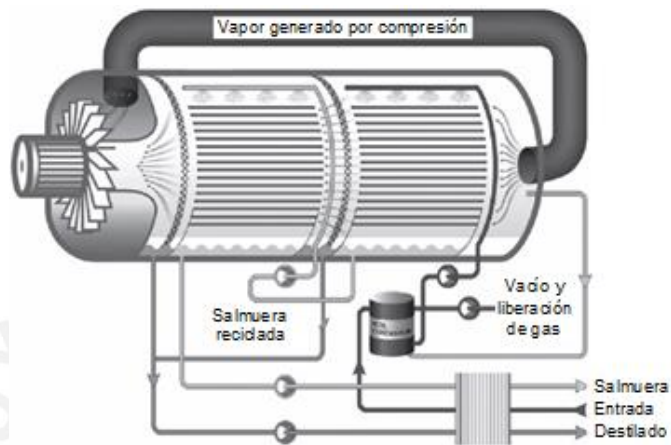


Figura 1.3. Destilación por compresión de vapor

1.2.3. Ósmosis inversa (RO)

La ósmosis inversa (RO) es un proceso en el cual el agua que contiene sales minerales, sólidos suspendidos, organismos orgánicos e inorgánicos, etc. Es forzada a pasar a través de una membrana semipermeable (se puede definir como semipermeable a una membrana que deja pasar selectivamente el agua y no sus constituyentes) mediante una determinada presión (ver Figura 1.4). Con este procedimiento se logra obtener agua con un bajo grado de salinidad (Voutchkov, 2013).

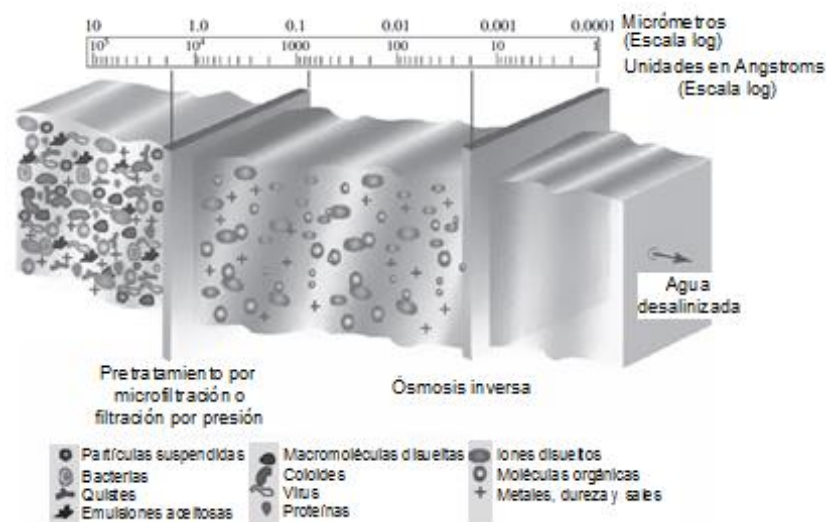


Figura 1.4. Ósmosis inversa

1.2.4. Electrodialisis (ED)

Esta técnica se basa en la aplicación de corriente continua al agua de alimentación (ver Figura 1.5). Esta corriente transporta a los iones minerales y otros iones con una gran carga eléctrica, contenidos en el agua de alimentación, a través de una membrana selectiva de iones hacia un par de electrodos con carga opuesta (Voutchkov, 2013).

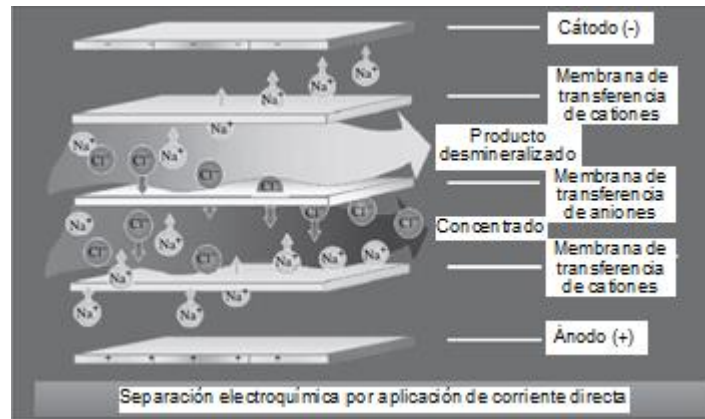


Figura 1.5. Electrodialisis

1.2.5. Intercambio de iones (IX)

Esta técnica se basa en la remoción de sal del agua de alimentación mediante el proceso de adsorción, la cual se obtiene gracias al uso de una resina selectiva de iones. El elemento principal en este proceso es la carga de iones que posee la resina IX, la cual en forma selectiva atrae o retiene iones de carga opuesta contenidos en la fuente de agua (Voutchkov, 2013).

1.3. Automatización para plantas industriales

1.3.1. Introducción

La automatización industrial, como la conocemos actualmente, tiene sus inicios en la revolución industrial, que se dio en la segunda mitad del siglo XVIII en el Reino Unido y que concluyó entre 1820 y 1840, con la introducción de las modificaciones realizadas por James Watt en el sistema de control en lazo cerrado para la máquina de vapor.

Hasta los años 60 los sistemas de control para los procesos industriales se basaban en señales manejadas por relé (señales digitales) o señales neumáticas para el control de procesos continuos (señales analógicas de 3 – 15PSI). Esto generaba una gran cantidad de inconvenientes por las grandes cantidades de cable utilizado para un proceso, el rediseño de un proceso y la pérdida de tiempo para dar solución a los problemas de planta.

A partir de los años 60 y las necesidades de la industria, se comenzaron a desarrollar diferentes soluciones para los procesos productivos, tales como el PLC (Controlador Lógico Programable), el DCS (Sistema de Control Distribuido), el control por computadora, los sistemas SCADA (Adquisición de Datos y Control Supervisorio), etc.

Actualmente, estas tecnologías se encuentran bastante avanzadas con respecto a sus predecesoras, lo cual origina confusión en las definiciones de cada una, pues a medida que avanza el desarrollo de estas tecnologías, cada vez son más parecidas entre ellas.

1.3.2. Controlador lógico programable (PLC)

Un controlador lógico programable (PLC) es un dispositivo industrial basado en computadora que cumple funciones discretas o continuas en una gran variedad de procesos. Originalmente fue diseñada para reemplazar a los relés en la industria de fabricación de automóviles, esto indica que *el propósito de este equipo se basaba en el control de variables discretas*.

En 1968, Bill Stone, quien pertenecía al grupo de ingeniero de General Motors, presentó una propuesta para el desarrollo de un equipo que solucionara los problemas del proceso de manufactura (Romero, Theorin, 2013). Este equipo debía cumplir con ciertas características como:

- Reducir los retardos de producción relacionados con problemas de control, además de ser de fácil mantenimiento y programación en línea con lógica escalera.
- Proveer la capacidad de expansión futura y ser desarrollado bajo un concepto modular para reducir el tiempo en el intercambio de componentes.
- Tenía que ser robusto, pues debería trabajar bajo condiciones de suciedad, interferencia electromagnética y vibración.

En 1969, la compañía Bedford Associates and Modicon presentaron el equipo Modicon 084, el cual cumplía con las características requeridas, y el que es conocido actualmente como el primer PLC (ver Figura 1.6).



Figura 1.6. Modicon 084

Luego del desarrollo del primer PLC varias empresas comenzaron a poner interés en el desarrollo de PLCs más avanzados, es así que actualmente se tiene una gran variedad de fabricantes, los cuales presentan una gran gamma de equipos para diferentes aplicaciones, dentro de estos se puede mencionar a los más representativos como:

- ABB
- Allen Bradley
- Omron
- Schneider
- Siemens

1.3.3. *Sistemas de control distribuido (DCS)*

Hasta los años 50 los sistemas de control consistían de dispositivos analógicos que se conectaban mediante cables en forma manual. Los lazos eran controlados y supervisados desde una sala de control como se muestra en la Figura 1.7 (Romero, Theorin, 2013).



Figura 1.7. Antigua sala de control

Con este tipo de diseño se tenía grandes inconvenientes cuando la arquitectura de control tenía que cambiar, pues gran parte del sistema tenía que ser modificado, lo que generaba poca flexibilidad y mucho más gasto que hoy.

En 1956, la compañía aeroespacial y de automóviles Thompson Ramo Wolridge (TRW) en asociación con la compañía petrolera Texaco, iniciaron un estudio para evaluar si era posible hacer uso de las computadoras para el control de procesos, las cuales, por ese entonces, podían realizar una adición en 1ms, una multiplicación en 20ms y el tiempo promedio entre fallas era de 50 a 100 horas, por lo que estos equipos no podrían ser usados para el control, pero si para la supervisión (Romero, Theorin, 2013).

Luego de años de estudio, en 1961 se lanzó al mercado la IBM 1710 (ver Figura 1.8), un equipo que consistía de una computadora de propósito general IBM 1620 y una tarjeta de adquisición de datos IBM 1711 A/D converter. Este equipo introdujo el soporte de interrupciones, las cuales no eran manejadas por computadoras de propósito general por ese entonces.



Figura 1.8. IBM 1710

Luego, en 1962 la compañía Imperial Chemical Industries (ICI) reemplazó todo su sistema de control analógico de soda y amoníaco por la computadora Argus (ver Figura 1.9), la cual no solo realizaba la supervisión del proceso, sino también realizaba tareas de control, por lo que fue conocida como Control Digital Directo (DDC).

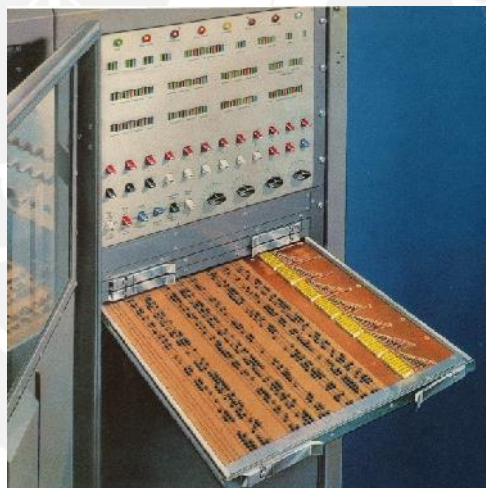


Figura 1.9. Computadora Argus

El DDC se basaba en una tabla, la cual interactuaba con la información obtenida de campo para realizar una secuencia de control, es así que no era necesario realizar un programa, pero tampoco era posible hacer algo que estuviera fuera de la tabla. Actualmente, el DDC se utiliza en los bloques de función de los sistemas de control distribuido (DCS).

Luego del avance de las computadoras, a inicio de los años 80, la Midac (Microprocessor Intelligent Data Acquisition and Control) desarrolló un sistema automático de construcción avanzada para la Universidad de Melbourne, este sistema consistía de un microprocesador 11 Z80 que compartía tareas y memoria con otros controladores distribuidos mediante una red serial (típicamente una red de paso de testigo IEEE 802.4).

Un gran aporte de este tipo de sistemas se basa en el lenguaje DDC, el cual trabaja bajo el enfoque de programación orientada a objetos.

Dadas las características de estos equipos, se les atribuye la denominación de sistema de control distribuido, pues su diseño original tenía el propósito de compartir las tareas de control, de un proceso, entre varios controladores, comunicados mediante una red.

Con la introducción de los sistemas de control distribuido, surgieron varias organizaciones que comenzaron a desarrollar diferentes protocolos de comunicación de campo, el problema radicaba en que ninguno de estos protocolos era el dominante y cualquiera que compre el equipo de una marca estaba supeditado a continuar comprando otros equipos al mismo fabricante por problemas con el protocolo de comunicación, pues este era cerrado (Romero, Theorin, 2013).

1.3.4. Protocolos de comunicación industrial

Tradicionalmente el cableado de equipos eléctricos se realizaba hilo a hilo, lo cual generaba grandes retardos de tiempo y muchos problemas al momento de fallas. Hasta hace unas décadas (y actualmente en muchas empresas del medio), estas soluciones cubrían todas las necesidades, tanto para señales digitales como para señales analógicas, requiriendo en este último caso cables protegidos contra interferencia electromagnética.

Al comenzar la evolución de los PLCs y DCSs, los protocolos de comunicación, se encontró la necesidad de realizar comunicaciones entre equipos. Al principio las comunicaciones eran mediante enlaces tipo serie. Luego, cada fabricante creaba un protocolo de comunicación para los dispositivos que desarrollaba. Finalmente, ante tantos sistemas cerrados y una gran variedad de protocolos, el desarrollo de protocolos se estandarizó y se fueron quedando los protocolos que presentaban mejores características y prestaciones para diferentes tipos de aplicaciones.

En la actualidad los protocolos de comunicación de campo más utilizados son:

- ControlNet
- DeviceNet
- Fieldbus Foundation
- HART
- Modbus
- Profibus (DP, PA y FMS)

Sin embargo, en este trabajo solo se utiliza el protocolo HART, pues es el que viene integrado en los dispositivos de campo de las plantas piloto y en los módulos de entrada/salida de la arquitectura de control distribuido a utilizar.

Protocolo HART

HART es un acrónimo en inglés para Transductor Remoto Direccional en Red (ver Figura 1.10). El protocolo HART usa la norma Bell 202, la cual utiliza la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) para sobreponer señales digitales de comunicación a bajo nivel sobre la señal de corriente continua de 4 – 20mA (HART, 1999).

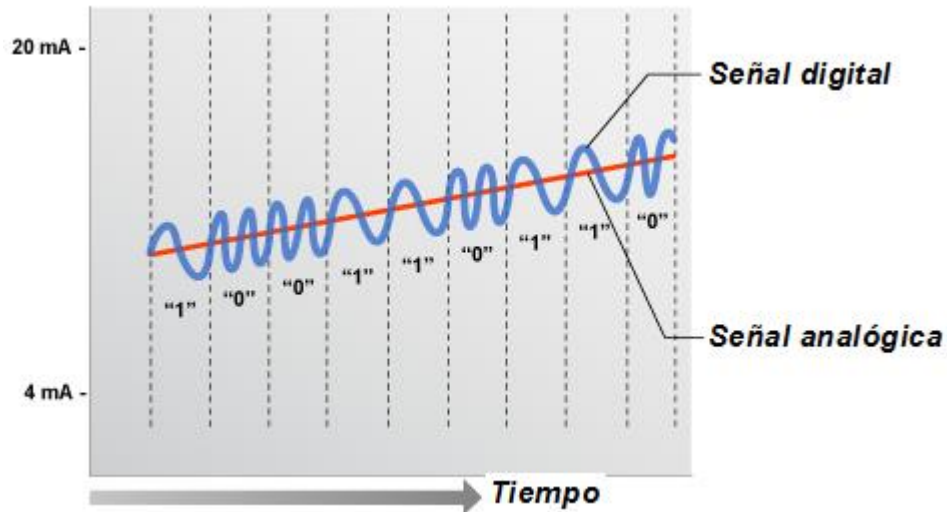


Figura 1.10. Señal digital sobrepuesta a la señal analógica

Este protocolo de comunicación permite la comunicación bidireccional en campo, y hace posible la transmisión de información adicional más allá de solo las variables normales de proceso comunicadas de y hacia un instrumento inteligente. El protocolo HART se comunica a 1200bps sin interrumpir la señal de 4 – 20mA y permite a la aplicación central (maestro) obtener dos o más actualizaciones digitales por segundo de un dispositivo inteligente de campo (esto depende de la velocidad de actualización del maestro). Ya que la señal digital es de fase no continua, no hay interferencia con la señal de 4 – 20mA.

Una ventaja del protocolo HART sobre los demás protocolos es la comunicación de canales simultáneos (ver Figura 1.11): la señal analógica de 4 – 20mA y la señal digital (HART, 1999).

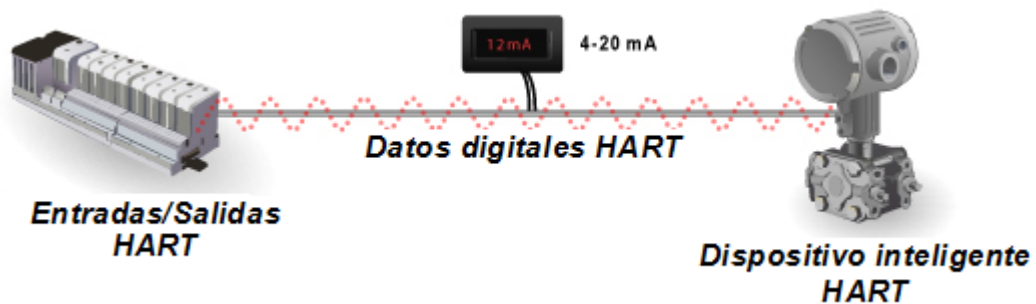


Figura 1.11. Dos canales de comunicación

El protocolo HART permite toda la comunicación digital con los dispositivos de campo en configuración de red punto a punto y multipunto (ver Figura 1.12).

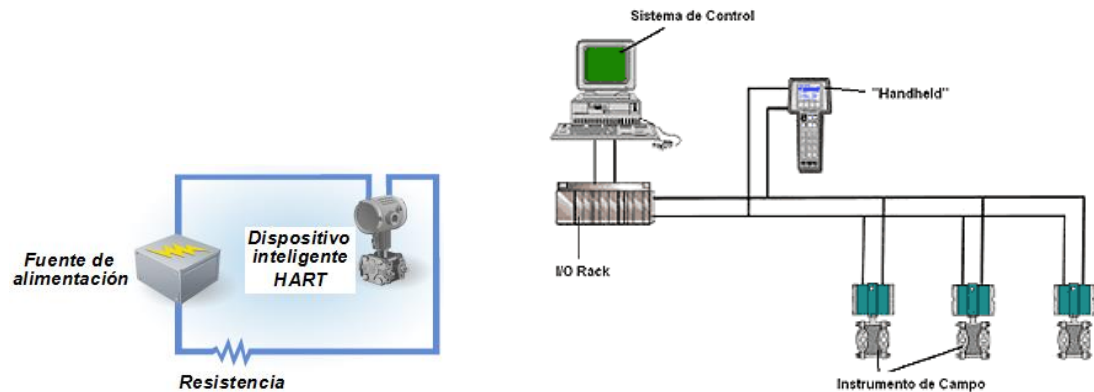


Figura 1.12. Configuración punto a punto y Multipunto (HART web)

1.3.5. Sistemas de supervisión por computadora y SCADA

Los sistemas de supervisión por computadora nacieron en 1959 con la computadora RW – 300, la cual solo servía para observar los datos obtenidos de campo, pues debido a los retardos en el procesamiento de datos, no era un medio adecuado para sostener el control de un proceso (Romero, Theorin, 2013).

Los sistemas de supervisión representan a uno o varios procesos en forma gráfica, mediante el uso de una o varias pantallas. Desde aquí se pueden observar todos los parámetros obtenidos por los dispositivos de campo. También se puede integrar con otros sistemas de supervisión mediante algún protocolo de comunicación (normalmente Ethernet TCP/IP).

En la actualidad, los sistemas de supervisión vienen integrados con los sistemas MES (Sistema de Ejecución de Manufactura), que monitorizan los procesos de producción en la planta, incluyendo el trabajo manual o automático de informes y los sistemas ERP (Sistema de Planificación de Recursos Empresariales), que manejan la producción, logística, distribución, inventario, envíos, facturas y contabilidad de la compañía (ver Figura 1.13).



Figura 1.13. Pirámide de automatización industrial

Actualmente existe una confusión en cuanto al concepto de sistema de supervisión por computadora y sistema SCADA (Adquisición de Datos y Control Supervisorio). Si bien, en los dos se utiliza un software para supervisión por computadora, el sistema SCADA va más allá, pues para definir a un sistema como SCADA, este debe tener la capacidad de realizar comunicación a grandes distancias mediante telemetría (telemetría es usada para enviar comandos, programas y para recibir información de monitoreo desde locaciones remotas (RTUs), como PLCs o DCSs hacia estaciones Maestras), como se muestra en la Figura 1.14 (Bailey, Wright, 2013).

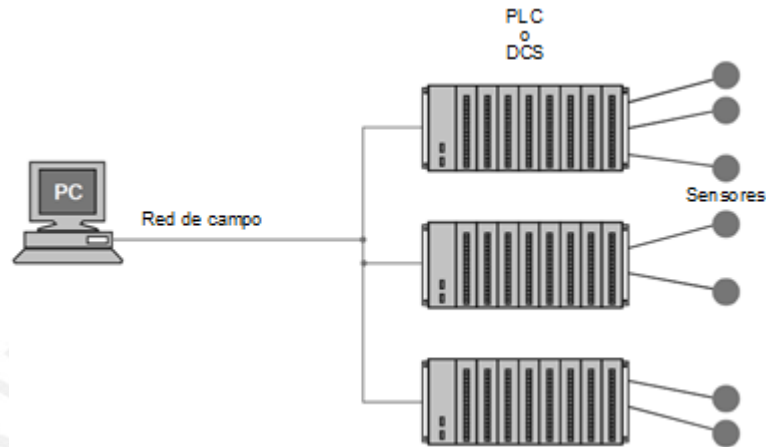


Figura 1.14. PLC o DCS como RTU

Muchas veces no es necesaria la obtención de grandes cantidades de información de todos los RTUs, pues los subprocesos, a los que se accede desde el computador principal, tienen pocas variables, por esta razón se desarrollaron los dispositivos electrónicos inteligentes (IED's), los cuales tienen capacidad de comunicación mediante algún protocolo de comunicación de campo (Bailey, Wright, 2013). Usualmente posee varios sensores y en muchos casos tiene la capacidad de ejecutar un algoritmo de control como el PID (ver Figura 1.15).

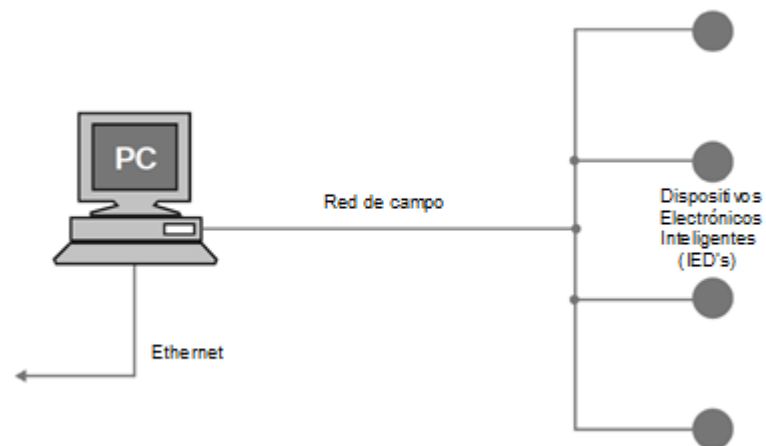


Figura 1.15. IED's como RTU

En la Figura 1.16, se muestra un sistema SCADA típico donde cada estación de operador contiene todo o parte del sistema de supervisión por computadora (Bailey, Wright, 2013).

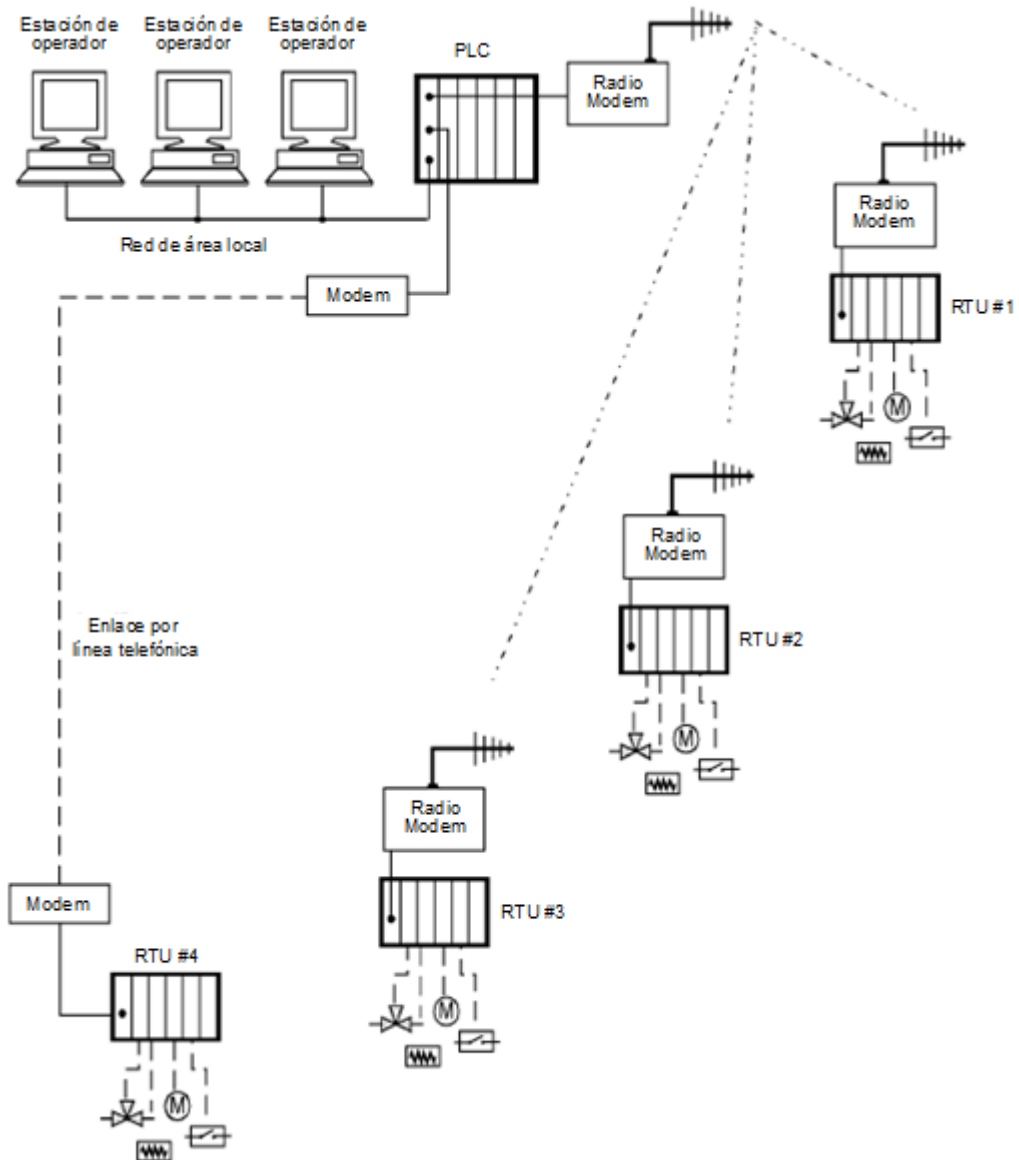


Figura 1.16. Arquitectura SCADA

Adicional a los sistemas de supervisión por computadora se tienen los paneles de operador (ver Figura 1.17) que son equipos diseñados para la supervisión de un proceso en campo. Este equipo es de gran ayuda, porque no es necesario esperar la acción correctiva de un operador en la sala de control; cualquier operador de campo calificado puede realizar algún cambio requerido en el proceso de forma inmediata (los cambios producidos por los operadores solo se dan si éste tiene el permiso otorgado mediante una contraseña).



Figura 1.17. Paneles de operador Panel View de la compañía Allen Bradley

1.4. Sistemas de detección y diagnóstico de fallas

1.4.1. Introducción

La detección de fallas se puede definir como la tarea de detectar el funcionamiento incorrecto de un sistema en estudio, a partir de observaciones realizadas; y el diagnóstico de fallas se puede definir como la tarea de determinar cuáles fueron las causas que generaron el comportamiento incorrecto en el sistema en estudio (Abad, 2007).

Existen diferentes técnicas cuando se realiza el diagnóstico de fallas, de acuerdo al conocimiento que se tiene del sistema a diagnosticar. Esto permite obtener la relación existente entre los síntomas observados, al detectar una falla, y el diagnóstico obtenido de acuerdo al conocimiento previo.

De acuerdo a un estudio realizado por Balakrishnan y Honavar (Balakrishnan and Honavar, 1998) el estudio del diagnóstico de fallas se puede distinguir bajo cuatro técnicas (ver Figura 1.18):

- Técnicas basadas en conocimiento.
- Técnicas basadas en casos.
- Técnicas basadas en modelos.
- Técnicas basadas en aprendizaje automático.

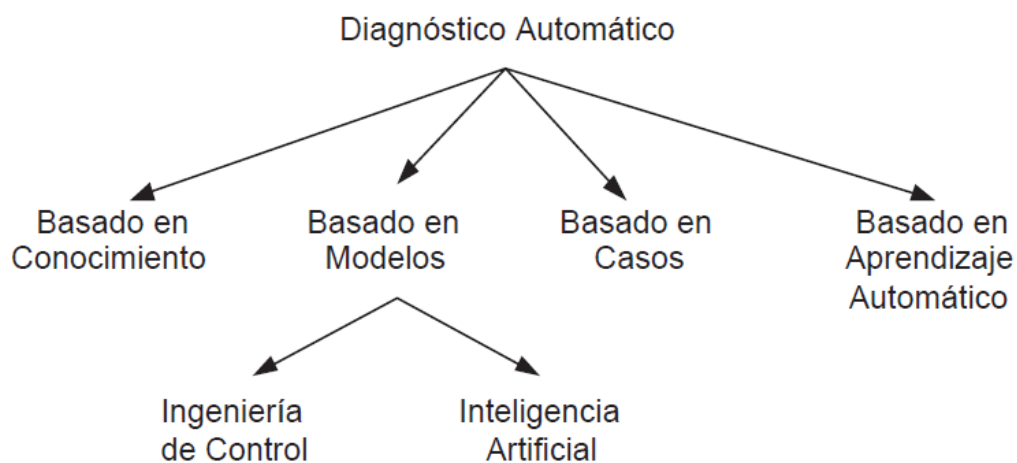


Figura 1.18. Técnicas de diagnóstico de fallas (Abad, 2007)

1.4.2. Detección y diagnóstico de fallas basado en conocimientos

Esta técnica se basa en el conocimiento, de un sistema en estudio, obtenido por los manuales y la experiencia de los expertos, con lo que se puede obtener un conocimiento heurístico acerca del mantenimiento y reparación del sistema en estudio. Este conocimiento se suele representar como un conjunto de reglas o estructuras organizadas dentro de una jerarquía de problemas, como se muestra en la Figura 1.19 (Abad, 2007).

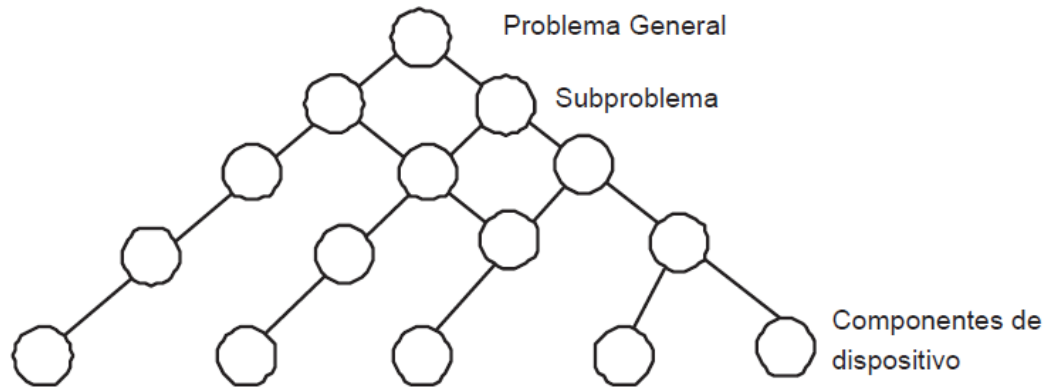


Figura 1.19. Jerarquía de problemas

Cómo se observa, en el nivel más alto de la jerarquía está el conocimiento general que representa un problema con el dispositivo y el proceso. Este problema es estudiado hasta llegar a los nodos terminales de la jerarquía, que representan ajustes en los dispositivos físicos como sensores, actuadores o elementos adicionales del sistema en estudio.

La técnica de diagnóstico basada en conocimientos es muy útil cuando no existe un modelo del sistema en estudio o es difícil de obtener. El enfoque más utilizado de esta técnica es la utilización de los sistemas expertos, que permiten representar el conocimiento de múltiples formas como reglas, grafos, etc. (Abad, 2007).

Aunque los sistemas expertos son ampliamente utilizados en los procesos industriales, tienen ciertos inconvenientes que hasta ahora no son eliminados en su totalidad como:

- La dificultad de adquisición y representación del conocimiento experto.
- La carencia de una metodología de desarrollo universalmente aceptada.
- Los problemas de mantenimiento ocasionados por su fragilidad debido a la falta de estructuración de su conocimiento.
- La dependencia del dispositivo.

No obstante, si el conocimiento está bien definido y acotado, los sistemas expertos siguen siendo una herramienta muy potente de diagnóstico a utilizar.

1.4.3. *Detección y diagnóstico de fallas basado en casos*

Esta técnica adapta soluciones utilizadas en problemas anteriores para resolver nuevos problemas. La intuición detrás del Razonamiento Basado en Casos es usar el conocimiento ganado al resolver problemas similares en el pasado como punto de comienzo desde los cuales se resuelven problemas actuales (Abad, 2007).

Un sistema de Razonamiento Basado en Casos (CBR del inglés Case Based Reasoning) almacena los episodios de problemas pasados como casos que más tarde pueden ser recuperados y usados para ayudar a resolver un nuevo problema. CBR se basa en dos observaciones acerca de la naturaleza del mundo:

- El mundo es regular, y por tanto problemas similares tienen soluciones similares.
- Los tipos de problemas encontrados tienden a ser recurrentes.

El proceso de un razonador de este tipo comprende cuatro pasos de forma cíclica:

- Recuperar los casos más similares.
- Reusar los casos para resolver los problemas.
- Revisar la solución si es necesario.
- Retener las nuevas soluciones como un caso nuevo.

La representación de los casos considera qué información debe contener. Un caso puede considerarse como una historia para aprender, como el contexto y la solución del problema, o también como un proceso por el cual el problema se resuelve.

El contexto de un caso se describe por los índices de los casos, que describen bajo qué circunstancias es apropiado almacenar un caso. El almacenamiento de casos se centra en guardar aquellos casos que se han seleccionado para una recuperación posterior.

Los métodos de recuperación proporcionan el medio por el cual extraemos aquellos casos del caso base que más cerradamente se ajusta a la descripción del problema nuevo. Los algoritmos de recuperación se basan en los índices de caos y la organización de los casos almacenados para dirigirlos de forma eficiente hacia casos útiles potenciales.

El CBR ha sido aplicado satisfactoriamente en múltiples campos, que van desde el área de negocios hasta diseños de arquitectura. Actualmente, la evolución de los métodos permite combinar CBR con técnicas de inteligencia artificial como:

- Algoritmos genéticos.
- Razonamiento basado en modelos.
- Técnicas de aprendizaje, etc.

1.4.4. Detección y diagnóstico de fallas basado en modelos

Esta técnica utiliza un modelo que representa de forma explícita el modelo en estudio para realizar el diagnóstico de fallas. Si el comportamiento de la situación observada no se ajusta a la estimación realizada por el modelo para dicha situación se concluye que hay una falla, y en un análisis posterior de las diferencias se intenta identificar el componente que falló (Thomas, 2002).

La mayoría de aproximaciones aparecidas en la última década, para realizar diagnóstico de fallas, se basa en el uso de modelos (DBM, ver Figura 1.20). Estos modelos se apoyan en el conocimiento del sistema a diagnosticar, que puede estar bien estructurado formalmente y de acuerdo con teorías bien conocidas o puede ser conocido a través de la experiencia de un experto y datos del sistema o proceso (Abad, 2007).

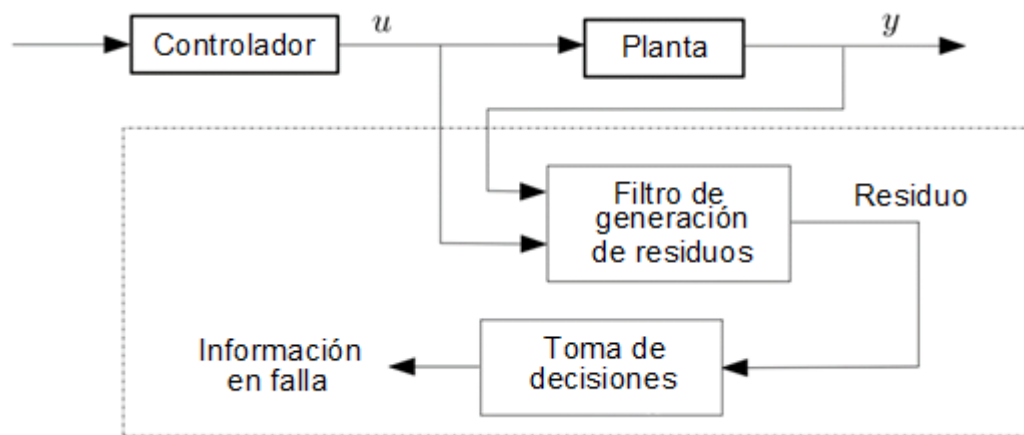


Figura 1.20. Detección de fallas basado en modelos

Los métodos más ampliamente utilizados en la detección y diagnóstico de fallos basado en modelos son:

- Estimación de estados.
- Estimación de parámetros.
- Redundancia analítica.
- Técnicas basadas en Inteligencia artificial.

Modelado para el diagnóstico de fallas

Para realizar el análisis o diseño en ciencias e ingeniería, los científicos siempre han necesitado representar el mundo a través de modelos, que pueden ser usados como sustitutos del sistema físico con respecto a las características relevantes para la tarea a realizar.

Un sistema físico puede ser visto desde distintas perspectivas, según los fenómenos que tengan lugar en él. En particular, se puede distinguir entre modelos estáticos y dinámicos. Si un sistema físico es considerado un conjunto de variables exógenas y un conjunto de variables endógenas, la evolución del estado del sistema, dado por los valores de las variables endógenas, es condicionada por el valor de las variables exógenas en el tiempo.

Los modelos estáticos proporcionan una imagen de los estados de equilibrio del sistema, mientras que los modelos dinámicos ofrecen también una descripción de los estados transitorios entre dos estados de equilibrio.

El primer concepto clave en el diagnóstico de fallas basado en modelos es que el conocimiento acerca de la estructura interna y el comportamiento correcto de un 'artefacto' diseñado puede ser usado para diagnosticar dicho artefacto (Abad, 2007).

La DBM permite realizar el diagnóstico de fallas basándose en:

- La descripción de la estructura interna del dispositivo, usualmente una lista de los componentes usados y sus conexiones.
- Los modelos de comportamiento correcto de los componentes del dispositivo.
- Las observaciones.

El segundo concepto clave en el diagnóstico de fallas basado en modelos se refiere a las tareas fundamentales del diagnóstico: generación de hipótesis, comprobación de hipótesis y discriminación de hipótesis (Reiter, 1987).

El tercer concepto clave del diagnóstico de fallas basado en modelos es que el modelado es la parte más dura para la DBM.

1.4.5. Detección y diagnóstico de fallas basado en aprendizaje automático

Los métodos de aprendizaje y reconocimiento de patrones son muy útiles cuando se pretende diagnosticar sistemas donde no se dispone del conocimiento estructural para relacionar los síntomas de las fallas.

Los métodos de aprendizaje determinan experimentalmente mediante el entrenamiento previo, una falla en base a un vector de síntomas de referencia. La comparación posterior con los síntomas observados, determinará la falla mediante la clasificación obtenida.

Con estas técnicas, el diagnóstico se consigue mediante la comparación de la evolución del sistema a diagnosticar con el conocimiento aprendido que se tiene del mismo, evaluando de esta forma el comportamiento del sistema. Para la adquisición de la experiencia se suele recurrir a experiencias previas almacenadas, o a la simulación del comportamiento del sistema a diagnosticar. Dicho conocimiento puede dar lugar a un modelo explícito o no. Todo esto se puede realizar con técnicas como aprendizaje simbólico o redes neuronales artificiales.

Una de las grandes ventajas de las técnicas de aprendizaje automático es que evitan los problemas relacionados con el desarrollo de un modelo explícito de conocimiento o la obtención de algún tipo de modelo, requerido por las aproximaciones basadas en conocimientos o basadas en casos, respectivamente. Por el contrario, su gran inconveniente radica en la necesidad de un conjunto de datos de entrenamiento, normalmente extenso que no suele estar disponible en los sistemas reales (Abad, 2007).

Otra de las desventajas que presentan estos sistemas aplicados al diagnóstico de fallas es la imposibilidad de reconocer situaciones para los que no han sido entrenados.

Algunas de las técnicas más aplicadas para el diagnóstico de fallas basado en el aprendizaje automático son:

- Redes Neuronales.
- Árboles de decisión.
- Máquinas de soporte vectorial.
- Lógica difusa.
- Redes neuro-difusas.
- Boosting.

1.5. Planteamiento del problema

Las plantas desalinizadoras actuales cuentan con sistemas de supervisión que integran alarmas capaces de detectar algunas fallas y sus posibles causas, pero la mayoría solo se basa en señales obtenidas de sensores analógicos (señal de 4 – 20mA), por lo que su capacidad es limitada. Para mejorar los sistemas de alarmas básicos y contrarrestar las problemáticas relacionadas a fallas de hardware es necesario integrar áreas de conocimiento como los protocolos de comunicación industrial y los sistemas de detección y diagnóstico de fallas de basado en modelo, capaces de identificar y diagnosticar diferentes tipos de anomalías en sensores, actuadores y en el proceso mismo.

Hipótesis

El desarrollo de módulos de detección de fallas, en una arquitectura de control distribuido, que integre los datos obtenidos por protocolos de comunicación industrial de los instrumentos de campo y los sistemas de detección y diagnóstico de fallas basado en modelo, generarán un mayor impacto en las soluciones para mantenimientos preventivos y correctivos de la planta desalinizadora piloto, tal que estos módulos puedan ser utilizados en otros procesos similares de forma rápida y sencilla.

Objetivo general

Desarrollo e implementación de un sistema de supervisión y monitoreo que integre módulos de detección y diagnóstico de fallos, programados dentro de una arquitectura de control distribuido, para una planta piloto desalinizadora de agua de mar.

Objetivos específicos

Para alcanzar este objetivo es necesario realizar los siguientes trabajos de investigación y desarrollo:

- Estudiar el funcionamiento de la planta piloto desalinizadora de agua de mar e identificar las variables con las que trabaja.

- Implementar el sistema de control distribuido que incluya las comunicaciones entre equipos y el sistema de supervisión.
- Desarrollar el sistema de supervisión por computadora que incorpore todas las variables de la planta piloto desalinizadora de agua de mar.
- Desarrollar el sistema de detección y diagnóstico de fallos para la planta piloto desalinizadora de agua de mar, que integre datos obtenidos por instrumentos de campo y sistemas de detección y diagnóstico de fallos basado en modelos (desarrollado en otro trabajo de tesis).
- Integrar el sistema de detección de fallas al sistema de supervisión por computadora.



2. ESTUDIO DE LOS DISPOSITIVOS DE CAMPO EN LA PLANTA PILOTO DESALINIZADORA DE AGUA DE MAR

2.1. Introducción

Para realizar el estudio y análisis profundo de un sistema dinámico es necesario contar con conocimiento práctico del sistema, o de un modelo matemático que represente la dinámica de este sistema.

En este trabajo se realiza el modelamiento individual de todos los dispositivos de campo (sensores y actuadores), y se toma como referencia un modelo del bastidor de ósmosis inversa desarrollado en otro trabajo de investigación. Este modelo ayuda a entender la relación entre variables controladas y variables de proceso.

Para poder detectar anomalías en el sistema, también se incluye información adicional obtenida de los dispositivos de campo haciendo uso del protocolo de comunicación HART. Este protocolo viene incluido en la mayoría de sensores, pero aún sus características no son aprovechadas en todos los procesos.

2.2. Estudio de la planta desalinizadora

El estudio de una planta desalinizadora se realiza a través del modelo obtenido por Alatiqi (Alatiqi, 1989), ya que este modelo es tomado como referencia para realizar estudios más avanzados en la desalinización de agua de mar por ósmosis inversa.

El modelo de estudio se presenta en la Figura 2.1.

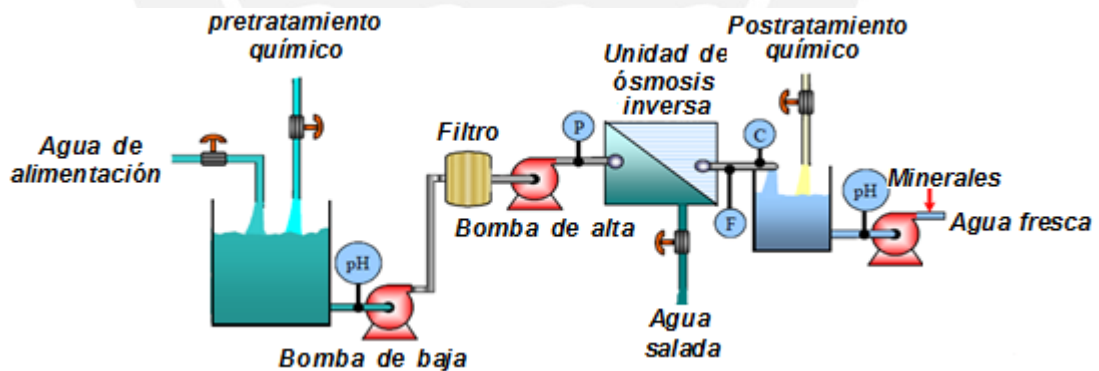


Figura 2.1. Planta de desalinización por ósmosis inversa

El diagrama de la Figura 2.1 representa, una planta de desalinización de agua de mar por ósmosis inversa. En base a este diagrama se desarrolla el modelo matemático del bastidor de ósmosis inversa, el cual muestra información de las relaciones existentes entre las entradas y salidas, y la influencia que tiene el cambio de una variable controlada sobre las variables de proceso (Alatiqi, 1989). El modelo se basa en un sistema multivariable de dos entradas y salidas como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Y = G_p(s)U \quad (2.1)$$

$$\rightarrow \begin{bmatrix} F \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{p11} & G_{p12} \\ G_{p21} & G_{p22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ PH \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Donde:

F: Flujo de permeado (gpm).

P: Presión de alimentación (psi).

PH: PH de alimentación.

C: Conductividad de permeado ($\mu\text{s}/\text{cm}$).

Las relaciones de cada función de transferencia se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{F}{P} = G_{p11} = \frac{0.002(0.056s+1)}{(0.003s^2+0.1s+1)} \quad (2.3)$$

$$\frac{F}{PH} = G_{p12} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{C}{P} = G_{p21} = \frac{-0.51(0.35s+1)}{(0.213s^2+0.7s+1)} \quad (2.5)$$

$$\frac{C}{PH} = G_{p22} = \frac{-57(0.32s+1)}{(0.6s^2+1.8s+1)} \quad (2.6)$$

Estas funciones de transferencia muestran información importante acerca del comportamiento del sistema. Las ganancias indican la dirección y magnitud de cambio de las variables de salida F y C, cuando se realiza un cambio unitario en las variables de entrada P y PH (para cada combinación).

Para revisar las relaciones existentes entra las entradas y salidas, se desarrolla una simulación en Matlab, mediante el diagrama de bloques mostrado en la Figura 2.2.

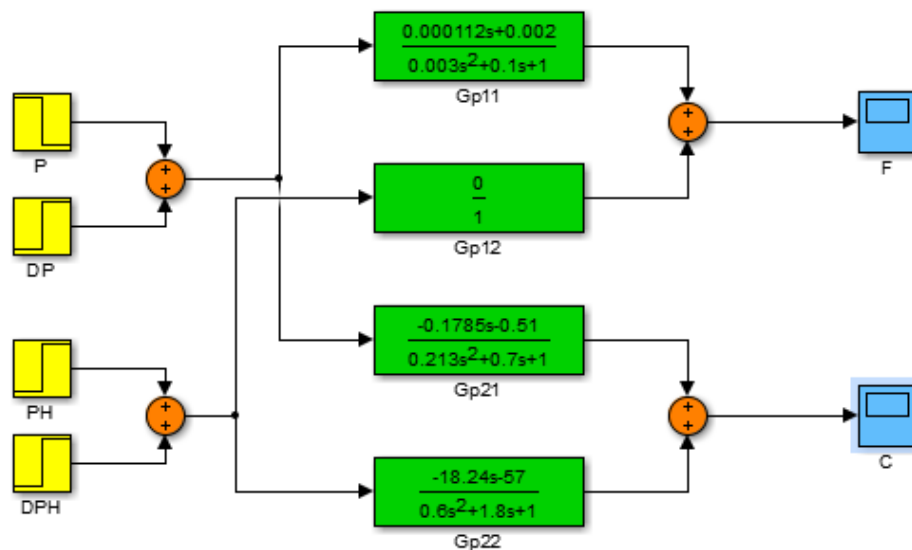


Figura 2.2. Diagrama de bloques de la ecuación (2.2)

Para ver la influencia de la presión sobre el flujo se realiza una variación de 100 psi en la presión de entrada. Los resultados se observan la Figura 2.3.

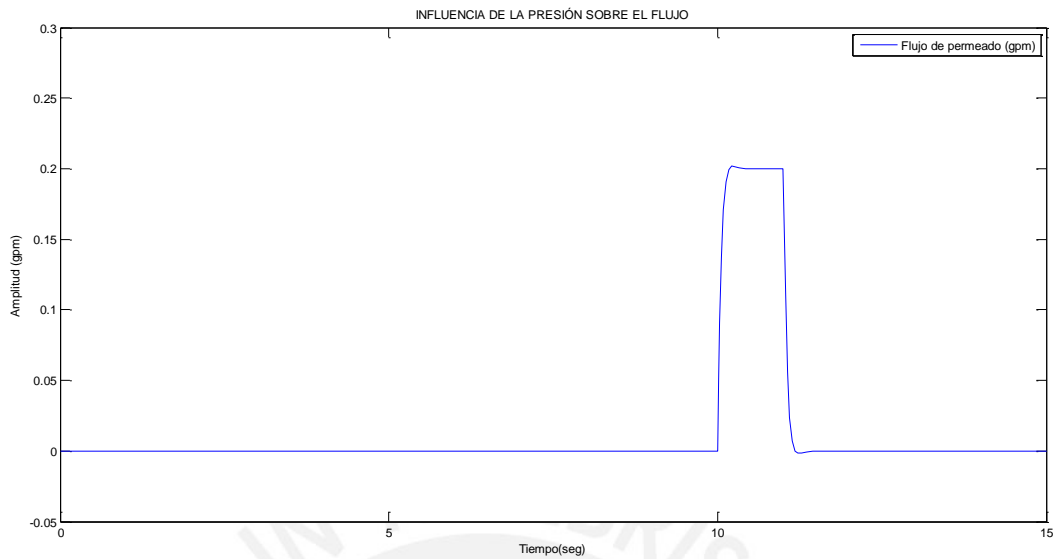


Figura 2.3. Influencia de la presión sobre el flujo de permeado.

Se puede observar que un cambio de 100psi en la presión de alimentación, entonces el flujo de permeado de tiene una variación positiva de 0.02gpm.

Para ver la influencia de la presión sobre la conductividad se realiza una variación de 100 psi en la presión de entrada. Los resultados se observan la Figura 2.4.

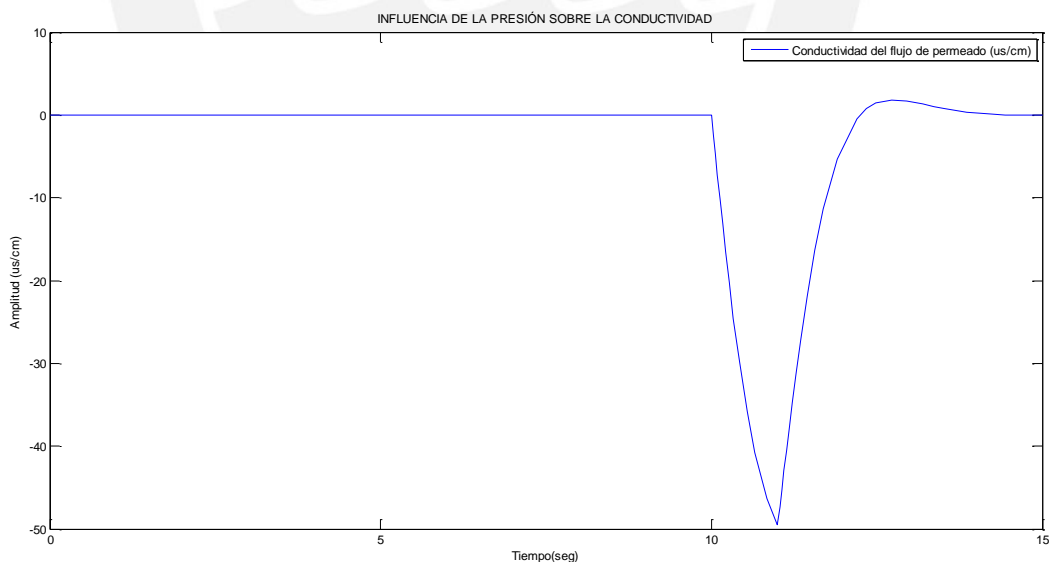


Figura 2.4. Influencia de la presión sobre la conductividad de permeado

Se puede observar que un cambio de 100psi en la presión, se produce una variación negativa de la conductividad de salida.

Para ver la influencia del PH sobre la conductividad se realiza una variación unitaria en el flujo de entrada. Los resultados se observan la Figura 2.5.

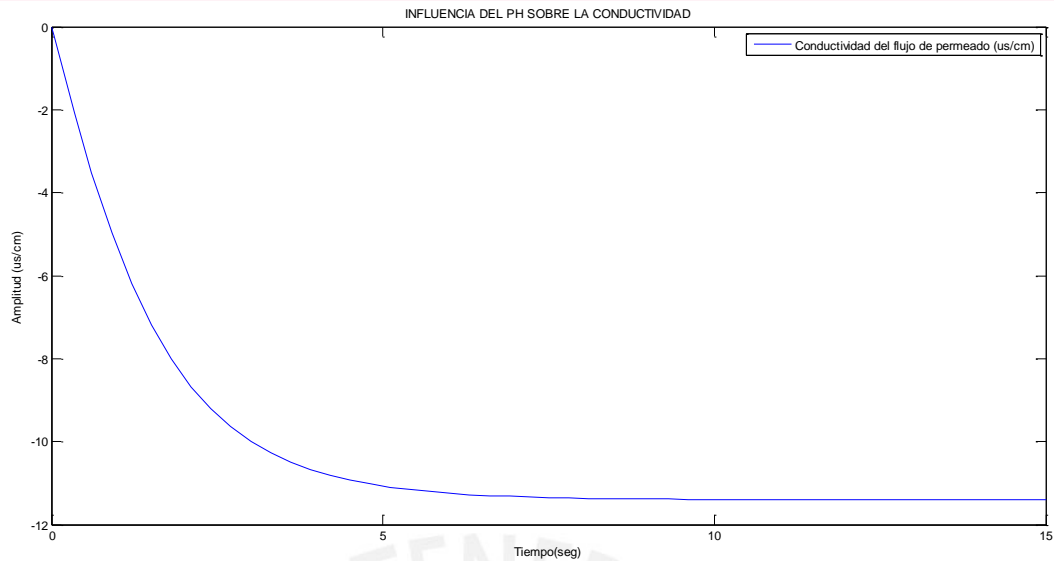


Figura 2.5. Influencia del PH sobre la conductividad de permeado

De acuerdo a la ecuación (2.2) se conoce que el PH no tiene influencia sobre el flujo de permeado, pero como se observa en la Figura 2.5, si tiene un efecto negativo en la conductividad.

2.3. Modelo de los dispositivos de campo

2.3.1. Dispositivos de campo

Para este trabajo también es necesario realizar el estudio de todos los dispositivos de campo, con el fin de definir el funcionamiento y los retardos que se pueden originar al obtener datos de operación. Este estudio es importante, para realizar la detección y diagnóstico de fallas en la operación de los instrumentos de campo.

Los instrumentos a estudiar son:

- Analizador inteligente, el cual analiza dos parámetros del proceso:
 - Sensor de conductividad de permeado.
 - Sensor de PH de alimentación.
- Transmisor de flujo de permeado.
- Transmisor de presión de alimentación.
- Transmisor de temperatura de entrada.
- Válvula de control proporcional eléctrico

De forma adicional se tiene en cuenta el transmisor de flujo y una válvula de control proporcional neumática de una planta de temperatura piloto, para poder aplicar los conceptos teóricos, ya que al inicio de este trabajo de investigación los instrumentos de la planta desalinizadora no estaban instalados y no se podía acceder a ellos. De estos dos instrumentos adicionales, solo se hace un estudio de la válvula de control proporcional, pues el transmisor de flujo es similar al transmisor de flujo de permeado.

Antes de realizar el modelo se tienen que tener en cuenta algunas definiciones básicas:

- **Transductor:** Un transductor es un dispositivo capaz de transformar una determinada manifestación de energía medida en otra diferente, pero de valor muy pequeño. Se les podría definir como un conversor de energía
- **Sensor:** Un sensor es un dispositivo que genera una señal eléctrica al detectar una magnitud física o química, llamada normalmente variable de instrumentación.
- **Actuador:** Es un dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar algún cambio en un proceso automatizado.
- **Proceso:** Un proceso es un conjunto de operaciones unitarias necesarias para modificar las características de las materias primas. Dichas características pueden ser de naturaleza muy variada, tales como: la forma, la densidad, la conductividad, la temperatura, etc.

Los sensores y actuadores siempre se relacionan mediante uno o más procesos como se muestra en la Figura 2.6.

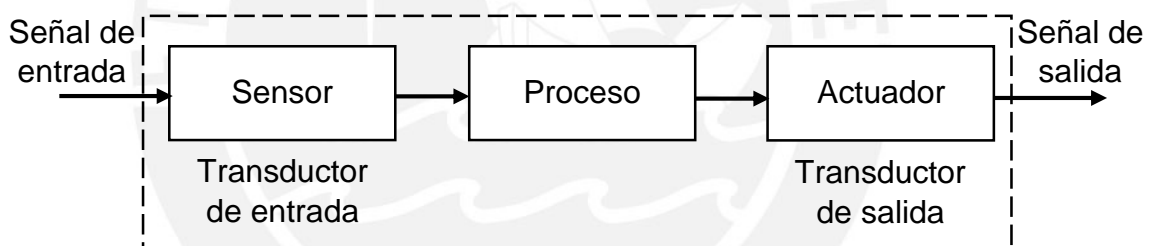


Figura 2.6. Interacción de dispositivos en un proceso

2.3.2. Transmisores

Un transmisor es un instrumento de medición industrial, el cual utiliza un sensor para medir una magnitud física o química, la cual es mostrada en una pantalla electrónica. También tiene la capacidad de transmitir la información medida mediante algún protocolo de comunicación industrial, así como la de definir los parámetros de operación de este instrumento.

Si bien los sensores miden variables, estas no necesariamente van a mostrar el resultado medido de forma directa. Muchos sensores tienen retardos o no linealidades dependiendo del rango de operación o variable a medir.

Los sensores pueden presentar comportamientos lineales, logarítmicos, exponenciales o potenciales (Figura 2.7). Sin embargo, la mayoría de sensores utilizados en el campo industrial presentan un rango de operación lineal en el cual se recomienda trabajar.

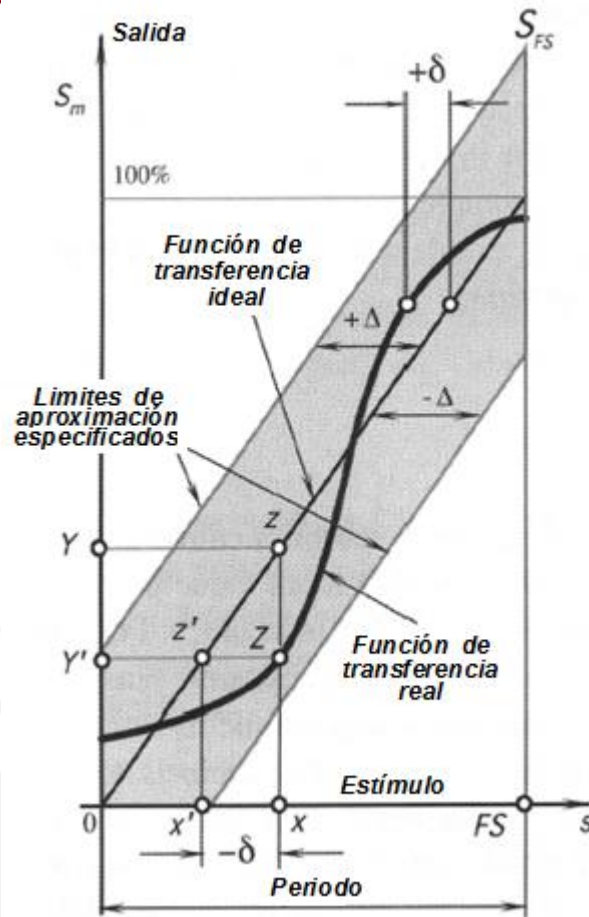


Figura 2.7. Comportamiento real e ideal de un sensor

Para entender el funcionamiento de un dispositivo de campo (sensor o actuador), se puede realizar el modelamiento mediante ecuaciones matemáticas o mediante datos. Cada método tiene ventajas y desventajas; sin embargo, la forma más sencilla de realizar el modelamiento de un sensor es por medio de datos y asociación a una función (ver Figura 2.8).

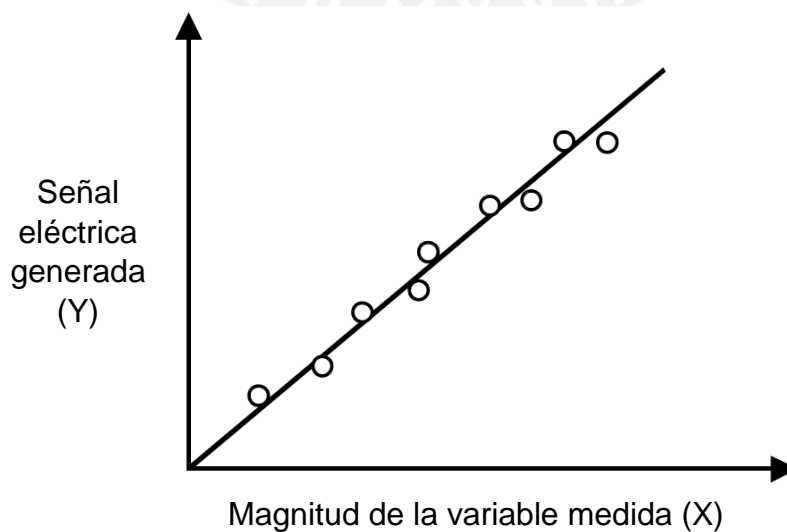


Figura 2.8. Relación de medidas para la asociación a una función

Si se realizan pruebas con el mismo sensor sujeto a diferentes condiciones, las medidas presentadas no siempre van a ser las mismas, pues la influencia de interferencia electromagnética, temperatura u otra variable desconocida, puede afectar el desempeño del sensor, como se muestra en la Figura 2.9.

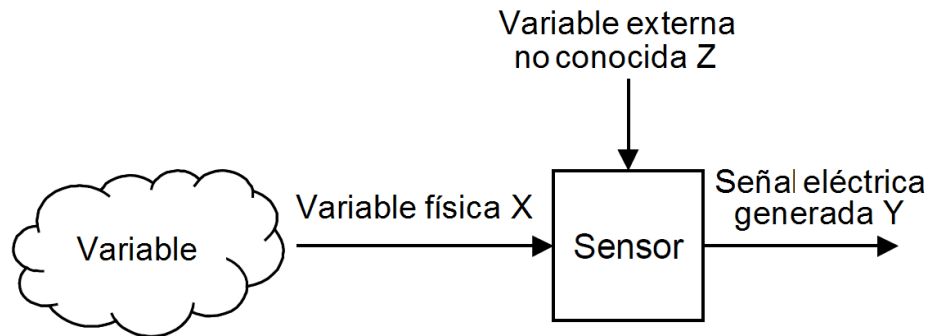


Figura 2.9. Medición de una variable por un sensor

Algunas características estáticas de los sensores se mencionan a continuación:

- Rango de entrada: El mínimo y máximo valor de la variable física a medir.
- Rango de salida: El mínimo y máximo valor que entrega el sensor. Este valor normalmente trabaja bajo un estándar, dentro de los más conocidos se tiene:
 - Rango de 0 – 20mA.
 - Rango de 4 – 20mA.
 - Rango de -10 – 10V.
 - Rango de 0 – 10V.
 - Rango de 0 – 5V.
- Sensibilidad: Es la capacidad que tiene el sensor para detectar una variación en la variable medida.
- Linealidad: El acercamiento que tiene un sensor a comportarse como una recta.
- Monotonicidad: Es la relación que existe entre la variable medida y la señal eléctrica generada. Si se incrementa el valor de la variable, entonces se incrementa la señal eléctrica generada y viceversa.
- Histéresis: Se refiere a la diferencia de dos valores de señal eléctrica generada para una misma magnitud medida, dependiendo de la trayectoria (crecimiento o decrecimiento). Este comportamiento normalmente se presenta en materiales ferromagnéticos.

A pesar de que los sensores presentan comportamiento no lineal (en el mundo todas las variables tienen un grado de no linealidad), estos se suelen considerar como lineales, de manera que pueden ser representados por una ecuación diferencial lineal (2.6). En la práctica los sensores se representan como un sistema de orden cero, primer orden y segundo orden, ya que es muy raro encontrar sistemas de orden superior.

$$a_k \frac{d^k y(t)}{dt^k} + \dots + a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = x(t) \quad (2.6)$$

Se debe entender que los sensores son estudiados como sistemas causales; es decir, las condiciones iniciales de operación son cero.

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación 6, se obtiene:

$$\begin{aligned} L \left\{ a_k \frac{d^k y(t)}{dt^k} + \dots + a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \right\} &= L \{ x(t) \} \\ \rightarrow L(a_k s^k + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0) Y(s) &= X(s) \\ \rightarrow G(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} &= \frac{1}{a_k s^k + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \end{aligned} \quad (2.7)$$

La ubicación de los polos de la ecuación (2.7), en el plano imaginario, permite conocer el comportamiento dinámico del sensor. Este comportamiento dinámico puede ser estable, oscilatorio, integral (positivo o negativo) o inestable, como se muestra en la Figura 2.10.

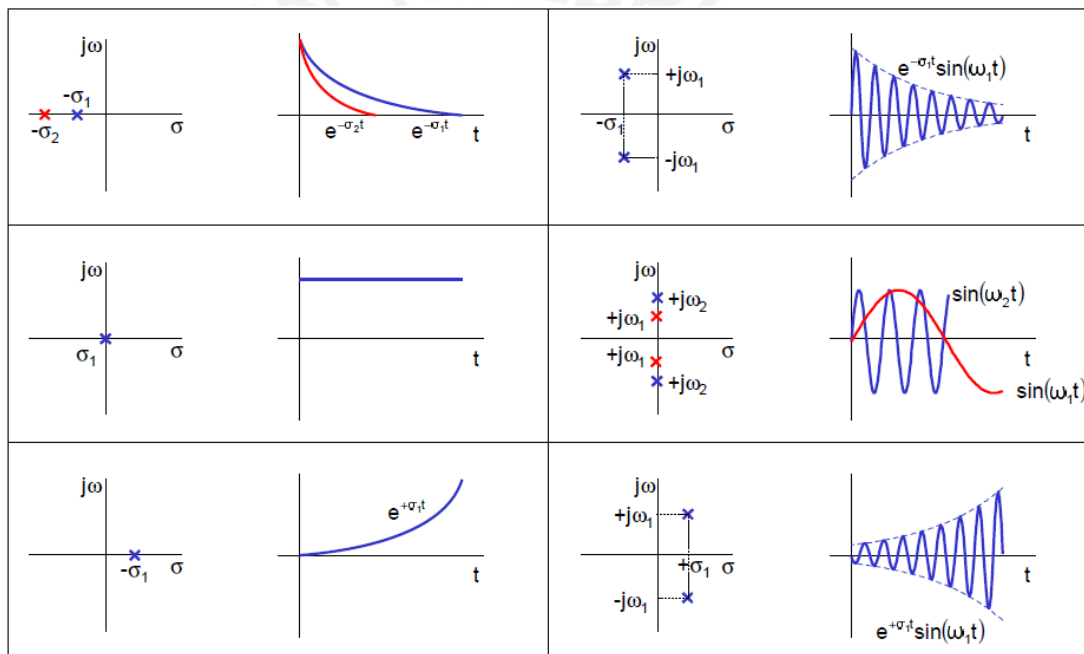


Figura 2.10. Posible comportamiento del sensor de acuerdo a la ubicación de sus polos en el plano imaginario

De acuerdo a las características mencionadas en los manuales de los transmisores con los que se trabaja, todos los sensores presentan rangos de linealidad y funciones de compensación interna por efecto de la temperatura sobre la variable medida. Por esta razón todos los sensores se consideran de orden cero (ecuación 2.8) o de primer orden (ecuación 2.9), dependiendo de la existencia de retardo en la medición y generación de señal eléctrica.

$$G(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = K \quad (2.8)$$

$$G(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{1}{a_1 s + a_0} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.9)$$

Donde:

- K: Ganancia estática que viene de la relación de la magnitud de la variable medida y la magnitud de la señal generada.
- τ : Es la constante de tiempo, indicada por el fabricante, la cual determina la dinámica del sistema.

Para hallar ganancia K en los transmisores en estudio, se debe tener en cuenta la ecuación de la recta generada de la Figura 2.11.

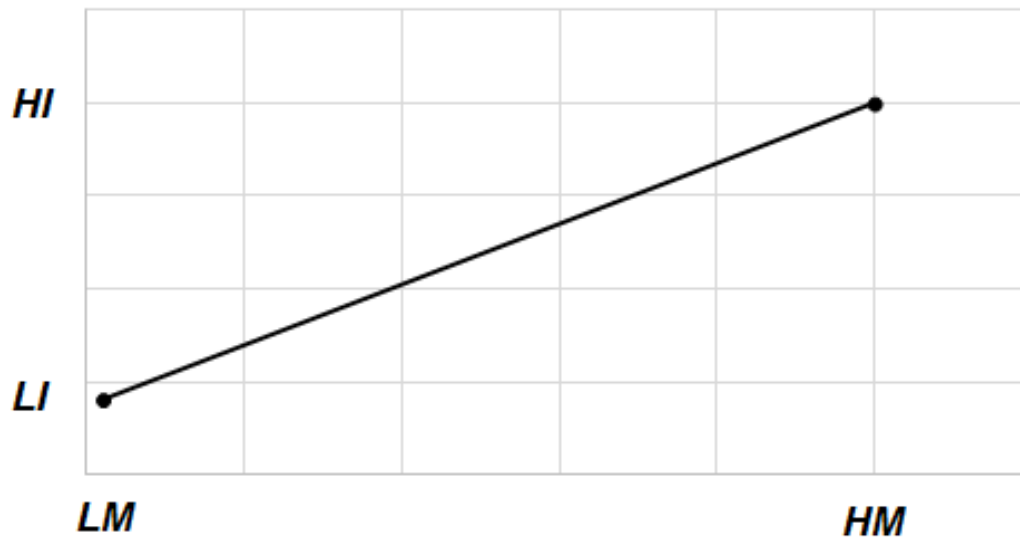


Figura 2.11. Relación de ganancia del transmisor

Donde:

- LM: Medida mínima del transmisor
- HM: Medida máxima del transmisor
- LI: Mínima salida del transmisor
- HI: Máxima salida del transmisor

Con estos datos se puede calcular la ganancia del transmisor, y por ende, la función de transferencia del transmisor:

$$S = \frac{m(M-LM)}{\tau s + 1} + LI \quad (2.10)$$

Donde:

- I: Señal de salida del transmisor
- M: Variable medida por el transmisor
- m: pendiente de la recta:

$$m = \frac{HI - LI}{HM - LM}$$

Con la función de transferencia (ecuación 2.10), se desarrolla un diagrama de bloques (ver Figura 2.12) en Simulink, con el cual se van a realizar las simulaciones de las funciones de transferencia de los transmisores para validarlos.

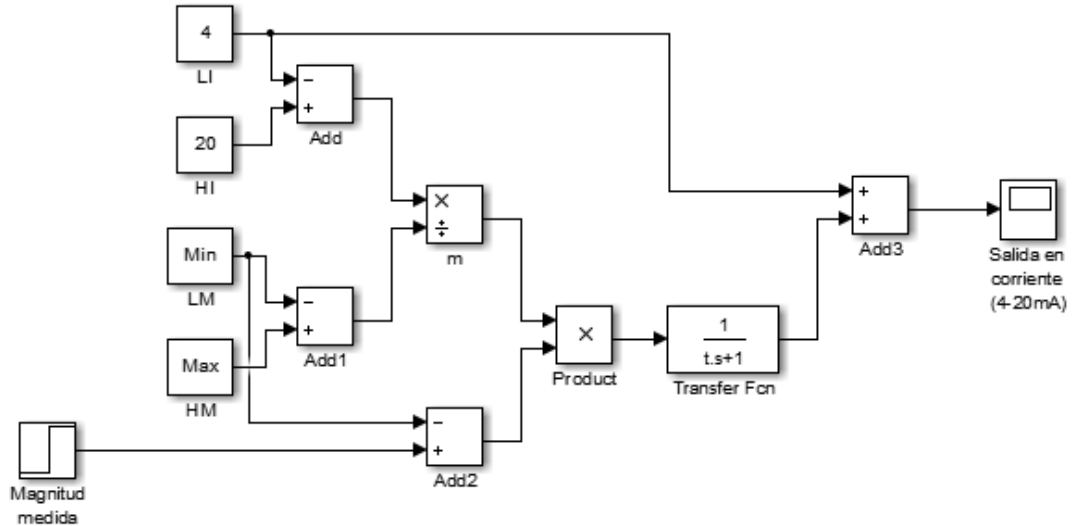


Figura 2.12. Diagrama de bloques para transmisores en Simulink

a) Transmisor de flujo de la planta desalinizadora piloto

Este dispositivo es un flujómetro electromagnético que consiste de un sensor y un transmisor, el cual mide el flujo de un líquido conductor que pasa a través de un campo magnético (ver Figura 2.13).

La ley de inducción de Faraday afirma que el desplazamiento de una barra conductora, a través de un campo magnético, induce una tensión eléctrica. Este principio de dínamo rige también la forma en que funcionan los flujómetros electromagnéticos.

Cuando las partículas cargadas eléctricamente atraviesan el campo magnético generado por dos bobinas, se induce una tensión eléctrica. Esta tensión inducida, que se toma entre dos electrodos de medición, es directamente proporcional a la velocidad del flujo y, por consiguiente, al flujo volumétrico (Rossemount, 2011).

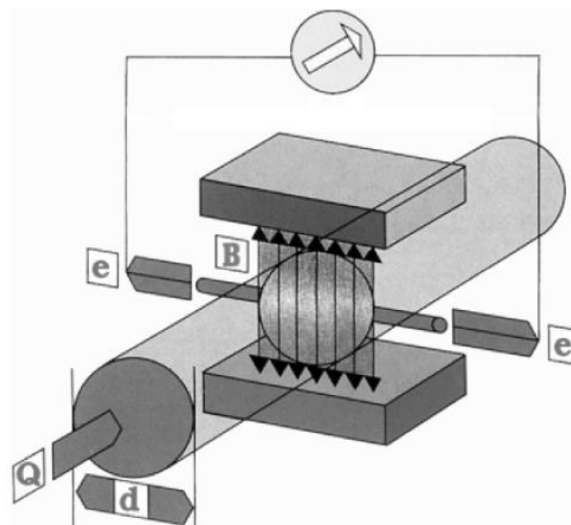


Figura 2.13. Principio de medición del flujómetro electromagnético

De acuerdo a la Figura 2.11 se llega a producir una relación entre el flujo que atraviesa el campo magnético y la corriente medida por los electrodos mediante la siguiente ecuación:

$$e = kBQd \quad (2.11)$$

Donde:

- e: emf generada en los electrodos (V).
- k: Constante de medición.
- B: Fuerza del campo magnético (Wb).
- Q: Tasa de flujo volumétrico (m^3/s).
- d: Espacio entre los electrodos (m).

El campo magnético se genera mediante una corriente continua pulsante de polaridad alterna para asegurar la estabilidad del punto cero y conseguir que la medición sea insensible a líquidos no homogéneos o con varias fases y, asimismo, pueda efectuarse en líquidos de baja conductividad ($> 5\mu s/cm$).

De acuerdo al manual de referencia 00809-0100-4662, Rev DA (Rossemount, 2011) este instrumento tiene las siguientes características:

- Máximo tiempo de respuesta: 50ms.
- Señal de salida: 4 – 20mA.
- Magnitud medida: 3.529 – 141.15l/m.

Luego, tomando como referencia la ecuación (2.10), se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{0.1163}{0.05s+1} + 4 \quad (2.12)$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada Figura 2.14.

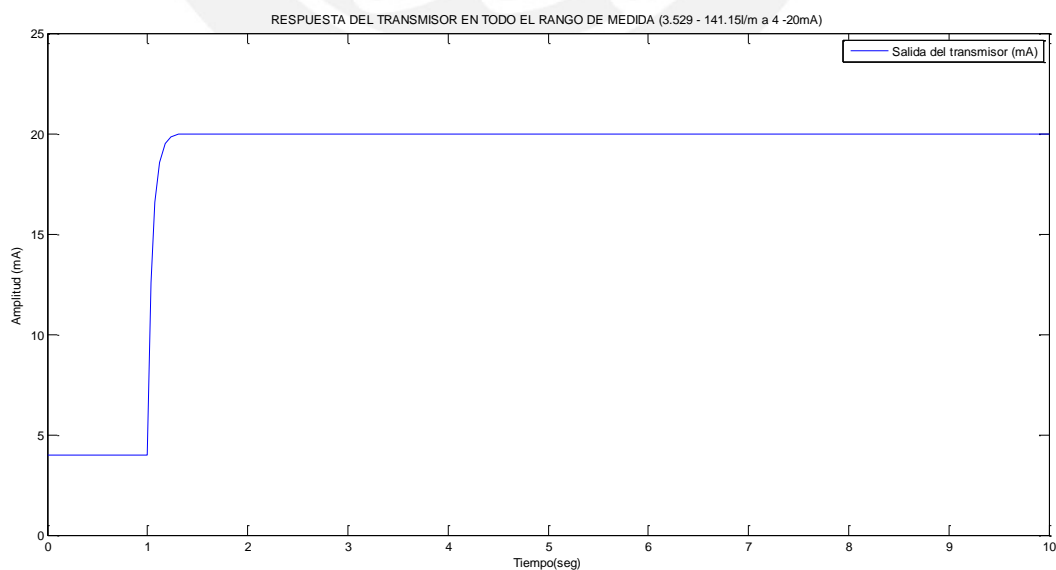


Figura 2.14. Respuesta del transmisor en todo su rango

b) Transmisor de presión de la planta desalinizadora piloto

Este dispositivo mide la presión haciendo uso de un sensor piezoresistivo, el cual se basa en la medida de la variación de resistencia inducida por la deformación en función de la presión (ver Figura 2.15).

Una tracción del conductor aumenta la longitud y reduce la superficie de sección con la consecuencia de un aumento en la resistencia eléctrica. Una deformación en el recalcado tiene el efecto contrario (Rossemount, 2013).

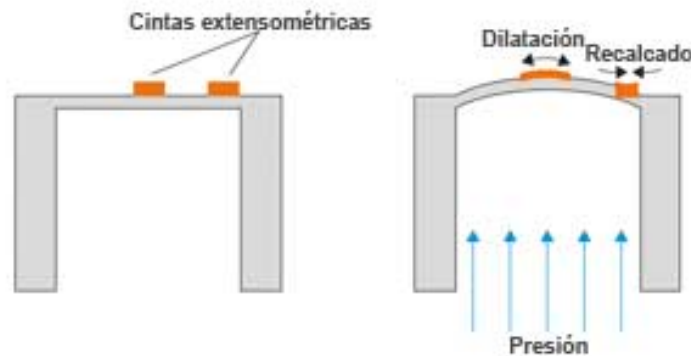


Figura 2.15. Operación del sensor piezoresistivo

Para la realización del principio de medición se utiliza un cuerpo base que se deforma de manera controlada al someterle presión. A menudo este cuerpo consiste de una membrana con una cinta semiconductor incorporada en forma de microestructura.

La ecuación que relaciona la resistencia con los cambios en la presión viene dada por la siguiente ecuación:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.13)$$

Donde:

- R: Resistencia eléctrica.
- ρ : Resistencia específica.
- l: Longitud.
- A: Superficie de sección.

Dado que la microestructura no ofrece gran resistencia al contacto de numerosos medios, esta es encapsulada para la mayoría de aplicaciones, donde la transmisión mediante aceite.

Para los transmisores Rossemount 2051, la presión es aplicada al diafragma. El aceite contrae el sensor y produce una variación de voltaje. Luego, esta señal es tratada por el procesador de señales. La señal tratada es utilizada por el microprocesador para calcular la salida del transmisor. Finalmente, esta señal es enviada al conversor D/A, el cual vuelve a convertir la señal a analógica y la superpone a la señal HART en la línea de 4 – 20mA, como se muestra en la Figura 2.16.

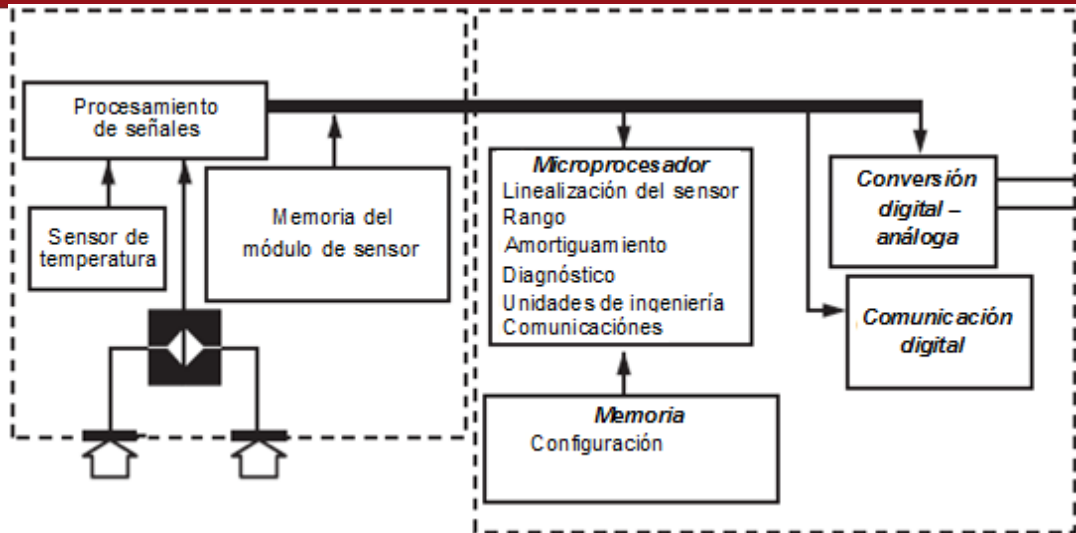


Figura 2.16. Operación del transmisor de presión Rossemount 2051 (Rossemount, 2013)

De acuerdo al manual de referencia 00809-0100-4107, Rev BA (Rossemount, 2013) este instrumento tiene las siguientes características:

- Máximo tiempo de respuesta: 160ms.
- Señal de salida: 4 – 20mA.
- Magnitud medida: 0 – 10000psi.

Luego, tomando como referencia la ecuación (2.10), se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{0.00160}{0.16s+1} + 4 \tag{2.14}$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 2.17.

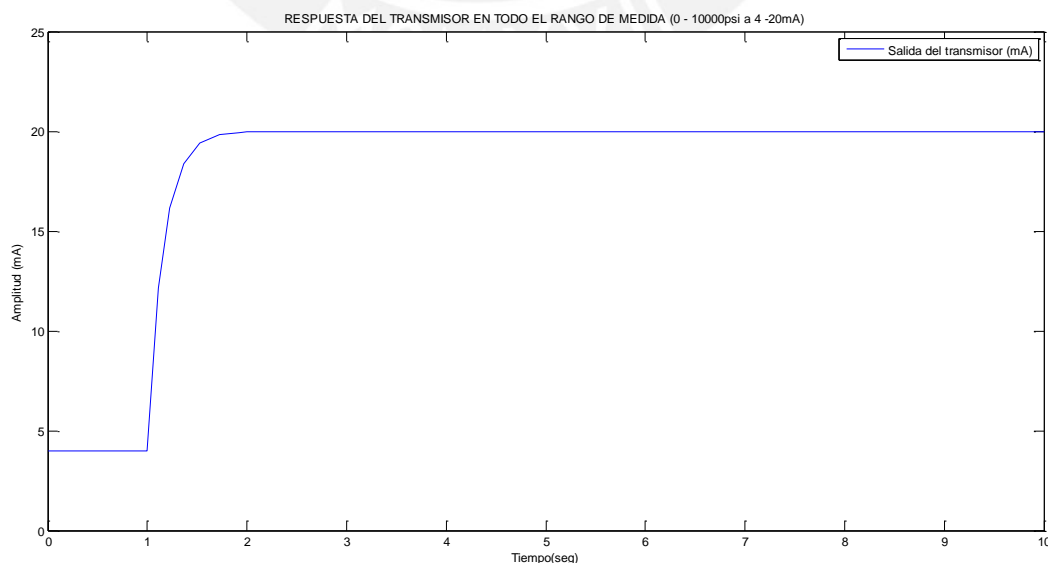


Figura 2.17. Respuesta del transmisor en todo su rango

c) Transmisor de temperatura de la planta desalinizadora piloto

Este dispositivo mide la temperatura haciendo uso de un sensor termoresistivo (RDT) de tipo Pt 100 (ver Figura 2.18).

El Pt100 consiste de un alambre de platino que a 0°C tiene 100ohms de resistencia y que al aumentar su temperatura, aumenta su resistencia eléctrica. El instrumento utilizado en este trabajo utiliza un Pt100 en conexión a 4 hilos (Rossemount, 2015).

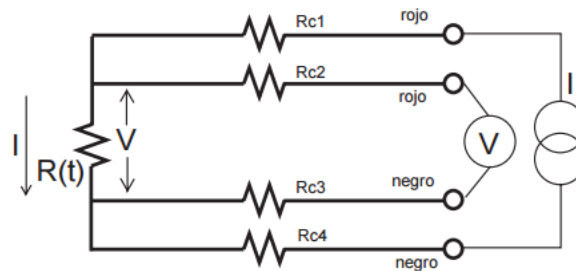


Figura 2.18. Conexión a 4 hilos de una pt100

De acuerdo al manual de referencia 00809-0200-4728, Rev RA (Rossemount, 2015) este instrumento tiene las siguientes características:

- Máximo tiempo de respuesta: 500ms.
- Señal de salida: 4 – 20mA.
- Magnitud medida: 0 – 100°C.

Luego, tomando como referencia la ecuación (2.10), se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{0.160}{0.5s+1} + 4 \quad (2.15)$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 2.19.

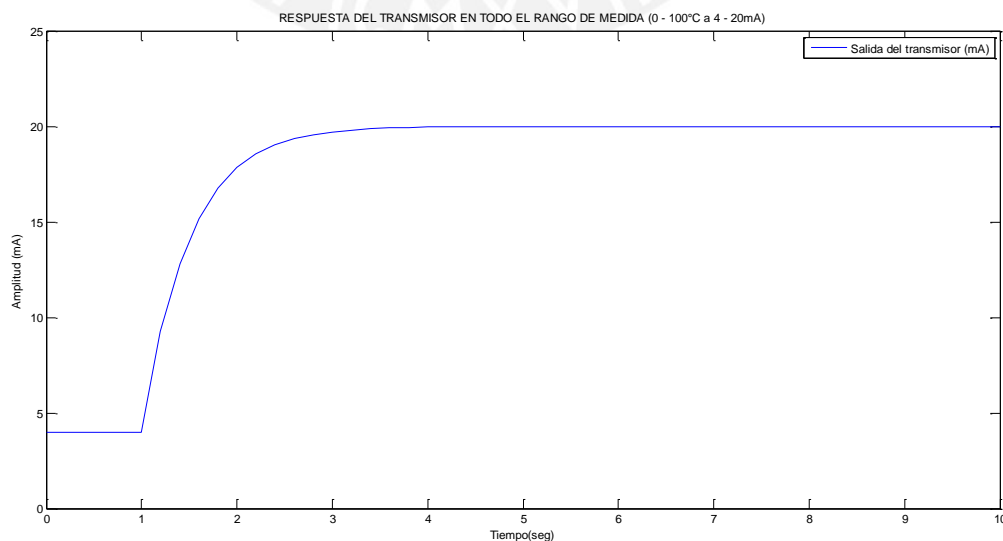


Figura 2.19. Respuesta del transmisor en todo su rango

d) Sensor de PH de la planta desalinizadora piloto

Este dispositivo utiliza un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia para medir el PH. Los dos electrodos vienen montados juntos como se muestra en la Figura 2.20 (Rossemount, 2014).

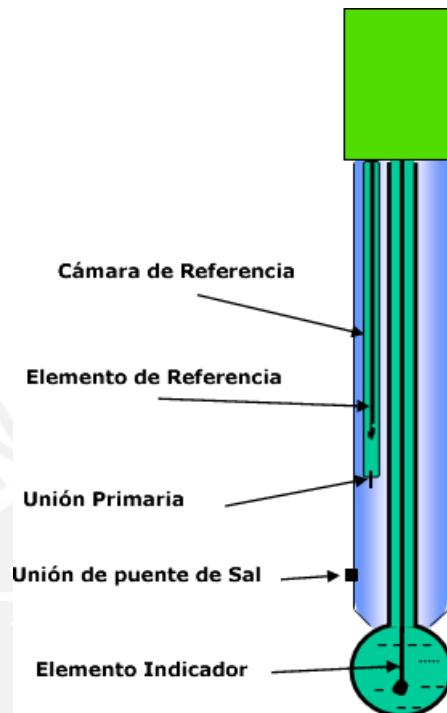


Figura 2.20. Electrodo combinado para medición de PH

El PH se determina midiendo el potencial generado (en milivolts) por el electrodo de vidrio, este potencial se compara con un potencial constante generado por el electrodo de referencia, el cual se encuentra en contacto con el fluido, formando un puente salino.

Este sensor envía la señal medida a un analizador (Rossemount Analytical 1056), el cual realiza una compensación de temperatura mediante un factor de compensación. El analizador también permite enviar la señal por corriente (4 – 20mA) o por protocolo HART.

De acuerdo al manual de instrucción PN 51-1056, Rev J (Rossemount, 2014) este instrumento tiene las siguientes características:

- Máximo tiempo de respuesta: 5s.
- Señal de salida: 4 – 20mA.
- Magnitud medida: 0 – 14.

Luego, tomando como referencia la ecuación (2.10), se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{1.1429}{5s+1} + 4 \quad (2.16)$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 2.21.

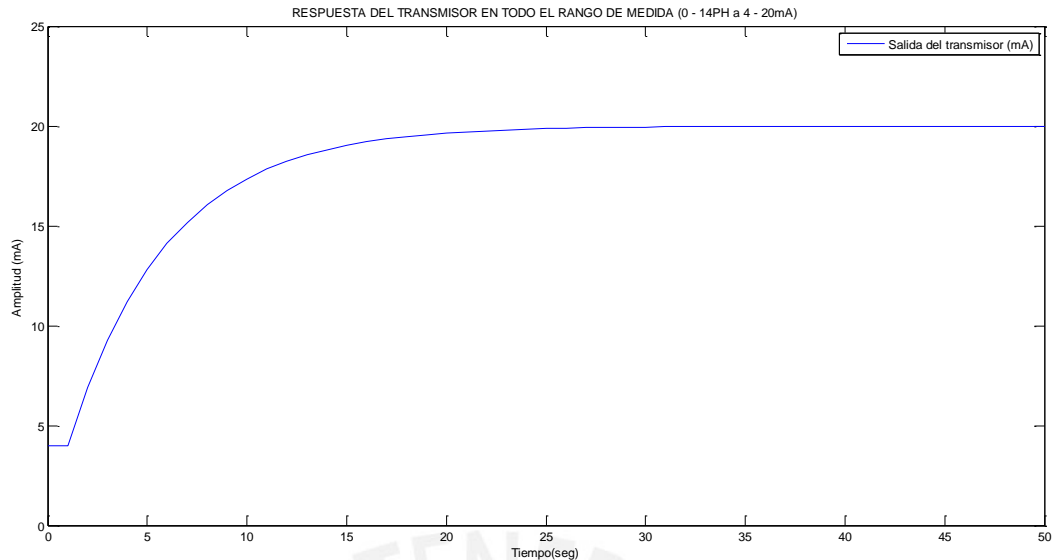


Figura 2.21. Respuesta del sensor en todo su rango

e) Sensor de Conductividad de la planta desalinizador piloto

Este dispositivo realiza la medida de la conductividad eléctrica del agua haciendo uso de dos electrodos ubicados en forma opuesta. Luego, se aplica una magnitud de voltaje AC, el cual genera una corriente en el medio. Esto hace que los cationes y aniones que contiene el medio se muevan de un electrodo hacia otro, generando un medio conductivo (a mayor cantidad de cationes y aniones, mayor será la corriente generada y viceversa). Ver Figura 2.22 (Rossemount, 2014).

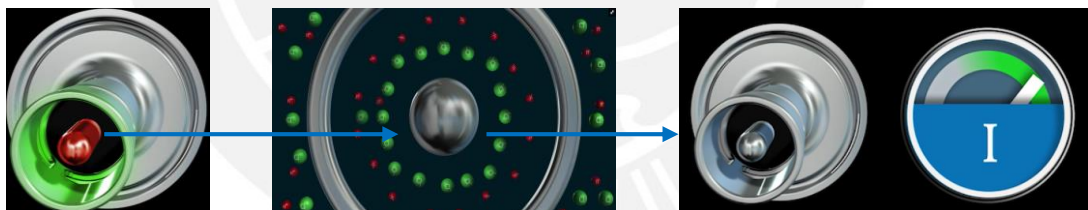


Figura 2.22. Proceso de medición de la conductividad de un fluido

Este sensor envía la señal medida a un analizador (Rossemount Analytical 1056), el cual realiza una compensación de temperatura mediante un factor de compensación. El analizador también permite enviar la señal por corriente (4 – 20mA) o por protocolo HART.

De acuerdo al manual de instrucción PN 51-1056, Rev J (Rossemount, 2014) este instrumento tiene las siguientes características:

- Máximo tiempo de respuesta: 3s.
- Señal de salida: 4 – 20mA.
- Magnitud medida: 0 – 600mS/cm.

Luego, tomando como referencia la ecuación 10, se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{0.0267}{3s+1} + 4 \quad (2.17)$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 2.23.

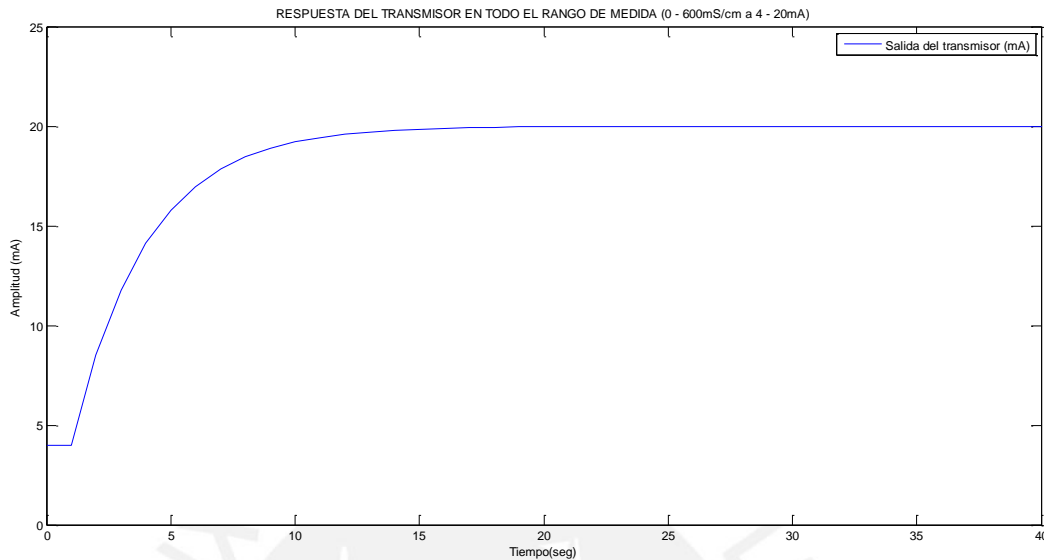


Figura 2.23. Respuesta del sensor en todo su rango

2.3.3. Actuadores

Para el control de la planta desalinizadora piloto, se debe hacer uso de actuadores como una motobomba y una válvula de control proporcional. Para este trabajo se plantea que la motobomba tiene una presión de trabajo constante, y el actuador que realiza la regulación es la válvula de control proporcional, por lo que se debe tener en consideración un modelo que permita identificar las posibles fallas de este actuador.

Válvulas de control proporcional

Las válvulas de control proporcional generan una acción de variación de flujo de un fluido mediante la oposición al mismo. Básicamente se componen de dos partes como se muestra en la Figura 2.24.

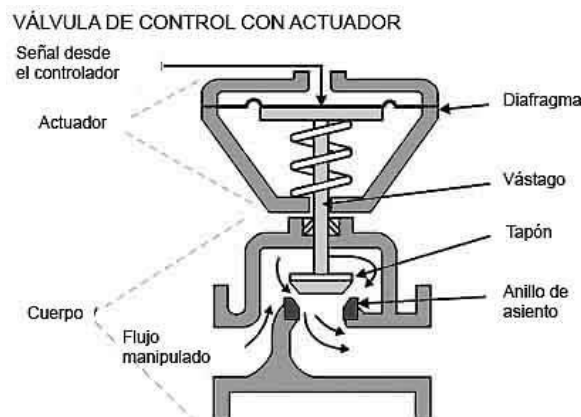


Figura 2.24. Actuar y cuerpo de válvula

Al producirse un movimiento en el vástago, se produce una diferencia de presión en el cuerpo y, por ende, una variación en el flujo de salida. La relación directa entre el movimiento del vástago y el flujo de salida se da en base a la dinámica de la válvula, la cual puede ser radical, lineal o isoporcentual (Fisher, 2013), como se muestra en la Figura 2.25.

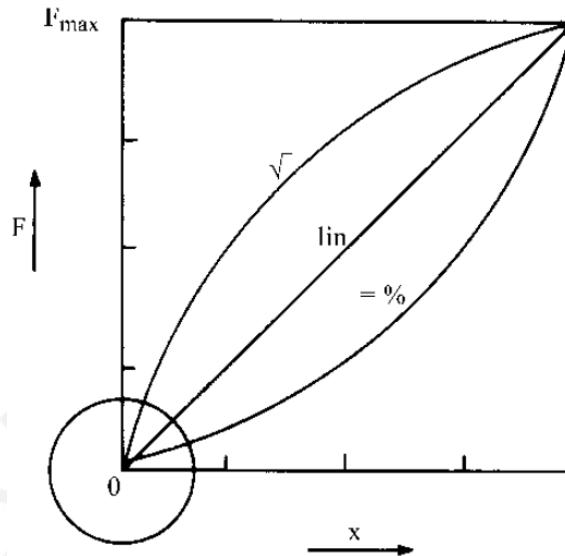


Figura 2.25. Dinámica de una válvula de control proporcional

En este trabajo, las dos válvulas en estudio son lineales, por lo que su dinámica se representa mediante la siguiente ecuación:

$$G_V(s) = \frac{K_a K_v}{T_v s + 1} \quad (2.18)$$

Donde:

- K_a : Ganancia del actuador.

$$K_a = \frac{\text{Rango de variación del desplazamiento del vástago}}{\text{Rango de variación de salida del controlador}} \quad (2.19)$$

- K_v : Ganancia del cuerpo de la válvula.

$$K_v = \frac{\text{Variación del flujo a la salida de la válvula}}{\text{Rango de variación del desplazamiento del vástago}} \quad (2.20)$$

- T_v : Constante de tiempo de la válvula: Dada por el fabricante.

En la práctica, las válvulas de control proporcional generan una pérdida de presión del fluido que atraviesa el cuerpo de la válvula, por lo que su representación práctica se muestra en la Figura 2.26.

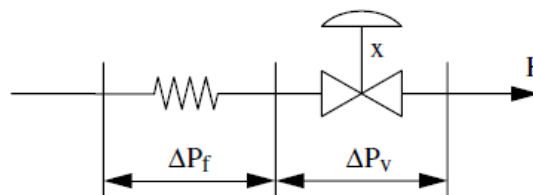


Figura 2.26. Representación práctica de una válvula de control

A la pérdida de presión se le denomina resistencia hidráulica (R_H), y relaciona el flujo a una variación de presión mediante la ecuación 20 (Fisher, 2013).

$$\Delta P_f = R_H F \tag{2.21}$$

Adicionando la ecuación 20 a la ecuación 17, se obtiene la ecuación 21, la cual representa el comportamiento dinámico de una válvula de control proporcional lineal en la práctica:

$$G_V(s) = \frac{K_a K_v}{T_v s + 1} + \frac{1}{R_H} \tag{2.22}$$

Finalmente, se construye un diagrama de bloques con base en la ecuación (2.21) para realizar simulaciones de las válvulas de control en estudio (ver Figura 2.27).

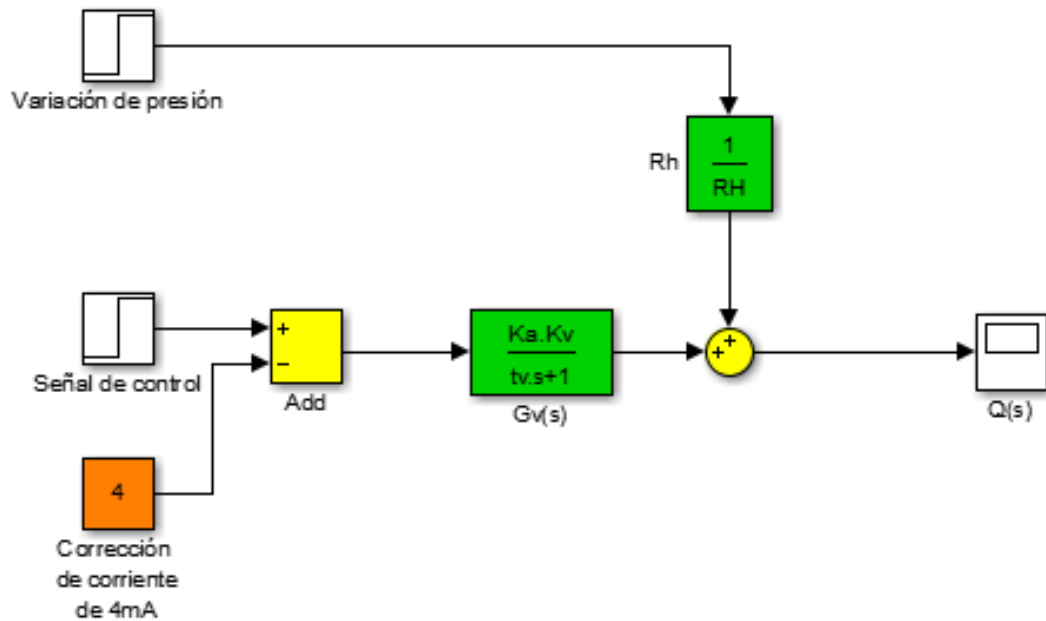


Figura 2.27. Dinámica de una válvula de control proporcional lineal

a) Válvula de control proporcional eléctrica de la planta desalinizadora piloto

Esta válvula trabaja en un rango lineal y con control por tiempo de acuerdo al manual del fabricante (valbia web). Las características se presentan en la Figura 2.28.

MODELO	VB030	VB060	VB110	VB190	VB270	VB350
TIEMPO DE APERTURA (S)	8	9	27	27	50	50
TORQUE	266	530	975	1680	2390	3100
VOLTAJE HT	100 - 240VAC					
MÁXIMA CORRIENTE HT	0.38 - 0.25		0.75 - 0.38			
MÁXIMA POTENCIA HT	38 - 60 VA		75 - 90 VA			
FRECUENCIA	50/60 Hz					
VOLTAJE LT	24V AC/DC					
MÁXIMA CORRIENTE LT	1.25	1.25	2.25	2.25	2.25	2.25
MÁXIMA POTENCIA LT	30 VA	30 VA	55 VA	55 VA	55 VA	55 VA

Figura 2.28. Características de la válvula valbia 030

Como la válvula se maneja bajo una relación, se debe crear una función que exprese el tiempo con el porcentaje de apertura mediante la gráfica presentada en la Figura 2.29.

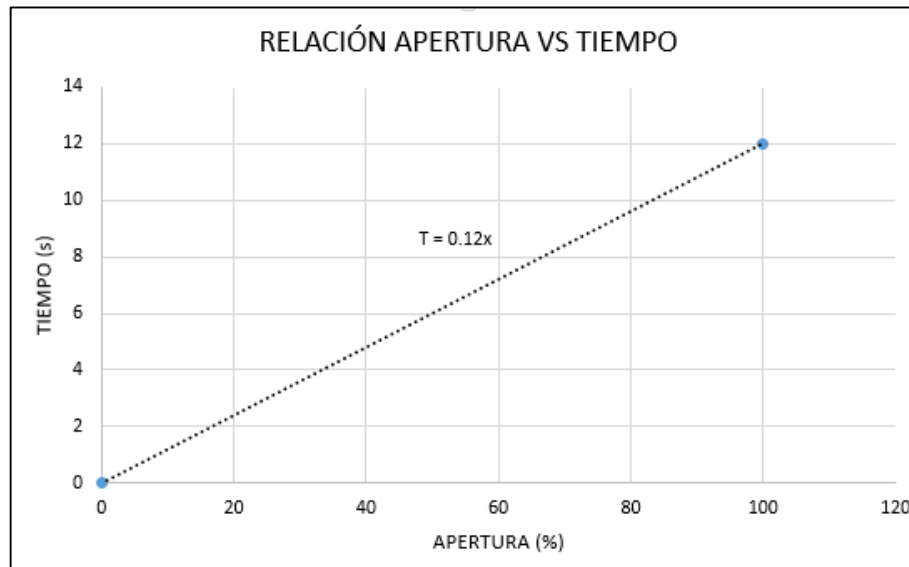


Figura 2.29. Relación entre tiempo y porcentaje de apertura

Con la relación de tiempo y porcentaje de apertura se obtiene una ecuación de orden cero, representada por:

$$T = \frac{T_{MAX}}{100\%} SP \quad (2.23)$$

Donde:

T: Señal de apertura de la válvula en segundos.

T_MAX: Tiempo para abrir la válvula al máximo.

SP: Punto de operación de la válvula.

b) Válvula de control proporcional neumática de la planta de temperatura piloto

De acuerdo al manual de referencia 52.124CVF_SVF (Baumann, 2015), la válvula de control proporcional de la planta de temperatura piloto presenta las siguientes características:

- Máximo tiempo de respuesta: 2s.
- Señal de entrada: 4 – 20mA.
- Dimensión del vástago: 12.7mm
- Resistencia hidráulica: 100
- Ganancia del cuerpo de válvula: 8.

Luego, tomando como referencia la ecuación 21, se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{6.35}{2s+1} + \frac{1}{100} \quad (2.24)$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 2.30.

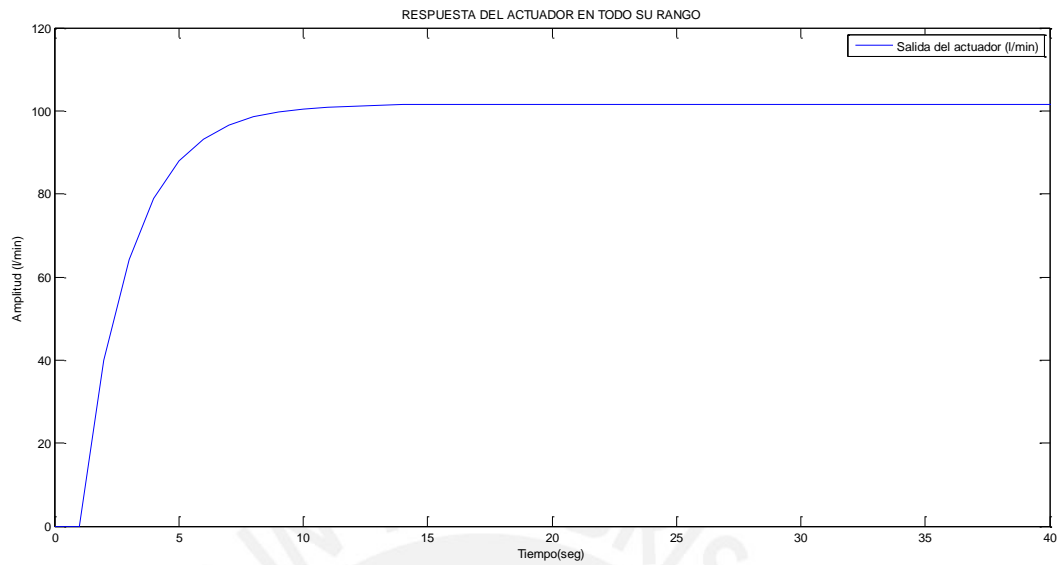


Figura 2.30. Respuesta del actuador en una apertura del 0 al 100%

3. **DESARROLLO DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN CON DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS**

3.1. **Introducción**

Existen diversas metodologías, teóricas y empíricas, para realizar la implementación del sistema de supervisión por computadora de un proceso industrial. Sin embargo, el enfoque de este trabajo radica en la integración de un sistema de detección y diagnóstico de fallos al sistema de supervisión por computadora.

La implementación del sistema de supervisión con detección y diagnóstico de fallas se realiza en el sistema de control distribuido **DeltaV**, el cual cuenta con las herramientas de ingeniería necesarias para el desarrollo de este trabajo.

La configuración del sistema completo se realiza con la herramienta **DeltaV Explorer**, la cual es la herramienta primaria de configuración. Con esta herramienta también se pueden separar los procesos en **Áreas**, las cuales trabajan de forma independiente con enfoque multitarea.

La lectura de las variables de la planta desalinizadora piloto, se realizan mediante la comunicación de los módulos de entrada y salida analógica – HART, del **DeltaV Controller**, con los instrumentos de la planta mediante el uso del protocolo HART, los cuales son previamente configurados mediante el software **AMS Device Manager**.

El algoritmo de detección y diagnóstico de fallos se desarrolla con la herramienta **DeltaV Control Studio**, la cual permite la creación de módulos individuales de forma gráfica. Asimismo, esta herramienta va a representar el enlace principal entre el sistema de supervisión por computadora y el **DeltaV Controller**.

Para el desarrollo del sistema de supervisión por computadora se va a utilizar la herramienta **DeltaV Operate**, la cual contiene gráficos y modelos (**Templates**) prediseñados que van a servir de base para desarrollar nuevos gráficos y modelos con características propias de la planta desalinizadora piloto. Además, para resaltar la capacidad de sistema de control distribuido **DeltaV** se va a integrar una planta de temperatura piloto con detección y diagnóstico de fallas.

3.2. Implementación del sistema de supervisión con detección y diagnóstico de fallos en el DeltaV

3.2.1. Características del Hardware de DeltaV

Se define a DeltaV (DeltaV, 2010) como un sistema digital de automatización (DAS), o como un sistema de control distribuido (DCS); sin embargo, su arquitectura lo define como un sistema híbrido, pues puede realizar aplicaciones de control digital y de procesos continuos, además posee una gran capacidad de comunicaciones para red de datos y control.

Como se puede observar en la Figura 3.1, DeltaV tiene una gran gama de equipos para diferentes aplicaciones; sin embargo, para este trabajo solo se van a definir los módulos a utilizar.

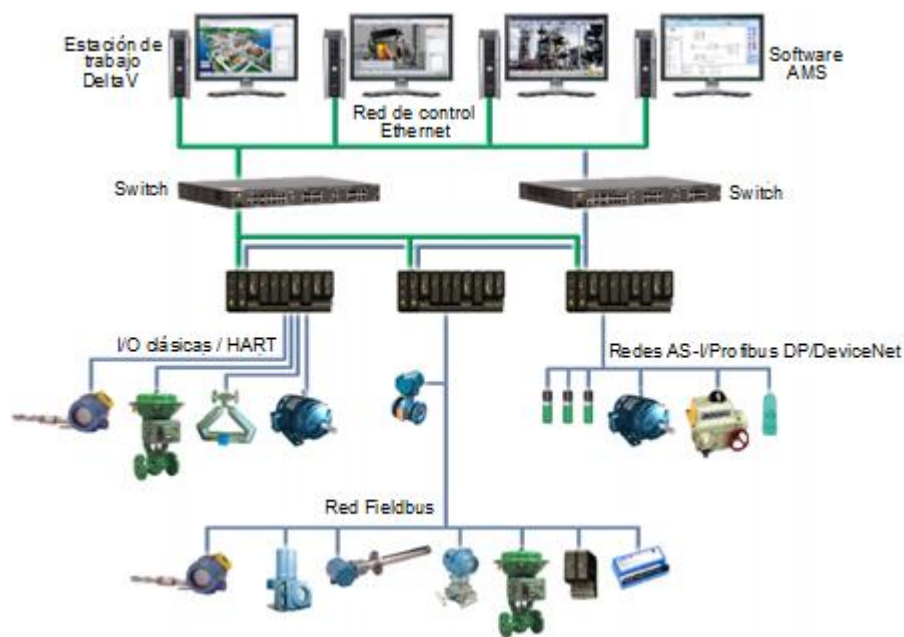


Figura 3.1. Arquitectura del DeltaV

Rack

El rack (ver Figura 3.2) se utiliza para soportar y comunicar a las tarjetas del sistema (fuente, controlador, módulos de entrada y salida, etc.). También, se utiliza para alimentar la red local que comunica a los módulos de entrada y salida con el controlador (DeltaV, 2013)



Figura 3.2. Rack DeltaV

Fuente de alimentación (24VDC)

La fuente de alimentación (ver *Figura 3.3*) se utiliza para realizar una conversión de 24VDC a 12VDC, que es el nivel de voltaje que necesitan los módulos de entrada y salida montados en el rack para comunicarse con el controlador (DeltaV, 2013).



Figura 3.3. Fuente de alimentación 24VDC – 12VDC

DeltaV Controller

Es un controlador que funciona en tiempo real; es decir, es multitarea y completa todas las tareas dentro de un tiempo definido, el cual es controlado por una lista de ejecución (Schedule).

Las tareas se pueden dividir en dos categorías:

- Tareas de control: Se refiere al control del programa almacenado dentro del controlador. Este programa es configurado en forma de tareas que son asociadas a cada parte de un proceso.
- Otras tareas: Se refiere a las tareas relacionadas al hardware. Entre las principales se puede mencionar:
 - Administración de redundancia.
 - Comunicaciones.
 - Diagnóstico del controlador.

DeltaV tiene dos tipos de controlador, serie M (ver *Figura 3.4a*) y serie S (ver *Figura 3.4b*). En este trabajo se va a utilizar el controlador serie S, ya que es el que se tiene disponible en el laboratorio (DeltaV, 2013).



a



b

Figura 3.4. (a) DeltaV serie M, (b) DeltaV serie S

DeltaV I/O

DeltaV cuenta con un gran número de módulos de entrada y salida con diferentes características tecnológicas; sin embargo, para este trabajo solo se van a utilizar cuatro tipos de módulos I/O:

- Módulo de entradas digitales 24VDC aislado.
- Módulo de salidas digitales 24VDC aislado.
- Módulo de entradas analógicas – HART.
- Módulo de salidas analógicas – HART.

a) Módulo de entradas digitales 24VDC aislado

Este módulo va conectado a los sensores digitales del proceso, como los presotatos, finales de carrera, pulsadores, etc. Al ser un módulo aislado, necesita de una fuente de alimentación externa de 24VDC (ver Figura 3.5).

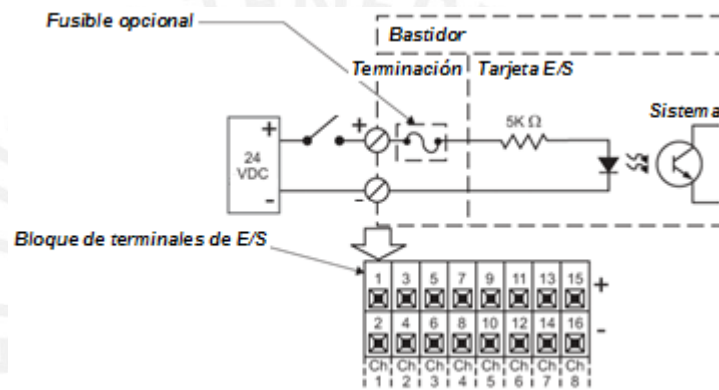


Figura 3.5. Módulo de entradas digitales 24VDC aislado (DeltaV, 2013)

b) Módulo de salidas digitales 24VDC aislado

Este módulo va conectado a los actuadores digitales del proceso, como las válvulas solenoide, cilindros neumáticos, bombas, etc. Al ser un módulo aislado, necesita de una fuente de alimentación externa de 24VDC (ver Figura 3.6).

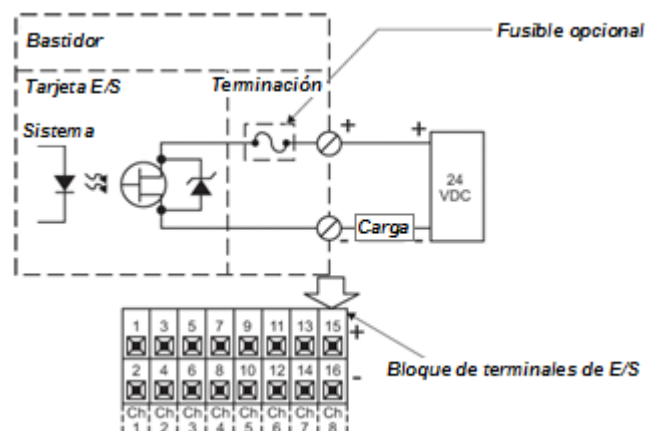


Figura 3.6. Módulo de salidas digitales 24VDC aislado (DeltaV, 2013)

c) Módulo de entradas analógicas – HART

Este módulo va conectado a los sensores analógicos del proceso, como los transmisores de presión, temperatura, flujo, etc. También tiene la capacidad de comunicarse mediante el protocolo HART a instrumentos inteligentes con un tiempo de escaneo de 600 – 800ms por canal habilitado (ver *Figura 3.7*).

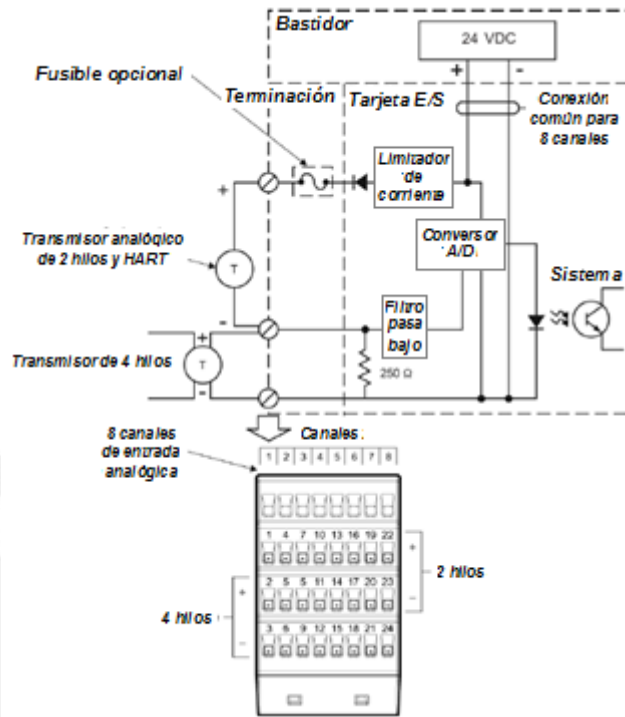


Figura 3.7. Módulo de entradas analógicas – HART (DeltaV, 2013)

d) Módulo de salidas analógicas – HART

Este módulo va conectado a los sensores analógicos del proceso, como las válvulas de control proporcional, variadores de frecuencia, etc. También tiene la capacidad de comunicarse mediante el protocolo HART a instrumentos inteligentes con un tiempo de escaneo de 600 – 800ms por canal habilitado (ver *Figura 3.8*).

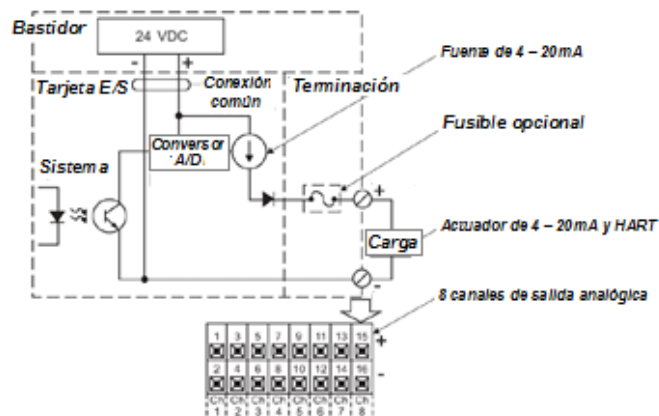


Figura 3.8. Módulo de salidas analógicas – HART (DeltaV, 2013)

3.2.2. Configuración del DeltaV Explorer

DeltaV Explorer

Es la herramienta principal para la configuración del sistema. Presenta todo el sistema en una simple vista que permite un acceso directo a cualquier otra herramienta del sistema. Esta herramienta también incluye la configuración y comisionamiento de dispositivos inteligentes como los que utilizan el protocolo Foundation fieldbus, Profibus DP y HART (ver *Figura 3.9*).

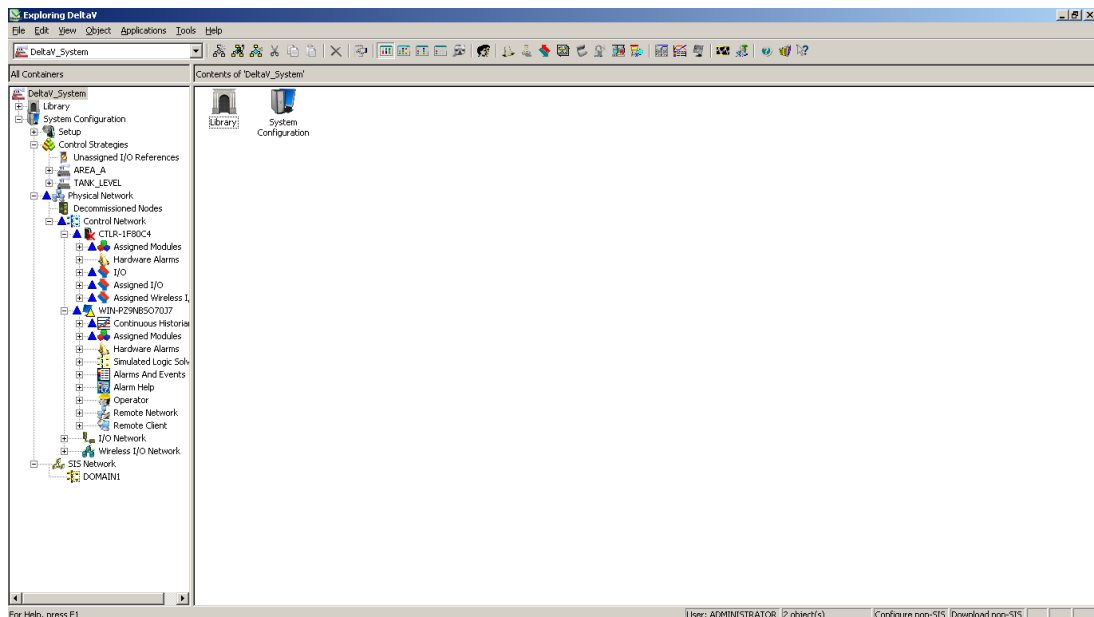


Figura 3.9. DeltaV Explorer

Configuración de Hardware

a) Configuración de la estación de trabajo

Existen dos divisiones en el tipo de estación de trabajo, cada una con un conjunto de subdivisiones que especifican el uso que se da al **DeltaV**, las cuales son:

- Estación de trabajo en la red de control
 - ProfessionalPlus: Provee la capacidad de configuración, operación y mantenimiento, pues posee la base de datos del sistema. Además, debe haber solo una de estas estaciones en la red de control, la cual debe ser la primera en configurarse.
 - Inter-Zone Server: Usada para comunicar datos de operación entre estaciones.
 - Local Professional: Usada para ingeniería, operación y comunicación.
 - Local Operator: Básicamente es usada para operación, aunque se pueden realizar ciertas configuraciones y para mantenimiento dependiendo de los privilegios asignados por el administrador.

- Local Base: Usada para correr un software de aplicación específico de **DeltaV**.
- Local Application Station: Utilizado para integrar el sistema **DeltaV** con otros procesos y sistemas de gestión.
- Estación de trabajo no localizada en la red de control
 - Remote Professional: Usada para ingeniería, operación y comunicaciones, fuera de la red de control **DeltaV**.
 - Remote Operator: Usada para operación, aunque se pueden realizar ciertas configuraciones y para mantenimiento dependiendo de los privilegios asignados por el administrador, fuera de la red de control **DeltaV**.
 - Remote Base: Usada para correr un software de aplicación específico de **DeltaV**, fuera de la red de control **DeltaV**.
 - Remote Application: Utilizado para integrar el sistema **DeltaV** con otros procesos y sistemas de gestión, fuera de la red de control **DeltaV**.

La configuración de la estación de trabajo se realiza desde la herramienta **DeltaV Workstation Configuration** (Figura 3.10) al instalar el software en la estación de trabajo. Sin embargo, este procedimiento se puede realizar luego, para esto la base datos debe estar detenida y todos los programas deben estar cerrados (DeltaV, 2010).

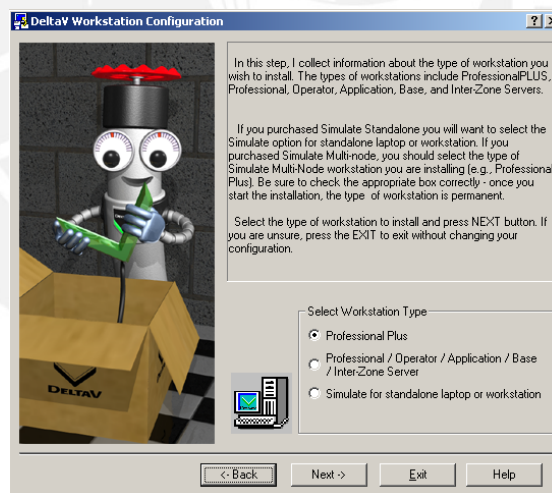


Figura 3.10. DeltaV Workstation

Para este trabajo, se va a instalar una estación de trabajo ProfessionalPlus.

b) Configuración del DeltaV Controller

Existen dos estados del controlador:

- Decomisionado: Este es el estado en el que se encuentra el controlador cuando se conecta a la estación de trabajo por primera vez.
- Comisionado: Este es el estado en el que se encuentra el controlador luego de estar configurado dentro de la red de control.

Para realizar el comisionamiento del **DeltaV Controller** se debe utilizar la herramienta **Configuration Assitant** (ver Figura 3.11), la cual indica todos los pasos necesarios para la configuración (DeltaV, 2010).



Figura 3.11. Configuration Assistant

c) Configuración de los módulos I/O

Luego de comisionar el **DeltaV Controller**, todos los módulos I/O son reconocidos y quedan grabados dentro de la red de control **DeltaV**, como se muestra en la Figura 3.12 (DeltaV, 2010).

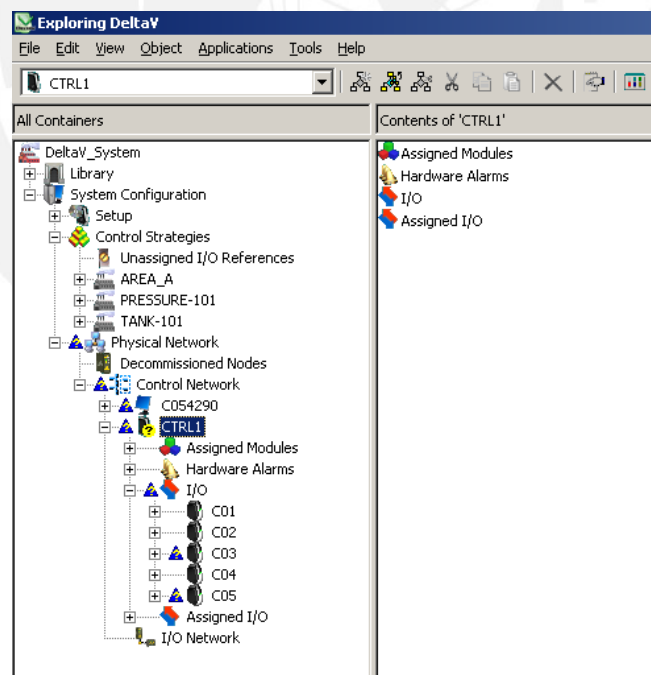


Figura 3.12. Red de control DeltaV

Todos los canales de los módulos I/O se encuentran deshabilitados por defecto, por esto se deben habilitar los canales a utilizar. Para el caso de los módulos I/O analógicos, se debe elegir entre dos tipos de canal:

- Canal analógico: Señal de 4-20mA.

- Canal analógico HART: Señal de 4-20mA y parámetros adicionales del instrumento transmitidos por el protocolo HART. Este es el tipo de canal que se va a utilizar en este trabajo (ver Figura 3.13).

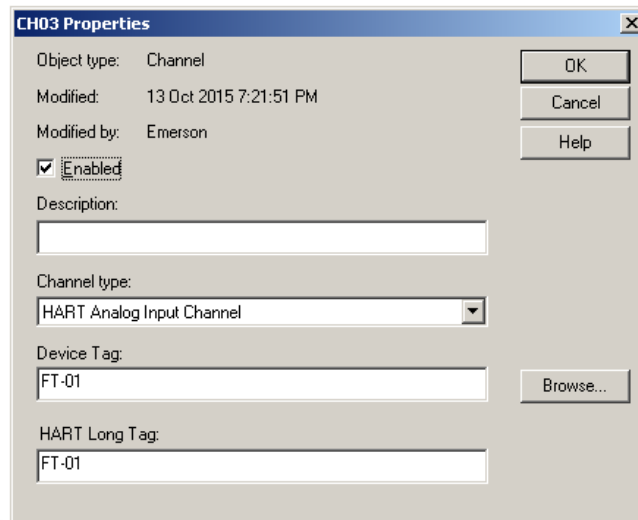


Figura 3.13. Configuración de un canal analógico

Para poder enlazar a los equipos de campo con las herramientas de **DeltaV** es recomendable asignarles un sobrenombre (Tag) que represente las características principales del equipo como se muestra en la Tabla 3.1 y la Tabla 3.2.

Tabla 3.1. Equipos de la planta desalinizadora piloto

Módulo	Canal	Equipo	Descripción
DI	CH01	LSVO – D01	Sensor de válvula completamente abierta.
	CH02	LSVC – D01	Sensor de válvula completamente abierta.
DO	CH01	CV – D01	Válvula de control proporcional del rechazo.
AI	CH01	CS – D01	Analizador de concentración.
		PHS – D01	Analizador de PH.
	CH02	FT – D01	Transmisor de flujo de permeado.
	CH03	TT – D01	Transmisor de temperatura de ingreso.
	CH04	PT – D01	Transmisor de presión de ingreso.
	CH05	FDF – D01	Valor de velocidad al variador de frecuencia.
AO	CH01	FDC – D01	Cambiar velocidad del variador de frecuencia.

Tabla 3.2. Equipos de la planta de temperatura piloto

Módulo	Canal	Equipo	Descripción
AI	CH06	FT – T01	Transmisor de flujo de salida.
AO	CH01	CV – D01	Válvula de control proporcional de entrada.

d) Configuración de áreas y módulos

DeltaV trabaja bajo jerarquías (ver Figura 3.14), de modo que es más fácil distribuir el control de uno o varios procesos en modo multitarea (DeltaV, 2010). Existen seis jerarquías:

- **Planta:** La planta se refiere al proceso completo.
- **Área de planta:** Se refiere a las divisiones que se hacen en una planta para poder controlar cada subproceso en forma independiente. En una estación ProfessionalPlus se pueden tener hasta 100 áreas de planta incluyendo áreas remotas.
- **Módulos:** Los módulos son la entidad de control más pequeña del sistema, los que contienen algoritmos, condiciones, alarmas, mensajes, información histórica, y otras características que definen el proceso. En una estación ProfessionalPlus, se pueden tener hasta 255 módulos por área de planta. Se debe tener en cuenta que la prioridad de ejecución de los módulos se relacionan en forma inversa con su tiempo de escaneo (Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Prioridad de ejecución de los módulos

Tiempo de escaneo	Prioridad
100ms, 200ms	Alta
500ms, 1s, 2s	Media
5s o mayor	Baja

- **Algoritmos:** Es la secuencia lógica que define el comportamiento de un módulo. Los algoritmos pueden ser representados en bloques de función o en cartas de función secuencial (SFC/Grafcet).
- **Bloques de función:** Son bloques pre-programados que presentan característica de uso cotidiano, como bloques PID, de temporización, de conteo, etc. También, existen bloques de función en los cuales se puede crear un algoritmo de forma personalizada. En un controlador se pueden tener hasta 250 bloques de función.
- **Parámetros:** Son datos definidos por el usuario que se utilizan para el cálculo y lógica del algoritmo de un módulo.

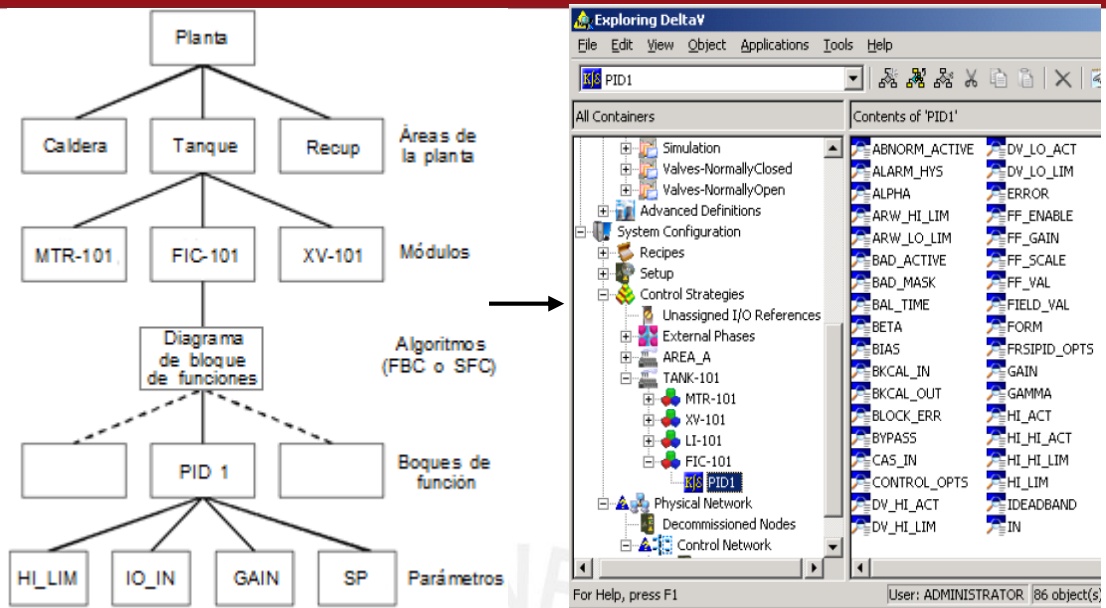


Figura 3.14. Jerarquías de DeltaV

Para este trabajo se crearon dos áreas de planta, una para la planta desalinizadora piloto y otra para la planta de temperatura piloto. Las jerarquías de la planta desalinizadora piloto se muestra en la Figura 3.15a, y las de la planta de temperatura piloto se muestran en la Figura 3.15b.

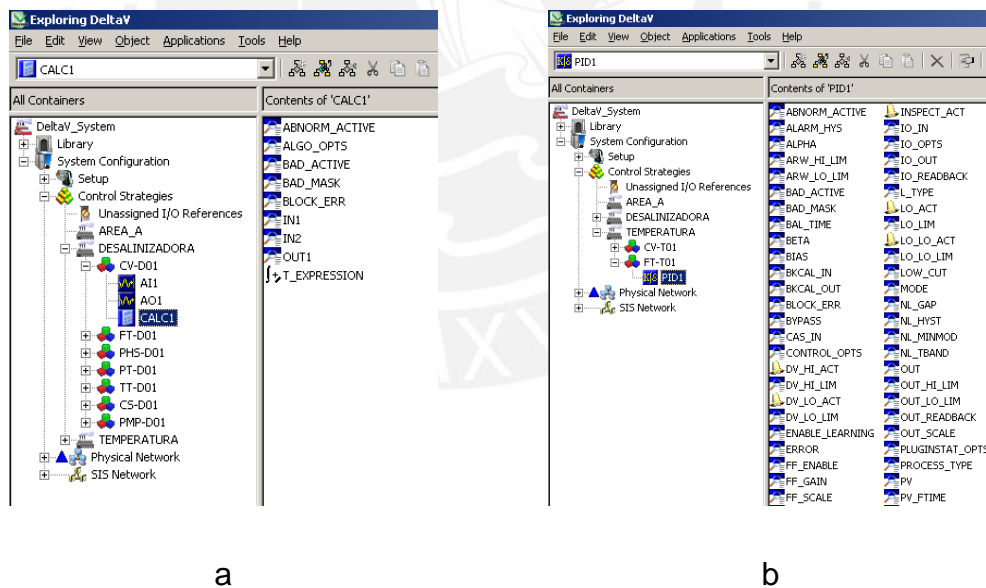


Figura 3.15 (a) Jerarquía para la planta piloto desalinizadora de agua de mar, (b) Jerarquía para la planta piloto de temperatura

e) Asignación de alarmas e históricos

En **DeltaV** cada estación de trabajo almacena datos históricos, alarmas y eventos. Los datos históricos son monitoreados y almacenados por el subsistema **Continuous Historian**, y los eventos y alarmas son almacenados por el subsistema **Alarms and Events**.

Para que el sistema funcione de forma correcta, todas las áreas involucradas en un proceso, deben ser asignadas al subsistema **Continuous Historian** o al subsistema **Alarm and Events** (ver Figura 3.16), si un área no es asignada no se almacenará ningún parámetro en la base de datos y por lo tanto no se podrán realizar modificaciones en tiempo real desde la estación de trabajo.

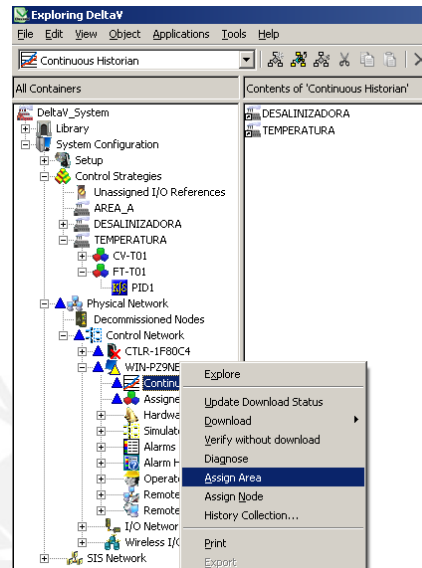


Figura 3.16. Asignación de áreas

3.2.3. Desarrollo de los algoritmos de detección y diagnóstico de fallas en el DeltaV Control Studio

3.2.3.1. DeltaV Control Studio

Es la herramienta donde se programan los algoritmos que contienen los módulos, se puede realizar la programación en bloques de función, en cartas de función secuencial (SFC/Grafcet) o en combinación de estas dos. Cuando no se encuentra un bloque de función que cumpla con las características necesarias que se requieren, se pueden utilizar los bloques **Calc** para programar expresiones que cumplan con nuestros requisitos.

3.2.3.2. Desarrollo de los algoritmos de detección y diagnóstico de fallas

El enfoque de este trabajo es de detección y diagnóstico de fallas, por lo tanto es de supervisión del sistema, por lo que no es necesario programar una estrategia de control o un bloque de cartas de función secuencial (SFC/Grafcet).

En el **Control Studio** no existen algoritmos de detección y diagnóstico de fallas, por lo que estos fueron programados en un bloque **Calc**. Además, para complementar a los bloques **Calc** se van a utilizar bloques de función estándar para comunicaciones I/O y temporización.

Los bloques **Calc** (ver Figura 3.17), se programan mediante expresiones que son representaciones en texto estructurado las cuales cumplen con el estándar IEC 61131-3.

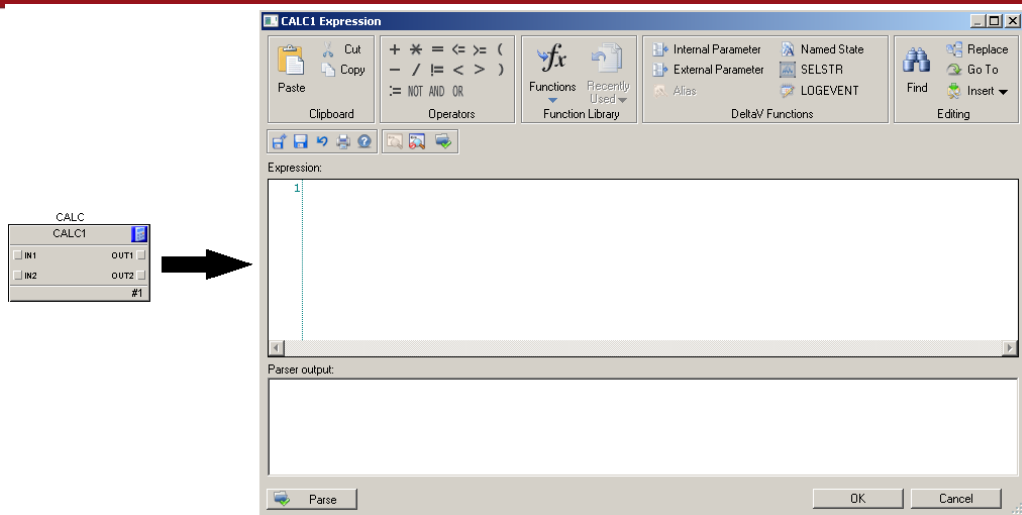


Figura 3.17. Programación de expresiones en texto estructurado

Se necesita crear bloques de detección y diagnóstico de fallas para todos los transmisores y para las válvulas de control proporcional de cada área según las Tablas 3.1 y 3.2. Sin embargo, no es necesario crear un módulo para cada instrumento, pues basta con crear un modelo de módulo (Template) para equipos con características similares. Es así que se van a crear cuatro modelos de módulos, los cuales se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Modelos de módulos

<i>Modelo de módulo</i>	<i>Descripción</i>
FDPV	Detección de fallas de válvula neumática.
FDEV	Detección de fallas de válvula eléctrica.
FDT	Detección de fallas de transmisor.

También es necesario desarrollar un módulo de detección y diagnóstico de fallas para toda la planta desalinizadora piloto, relacionando sus variables mediante el modelo de la planta mostrado en el capítulo 2 y tomando ciertas características de los sistemas expertos.

Para la detección de fallas se van a utilizar los datos de entradas y salidas de campo (analógico y digital), así como la información obtenida por el protocolo HART, la cual se distribuye de la siguiente manera:

- Todos los dispositivos HART
 - COLD_START (bit #5): Indica si el dispositivo HART se reinició.
 - CONFIG_CHANGED (bit #6): Indica si la configuración del dispositivo HART cambió.
 - DEV_MALFUNC (bit #7): Indica que el dispositivo HART se encuentra funcionando de manera incorrecta.

- HART_FIELD_VAL: Valor de 4 – 20mA leído por el protocolo HART.
- HART_PV: Primera variable del dispositivo HART.
- HART_SV: Segunda variable del dispositivo HART.
- HART_TV: Tercera variable del dispositivo HART.
- HART_FV: Cuarta variable del dispositivo HART.
- HINTEG: Indica si existe algún error en el protocolo HART.
- MORE_STATUS (bit #4): Indica si existen detalles adicionales en los dispositivos HART.
- NO_COMM: Indica si la comunicación con los dispositivos HART se detuvo o nunca se inició.
- NPV_PAST_LIM (bit # 1): Indica si alguna de las variables que no son primarias se encuentran fuera de los límites.
- PV_PAST_LIM (bit #0): Indica que la variable principal del dispositivo HART está fuera de los límites.
- Solo actuadores HART
 - PV_FIXED (bit #3): Indica si el valor fijado para un actuador HART fue alcanzado.
 - PV_SAT (bit #2): Indica que el valor alcanzado por un actuador HART está fuera de los límites.

a) FDPV

Este modelo de módulo toma los valores leídos en el **DeltaV Controller** por protocolo HART y el valor enviado por señal de 4 – 20mA hacia el actuador. También, se tiene en cuenta el retardo ocasionado por la dinámica de la válvula antes de indicar una falla. Con estas características se desarrolla un diagrama de flujo (ver Figura 3.18), donde muestra la operación del algoritmo desarrollado en el bloque **Calc**, con el cual se detectan cinco fallas de acuerdo a la Tabla 3.5.

Tabla 3.5

FALLAS	VALOR
Sin falla	0
Falta de corriente a la entrada.	1
Falta de presión a la entrada.	2
Bloqueo de válvula.	3
Malfuncionamiento interno.	4
Error en la comunicación.	5

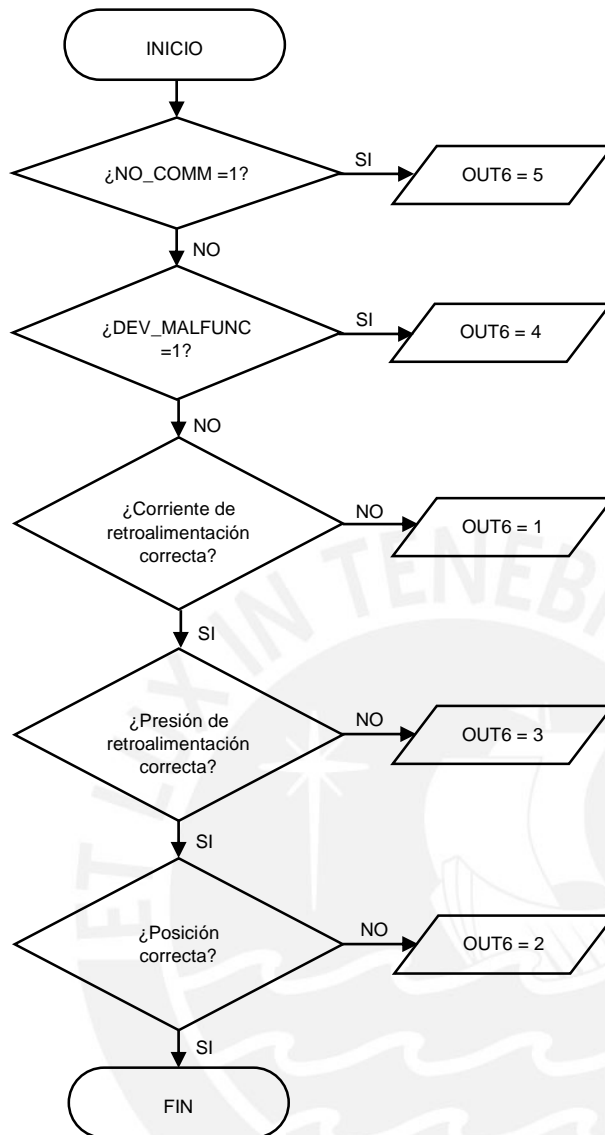


Figura 3.18. Diagrama de flujo del bloque de detección y diagnóstico de fallas para el modelo de módulo FDPV

Luego de desarrollar el diagrama de flujo, se implementa el programa en el **Control Studio** (ver Figura 3.19), el cual lee los valores obtenidos por protocolo HART mediante las cuatro primeras entradas:

- IN1: Medida de la posición actual en corriente
- IN2: Medida de la posición solicitada en porcentaje.
- IN3: Medida de la presión en la posición actual en psi.
- IN4: Medida de la posición actual en porcentaje.

La entrada IN5 sirve para borrar las alarmas luego de solucionar los problemas con la válvula.

Las salidas OUT1, OUT2, OUT3, y OUT4 corresponden a los valores de las primeras cuatro entradas, pero en unidades de ingeniería.

La salida OUT5 sirve para activar un temporizador que emula al retardo originado por la dinámica de la válvula.

La salida OUT6 muestra el código de fallas.

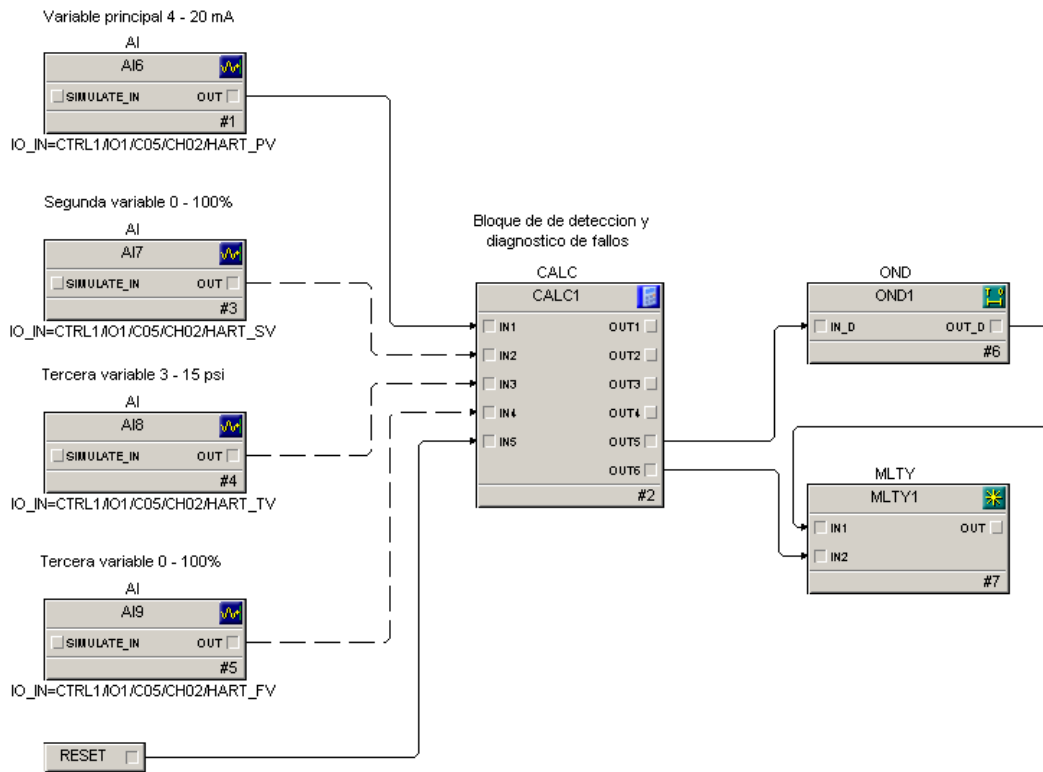


Figura 3.19. Modelo de módulo FDPV

b) FDEV

Este modelo de módulo detecta fallas en la válvula eléctrica, basándose en la posición totalmente abierta o totalmente cerrada, leída por el **DeltaV Controller**. También toma como referencia el valor de la señal enviada hacia el actuador. Con estas características se desarrolla un diagrama de flujo (ver Figura 3.20), donde muestra la operación del algoritmo desarrollado en el bloque **Calc**, con el cual se detectan tres fallas de acuerdo a la Tabla 3.6.

Tabla 3.6

FALLAS	VALOR
Sin falla	0
Falla de posición totalmente cerrada.	1
Falla de posición totalmente abierta.	2
Falla de comunicación.	3

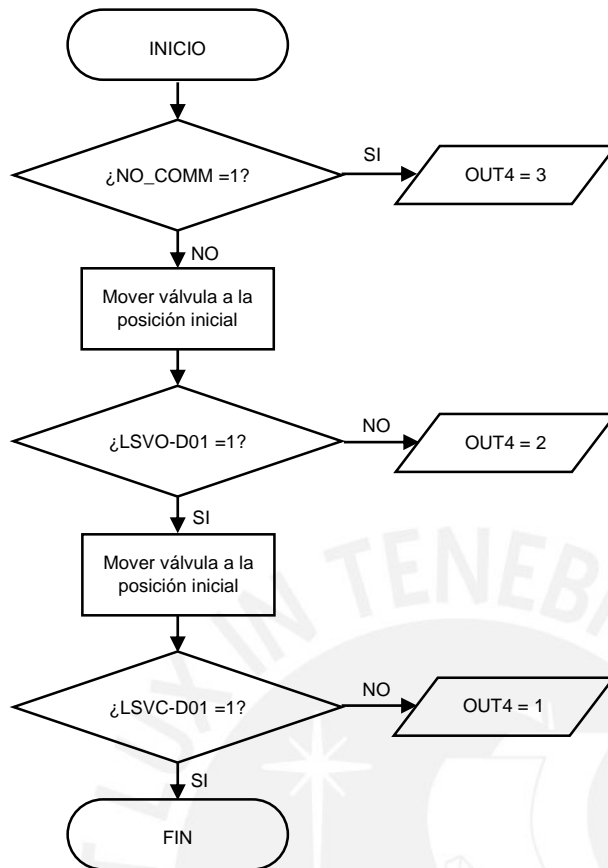


Figura 3.20. Diagrama de flujo del bloque de detección y diagnóstico de fallas para el modelo de módulo FDEV

Luego de desarrollar el diagrama de flujo, se implementa el programa en el **Control Studio** (ver Figura 3.21), el cual lee los valores obtenidos por los sensores LSVO-D01 y LSVC-D01 mediante las dos últimas entradas:

- IN4: Sensor de posición totalmente abierto.
- IN5: Sensor de posición totalmente cerrado.

La entrada IN3 sirve para borrar las alarmas luego de solucionar los problemas con la válvula.

Las dos primeras entradas sirven para recibir comandos que indiquen abrir o cerrar la válvula:

- IN1: Abrir válvula.
- IN2: Cerrar válvula.

La salida OUT1 sirve para activar un temporizador que activa la apertura de la válvula.

La salida OUT3 sirve para activar un temporizador que activa el cerrado de la válvula.

La salida OUT2 sirve para activar la actuación sobre las salidas.

La salida OUT4 muestra el código de fallas.

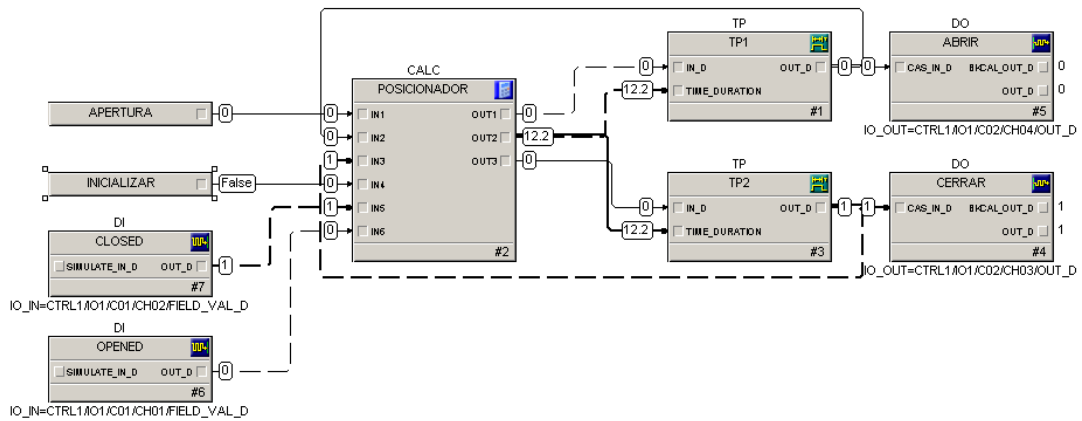


Figura 3.21. Modelo de módulo FDEV

c) FDT

Este modelo de módulo detecta y fallas en los transmisores, basándose en los valores leídos en el **DeltaV Controller** obtenidos por el protocolo HART. Con estas características se desarrolla un diagrama de flujo (ver Figura 3.22), donde muestra la operación del algoritmo desarrollado en el bloque **Calc**, con el cual se detectan tres fallas de acuerdo a la Tabla 3.7.

Tabla 3.7.

FALLAS	VALOR
Sin falla	0
Falla por temperatura alta.	1
Falla interna del transmisor.	2
Falla de comunicación.	3

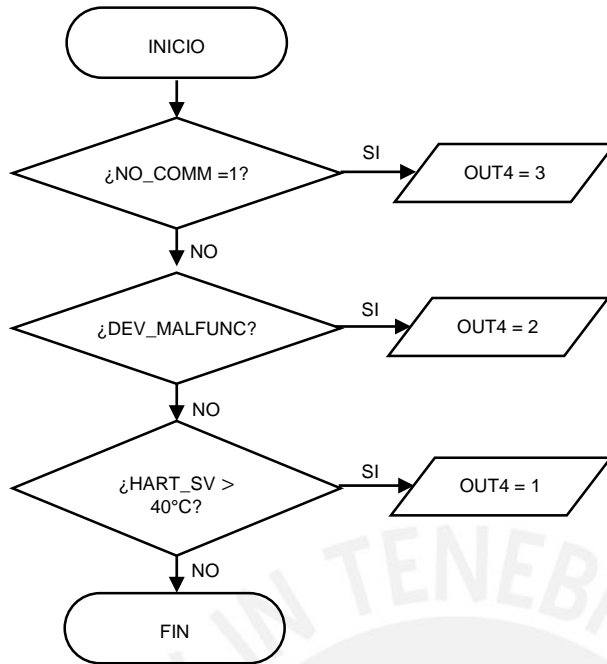


Figura 3.22. Diagrama de flujo del bloque de detección y diagnóstico de fallas para el modelo de módulo FDT

Luego de desarrollar el diagrama de flujo, se implementa el programa en el **Control Studio** (ver Figura 3.23), el cual lee el valor obtenido por la señal de 4 – 20mA y los valores obtenidos por las tres variables principales del protocolo HART:

- IN1: Valor de la señal de 4 – 20mA.
- IN2: Valor primario del protocolo HART (señal del transmisor).
- IN3: Valor secundario del protocolo HART (Totalizador).
- IN4: Valor Terciario del protocolo HART (Temperatura del transmisor).

La salida OUT4 muestra el código de fallas.

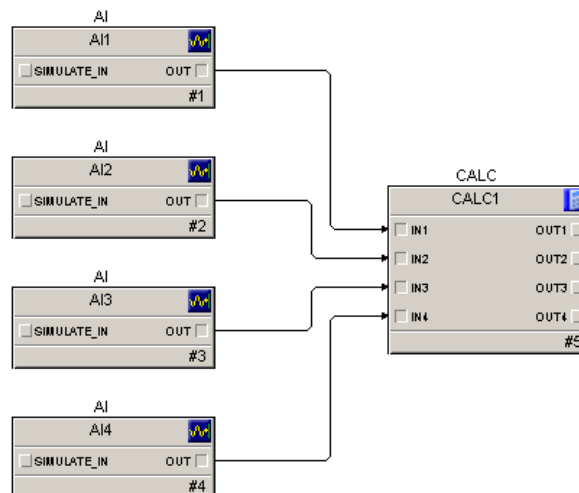


Figura 3.23. Modelo de módulo FDT

3.2.4. Desarrollo del sistema de supervisión en el DeltaV Operate

3.2.4.1. DeltaV Operate

En esta aplicación de **DeltaV** se desarrollan las pantallas de supervisión y se muestra toda la información importante como alarmas, históricos, tendencias, etc., al operador.

3.2.4.2. Desarrollo del sistema de supervisión

Existen diversas metodologías y procedimientos para diseñar un sistema de supervisión por computadora. Para este trabajo se va a seguir una convención de colores, los cuales van a informar de manera rápida el estado de un dispositivo de acuerdo a la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Estados de un dispositivo

ESTADO	COLOR
Normal	Color original
Alarma por señal fuera de los límites inferiores y superiores.	Amarelo
Falla externa de un dispositivo.	Verde
Falla interna de un instrumento.	Naranja
Falla por falta de comunicación.	Negro

a) Pantallas de supervisión

Estas pantallas son diseñadas para representar el proceso real y mostrar todas las variables de forma inmediata. Para este trabajo se desarrollaron cinco pantallas:

- Pantalla de supervisión de la planta piloto de temperatura (ver Figura 3.24).
- Pantalla de supervisión de la planta piloto desalinizadora de agua de mar – Etapa de pretratamiento y filtrado de agua (ver Figura 3.25).
- Pantalla de supervisión de la planta piloto desalinizadora de agua de mar – Etapa de desalinización de agua (ver Figura 3.26).
- Pantalla de supervisión de la planta piloto desalinizadora de agua de mar – Etapa de almacenamiento de agua fresca y agua salda (ver Figura 3.28).

Las pantallas que muestran las alarmas y demás información no son desarrolladas, pues ya viene pre diseñadas en **DeltaV Operate**.

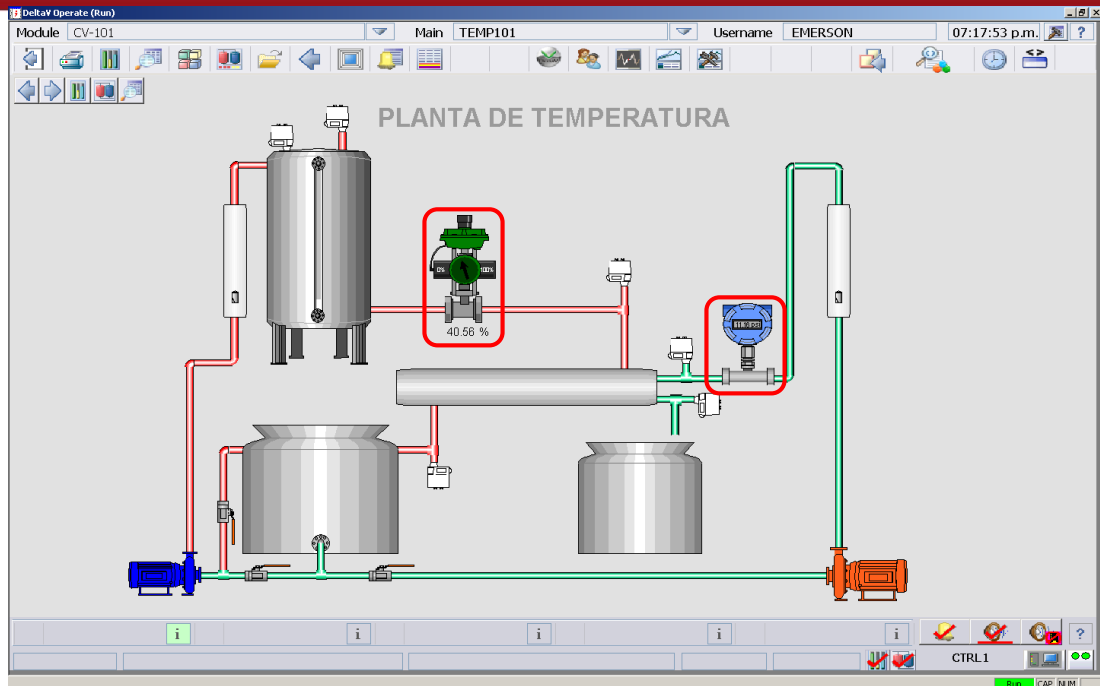


Figura 3.24. Pantalla de supervisión de la planta de temperatura.

En la Figura 3.24 prácticamente se muestra un esquema, pues esta planta fue tomada como experimento para la aplicación de los módulos de detección y diagnósticos de fallas, al no tener la planta piloto desalinizadora de mar instalada.

Los dispositivos resaltados en rojo son los únicos que cuentan con un faceplate disponible, pues solo ellos tienen la capacidad de transmitir datos por protocolo HART.

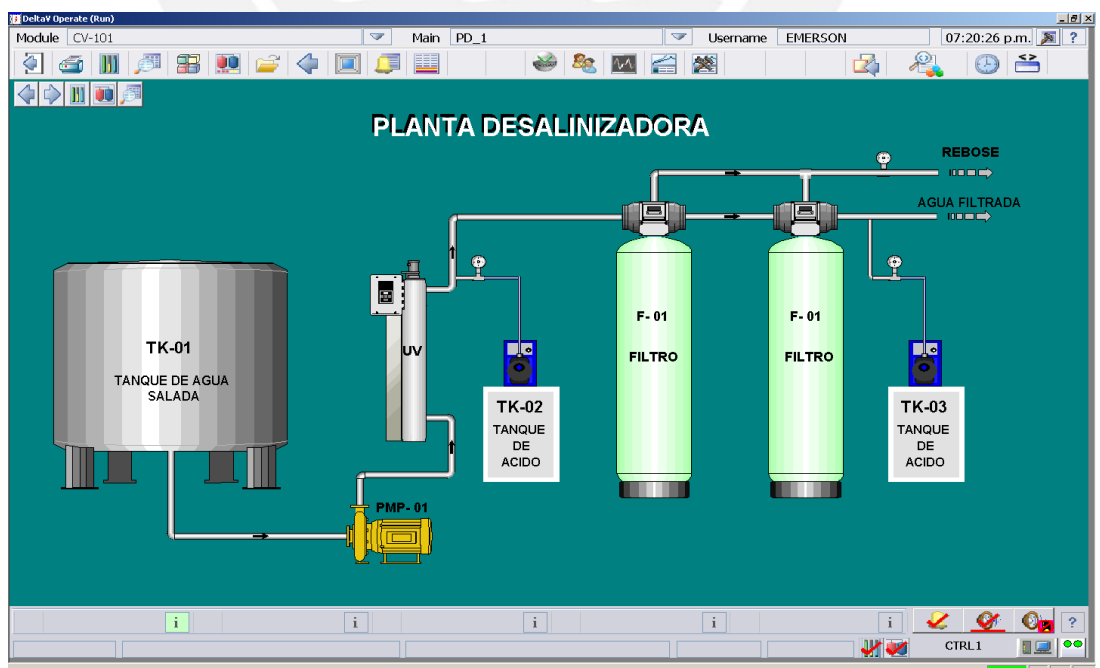


Figura 3.25. Primera pantalla de supervisión de la planta desalinizadora

En la Figura 3.25 se muestra el recorrido del agua a desalinizar. El agua es bombeada desde el tanque de agua salada hasta el filtro UV, el cual se encarga de eliminar a todos los microorganismos presentes en el agua. A la salida del filtro UV se inyecta una sustancia alcalina para variar el pH del agua a desalinizar. Finalmente se pasa el agua por los filtros 1 y 2 para eliminar las impurezas presentes en el fluido, las cuales pueden dañar la membrana de ósmosis inversa.

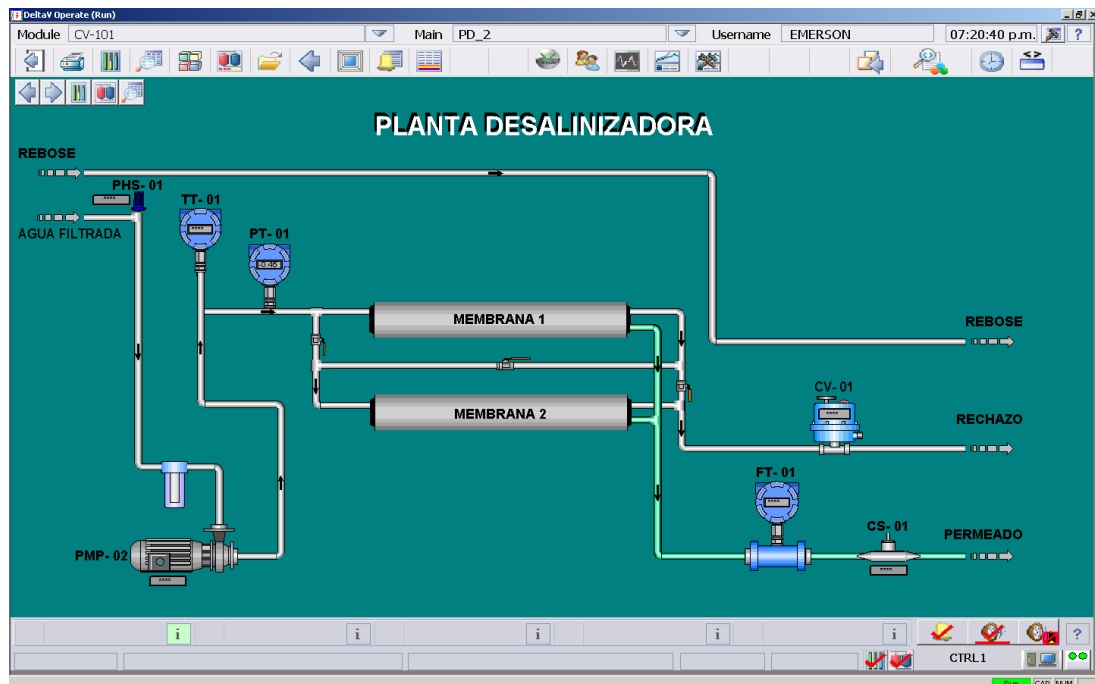


Figura 3.26. Segunda pantalla de supervisión de la planta desalinizadora

En la Figura 3.26, se muestra el proceso de desalinización del agua filtrada. Se mide el pH del agua filtrada mediante el sensor PHS-01, con esta señal se puede enviar una orden de aumentar o reducir el pH en la secuencia de pretratamiento. Luego, el agua pasa a través de un filtro, el cuál elimina las micropartículas o suciedad que no se pudieron eliminar en los filtros 1 y 2.

Luego, la bomba PMP-02 bombea el agua a alta presión hacia las membranas de ósmosis inversa. La presión y temperatura del agua son medidas mediante los transmisores PT-01 y TT-01, antes de entrar al bastidor de ósmosis inversa (membrana 1 y 2). El agua que sale del bastidor de ósmosis inversa es distribuida entre dos canales: el rechazo (tubería gris) y el permeado (tubería verde).

En la tubería de rechazo se encuentra la válvula de control proporcional eléctrica CV-01, con la cual se puede aumentar o disminuir la presión en el bastidor de ósmosis inversa.

En la tubería de permeado se mide el flujo y la conductividad del agua mediante el transmisor FT-01 y el sensor CS-01, para luego ser enviadas a los módulos de detección y diagnósticos de fallas.

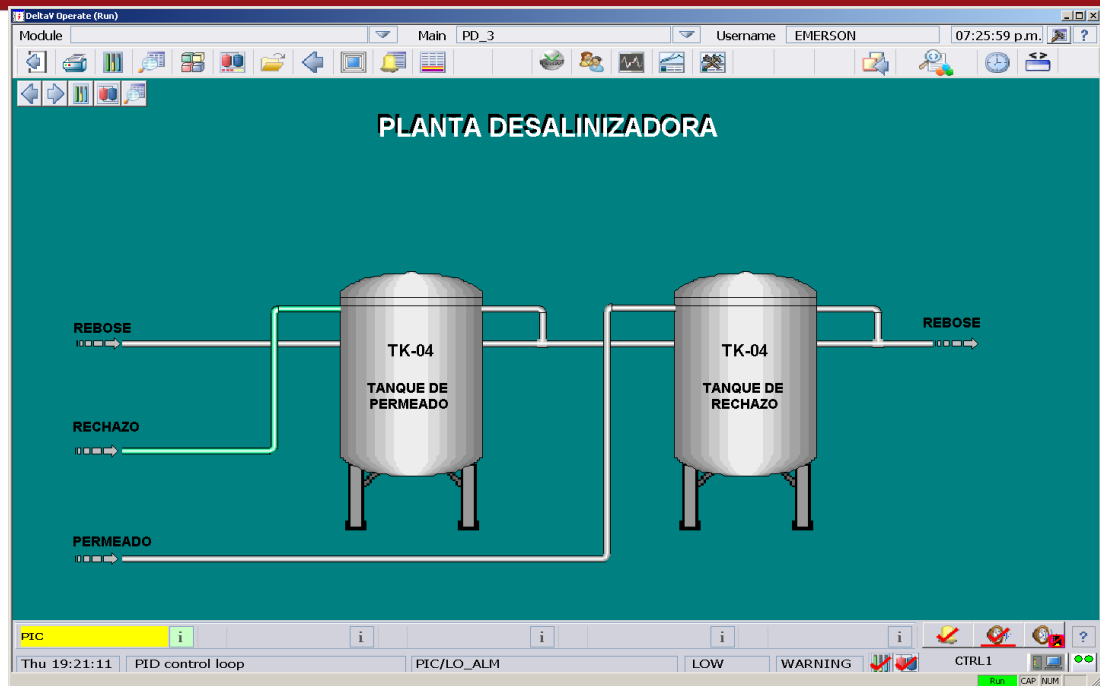


Figura 3.27. Tercera pantalla de supervisión de la planta desalinizadora
En la Figura 3.27, se muestra el almacenamiento del permeado y del rechazo.

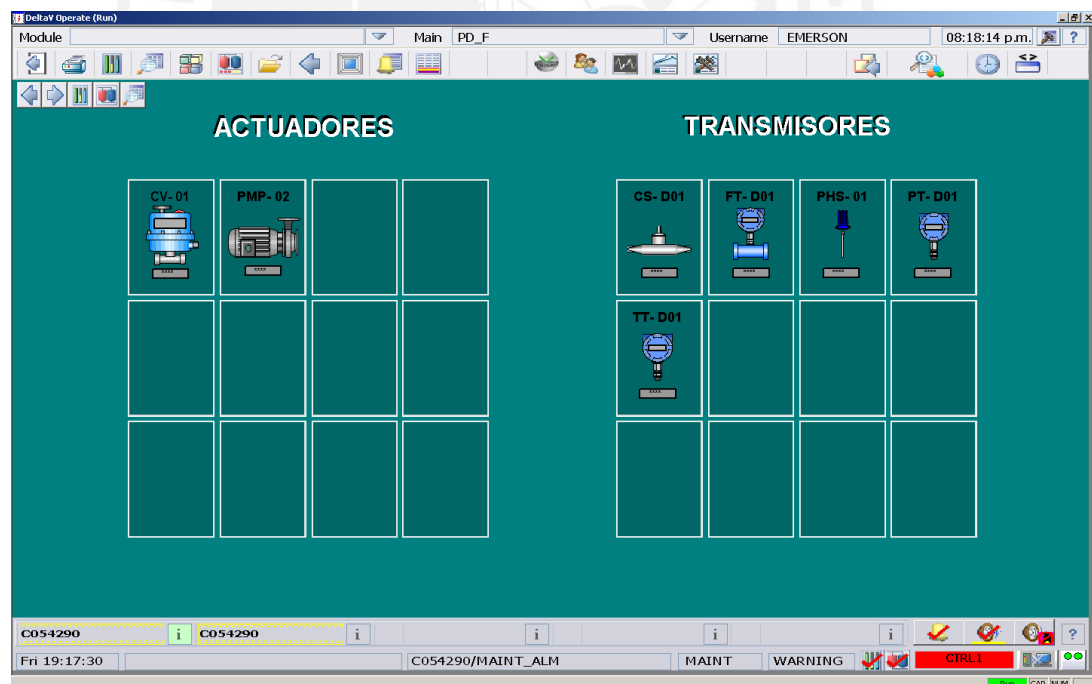


Figura 3.28. Pantalla de supervisión de todos los dispositivos de campo

Si bien las pantallas de supervisión representan a las plantas piloto, para el propósito de este trabajo es necesario desarrollar una pantalla adicional que permita acceder a todos los dispositivos de campo, de manera que se tenga un acceso mucho más rápido, como se muestra en la Figura 3.28.

b) Faceplates

Un faceplate es una pantalla de supervisión secundaria desde la cual se puede supervisar o controlar un dispositivo específico. Para este trabajo se desarrollaron cuatro faceplates, los cuales van enlazados a cada modelo de módulo desarrollado.

- Faceplate para transmisores (ver Figura 3.29)

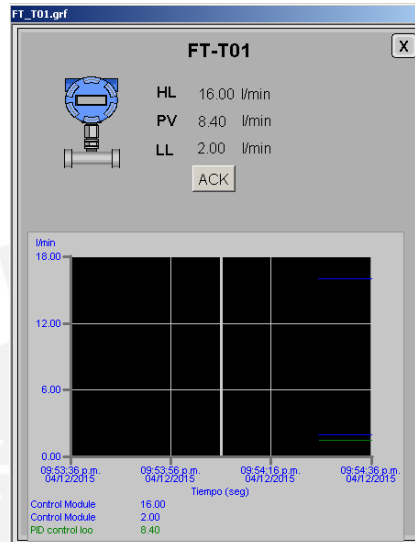


Figura 3.29. Faceplate para transmisores

Como los transmisores son de diferentes modelos, se diseñó el faceplate tal que el símbolo del transmisor se ajustara a las características del transmisor montado en campo. Este cambio se realiza de forma automática luego de configurar el modelo de módulo **FDT** en el **Control Studio**.

- Faceplate para válvula neumática (ver Figura 3.30)



Figura 3.30. Faceplate para válvula de control proporcional neumática

- Faceplate para válvula eléctrica (ver Figura 3.31)



Figura 3.31. Faceplate para válvula de proporcional eléctrica

3.3. Configuración y lectura de parámetros de los instrumentos de campo con el AMS Device Manager

3.3.1. AMS Device Manager

Es un programa diseñado para interactuar de forma directa con los dispositivos de campo mediante protocolos de comunicación HART, Foundation fieldbus, Profibus y Wireless HART. Desde este programa se puede revisar y configurar todos los parámetros de un dispositivo, lo cual resulta ser muy eficiente para la detección y diagnóstico de fallas.

En este trabajo se utilizó este programa para interactuar con cada dispositivo de campo HART, de manera que se pudo configurar cada dispositivo de acuerdo a los requerimientos de cada planta. Además se pudieron revisar los parámetros de cada dispositivo para confirmar los datos con lo que se trabajaron.

3.3.2. Configuración del AMS Device Manager

Para configurar este programa, es necesario haber configurado previamente los módulos de entrada y salida en modo HART en el *DeltaV Explorer*, pues el **AMS** se comunica con los dispositivos de campo mediante estos módulos.

Luego, se debe realizar una configuración de red para comunicar el **AMS** con el *DeltaV* como se muestra en la Figura 3.32.

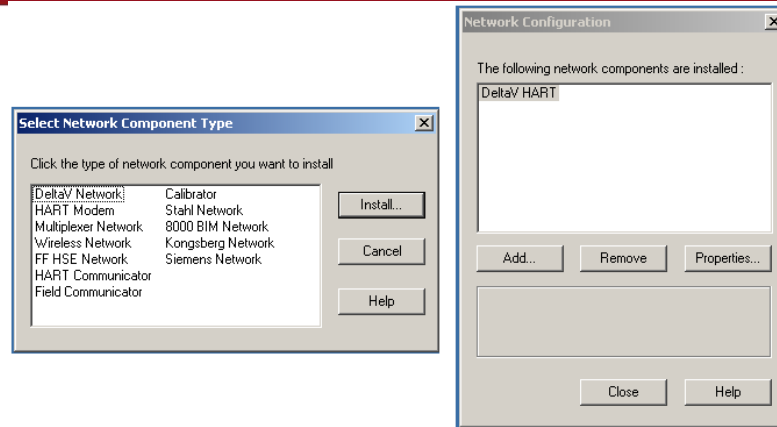


Figura 3.32. Configuración de red para comunicar el AMS y DeltaV

3.3.3. Configuración y lectura de parámetros de los instrumentos de campo

Luego de realizar la comunicación por entre el **AMS** y **DeltaV** todos los dispositivos conectados a los módulos de entradas y salidas en modo HART serán reconocidos de forma automática (ver Figura 3.33).

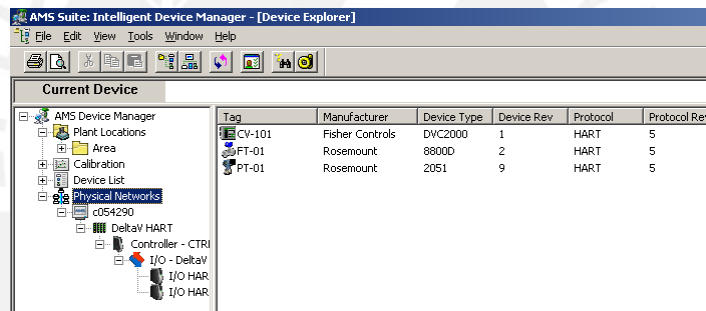


Figura 3.33. Dispositivos reconocidos de forma automática en el AMS

En la Figura 3.34, se muestra la pantalla de acceso al monitoreo y configuración de parámetros del transmisor de flujo **FT – T01** en el **AMS**.

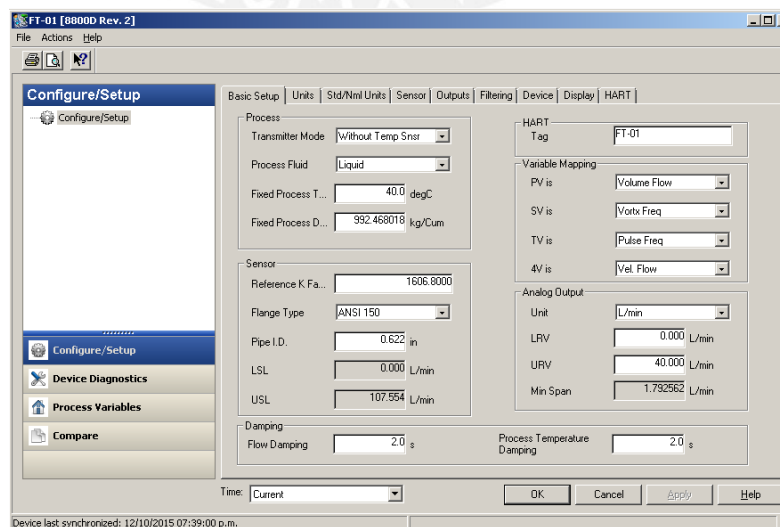


Figura 3.34. Parámetros del transmisor de flujo FT – T01

3.4. Desarrollo del sistema de supervisión para el Panel View 1500

3.4.1. Introducción

Los sistemas de control distribuido tienen la función de realizar el control y supervisión de una planta completa; sin embargo, en muchos casos cada subsistema cuenta con un panel de operador instalado en planta que permite al operador de campo visualizar y realizar cambios en ciertos parámetros del subsistema.

Existen diversos fabricantes de paneles de operador en el medio. Sin embargo, el panel a utilizar para este trabajo de investigación es el PanelView Plus 1500 de la marca Allen Bradley, el cual vino instalado con la planta desalinizadora piloto.

3.4.2. RSLinx

RSLinx es un software de la compañía Allen Bradley. Cumple las funciones de servidor de datos y comunicaciones de automatización. Desde este software se realizan las configuraciones básicas para comunicar los equipos de campo con otras aplicaciones.

Existen diferentes versiones aplicativas de RSLinx, las cuales se pueden separar en dos grupos:

- RSLinx Classic.
- RSLinx Enterprise.

RSLinx Classic

RSLinx Classic para dispositivos y redes de automatización Rockwell es un software de comunicación industrial, el cual provee a los controladores Allen-Bradley la capacidad para acceder a diferentes aplicaciones desarrolladas por Allen-Bradley y Rockwell. Esta API, por sus siglas en inglés (Application Programming Interface) soporta aplicaciones personalizadas desarrolladas con RSLinx Classic SDK.

RSLinx Classic se encuentra disponible en cuatro versiones, las cuales dependen del tipo de aplicación que se va a realizar. Todas las versiones disponen de las siguientes características:

- Programación en lógica de escalera utilizando productos RSLogix.
- Configuración de dispositivos utilizando RSNetWorx.
- Configuración de módulos Ethernet.
- Actualización de Firmware.
- Búsqueda de redes y obtención de información de dispositivos conectados.

Las características que diferencian a cada versión de RSLinx son:

- RSLinx Lite: Provee las funciones básicas requeridas para soportar las aplicaciones RSLogix y RSNetWorx.

- RSLinx Classic Single Node: Provee las funciones básicas para realizar la comunicación entre equipos de campo y aplicaciones de Rockwell. También soporta comunicaciones OPC y DDE, pero solo para un equipo.
- RSLinx Classic OEM: Provee las funciones básicas para realizar la comunicación entre equipos de campo y aplicaciones de Rockwell. También soporta comunicaciones OPC y DDE, para varios equipos.
- RSLinx Classic Gateway: Provee las funciones necesarias para realizar la integración de comunicaciones con otras computadoras por medio de redes TCP/IP. Esto permite obtener datos de diferentes nodos sin la necesidad de tener instalado el RSLinx Classic en cada computadora.

RSLinx Enterprise

RSLinx Enterprise es un servidor de datos, alarmas y eventos que trabaja directamente con el software FactoryTalk View. Este software se configura para realizar la comunicación entre dispositivos de campo y los sistemas de supervisión. La configuración básica consiste de:

- Lista de comunicación de dispositivos y sus configuraciones.
- Controladores de dispositivos y sus propiedades asociadas.
- Enlaces directos a dispositivos.

Para el desarrollo de este trabajo de tesis, se utiliza el RSLinx Classic para el reconocimiento y la configuración del controlador, y el RSLinx Enterprise para la comunicación entre el controlador con el panel de operador.

3.4.3. CompactLogix

Los controladores CompactLogix son fabricados por la compañía Allen-Bradley. Fueron desarrollados para aplicaciones de pequeña o mediana envergadura (ver Figura 3.35).



Figura 3.35. Controladores CompactLogix

Pueden tener características básicas o avanzadas dependiendo de su versión:

- CompactLogix 1768: Ofrecen canales de comunicación Ethernet/IP o ControlNet integrados, y comunicaciones via DeviceNet modulares. Son compatibles con hasta 30 módulos de entra/salida y hasta 16 ejes de movimiento.
- CompactLogix 1769: Ofrecen canales de comunicación Ethernet/IP o ControlNet integrados y comunicaciones via DeviceNet modulares.
- CompactLogix 5370: En combinación con los servovariadores Kinetix 350, estos controladores proporcionan una potente solución de movimiento cuando se requiere un alto rendimiento en un paquete compacto y asequible. Estos controladores expanden la escalabilidad de la familia Logix y comparten características comunes entre las tres plataformas, incluida la compatibilidad con Integrated Motion on EtherNet/IP y anillo a nivel del dispositivo (DLR) para una resiliencia mejorada de red.

Para este trabajo de tesis se utiliza el controlador CompactLogix 1769, el cual contiene un programa básico para la interacción de entradas y salidas de la planta desalinizadora piloto.

3.4.4. Panel View 1500

Son terminales diseñados para monitorear, controlar y mostrar información de estado de una aplicación en forma gráfica (ver Figura 3.36). Trabajan con la plataforma abierta del sistema operativo Windows CE. Para configurar y desarrollar una aplicación en estos terminales es necesario utilizar el software FactoryTalk View Machine Edition.



Figura 3.36. PanelView Plus 1500

Algunas características básicas son:

- Pantalla a colores de 15 pulgadas, con una resolución mínima de 1024x768 y gráficos de 18 bits.
- Admite la operación del operador por medio de una pantalla táctil, con teclado o una combinación. Para este trabajo se utiliza una pantalla táctil, por lo que se considera para el ingreso de datos dentro la aplicación.

3.4.5. Desarrollo del sistema de supervisión

Para el desarrollo del sistema de supervisión en el panel de operador, se toma como base el sistema de supervisión desarrollado para el sistema de control distribuido DeltaV.

La aplicación desarrollada cuenta con cuatro pantallas de supervisión y siete faceplates, desde los cuales se puede realizar el control y monitoreo de cada dispositivo de campo de forma directa, como se muestra a continuación (Figura 3.37, Figura 3.38, Figura 3.39, Figura 3.40, Figura 3.41, Figura 3.42, Figura 3.43, Figura 3.44, Figura 3.45, Figura 3.46, Figura 3.47).

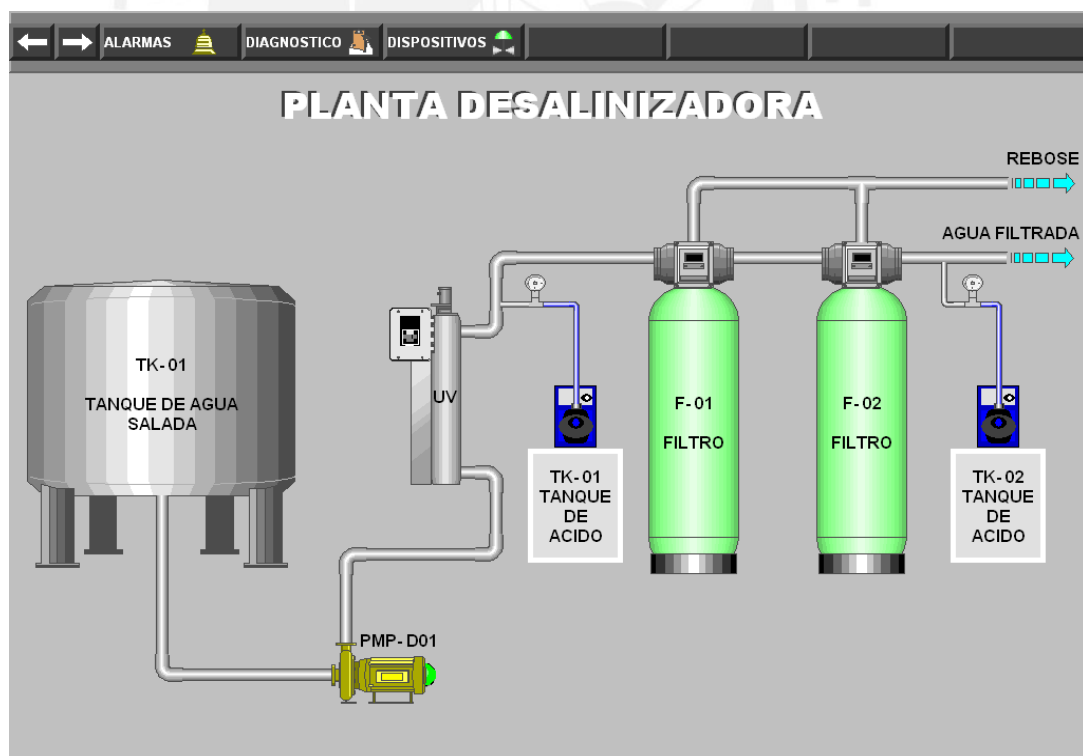


Figura 3.37. Primera pantalla de la planta desalinizadora piloto

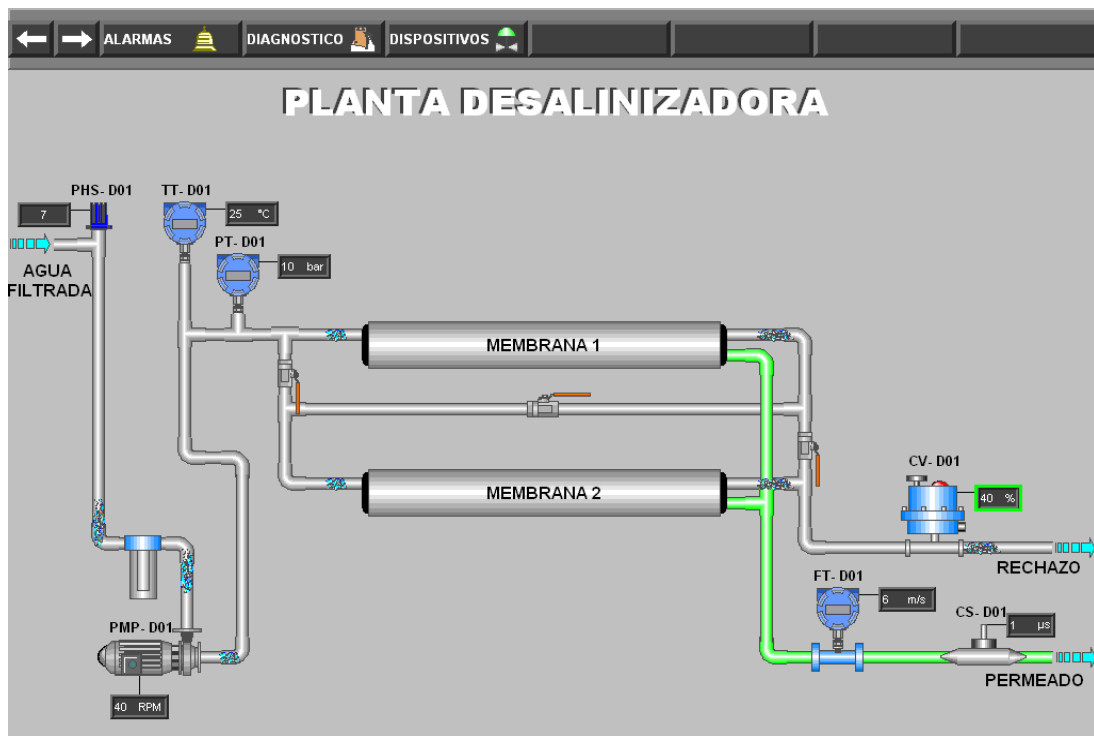


Figura 3.38. Segunda pantalla de la planta desalinizadora piloto

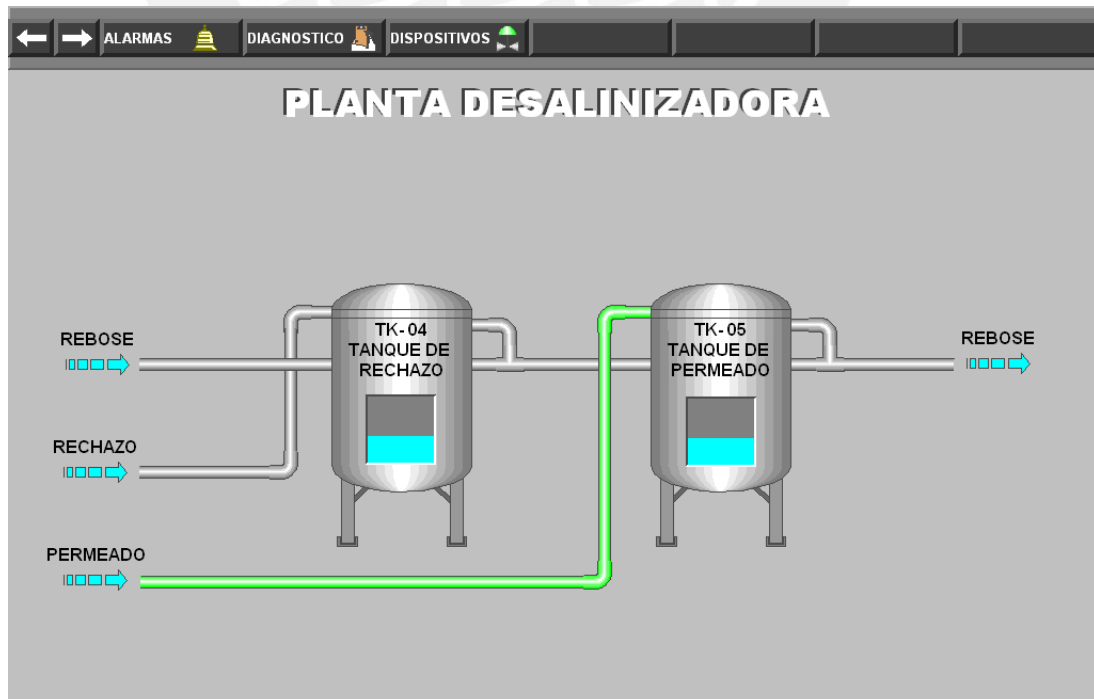


Figura 3.39. Tercera pantalla de la planta desalinizadora piloto

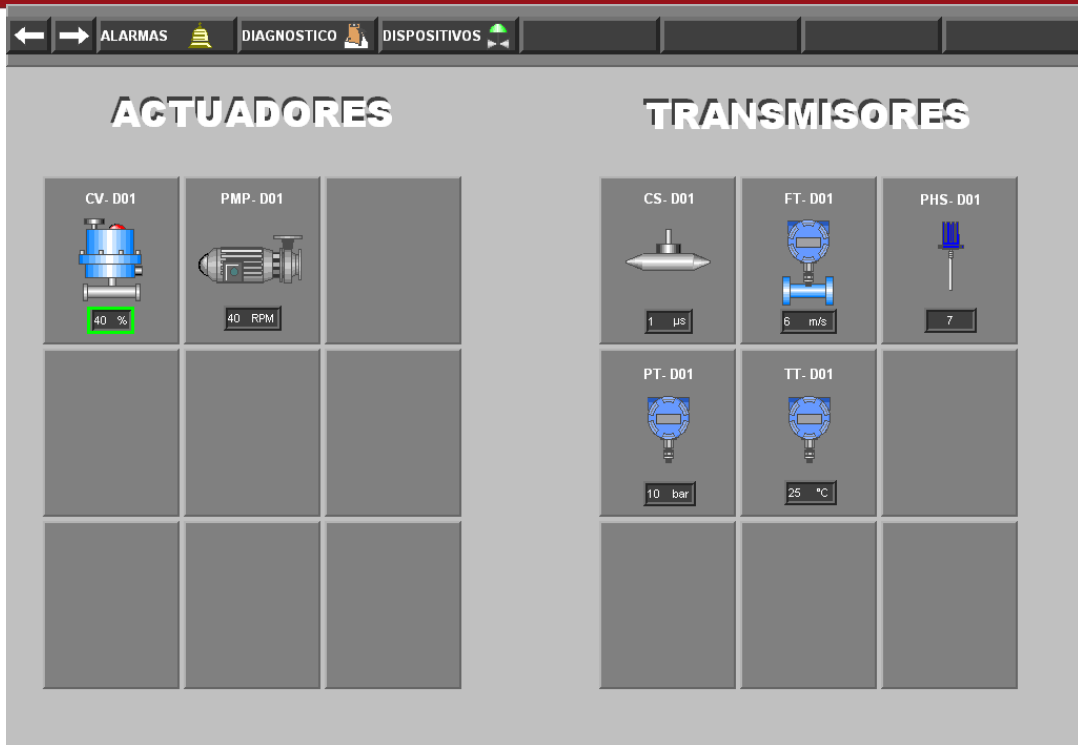


Figura 3.40. Pantalla de dispositivos de campo

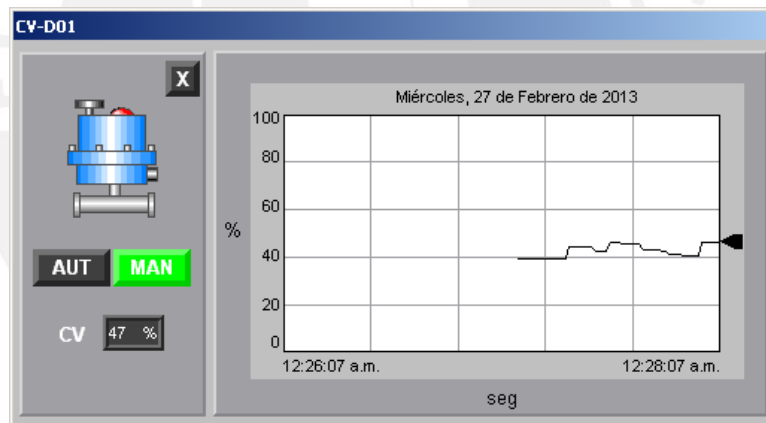


Figura 3.41. Faceplate para actuador CV-D01

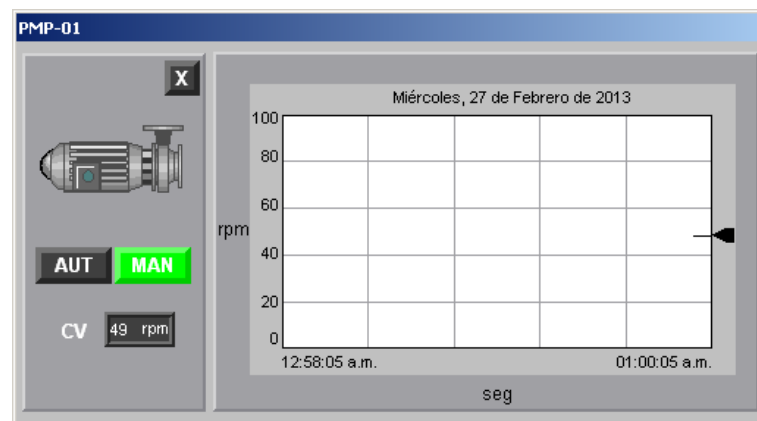


Figura 3.42. Faceplate para actuador PMP-D01

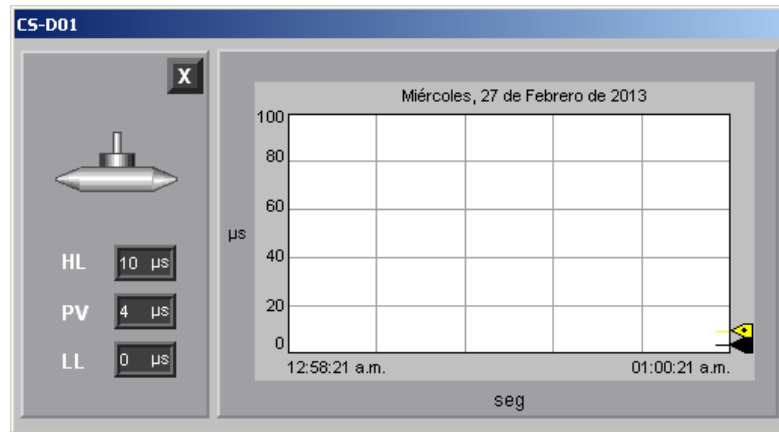


Figura 3.43. Faceplate para sensor CS-D01

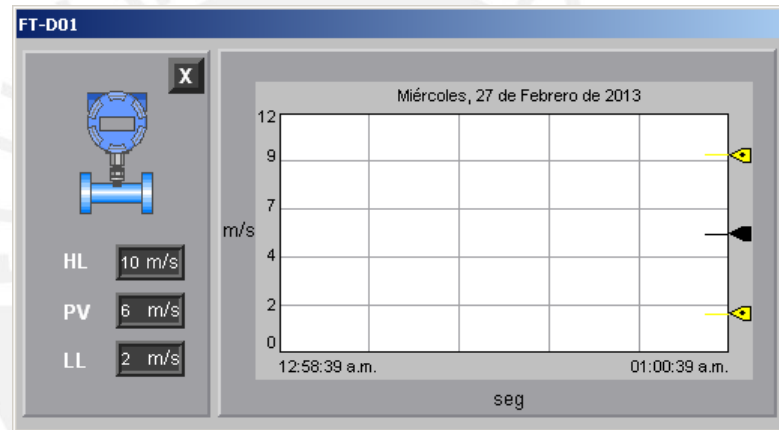


Figura 3.44. Faceplate para transmisor FT-D01

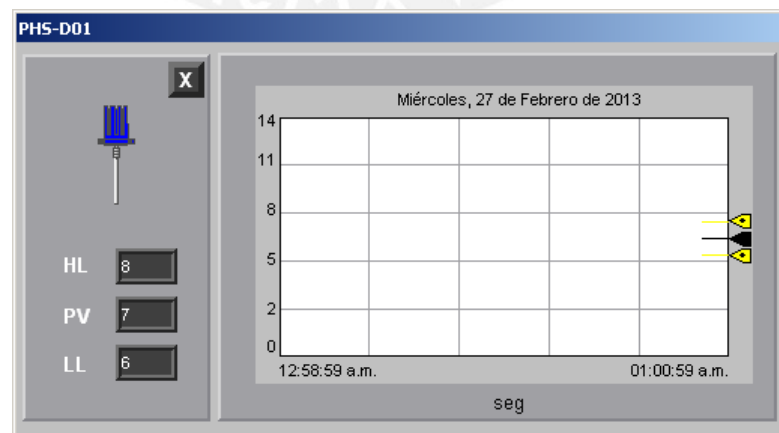


Figura 3.45. Faceplate para sensor PHS-D01

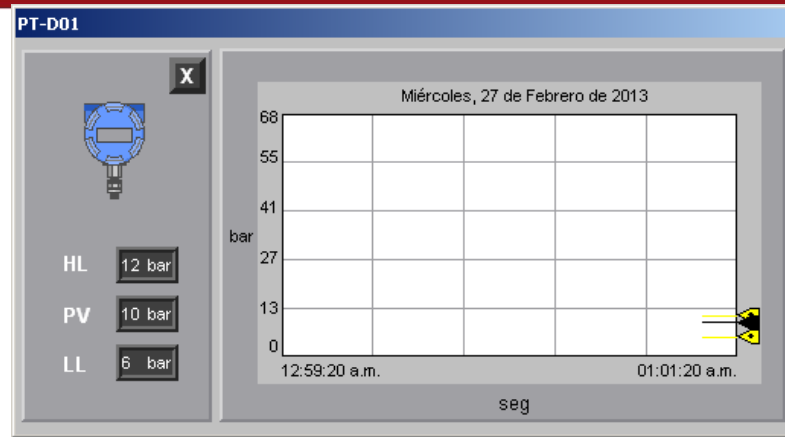


Figura 3.46. Faceplate para transmisor PT-D01

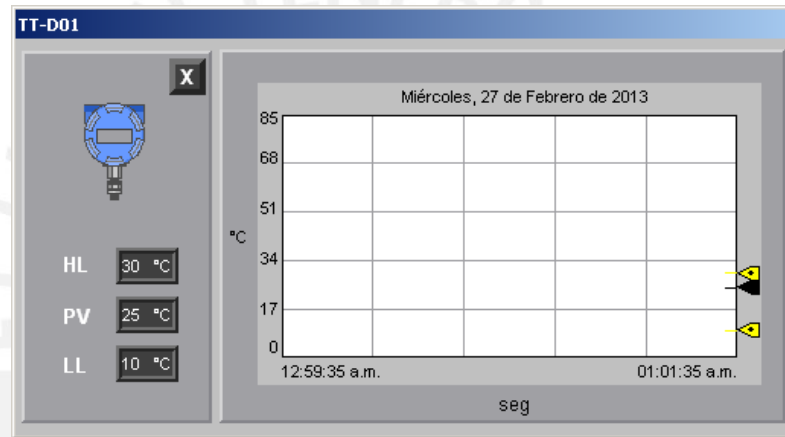


Figura 3.47. Faceplate para transmisor TT-D01

4. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN CON DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS

4.1. Introducción

En este capítulo se muestran los resultados experimentales del sistema de supervisión con detección y diagnóstico de fallas para la válvula de control proporcional neumática, ya que ésta presenta características similares a los otros módulos de detección y diagnóstico de fallas. Los resultados muestran el desempeño de las pantallas de supervisión y de los faceplates. Cabe resaltar que los faceplates desarrollados en este trabajo de tesis se pueden utilizar en cualquier otro sistema con características similares o como elementos individuales de un sistema que utilice dispositivos de campo del mismo tipo.

4.2. Fallas en la válvula de control proporcional neumática

Para poder entender el comportamiento del sistema de supervisión con detección y diagnóstico de fallas, se deben observar los valores medidos en los dispositivos de campo; para ello cada módulo almacenado en el **DeltaV Controller** debe ser analizado en línea (ver Figura 4.1).

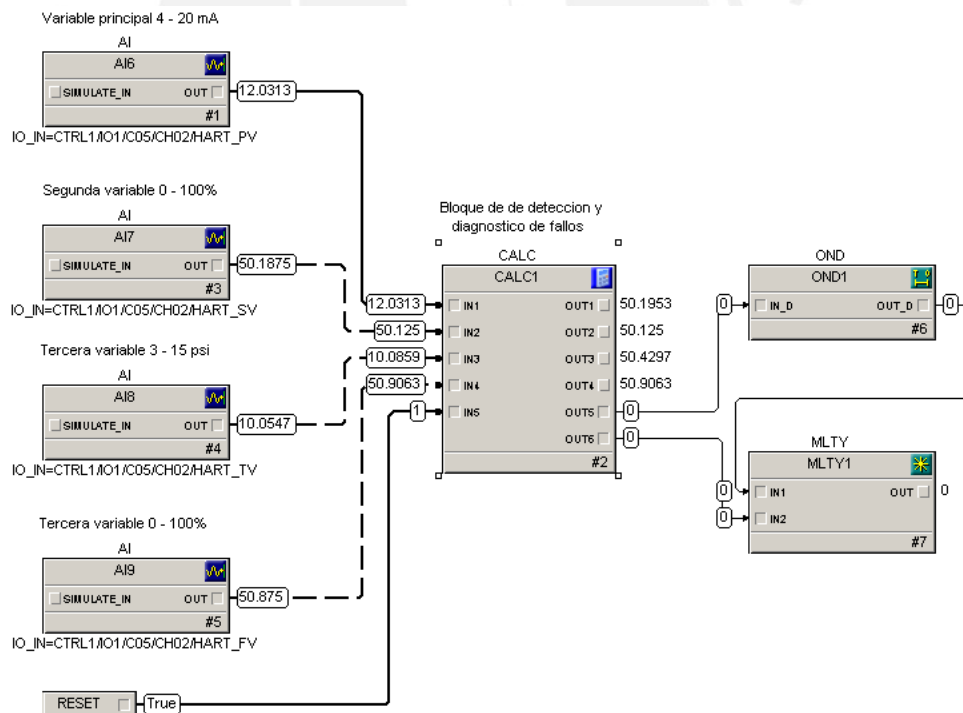


Figura 4.1. Bloque de detección de fallas para válvula de control proporcional neumática.

Cómo se observa en la Figura 4.1, la salida “OUT6” tiene valor cero, esto significa que el actuador se encuentra trabajando de manera adecuada. El correcto desempeño del actuador se muestra en la pantalla de supervisión (ver Figura 4.2).

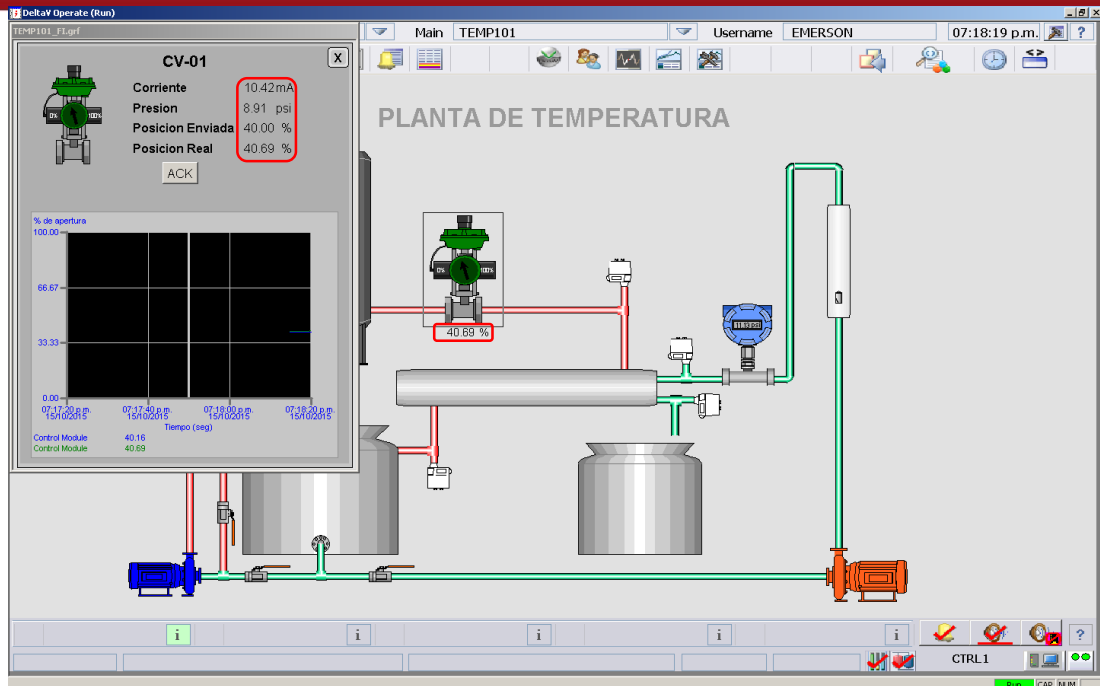


Figura 4.2. Válvula neumática en operación sin fallas

Para poder observar el desempeño del bloque, se van a forzar las fallas. Algunas se fuerzan de forma real (mediante conexión o desconexión de dispositivos, ver Figura 4.3 y Figura 4.5) y otras mediante cambios en los valores medidos, mediante el programa almacenado en el **DeltaV Controller** (ver Figura 4.7 y Figura 4.9).

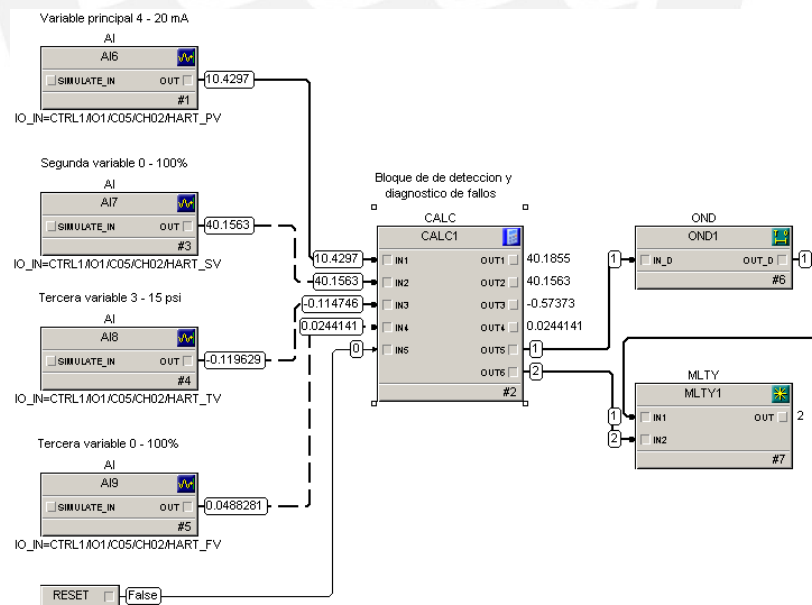


Figura 4.3. Falla por falta de corriente a la entrada

En la Figura 4.3, se observa que el valor de la salida “OUT6” es 1, lo cual indica que el valor de la corriente de ingreso no es la esperada. Este código es comunicado automáticamente al sistema de supervisión, el cual informa al operador sobre la detección y diagnóstico de una falla (ver Figura 4.4).

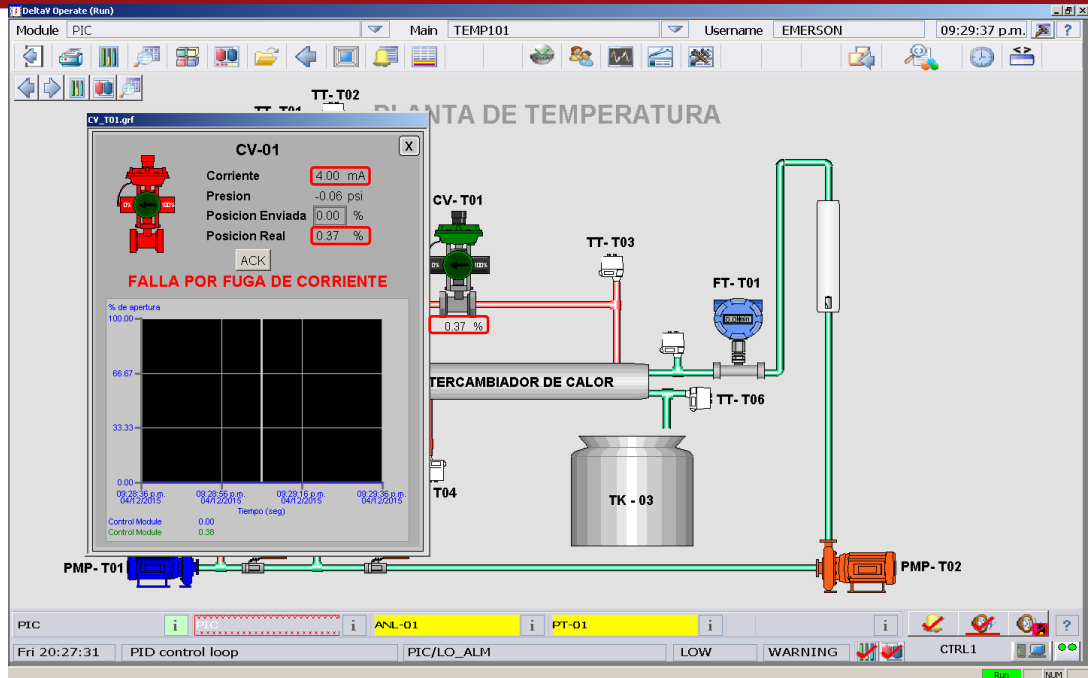


Figura 4.4. Válvula neumática con falla por falta de corriente.

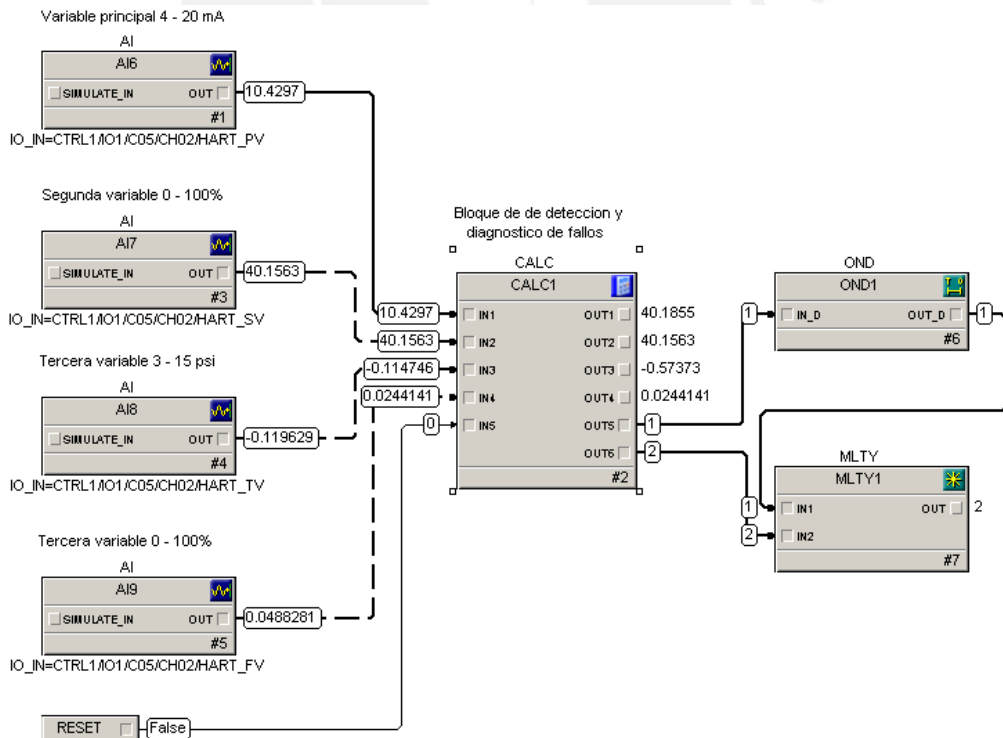


Figura 4.5. Falla por caída de presión en la línea

En la Figura 4.5, se observa que el valor de la salida “OUT6” es 2, lo cual indica que el valor de la corriente de ingreso no es la esperada. Este código es comunicado automáticamente al sistema de supervisión, el cual informa al operador sobre la detección y diagnóstico de una falla (ver Figura 4.6).

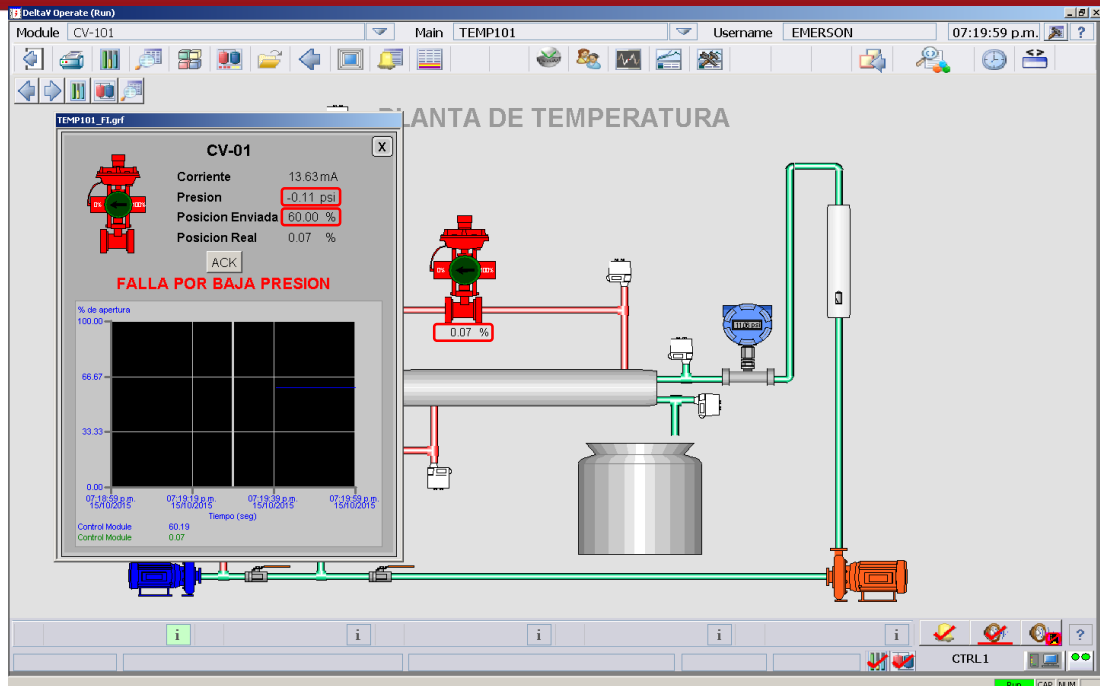


Figura 4.6. Válvula neumática con falla por falta de presión

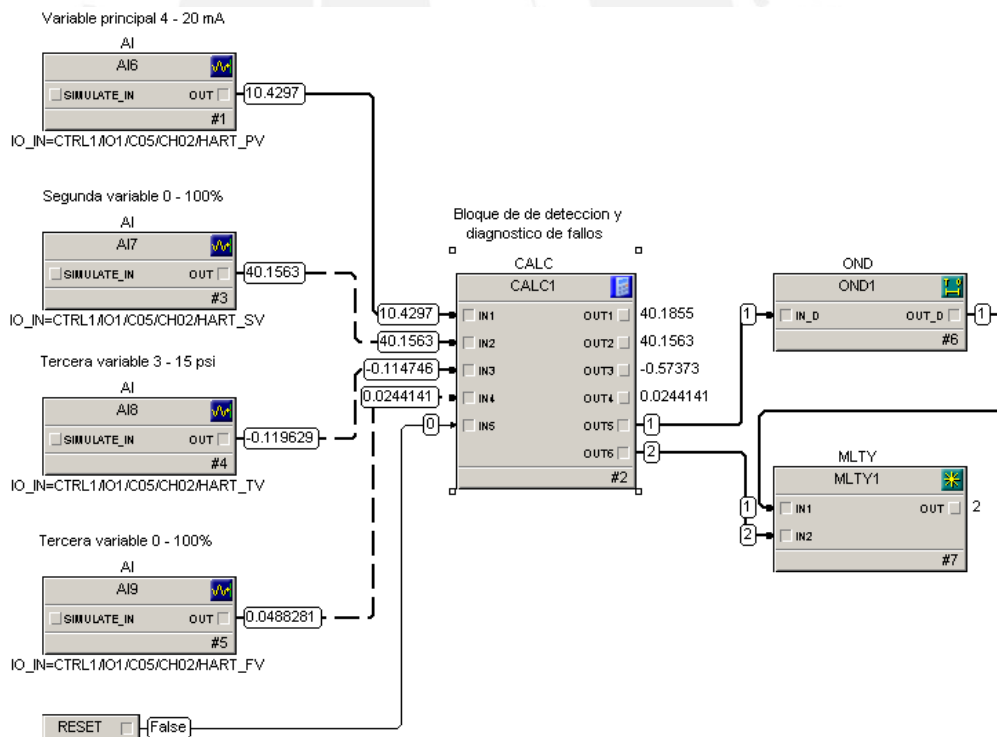


Figura 4.7. Falla por error en la comunicación

En la Figura 4.7, se observa que el valor de la salida “OUT6” es 5, lo cual indica que el valor de la corriente de ingreso no es la esperada. Este código es comunicado automáticamente al sistema de supervisión, el cual informa al operador sobre la detección y diagnóstico de una falla (ver Figura 4.8).

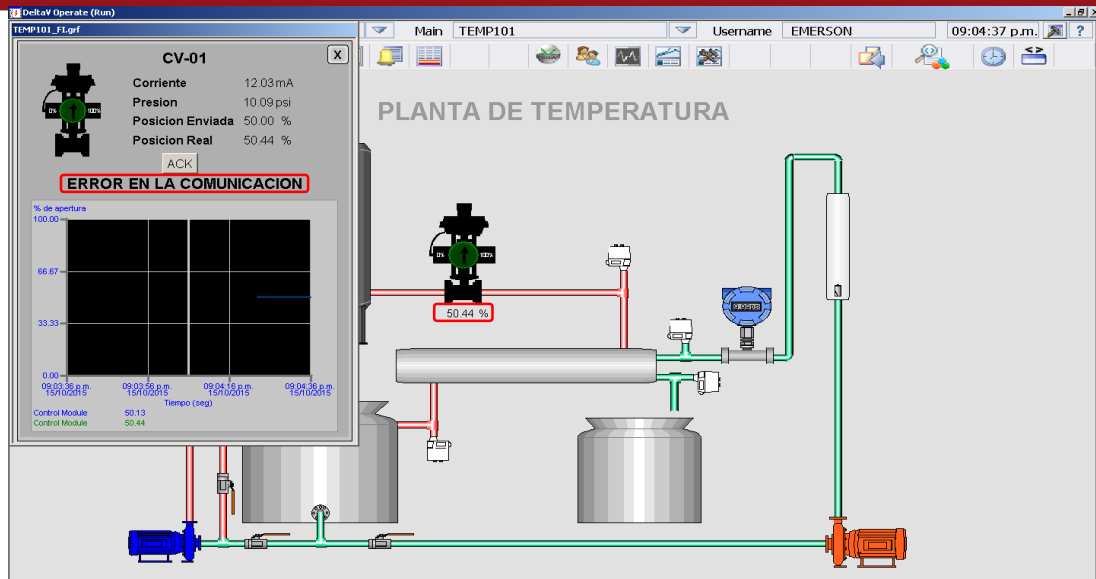


Figura 4.8. Válvula neumática con falla por error en la comunicación

4.3. Detección de fallas en el AMS

Otra forma de detectar las fallas, es mediante el uso del AMS Device manager, ya que este se comunica directamente con los dispositivos de campo con capacidad de comunicación por protocolo HART (ver Figura 4.9 y Figura 4.10).

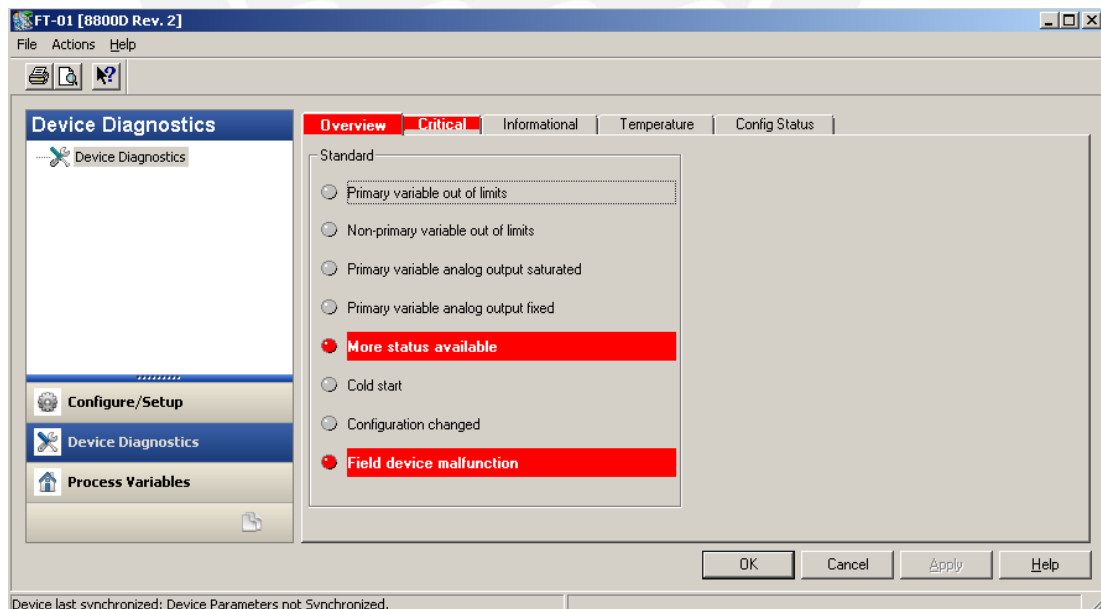


Figura 4.9. Error en el transmisor por malfuncionamiento interno, detectado por el AMS Device manager.

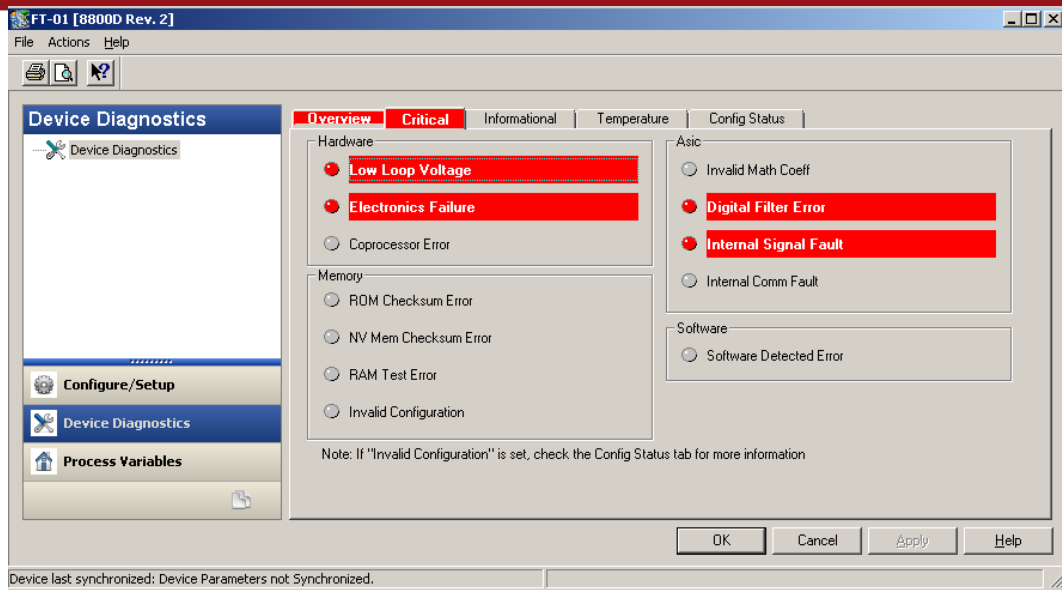


Figura 4.10. Causa del malfuncionamiento interno del transmisor, detectado por el AMS Device manager

4.4. Análisis de resultados

Este análisis se realiza en base a los resultados obtenidos en la detección y diagnóstico de fallas de la válvula de control proporcional de la planta de temperatura piloto, la cual fue mostrada en los subcapítulos anteriores.

Para el análisis de resultados se toman en cuenta las siguientes características del sistema:

- T_{min}: Menor tiempo empleado para la detección de fallas en el dispositivo. Esto se obtiene en el mejor de los casos: tarea ejecutada en forma inmediata (100ms), se lee el canal HART de forma inmediata con mayor velocidad (primer canal = 600ms), tiempo de visualización (1seg).
- T_{max}: Mayor tiempo empleado para la detección de fallas en el dispositivo. Esto se obtiene en el peor de los casos: tarea no ejecutada en forma inmediata (200ms), no se lee el canal HART de forma inmediata con menor velocidad (segundo canal = 1600ms), tiempo de visualización (1seg).
- Comunicación: Sin protocolo (No) – Con protocolo (HART).

El análisis de resultados para las fallas 1, 2, 3 y 4 (ver Tabla 3.5) se muestran en la Tabla 4.1

Tabla 4.1. Análisis de resultados para las fallas 1, 2, 3 y 4

Comunicación	T _{min}	T _{max}
NO	No detecta	No detecta
HART	1.7 seg	2.8 seg

El análisis de resultados para la falla 5 (ver tabla 3.5) muestra otros resultados, pues estos no dependen de la planta, sino de los módulos I/O del **DeltaV**. La detección por fallas en la comunicación se realiza por el **DeltaV Controller**, por lo que este tipo de falla es independiente de la comunicación por señal de 4 – 20mA o por protocolo HART ver Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Análisis de resultados para la falla 5

Comunicación	Tmin	Tmax
NO	1.1 seg	1.2 seg
HART	1.1 seg	1.2 seg



CONCLUSIONES

Se realizó el estudio de la arquitectura de control distribuido **DeltaV** y todas sus aplicaciones. Así como el **AMS Device manager**. Este estudio se realizó desde la instalación y configuración de los programas hasta el desarrollo de todo el sistema de detección y diagnóstico de fallos, pues el equipo físico se encontraba instalado, pero no había sido utilizado desde su adquisición. A pesar de no contar con la suficiente cantidad de material bibliográfico por parte del fabricante (no fue posible acceder a documentación avanzada por parte del fabricante), se logró desarrollar la parte práctica de este trabajo, y darle el enfoque de aplicación industrial, el cual muchas veces no se realiza en un trabajo de detección y diagnóstico de fallas.

Se estudiaron y modelaron los transmisores y actuadores de las planta piloto desalinizadora de agua de mar y la planta piloto de temperatura. Con los resultados de este estudio se pudieron desarrollar los módulos de detección y diagnóstico de fallas de los dispositivos de campo en la arquitectura de control distribuido **DeltaV**. También, se integraron los valores de los parámetros internos de cada dispositivo de campo, obtenido por comunicación con protocolo HART, lo cual representa una ventaja sustancial sobre muchos sistemas de detección y diagnóstico de fallas que solo se basan en un modelo. Estos módulos poseen la capacidad de ser reproducidos en cualquier otra arquitectura que cumplan con el estándar de programación IEC 61131-3.

Se desarrollaron las pantallas de supervisión y faceplates asociados a los dispositivos de campo, las cuales indican el acontecimiento de una falla (detección) y el motivo (diagnóstico). El distintivo de este sistema de supervisión fue el de crear una pantalla estrictamente para los dispositivos de campo, la cual facilita la interacción directa de todos los componentes del proceso, sin necesidad de pasar a través de cada una de las pantallas de supervisión.

Se crearon pantallas de supervisión para el panel de operador instalado en la planta piloto desalinizadora de agua de mar. El enfoque de las pantallas de supervisión en el panel fue muy similar a las desarrolladas para el sistema de supervisión con la arquitectura de control distribuido, lo cual genera facilidad para la operación de la planta en modo local o remoto.

Luego de realizar pruebas con los dispositivos de campo de la planta piloto de temperatura se obtuvieron resultados satisfactorios, pues ante cualquier acontecimiento en la planta (acontecimientos contemplados en el desarrollo de los módulos de detección y diagnóstico de fallas), se detectaron y diagnosticaron las fallas de los dispositivos de campo con los bloques **Calc**. Esta información se pudo observar en las pantallas de supervisión y en los faceplates. Con estos resultados quedó verificando el correcto funcionamiento de los módulos de detección y diagnóstico de fallas implementados en la arquitectura de control distribuido **DeltaV**.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abad Pedro J, Suárez Antonio J, Gasca Rafael M, Ortega and Juan A. **Using supervised learning techniques for diagnosis of dynamic systems**. In Proceedings of the 13th International Workshop on Principles of Diagnosis, Semmering, Austria, 2002.
- [2] Alatiqi, I.M., Ghabris, A.H., and Ebrahim, S. **System identification and control of reverse osmosis desalination**. Desalination, 75, 119-140, 1989.
- [3] Alatiqi, Imad,. Hissham Ettouney, Hisham El-Dessouky. **Process Control in Water Desalination Industry: An Overview**. Desalination 126, 15-32, 1999.
- [4] Bailey David; Wright Edwin. **Practical SCADA for Industry**, IDC Technologies, Oxford, 2003.
- [5] Balakrishnan K and Jonavar V. **Intelligent diagnosis systems**. Journal of Intelligent Systems, 8, 1998.
- [6] Burden Andrew, Deshpande Pradeep, Waiters James. **Advanced process control of a B-9 Permasep permeator desalination pilot plant**. Desalination 133, 271-283, 2000.
- [7] Cipollina A; Micale Giorgio; Rizzuti Lucio. **Seawater Desalination**, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, New York, 2009.
- [8] Creus Antonio. **Instrumentación Industrial**, Alfaomega Group Editor, S.A. C.V., Mexico D.F, 2010.
- [9] DeltaV. **Advanced Alarming Modules**, DeltaV Whitepaper, Emerson Process Mangement, USA, 2015.
- [10] DeltaV. **DeltaV HART Capabilities**, DeltaV Whitepaper, Emerson Process Mangement, USA, 2013.
- [11] DeltaV. **DeltaV M-Series I/O Subsystem Horizontal Carriers**, DeltaV Whitepaper, Emerson Process Mangement, USA, 2013.
- [12] DeltaV. **DeltaV Operate Themes**, DeltaV Whitepaper, Emerson Process Mangement, USA, 2013.
- [13] DeltaV. **Getting Started with your DeltaV™ Digital Automation Systems**, Emerson Process Mangement, Republic of Singapore, 2010.
- [14] DeltaV. **Monitor and Control Software**, DeltaV Product Data Sheet, Emerson Process Mangement, USA, 2013.
- [15] DeltaV. **System Administration and Maintenance**, Fisher-Rosemount Systems, Inc, UK, 2005.

- [16] DeltaV. **Universal HART Commands**, DeltaV Whitepaper, Emerson Process Management, USA, 2013.
- [17] E.A. Parr, Msc, CEng, MIEE, MInstMC. **Programmable Controllers An engineer's guide**, third Edition, E.A. Parr 1993, 1999, 1993, Oxford, 2003.
- [18] Fisher. **Control Valve Handbook**, Emerson Process Management, Fourth Edition, USA, 2013.
- [19] Gambier, A.; Krasnik, A.; Badreddin, E., **Dynamic Modeling of a Simple Reverse Osmosis Desalination Plant for Advanced Control Purposes**. American Control Conference, 2007. ACC '07, vol., no., pp.4854, 4859, 9-13 July 2007.
- [20] García-Rodríguez L. and Gómez-Camacho C. **Perspectives of Solar-Assisted Seawater Distillation**, 2001.
- [21] Gordon Clarke; Deon Reynders. **Practical Modern SCADA Protocols**, IDC Technologies, Oxford, 2004.
- [22] HART. **HART field communications protocol**. HART Communication Foundation, Austin, Texas, USA, 1999.
- [23] Helson Ron. **Understanding The Power of HART Communication**. HART Communication Foundation, Application guide, Austin, Texas, USA, 2003.
- [24] Helson Ron. **The Impact of HART on Process Automation**. HART Communication Foundation, Austin, Texas, USA, 2004.
- [25] Isermann Rolf. **Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing**. Tutorial paper. Automatica, 29(4):815_835, 1993.
- [26] Isermann Rolf. **Supervision, fault detection and fault-diagnosis – an introduction**. Control Engineering Practice, 1997.
- [27] Isermann Rolf. Fault Diagnosis Systems. **An introduction from fault diagnosis to fault tolerance**. Springer, 2006.
- [28] Isermann Rolf. **Fault – Diagnosis Applications**, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, New York, 2011.
- [29] Reiter R. **A theory of diagnosis from first principles**. Artificial Intelligence, 32, 1987.
- [30] Riverol, C., and V. Pilipovik. **Mathematical modeling of perfect decoupled control system and its application: A reverse osmosis desalination industrial-scale unit**. Journal of Automated Methods and Management in Chemistry, 2005, 50-54, 2005.
- [31] Siemens Energy & Automation, Inc. **DCS or PLC?** Siemens Energy & Automation, Inc., USA, 2007.

- [32] Stankovic John A. ***Fault – Tolerant – Real – Time Systems***, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, 1996.
- [33] Thomas P. ***Fault detection and diagnosis in engineering systems***. Control Engineering Practice, 10(3):1037_1038, 2002.
- [34] Voutchkov Nikolay. ***Desalination engineering planning and design***, The McGraw – Hill Companies, USA, 2013.

