

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



Diseño, Validación e Implementación de Sistema de Detección de Fallas, para Componentes Intel de Costa Rica, con HoldLastState

**Informe de Proyecto de Graduación para Optar por el
Título de Ingeniero en Electrónica con el Grado Académico de Licenciatura**

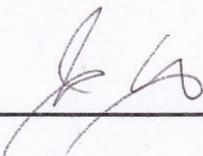
Jeffry Alexander Chacón Ceciliano

Cartago, Noviembre de 2012

INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

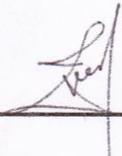
Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Juan Carlos Jiménez Robles

Profesor lector



Ing. Marvin Hernández Cisneros

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Cartago, 27 de noviembre de 2012

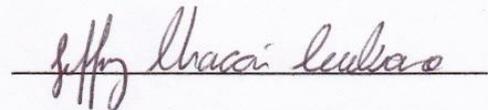
Declaratoria de Autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 27 de noviembre de 2012



Jeffry Alexander Chacón Ceciliano
Céd: 304230088

Resumen

Los sistemas de control de las facilidades de la empresa Componentes Intel de Costa Rica están siendo afectados por fallas en sus procesos. Es evidente que conforme los equipos y materiales envejecen, las fallas ocurren, afectando severamente las operaciones de la empresa y por ende su producción. Derivado de esta importante problemática, se implementa un laboratorio de pruebas donde se demuestre una solución capaz de detectar y manejar apropiadamente una falla de un sensor o un transmisor, dando aviso de la misma, y manteniendo un control estable mientras es atendida.

Para dar una solución apropiada al efecto de los fallos sobre los equipos, se realiza un estudio muestral de la operación de algunos sensores. Además se practican mediciones remotas con algunos de estos equipos y se reproducen fallos en el laboratorio con el fin de analizar la distribución estadística y dar pie a un sistema capaz de prevenir daños e impacto en la producción. Finalmente se lleva a cabo un laboratorio de pruebas para un sistema de control patrón con la implementación de un sistema de detección de fallas con un retenedor del último estado o *HoldLastState*.

Palabras Clave: Sistemas de control, detección de fallas, estadística de control, holdlaststate, sensor, transmisor

Abstract

The control systems at the facilities of Componentes Intel de Costa Rica are being affected by problems in their operation. It is evident that as equipment and materials age, failure of a certain process may occur, damaging the actuators of the company facilities and therefore affecting their production. Given these problems, a trial laboratory is held, where a solution capable to detect and manage failure on a sensor or transmitter must be proven and validated. This solution also alerts the staff in charge and maintains a stable control meanwhile the situation is resolved.

In order to provide a proper solution to the effects caused by failure on the equipment, a sampling study is held in regard of the operation of certain sensors and transmitters. Moreover, remote monitoring is held with some of the equipment, and failure circumstances are reproduced at the trial laboratory. This is held to analyze the statistical distribution of data and produce a system capable to prevent damage and therefore impact on production. Finally, the trial laboratory is presented with the final implementation of the failure detection system, with a hold last state mechanism.

Key words: Control Systems, failure detection, statistics for control systems, hold last state, sensor and transmitter.

Dedicatoria

A mi madre María Elena Ceciliano C. y a mi padre Simón Chacón M., quienes con su ejemplo, apoyo y paciencia me impulsaron a lograr mis metas y me enseñaron a nunca dejar de soñar.

Agradecimiento

Agradezco primero a Dios por haberme dado las capacidades y los medios para progresar en mis estudios. Doy gracias a mis hermanas Maureen y Marjorie por haberme dado todo su apoyo y cariño para poder alcanzar mis metas. A mis amigos y seres queridos, quienes me brindaron motivación para poder lograr mi meta, muchas gracias.

Finalmente, externo mi gratitud a la empresa INGPRO S.A. y al asesor Ing. Luis Diego Salazar por haber compartido conmigo su conocimiento y experiencia en campo para alcanzar este importante objetivo.

INDICE GENERAL

| | |
|--|----|
| Capítulo 1: Introducción | 14 |
| 1.1 Problema existente e importancia de su solución | 16 |
| 1.2 Solución seleccionada | 20 |
| Capítulo 2: Meta y objetivos | 22 |
| 2.1 Meta | 22 |
| 2.2 Objetivo general | 22 |
| 2.3 Objetivos específicos | 22 |
| Capítulo 3: Marco teórico | 24 |
| 3.1 Descripción del sistema a mejorar | 24 |
| 3.2 Antecedentes Bibliográficos | 29 |
| 3.2.1 Fluke 744 Documenting Process Calibrator | 29 |
| 3.2.2 Sensores de Presión 700PD4 y 700P27 | 30 |
| 3.2.3 Fluke 9142 Field Metrology Well | 31 |
| 3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema | 32 |
| 3.3.1 Mecánica de Fluidos | 32 |
| 3.3.2 Termodinámica | 37 |
| Capítulo 4: Procedimiento Metodológico | 42 |
| 4.1 Reconocimiento y definición del problema | 42 |
| 4.2 Obtención y análisis de información | 43 |
| 4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución | 45 |
| 4.4 Implementación de la solución | 46 |

| | | |
|---|--|-----|
| 4.5 | Reevaluación y rediseño..... | 50 |
| Capítulo 5: Descripción detallada de la solución..... | | 51 |
| 5.1 | Análisis de soluciones y selección final | 51 |
| 5.2 | Descripción del hardware..... | 56 |
| 5.3 | Descripción del software | 58 |
| Capítulo 6: Análisis de Resultados..... | | 64 |
| 6.1 | Resultados | 64 |
| 6.2 | Análisis de Funcionamiento | 72 |
| Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones | | 77 |
| 7.1 | Conclusiones | 77 |
| 7.2 | Recomendaciones | 78 |
| Capítulo 8: Bibliografía..... | | 79 |
| Capítulo 9: Apéndices | | 80 |
| A.1 | Glosario, abreviaturas y simbología..... | 80 |
| A.2 | Manual de usuario | 81 |
| A.3 | Protocolos de medición | 82 |
| A.4 | Hojade Información del Proyecto..... | 97 |
| Capítulo 10: Anexos..... | | 100 |
| Anexo A.1 | Portadas de los Manuales | 100 |

INDICE DE FIGURAS

| | | |
|---------------------|--|----|
| Figura 3.1.1 | Descripción Generalizada de un Sistema Patrón de Control Automático con Capacidad de Detección de Fallas y HLS | 24 |
| Figura 3.1.2 | Bombas de Inyección de Agua Ultra Pura para Piso de Producción | 26 |
| Figura 3.1.3 | Sensor y transmisor de presión | 27 |
| Figura 3.1.4 | Interfaz del Sistema de Monitoreo | 28 |
| Figura 3.2.1 | Documentador y Calibrador de Procesos Fluke 744 | 29 |
| Figura 3.2.2 | Sensor de Presión Modelo 700 PD4 | 30 |
| Figura 3.2.3 | PozoSeco Fluke Modelo 9142 | 31 |
| Figura 3.3.1 | Sensores de Presión en Operación con Conexión de Tubo de Acero Inoxidable de $\frac{3}{4}$ de Pulgada | 34 |
| Figura 3.3.2 | Sensor de Presión y Transmisor Marca Rosemount Modelo 3051 | 36 |
| Figura 3.3.3 | Representación de las partes de una RTD | 39 |
| Figura 3.3.4 | Sensor de temperatura RTD utilizado en el sistema de detección de fallas con su respectivo transmisor | 40 |
| Figura 3.3.5 | Diagrama de conexiones recomendado por el fabricante para una RTD con dos, tres o cuatro hilos | 41 |

| | | |
|---------------------|--|----|
| Figura 4.4.1 | Respuesta del Sistema de Control Patrón con Referencia de 12° Celsius | 47 |
| Figura 4.4.2 | Gráfica del Sistema de Detección de Fallas en Límites de Control Calculados cada 5 segundos | 49 |
| Figura 5.1.1 | Gráfica de tendencias para los sensores de flujo, presión, concentración de O2 y concentración de humedad para el sistema de N2 en el edificio CR1 | 54 |
| Figura 5.2.1 | Equipo SLC - 500 utilizado con CPU 5/05 y tarjeta de adquisición de datos analógica. | 56 |
| Figura 5.2.2 | Propiedades del Controlador y Consumo de Memoria del Sistema Implementado | 57 |
| Figura 5.3.1 | Diagrama de Flujo con los Estados del Programa | 59 |
| Figura 5.3.2 | Vista del RSLinx Classic | 61 |
| Figura 5.3.3 | Vista del Programa Computacional Implementado | 62 |
| Figura 6.1.1 | Impacto de la Arena en la Tubería de los Transmisores del Make Up en el Sistema Rodi | 66 |
| Figura 6.1.2 | Desviación del sensor CR1_PT1_NITROGEN respecto a la línea recta. | 67 |
| Figura 6.1.3 | Temperatura en un sistema de agua helada con un tiempo de muestreo de 30 segundos. | 68 |

| | | |
|---------------------|---|----|
| Figura 6.1.4 | Frecuencia de las Temperaturas en Incrementos de 1°C | 70 |
| Figura 6.1.5 | Reporte “Historial del Instrumento” para un Sensor y Transmisor Específico | 71 |
| Figura 6.2.1 | Falla por Decremento Acelerado de Temperatura | 73 |
| Figura 6.2.2 | Operación Normal del Sistema de Detección de Fallas, Bajo un Régimen Incremental en la Variable de Proceso del Sistema de Control | 74 |
| Figura 6.2.3 | Falla en la Variable de Proceso del Sistema de Control Patrón Causada por un Cortocircuito | 75 |
| Figura 6.2.4 | Efecto del HoldLastState a la Salida del Sistema de Control Durante y Después de Atendida la Alarma | 76 |

INDICE DE TABLAS

| | | |
|--------------------|--|----|
| Tabla 1.1.1 | Descripción de los Sistemas de Control en las Facilidades de la Empresa Cliente | 17 |
| Tabla 1.1.2 | Distribución de Algunos Sensores Importantes y los Sistemas a los que Pertenecen | 18 |
| Tabla 3.3.1 | Resistividad y Coeficiente Térmico de los Materiales en un RTD | 38 |
| Tabla 6.1.1 | Estado Actual de los Transmisores Estudiados | 64 |
| Tabla 6.1.2 | Valores Encontrados en los Sensores Estudiados con Rango de 0 a 150 PSI | 67 |
| Tabla 6.1.3 | Valores de Medición para el Proceso de Agua Helada en Grados Celsius | 68 |
| Tabla 6.1.4 | Análisis Estadístico para los Valores de la Tabla 61.3 | 69 |

Capítulo 1

Introducción

La empresa INGPRO S.A. es una empresa que se dedica al diseño, implementación y mantenimiento de sistemas de automatización, sistemas electromecánicos y sistemas mecánicos. Su oficina se encuentra ubicada en el cantón de Belén, Heredia, Costa Rica. Esta empresa cuenta con los departamentos administrativo, ventas e ingeniería. Dentro del departamento de ingeniería se contemplan tres áreas distintas: automatización, electromecánica y mecánica.

De las divisiones mencionadas, es importante destacar la función de algunos departamentos en particular. La función del departamento de ingeniería es evaluar el problema y proponer soluciones de aplicación que ayuden al cliente a resolver su necesidad. El departamento administrativo por su parte, resuelve las necesidades de compra e inventario de equipo, según se requiera.

El proceso productivo de la empresa comienza por el departamento de ventas. En esta etapa, el cliente llama a la compañía o consulta directamente al personal, en búsqueda de una solución a sus problemas de aplicación. El departamento de ventas ofrece soluciones basadas en la necesidad del cliente. En ocasiones, las aplicaciones que requiere el cliente cuentan con especificaciones particulares. En estos casos, interviene directamente el departamento de ingeniería.

Cuando el cliente requiere una demostración del proyecto a implementar, entonces el departamento de ingeniería propone, diseña e implementa la posible solución en un laboratorio de pruebas dentro de la compañía. Esta implementación permite demostrarle al cliente que el proyecto propuesto se adapta a sus necesidades.

El cliente de INGPRO S.A interesado en la realización del presente proyecto es Componentes Intel de Costa Rica. Esta empresa se encuentra ubicada en la Ribera de Belén, en Heredia y se dedica principalmente a ensamblar y probar microprocesadores, diseñar circuitos electrónicos y proveer servicios financieros a toda la corporación.

La necesidad de implementar un sistema de detección de fallas con características particulares en las instalaciones de la empresa Componentes Intel de Costa Rica responde a una problemática de inestabilidad y daños en los equipos actuadores de los sistemas de control, con el consecuente grave impacto en la manufactura de los chips. Esta problemática ha sido detectada en múltiples ocasiones por el departamento de *Facilities Technical Support*(FTS).

El personal responsable de actuar ante las alertas del sistema encontró que en numerosas ocasiones los actuadores operan inesperadamente o se dañan por la respuesta desmedida de alguno de los controles Proporcional, Integral y Derivativo (PID) que los gobiernan. Para darle solución a este problema la empresa INGPRO S.A. ha propuesto un proyecto de implementación que consta de 3 secciones: un laboratorio de pruebas, una implementación en sistemas no críticos y finalmente una implementación global del sistema en todos los edificios. El presente proyecto pretende generar un laboratorio de pruebas apropiado para dar solución a la problemática.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

Se cuenta con una red de sensores que controlan vía control PID las variables de proceso de los diversos sistemas en los edificios de la empresa Componentes Intel de Costa Rica. Son cuatro variables de proceso en total y corresponden a presión, temperatura, concentración de oxígeno y nivel de altura. De las variables mencionadas se realizó un estudio sobre las variables de presión, temperatura y nivel de altura vía presión diferencial.

La importancia del presente proyecto radica en la necesidad de solucionar los problemas que ocurren en los sistemas de control de las facilidades ante fallos capaces de volver inestables o afectar los equipos actuadores y por ende dañar los microprocesadores en producción. Estos fallos en el sistema se han detectado cuando aparecen eventos no esperados o anomalías en las condiciones de operación de los sensores y transmisores, tales como cambios abruptos en la variable de proceso, inestabilidad, saturación y corrimiento del rango o *span* entre otros. Estos comportamientos anormales generalmente son ocasionados por descargas eléctricas, corte del suministro eléctrico, inducción magnética, cortocircuito, sensor no calibrado, sensor dañado y acciones humanas.

La implementación actual de los sistemas de control en la infraestructura de Componentes Intel de Costa Rica cuenta con más de 150 sensores de temperatura y presión (absoluta y diferencial), distribuidos en los edificios CR1, CR2, CR3 y CUY. Los sensores de presión, nivel (vía presión diferencial) y temperatura son de la marca Rosemount y los modelos de los transmisores disponibles para el estudio corresponden al 3051 para presión y nivel, y 344 para temperatura. Estos transmisores están programados para operar con corriente, en un rango desde los 4mA hasta los 20mA. Esta empresa cuenta con múltiples modelos diferentes de Controladores de la marca Allen-Bradley, entre los más abundantes los modelos SLC 500, CompactLogix y más recientemente ControlLogix.

Los sistemas de control implementados se encuentran ubicados en diferentes áreas de interés para la compañía. Estos sistemas cumplen importantes funciones dentro de la empresa, desde brindar comodidad a los empleados de una oficina, hasta mantener fijo el punto de rocío crítico en el piso de manufactura de los microprocesadores. La descripción de los sistemas de control investigados se detalla en la tabla 1.1.1

Tabla 1.1.1 Descripción de los Sistemas de Control en las Facilidades de la Empresa Cliente

| Abreviatura | Descripción del Sistema |
|--------------------|--|
| CW | 1° Etapa de enfriamiento del agua (ColdWater) |
| DCW | Agua helada para alimentar los equipos chiller |
| CHW | Agua helada para alimentar el A/C |
| RODI | Sistema de agua para corte y pulido de chips |
| DW | Sistema de agua potable |
| WWTP | Sistema de agua para la planta de tratamiento |
| PCW | Agua helada para procesos |
| MEF | Ventiladores de escape de la fábrica |

Los sistemas mencionados en la tabla 1.1.1 forman parte de servicios que se brindan en las instalaciones de la empresa cliente. Estos sistemas abarcan desde servicios complejos tales como aire acondicionado para los edificios y suministro de agua ultra pura para algunos procesos de manufactura (como el corte y pulido de los chips), hasta sistemas básicos para la operación de la planta, como el agua potable y el tratamiento de desechos. Generalmente los sensores disponibles en los sistemas

de control llevan en su nombre o *Tagel* sistema al que pertenecen. Por ejemplo un sensor de presión en el sistema RODI es CR3_PT1_RODI. Esto es, el edificio, el tipo y número de sensor al que se hace referencia y el sistema donde se ubican.

La importancia de proponer un laboratorio de pruebas adecuado, con una plataforma capaz de detectar fallos en los sensores y prevenir daños en los sistemas de control, es crucial para la eficiencia del departamento de FTS en Componentes Intel de Costa Rica y para toda la corporación en general por una cuestión económica y de mejoramiento de los procesos. Cualquier daño en algún sistema por motivo de un sensor en mal estado es capaz de detener el proceso productivo de manufactura, con pérdidas económicas que rondan entre uno y dos millones de dólares por minuto, según el asesor de la empresa IngPro S.A.

En la tabla 1.1.2 se muestra la distribución real de los sensores en la empresa, el sistema de control al que pertenecen y los dispositivos PLC que se encuentran físicamente ligados a la variable en cuestión. La tabla 1.1.2 permite conocer específicamente qué controlador se verá impactado en caso de existir problemas, en cual edificio se debe atender el problema y cual PLC está siendo afectado.

Tabla 1.1.2 Distribución de Algunos Sensores Importantes y los Sistemas a los que Pertenecen

| No | Edificio | Sistema | Tipo de Sensor | Ubicación |
|-----------|-----------------|----------------|-----------------------|------------------|
| 1 | CR1 | CW | Temperatura | PLC01 |
| 2 | CR1 | MEF | Presión | PLC07 |
| 3 | CR1 | MEF | Presión | PLC09 |
| 4 | CR1 | MEF | Presión | PLC06 |
| 5 | CR1 | MEF | Presión | PLC09 |

| | | | | |
|-----------|-----|------|------------------------------|----------|
| 6 | CR1 | MEF | Presión | PLC08 |
| 7 | CR1 | MEF | Presión | PLC09 |
| 8 | CR1 | PCW | Presión | PLC01 |
| 9 | CR2 | CW | Temperatura | PLC1 |
| 10 | CR3 | CHW | Presión | MECH3 |
| 11 | CR3 | CHW | Presión | MECH3 |
| 12 | CR3 | CW | Temperatura | CTW |
| 13 | CR3 | CW | Temperatura | PLCA |
| 14 | CR3 | PCW | Presión | MECH1 |
| 15 | CR3 | RODI | Presión | RODI |
| 16 | CR3 | RODI | Temperatura | RODI |
| 17 | CR3 | MEF | Presión | MUA1-DH6 |
| 18 | CR3 | MEF | Presión | MUA1-DH6 |
| 19 | CR3 | MEF | Presión | BMS |
| 20 | CR3 | MEF | Presión | BURN-IN |
| 21 | CR3 | MEF | Presión | MUA1-DH6 |
| 22 | CR1 | DW | Presión | PLC-01 |
| 23 | CR1 | WWTP | Presión | WWTP-2 |
| 24 | CR1 | WWTP | Concentración O ₂ | WWTP-2 |

Aunque algunos sensores se utilizan solo para monitoreo de las instalaciones y cuenten únicamente con una alarma, existen otros sensores ligados a reguladores PID funcionando de manera automática. Estos últimos son sensores críticos para el proceso de manufactura, y un fallo en estos sistemas detendría por minutos o hasta horas los procesos de manufactura y dañaría los microprocesadores fabricados; lo cual elevaría los costos de producción. Algunos sensores que se clasifican como RODI son críticos para el manejo de agua en el piso de producción, siendo capaz una falla de detener un proceso entero. Para mencionar un ejemplo en concreto, el sensor de presión CR3_PT_RODI_Tank02 es crítico por tener un control PID asociado y completamente ligado a la operación del piso de producción de la compañía.

1.2 Solución seleccionada

La empresa Componentes Intel de Costa Rica requiere un laboratorio de pruebas para un sistema de detección de fallas donde se pueda comprobar la funcionalidad del proyecto para la implementación en una segunda etapa, dentro de los sistemas preexistentes. La razón del laboratorio de pruebas es que se debe hacer una revisión de los efectos del sistema implementado sobre los módulos de control automático, de manera que sea posible agregar el módulo sin impactar la producción ni afectar los servicios básicos de la compañía. A continuación se enumeran algunos requerimientos solicitados para la implementación del proyecto.

- Se selecciona una modalidad de laboratorio de pruebas de un sistema de detección de fallos, para verificar su funcionamiento previo a una implementación en las facilidades de la empresa.
- El sistema de detección de fallos debe poder ser genérico para utilizarse en cualquier sistema de control que lo requiera, por lo que se deben poder variar parámetros que permitan ajustarlo a los requerimientos del proceso.

- El criterio para definir una falla del sensor debe ser fundamentado estadísticamente.
- Cuando se detecta una falla, se debe retener el último valor estable de la salida del regulador PID mediante un mecanismo *HoldLastState*.
- Debe contar con una interfaz gráfica de usuario, fácilmente agregable al sistema de monitoreo de los edificios BMS, desde donde se puedan modificar parámetros y monitorear el comportamiento de las salidas de los PID y de las entradas de las variables de proceso o PV por sus siglas en inglés.

Capítulo 2

Meta y objetivos

2.1 Meta

Diseñar implementar y validar un sistema de manejo de fallas en los sistemas de control de los edificios de la empresa Componentes Intel de Costa Rica, con *HoldLastState*.

2.2 Objetivo general

Diseñar implementar y validar un sistema de manejo de fallas para un sistema de control patrón en el laboratorio de pruebas de la empresa Componentes Intel de Costa Rica.

2.3 Objetivos específicos

1. Analizar comprobar y registrar la situación actual de los sistemas de control de temperatura, presión, nivel de altura.
2. Diseñar e implementar un sistema de control automático patrón para utilizar escenarios reales con la respuesta de variable de control ante las fallas desarrolladas en el laboratorio de pruebas.
3. Diseñar y realizar pruebas de fallo en el sistema patrón de control automático.
4. Diseñar e implementar un sistema *HoldLastState* capaz de mantener la última salida conocida antes de una falla.

5. Diseñar e implementar un sistema de detección de fallas multiplataforma, capaz de gobernar las alarmas y un sistema *HoldLastState*.
6. Comparar y validar el funcionamiento del Sistema de Detección de Fallas Multiplataforma en el Sistemas de Control Automático patrón.

Capítulo 3

Marco teórico

3.1 Descripción del sistema a mejorar

En la figura 3.1.1 se aprecia el diagrama de flujo propuesto del sistema de control a mejorar. A partir de este diagrama se considera un lazo de control automático patrón, compuesto de un control PID, una planta, una realimentación a través de un sensor y una referencia. Este sistema patrón es un ejemplo que representa el funcionamiento generalizado de los sistemas de control automático en las facilidades de la empresa Componentes Intel de Costa Rica; para efectos del laboratorio de pruebas realizado en el departamento de FTS.

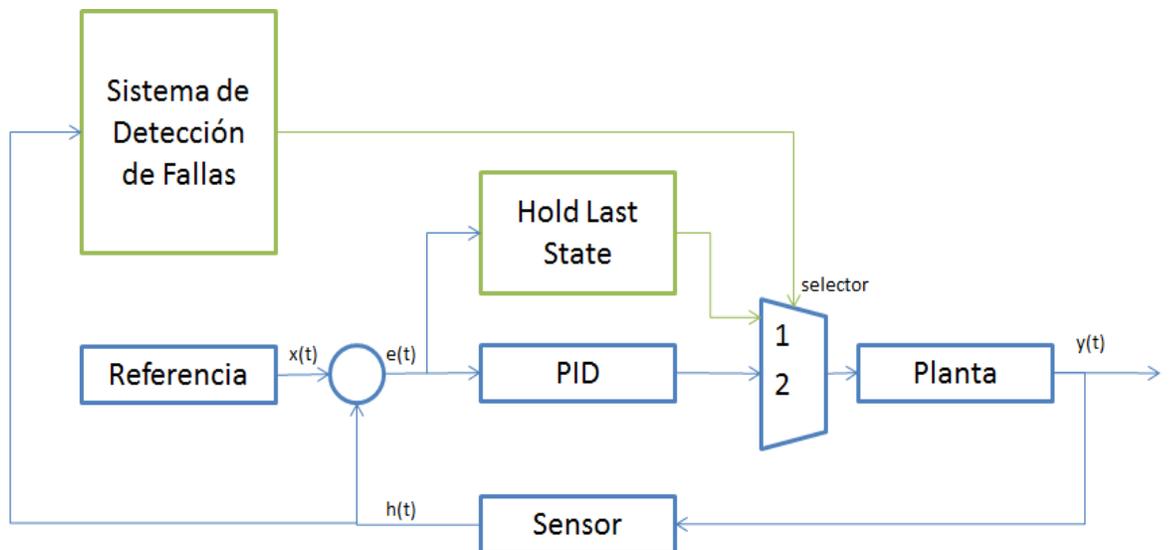


Figura 3.1.1 Descripción Generalizada de un Sistema Patrón de Control Automático con Capacidad de Detección de Fallas y HLS (Power Point)

En la figura 3.1.1 se aprecia la inserción del sistema de detección de fallas y el HLS dentro de un esquema de lazo de control patrón. En esta figura se aprecia que en condiciones normales el sistema de control patrón opera de manera estable y se asume que el sensor está muestreando la salida de la planta de manera apropiada y que a su vez realimenta en un rango estándar de 4 a 20 mA al bloque de control PLC o SLC, donde posteriormente es escalado a un valor de operación apropiado para el sistema de control.

El sistema de detección de fallas, toma esta salida escalada conocida como variable de proceso o PV, y la analiza, de acuerdo a un algoritmo adecuado. Si este mecanismo detecta una posible falla en los valores del PV, activa un multiplexor, que inmediatamente coloca a la salida del sistema un *HoldLastState*. El HLS retendrá la salida del sistema de control en el último estado seguro hasta que un operador verifique la falla, la corrija y haga un reset al sistema de detección de fallas.

Algunos de los sistemas de control más críticos se encuentran ubicados en el sistema RODI; donde se prevé impactar positivamente su funcionamiento mediante el sistema de detección de fallas con HLS. Dentro de dicho sistema por ejemplo, se puede apreciar el lazo de control encargado de inyectar agua ultra pura al piso de producción del edificio CR3. En la figura 3.1.2 se aprecian las dos bombas que inyectan agua ultra pura a la tubería que ingresa a piso de producción.



Figura 3.1.2 Bombas de Inyección de Agua Ultra Pura para Piso de Producción (Fotografía)

Las dos bombas en la figura 2 son de gran importancia para el negocio de la empresa, ya que se utilizan para el corte y pulido de los chips que se están fabricando en piso de producción. La importancia es alta cuando se considera que una falla en estos sistemas ocasionaría un paro en la producción, daño de las bombas y hasta una pérdida económica de más de dos millones de dólares el minuto, según el ingeniero asesor. Es importante destacar que un cambio en la programación del PLC RODI, así como en cualquier otro PLC ligado al control de algún proceso en piso de producción, solo se puede producir cuando la manufactura se encuentre en *Shut Down*, lo cual ocurre muy pocas veces al año, a razón de mantenimiento principalmente.

En la figura 3.1.3, se puede apreciar un sensor y un transmisor de presión, responsable de realimentar el control PID que gobierna estos actuadores. Este instrumento de monitoreo recibe el nombre de *PolishLoopProductPressure* y es uno

de los tantos instrumentos de monitoreo existentes para los lazos de control implementados en Componentes Intel de Costa Rica.



Figura 3.1.3 Sensor y transmisor de presión (Fotografía)

El sistema mostrado como ejemplo anteriormente es solo uno de los sistemas que se ha considerado para el diseño del sistema de detección de fallas con HLS. La totalidad de los sistemas considerados para el diseño del laboratorio de pruebas se describen en la tabla 1.1.

Los sistemas de control de la tabla 1.1.1 se monitorean a través del *BuildingMonitoringSystem*, o BMS. Este sistema se presenta en la figura 3.1.4 Es a través de este sistema que los encargados de facilidades pueden realizar acciones como activar o desactivar sistemas de control y alarmas, establecer los controles PID de los actuadores en automático o manual, monitorear gráficas de tendencias de las variables de proceso en cada uno de los sistemas disponibles en los edificios, encontrar la ubicación de algún equipo en particular entre otros.

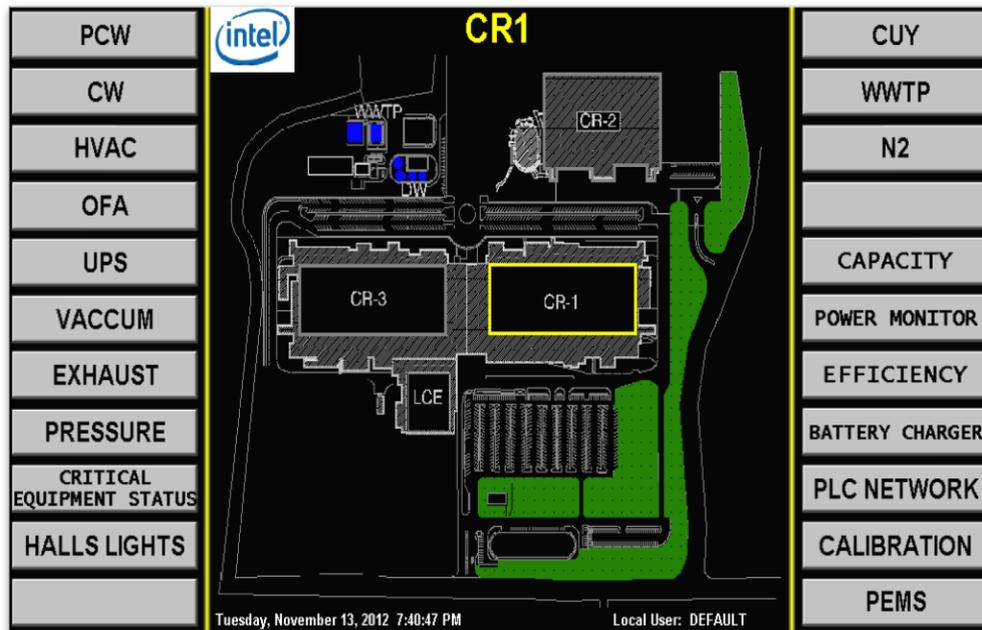


Figura 3.1.4 Interfaz del Sistema de Monitoreo (RSView)

El *BuildingMonitoringSystem* (BMS) es el sistema de monitoreo utilizado por FTS para detectar problemas en todo el complejo de la empresa. Este sistema fue diseñado para monitorear en tiempo real todas las variables importantes en cada uno de los sistemas de control. Además, se puede conocer la salida de todos los sensores en operación y el funcionamiento de la variable de control (CV o *control variable*) los reguladores PID asociados estos instrumentos de medición en tiempo real y se puede actuar directa o indirectamente sobre algunos parámetros, dependiendo de los sistemas.

3.2 Antecedentes Bibliográficos

La tecnología del equipo de medición utilizado corresponde principalmente al calibrador Fluke 744, sensores de presión 700PD4 y 700P27 y pozo seco Fluke 9142. A continuación se procede a explicar las principales características de estos dispositivos.

3.2.1 Fluke 744 DocumentingProcessCalibrator

Los transmisores inteligentes son parte importante de los procesos de medición en la industria. La herramienta Fluke 744 es un dispositivo que permite calibrar, mantener y dar soporte a través del protocolo de comunicación HART a la instrumentación de un proceso. El sistema permite cumplir estándares internacionales tales como ISO 9000, FDA, EPA y OSHA. El equipo utilizado se presenta en la figura 3.2.1.



Figura 3.2.1 Documentador y Calibrador de Procesos Fluke 744 (Fotografía)

Este equipo soporta mediciones con once tipos de termo pares a enumerar E, N, J, K, T, B, R, S, C, L o U. Además también es posible medir valores en una RTD. Para medir presión de referencia se pueden utilizar sensores de la serie Fluke propios para cada intervalo de presión y con comunicación dedicada con el calibrador. Permite medir y calibrar transmisores inteligentes de presión y temperatura además de documentar y certificar el valor dejado o *As Found* y el valor encontrado o *As Left*.

3.2.2 Sensores de Presión 700PD4 y 700P27

Los sensores de presión utilizados corresponden a los modelos 700PD4 y 700P27. Se encuentran en forma de presión absoluta (con referencia en la presión atmosférica) o en forma de presión diferencial, con una o dos entradas de aire respectivamente. Un sensor de presión diferencial con su entrada baja al aire también funciona como sensor de presión absoluta. En la figura 3.2.2 se observa un sensor de presión 700PD4, con rango de -15 PSI hasta +15 PSI.



Figura 3.2.2 Sensor de Presión Modelo 700 PD4 (Fotografía)

3.2.3 Fluke 9142 Field MetrologyWell

Este dispositivo permite recorrer puntos específicos de temperatura, con el propósito de documentar y calibrar un transmisor inteligente y su sensor de temperatura respectivo. Tiene un rango de temperaturas a 23°C de -25°C a 150°C. Tiene un tamaño de inmersión de los RTD de 150 mm y dentro del pozo, tiene una resolución de monitoreo de temperatura del 0.01°C. Su tiempo de calentamiento para pasar de 23°C a 150°C es de 23 minutos mientras que su tiempo para pasar de -25°C a 150°C es de 25 minutos. Además, su tiempo para pasar de 23°C a -25°C es de 15 minutos y el tiempo para pasar de 150°C a -23°C es de 25 minutos. Un termopozo Fluke 9142 se presenta en la figura 3.2.3.



Figura 3.2.3 Pozo Seco Fluke Modelo 9142 (Screenshot del Manual)

3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema.

El sistema de detección de fallas está orientado a trabajar en conjunto con sistemas que operan utilizando mecánica de fluidos y sistemas de regulación de la temperatura. En el primer caso la variable de proceso para el sistema de control es la presión como una medición directa, para determinar la presión diferencial o para determinar la presión diferencial para el cálculo de un flujo. Cada uno de estos sistemas tiene sus principios fundamentales, que deben ser considerados para entender el comportamiento estadístico de los sistemas. De acuerdo con la tabla 1, los sistemas CW, DCW, CHW, RODI, DW, WWTP y PCW son sistemas de control de agua mientras que en los sistemas MEF, interesa el comportamiento de gases como el aire. En estos casos, los conceptos de termodinámica, y mecánica de fluidos son necesarios para poder describir el origen de una falla y por ende, implementar un sistema capaz de detectarla.

3.3.1 Mecánica de Fluidos

Resulta importante conocer la teoría detrás de la mecánica de medición de la presión. La teoría de mecánica de fluidos nos permite conocer por qué factores como la compresión de un fluido pueden interferir en el proceso de medición o afectar el proceso de calibración de un sensor de presión y ocasionar su eventual falla luego de ser puesto en marcha. La magnitud escalar de presión en un punto se define con la ecuación 3.1.

$$P = \frac{dF}{dA} \quad (3.1)$$

A partir de la ecuación 3.1 se conoce que la presión en una altura cualquiera de una columna va a tener una relación directamente proporcional del área transversal y de la fuerza que ejerza un fluido sobre la superficie.

La compresibilidad puede ser descrita en un fluido por el coeficiente B, definido en la ecuación 3.2.

$$B = \frac{\Delta P}{\Delta \rho / \rho} \quad (3.2)$$

A partir de la ecuación 3.2 se aprecia que la compresibilidad está representada en función de un cambio de presión por un cambio relativo de densidad. En el caso de la presión, también es importante conocer la compresibilidad del fluido, ya que una variación en la presión por compresibilidad que nos aleje del valor esperado puede provocar una lectura errónea.

La presión puede variar en múltiples direcciones, siendo por lo tanto una cantidad vectorial representable en coordenadas rectangulares como las de la ecuación 3.3 y en notación diferencial en la ecuación 3.4.

$$\vec{P} = P \cdot a_x + P \cdot a_y + P \cdot a_z \quad (3.3)$$

$$dP = -p \cdot a_x \cdot dx - p \cdot a_y \cdot dy - p \cdot (a_z + g) \cdot dz \quad (3.4)$$

Se le conoce como presión estática a aquella que solo varía en el eje z, de acuerdo al marco de referencia. Tomando como base la ecuación 3.3, se determina la presión estática. Este tipo de presión se presenta en la ecuación 3.5

$$P_{Estatica} = P \cdot a_z \quad (3.5)$$

A partir de la ecuación 3.2 y la ecuación 3.5 se puede comprender que un cambio en la presión estática ΔP en dirección a_z puede haber ocurrido por la compresión de un fluido en el proceso de calibración (por ejemplo una calibración sin haber evacuado toda el agua del tubo), y que esto vaya a producir posteriormente una falla en el sensor fuera de rango; sin que esta situación amerite un alto en el proceso de control que se está llevando a cabo.

3.3.1.1 *Sensor y Transmisor de Presión*



Figura 3.3.1 Sensores de Presión en Operación con Conexión de Tubo de Acero Inoxidable de $\frac{3}{4}$ de Pulgada (Fotografía)

Los sensores de presión generalmente son conectados a través de un tubo de acero inoxidable de ¾ de pulgada, al punto donde se quiere determinar la variable de proceso. En la figura 3.3.1 se observan cinco sensores de presión en operación dentro de un sistema de filtrado de agua en cuarto RODI, edificio CR3, en las facilidades del cliente.

Un error común es no considerar la columna de agua que se genera al cambiar la altura del tubo de acero inoxidable para el cálculo de la presión de referencia. La ecuación 3.6 representa el Principio de Pascal.

$$P = p_o + \rho \cdot g \cdot h \quad (3.6)$$

No considerar el Principio de Pascal en la referencia del sistema de control puede ocasionar una falla, *warning* o alarmen el sistema de control del BMS. En la figura 6 se muestra un sensor y transmisor de presión Rosemount modelo 3051.



Figura 3.3.2 Sensor de Presión y Transmisor Marca Rosemount Modelo 3051 (Fotografía)

El sensor y transmisor mostrado en la figura 3.3.2 cuenta con una configuración interna que puede ser modificada vía comunicación HART. Entre estas configuraciones se puede modificar el rango de operación, el tipo de salida (corriente o tensión) los rangos de salida (por ejemplo de 4 a 20 mA o de 0 a 10 V) y se le puede dar servicio al dispositivo a través de un calibrador.

3.3.2 Termodinámica

Para el caso en estudio, es importante rescatar la primera ley de la termodinámica. Esta ley explica que la conservación de la energía ocurre cuando la energía interna del sistema ΔE durante una transformación, es el trabajo realizado sobre el sistema W más la cantidad de calor absorbido por un sistema. Dicho de otro modo, se define la cantidad de calor absorbido por un sistema Q , como el cambio de la energía interna que no se debe al trabajo, tal como se explica en la ecuación 3.7.

$$\Delta E = Q + W \quad (3.7)$$

El concepto de calor es importante dentro del marco del laboratorio de pruebas, ya que se implementó un sistema de control de temperatura patrón, para realizar múltiples pruebas controladas. Existe gran variedad de sensores para medir temperatura. Algunos de los más populares en el control de procesos en la industria son los termistores, los termopares y los sensores de detección de temperatura por resistencia variable o RTD, por sus siglas en inglés. Este laboratorio de pruebas fue concebido en el marco de una simulación de un sistema de enfriamiento por ventilación para una aplicación que se encuentre realizando un trabajo y por ende, irradie calor que requiera ser disipado. Esta temperatura es monitoreada a través de un sensor RTD marca Rosemount de cuatro hilos disponible en el laboratorio de pruebas. Respecto al calor transferido al sensor, interesa conocer el valor de la temperatura inicial y final, por lo que en la ecuación 3.8 se presenta la relación de la ecuación calorimétrica.

$$Q = c \cdot m \cdot (T_F - T_I) \quad (3.8)$$

Se conoce de antemano de la ecuación 3.8 que Q es la cantidad de calor absorbido por el sistema, m es la masa que absorbe el calor, $(T_F - T_I)$ es el delta de

las temperaturas final e inicial y c es la constante calórica de la sustancia de la que está compuesta la masa.

3.3.2.1 Sensor de Temperatura RTD

El sensor detector de temperatura por resistencia, o *Resistor Temperature Detector* RTD por sus siglas en inglés, tiene características físicas particulares. Como se puede apreciar en la ecuación 3.9, la resistencia de un sensor RTD depende de la temperatura del medio y de un coeficiente de temperatura de la resistencia α_1 .

$$R = R_0(1 + \alpha_1 T) \quad (3.9)$$

El coeficiente de temperatura α_1 depende del tipo de material. Cada material tiene una resistividad asociada y una constante de resistividad diferente. Estos valores se presentan en la tabla 3.3.1

Tabla 3.3.1 Resistividad y Coeficiente Térmico de los Materiales en un RTD

| METALES | RESISTIVIDAD (ρ) Ωm | COEFICIENTE TERMICO α_1 K^{-1} |
|-----------|---|---|
| Cobre | $1,68 \times 10^{-8}$ | $4,3 \times 10^{-3}$ |
| Níquel | $6,84 \times 10^{-8}$ | 7×10^{-3} |
| Platino | $10,6 \times 10^{-8}$ | $3,9 \times 10^{-3}$ |
| Wolframio | $5,6 \times 10^{-8}$ | $4,5 \times 10^{-3}$ |

Las RTD vienen en una variedad de dos, tres y cuatro cables. Las RTD de dos cables utilizan el este medio para proveer la corriente de excitación y medir la tensión de la RTD simultáneamente. En una RTD de tres cables, uno de los cables está conectado a un lado del elemento de temperatura y los otros dos son conectados al otro lado del elemento. Finalmente, una RTD de cuatro cables es la conexión óptima para este tipo de sensores. Dicha configuración remueve el error causado por la resistencia no coincidente de los hilos conductores. En la figura 3.3.3 se presenta una representación de las partes que componen a una RTD industrial de tres hilos con fines ilustrativos.

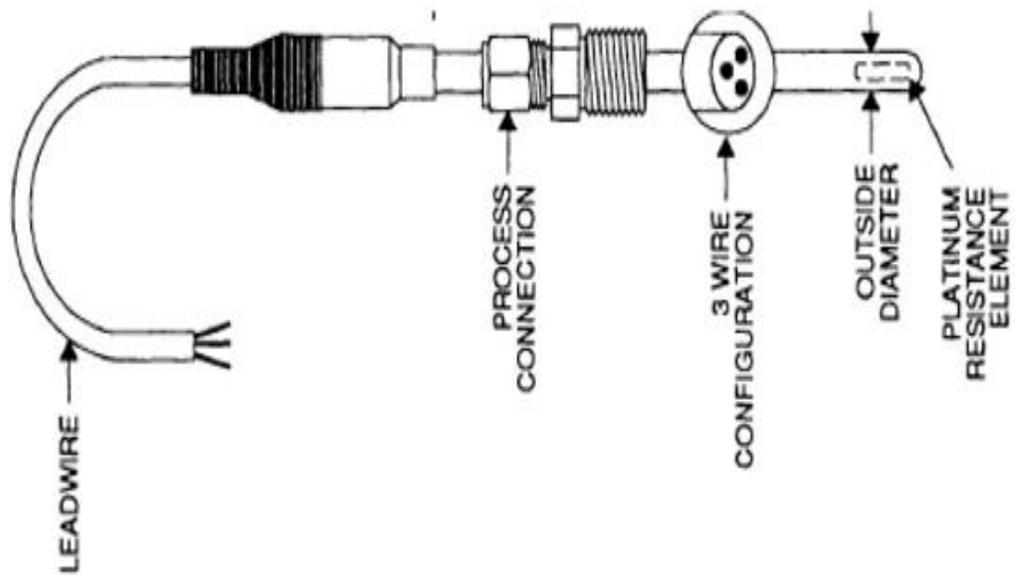


Figura 3.3.3 Representación de las partes de una RTD (Screenshot[2])

En la figura 3.3.4 se muestra el sensor RTD de platino utilizado en el sistema de control patrón del laboratorio de pruebas en conexión con su respectivo transmisor Rosemount, modelo 3144P.



Figura 3.3.4 Sensor de temperatura RTD utilizado en el sistema de detección de fallas con su respectivo transmisor (Fotografía)

Al igual que el transmisor de presión, el transmisor de temperatura también puede ser configurado vía comunicación HART para modificarle el tipo de salida y los rangos de operación. Adicionalmente también se le puede dar servicio al dispositivo a través de un calibrador con comunicación HART. El transmisor de temperatura utilizado en el sistema de control patrón, basado en RTD provee el diagrama de conexiones recomendado por el fabricante para una RTD de 4 cables. Este diagrama se muestra en la figura 3.3.5.

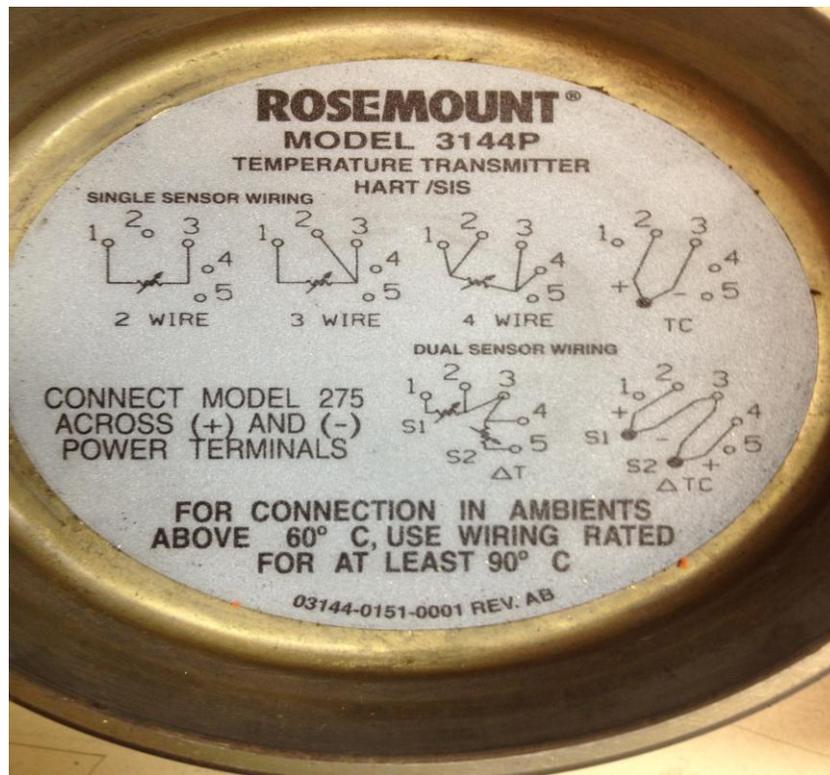


Figura 3.3.5 Diagrama de conexiones recomendado por el fabricante para una RTD con dos, tres o cuatro hilos (Fotografía)

A partir del diagrama de conexiones de la figura 3.3.5 se puede apreciar la conexión recomendada por el fabricante (Rosemount) para la configuración de uno, dos tres y cuatro hilos. Además el fabricante recomienda otro tipo de conexiones para otro tipo de sensores, por ejemplo termo pares, o conexiones de sensores duales. La conexión implementada en este laboratorio de pruebas corresponde, en la figura 3.3.5, al diagrama sobre la leyenda *4 WIRE*.

Capítulo 4

Procedimiento Metodológico

Para encontrar la solución al problema se siguieron una serie de procedimientos necesarios para comprender el funcionamiento actual de los sistemas y por lo tanto poder definir apropiadamente un mecanismo de detección de fallas apropiado. Varios de estos procedimientos se explican a continuación.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Los efectos del problema a resolver se cuantifican en términos de daños al equipo y pérdida de producto en el piso de producción. Para reconocer y definir el problema se realizan diferentes procedimientos que involucran definir adecuadamente qué es una falla en un sensor o un transmisor de un sistema de control. Para esto se llevaron a cabo las siguientes actividades.

1. Caracterización de los eventos considerados como fallas en los sistemas de control mediante revisión de alertas, condición de los equipos y comprobación de los transmisores, en el BMS.
2. Realización de pruebas en laboratorio donde se comprueban los efectos de un fallo en el sistema de control patrón implementado.
3. Calibración de algunos sensores en estudio, utilizando el documentador y calibrador Fluke 744, sensores de presión o temperatura y comparación con los certificados de calibración, históricos de calibración, valor encontrado y valor dejado entre otros.

4. Reconocimiento de algunos sensores con problemas en su rango de operación o con problemas de salida en el transmisor.

Las restricciones en cuanto a la solución del problema se basan en la prohibición a impactar la operación de ninguno de los sistemas que se encuentra en producción. Para poder hacer un cambio a algún sistema en funcionamiento se debe obtener un permiso anticipado de trabajo llamado “Programa Preventivo de Incidentes” o SIPP por sus siglas en inglés. Además, se debe garantizar que el piso de producción no se encuentre en operación, por lo que se estima que este tipo de cambios en la programación de los SLC deben hacerse en una fecha de apagado general de piso de producción o *Shutdown*. Otras limitaciones son el uso de equipo de protección personal en todo momento, la necesidad de trabajar con un asistente colaborador y permisos de operación en gabinetes de 120 V o más por riesgo de arco eléctrico.

4.2 Obtención y análisis de información

La información preliminar necesaria para la determinación del problema se adquiere a través cuatro fuentes. La primera es la documentación disponible en el departamento de FTS, en Componentes Intel de Costa Rica. La segunda fuente consiste en un estudio de campo sobre el estado general de los sensores y transmisores. La tercera fuente corresponde a una consulta hecha al ingeniero asesor de la empresa (INGPRO S.A.), quien cuenta con amplia experiencia en el funcionamiento de los sistemas de control del cliente.

La cuarta fuente es una consulta generalizada a los dueños de los equipos involucrados en los sistemas de control estudiados, con el fin de conocer más de la problemática que afecta a la empresa. La finalidad de esta fuente es estudiar cómo son los fallos en realidad, qué efectos ocurren y cuál es el impacto en la producción por este tipo de acontecimientos.

De la investigación mencionada como segunda fuente, y utilizando además la documentación, se realiza una revisión comparativa de la última calibración en algunos sensores, certificados de calibración y reportes de trabajos. Se procede a verificar en campo los sensores no críticos disponibles para el estudio. Esta verificación se realiza mediante el procedimiento de calibración encontrado en el apéndice, bajo el rubro de protocolos de medición.

Existen diferentes criterios que deben ser considerados para definir una falla de la mejor manera. Para ello, se deben considerar los principios fundamentales de la mecánica de fluidos y temperatura. Utilizando la documentación disponible en el departamento de FTS, a través del software de monitoreo de los edificios, BMS; se utiliza un método de inferencia estadística en base a una sola muestra, llamado Hipótesis Estadística, para definir el concepto de falla en el sistema. Paralelo a este método de análisis se considera también el criterio del experto, es decir del dueño del sistema en cuestión. El análisis válido es el que permite a la planta funcionar y permitir la producción adecuadamente; y solo aquel empleado que está familiarizado con el sistema en cuestión, puede conocer los ajustes necesarios con exactitud. Para unificar criterios, dentro del análisis de hipótesis estadística, se considera analizar y determinar una región de aceptación de valores críticos definidos por el dueño del sistema y criterios estadísticos apropiados tales como la distribución normal y medidas de tendencia central.

Las restricciones de acceso y manipulación de los sistemas de control en funcionamiento por razones de seguridad personal y de la producción, hace necesario que se implemente un laboratorio de pruebas. En este espacio se valida la unificación de criterios estadísticos con los del experto como una estrategia metodológica apropiada. Se prevé tener un impacto positivo importante en el funcionamiento de los sistemas de control implementados en las facilidades de

Componentes Intel de Costa Rica que permita el ahorro de recursos y tiempo en atención de problemas e impacto a la industria.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

El detector de fallas más utilizado en estos procesos suele ser un comparador de ventana para la variable de proceso, según algunos técnicos asesores, involucrados en la oficina de FTS. Este mecanismo tiene múltiples ventajas en la implementación debido a que solo depende del conocimiento de los rangos de operación del proceso para funcionar. Empero, este sistema obvia varias fallas que solo pueden ser detectadas mediante un análisis estadístico.

La forma en que se analiza la información es mediante el concepto de qué debe representar verdaderamente una falla en los procesos de control. Se define la falla de un sensor como hipótesis y se busca que el sistema decida si se acepta o se rechaza este enunciado a partir de la inferencia estadística. Como menciona Montgomery “Una hipótesis estadística es un enunciado acerca de los parámetros de una o más poblaciones”. Como se afirmó anteriormente, el rango muestral obtenido mediante los procesos de calibración se asume como representativo para decir que sigue la tendencia poblacional del comportamiento de los sensores. Además, observando la distribución de las frecuencias de aparición de los datos en un sistema de control adecuado, es aceptable considerar que la distribución será normal hacia su referencia y que merece un tratamiento estadístico basado en medidas de tendencia central para su análisis.

Otro factor importante en la selección de una solución es que el proyecto de diseño es de bajo costo ya que los sensores y equipos de control ya se encuentran instalados y en operación, por lo que conviene utilizarlos no solo para realizar su debido proceso, sino además como un mecanismo de monitoreo de sus propios sensores. De esta forma no solo se realizan los procesos de control, sino también se

garantiza su operación en el tiempo sin poner en riesgo la producción de una meta de 1.71 millones de unidades en un *Cycle Time* o período de producción de 5 días.

4.4 Implementación de la solución

En la implementación de la solución, inicialmente se toma como referencia los criterios establecidos por la oficina de FTS. Para ello, fue necesario utilizar un microcontrolador Allen-Bradley SLC 500 y tomar como referencia los programas preexistentes de algunos de los sistemas de control. Como no se puede impactar directamente el sistema debido a políticas de la empresa, se toma la decisión de que es necesario realizar un sistema de control patrón, que emule actuar sobre una planta, aunque con la precaución de que el sistema de control no se sature fácilmente.

La respuesta transitoria no es crítica en estos sistemas, aunque sí es crítico mantener el sobreimpulso regulado, libre de acciones agresivas, debido a que cualquier pico a la salida del sistema de control puede dañar los actuadores. Con esto en mente, se procede a diseñar un regulador PID patrón, con constante integrativa igual a cero para evitar la saturación por el error, y con características de diseño tomadas por conocimiento de la relación entre las constantes proporcional, derivativa e integradora y sus efectos sobre el sobreimpulso, el tiempo de estabilización y el error en estado estable. El cálculo de un PID exacto no se utiliza en estos sistemas de control ya que su operación es muy estable y no se conocen con exactitud las ecuaciones de las plantas o actuadores, que pueden ser bombas, abanicos, *chiller*, etc. La respuesta del sistema de control patrón para una referencia de 12° Celsius se muestran en la figura 4.4.1

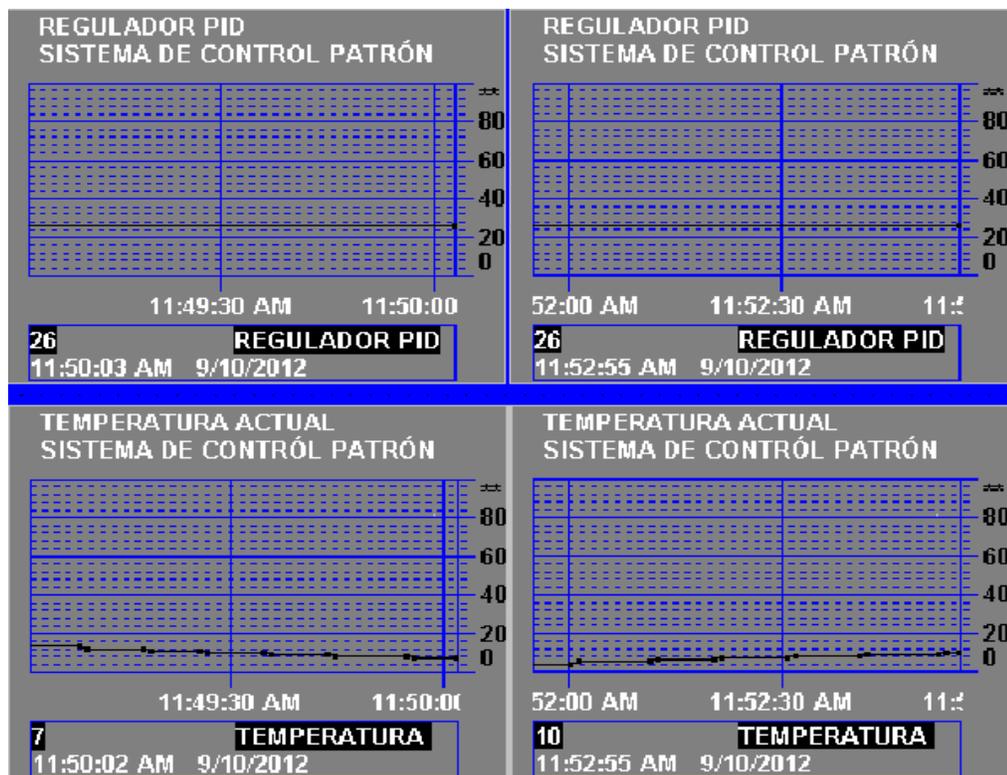


Figura 4.4.1 Respuesta del Sistema de Control Patrón con Referencia de 12° Celsius (RSView)

Una vez implementado el sistema de control patrón se debe seleccionar el método estadístico por el que se analizará una falla. Este aspecto medular del proyecto es de vital importancia, por lo que se analiza en base a las investigaciones de campo realizadas con anterioridad, para justificar con un argumento matemático la selección y la implementación realizada. Parte de la problemática existente para detectar una falla es que no se justificaba realmente qué es una falla, o cuales características propiamente deberían indicar si un sistema está en peligro o requiere de atención. Dependiendo del sistema, una falla no es representada únicamente por sobrepasar un límite de operación, o llegar a valores extremos. Es por eso que se implementa un sistema basado en estadística de tendencia central, ya que los sistemas de control tienen como objetivo estabilizar la variable de proceso en una referencia, por lo que se puede afirmar que seguirá una distribución normal.

La principal diferencia de un sistema de límites de control matemático con respecto al del presente proyecto es que el cálculo de los límites superior e inferior no se lleva a cabo únicamente a partir del valor del promedio. Se debe recordar que parte de la premisa de que el sistema de detección de fallas sea realmente práctico para monitorear procesos es que el dueño del sistema pueda establecer un porcentaje a partir de los cálculos matemáticos de los rangos de control inferenciales, para poder así incluir los criterios del dueño del sistema dentro de la selección de una falla. Inicialmente se establecen por defecto los rangos establecidos por el método estadístico de gráficos de control de fracción de unidades no conformes “p”. El intervalo de tiempo entre cálculos de estos rangos puede ser actualizado por el usuario.

Para realizar el método de cálculo de los límites de control de fracción de unidades no conformes “p” inicialmente el usuario debe introducir los rangos de una ventana a partir de donde los rangos serán o no conformes a los requerimientos. Por ejemplo, para una temperatura de 25°C, el usuario puede decir que las temperaturas no conformes serán aquellas que estén por encima de los 35°C y por debajo de los 15°. Una vez realizado esto, el sistema procede a calcular periódicamente la fracción media de las unidades no conformes p_i utilizando la ecuación 4.1, con N igual a 30 número de muestras en un registro de ese tamaño.

$$\bar{p} = (p_1 + \dots + p_N) / N \quad (4.1)$$

Posteriormente se calcula el tamaño medio de las muestras n , tal como lo indica la ecuación 2.

$$n = (n_1 + \dots + n_N) / N \quad (4.2)$$

Finalmente se calculan los porcentajes que serán los límites de control superior e inferior que regulen el comportamiento medio instantáneo de los valores, utilizando las ecuaciones 4.3 y 4.4.

$$LCS_p = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(100 - \bar{p})}{\bar{n}}} \quad (4.3)$$

$$LCI_p = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(100 - \bar{p})}{\bar{n}}} \quad (4.4)$$

Una vez hecho esto, lo que ocurre es que la media, que se calcula instantáneamente, estará fluctuando entre estos dos rangos de control que se calculan periódicamente, según un tiempo establecido de cálculo que es ingresado directamente por el usuario. La gráfica 4.4.2 presenta de manera completa el sistema de límites de control en operación.

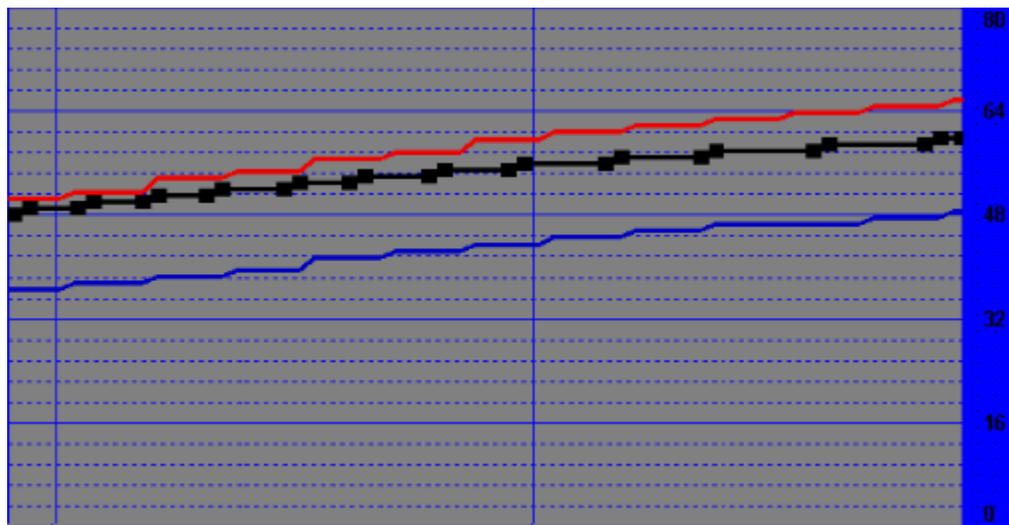


Figura 4.4.2 Gráfica del Sistema de Detección de Fallas en Operación con Límites de Control Calculados cada 5 segundos (RSView)

Una vez finalizado el proyecto, se divulga el laboratorio de pruebas en la oficina de FTS. Se presenta el laboratorio de pruebas a los ingenieros encargados de esta oficina por parte de Intel y a los responsables de la empresa Jones LangLaSalle JLL, responsables de dar mantenimiento a las facilidades de Componentes Intel de Costa Rica.

4.5 Reevaluación y rediseño

Para mejorar el proceso de detección de fallas se puede desarrollar un mecanismo para detectar comportamientos anormales durante el arranque de un sistema de control, particularmente durante el primer minuto. Prediciendo estos valores, entonces el sistema ya no tendría que tomar como referencia el valor ingresado por el usuario como referencia, y además podría tolerar ciertos tipos de arranques que podrían ser normales pero con un sobre impulso grande. Existe el riesgo que un sistema que encienda con un sobre impulso active el sistema de detección de fallas si el transitorio durante el encendido del sistema de control sobrepasa los límites de control.

Capítulo 5

Descripción Detallada de la Solución

El laboratorio de pruebas implementado se ubica dentro de las instalaciones de la empresa Componentes Intel de Costa Rica, específicamente en las oficinas de FacilitiesTechnicalSupport (FTS). La empresa Componentes Intel de Costa Rica tiene múltiples sistemas de control que cuentan con una estructura similar a la sección de color azul de la figura 3.1.1. Se identificó que la solución no podía ser parte del lazo de control en cuestión, debido a que uno de los criterios de diseño es la portabilidad del sistema; es decir, que los cambios que se deban realizar en la programación de los controladores para su implementación han de ser mínimos. Esto último permite agregar el sistema de detección de fallas de manera sencilla en la implementación de los sistemas de control de la tabla 1.1.1. Otro criterio de diseño es que el sistema de detección de fallas debe ser personalizable. Una falla en un sistema de aire como el MEF no será similar a una falla en un sistema de agua como el RODI. Una de las premisas del sistema de detección de fallas es que el criterio del experto, que en este caso es el “dueño” o encargado del equipo, es fundamental para definir qué es realmente una falla en el sistema. Para escoger el tipo de parámetros que el usuario es capaz de modificar, el tipo de visualización que va a tener el sistema y como se puede acceder a este sistema es importante hacer un análisis de soluciones basado en la implementación actual de los sistemas de control y monitoreo a través del BMS.

5.1 Análisis de soluciones y selección final

Como se mencionó anteriormente, los sistemas de control de la tabla 1.1.1 se monitorean a través del *BuildingMonitoringSystem*, o BMS. Este sistema se presenta en la figura 3.1.4. Es a través de este sistema que los encargados de facilidades pueden realizar acciones como activar o desactivar sistemas de control y alarmas, establecer los controles PID de los actuadores en automático o manual,

monitorear gráficas de tendencias de las variables de proceso en cada uno de los sistemas disponibles en los edificios, encontrar la ubicación de algún equipo en particular entre otros.

La solución propuesta debe incluir una interfaz gráfica, accesible remotamente a través del sistema BMS, en donde el usuario pueda cambiar los valores para personalizar el sistema de detección de fallas acorde con el sistema que se está protegiendo. Además, debe permitir una visualización gráfica del control que se está ejerciendo sobre la variable de proceso, y definir de acuerdo a una hipótesis, cuándo está el sistema en falla. La planta sobre la que se plantea efectuar este control es una planta simulada de enfriamiento de un proceso. Se simula un control patrón tipo PID que será afectado por la variable del proceso, proveniente de un transmisor de temperatura de 4 a 20 mA. Las soluciones planteadas al proceso de detección de fallas corresponden a métodos para el control estadístico de procesos. Se pretende analizar la variable de proceso para así evitar que el fallo se propague hasta los actuadores a la salida del PID.

Un método de detección de fallas considerado fue el comparador de ventana para la variable de proceso. Este detector de fallas fue considerado como la primera alternativa para prevenir fallas en los equipos de control de la empresa. Este sistema es capaz de mantener el sistema dentro de un rango preestablecido a la variable de proceso y de alertar en caso de que se sobrepase alguno de los límites de control establecidos en el programa. Esta solución cuenta con una serie de inconvenientes importantes. El principal inconveniente consiste en que el detector de fallas no posee portabilidad, es decir, si se implementa esta solución para un sistema de control particular, esta solución podría no funcionar para otro sistema con mediciones diferentes, en especial si los rangos no se pueden cambiar a través de una interfaz de usuario.

El segundo inconveniente es que el proceso puede sobrepasar el límite superior o inferior de control sin que esto represente una falla al sistema, generando una alerta. Esto puede ocurrir porque los valores instantáneos no siempre son representativos de que un proceso esté incurriendo en una falla, en especial cuando se trata de sistemas que pueden fluctuar ampliamente por operación normal, tal como la presión de agua o temperatura del aire. El tercer y último inconveniente es que el sistema de detección estaría aislado del criterio de experto, exponiendo el sistema a operar bajo condiciones estáticas que podrían cambiar por situaciones normales.

Para realizar una prueba crítica se realiza un comparador de ventana básico. Utilizando el equipo del laboratorio de pruebas, se considera una gráfica de operación de un transmisor real en funcionamiento a través del BMS. Esta gráfica se presenta en la figura 5.1.1. La línea azul es el flujo principal, la verde es la presión principal, la roja es un analizador de concentración de O₂ y la amarilla es un analizador de concentración de humedad, todo para el sistema de N₂.

Otro método de detección de fallas es el cálculo estadístico de límites de control. Se realiza un análisis de datos a partir de varios sistemas de control, mostrando resultados similares en cuanto a su distribución, por lo que se concluye que las variables de proceso de sistemas de control en general tienden a tener una distribución similar a la campana de gauss. A continuación se explica con uno de los análisis realizados la aceptación del mecanismo dentro del sistema de fallas.

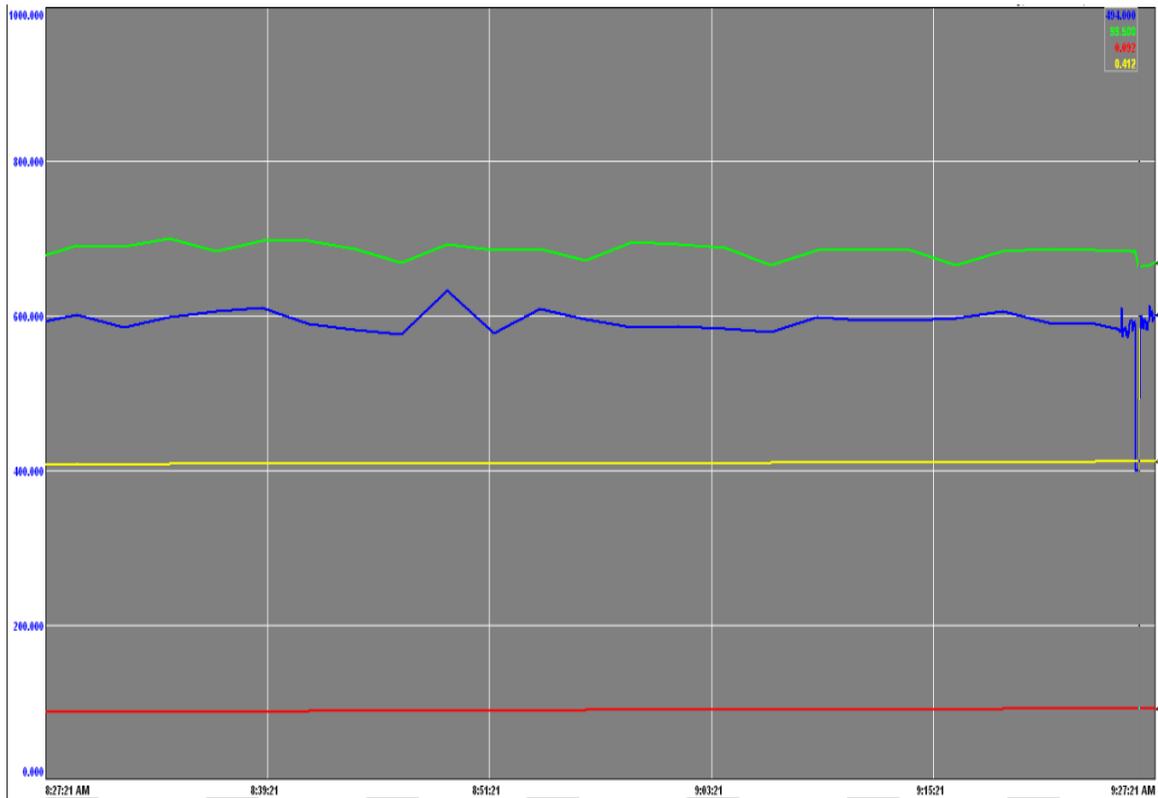


Figura 5.1.1 Gráfica de tendencias para los sensores de flujo, presión, concentración de O₂ y concentración de humedad para el sistema de N₂ en el edificio CR1 (RSView, BMS)

A partir de la figura 5.1.1, analizando cualitativamente la gráfica azul, es decir, la tendencia del flujo principal (en unidades de pie cúbico por minuto, o CFM por sus siglas en inglés), se observa un pico mínimo alrededor de las 9:27am (al final de la gráfica). Un comparador de ventana con un rango de operación apropiado para esta tendencia, es decir de 400 a 800 CFM para un valor medio aproximado de 600 CFM, hubiera activado una alarma porque el pico inferior alcanzó alrededor de 390 CFM.

Este tipo de inflexibilidad vuelve tedioso el procedimiento de reporte de alarmas, ya que claramente se puede apreciar que una perturbación de este tipo no es representativo y además no es indicador de que el sensor o el transmisor

estén entrando en falla. En un sistema que opera con un control poco exigente, tal como el flujo de N_2 en una tubería, se debe valorar cuando una fluctuación se puede considerar una falla. En el departamento de FTS se considera una falla como aquello que pueda volver el sistema de control inestable.

El método seleccionado para la detección de fallas corresponde al de gráficos de control con cálculo permanente de promedios como tendencia central representativa. La teoría de estos gráficos es ampliamente utilizada para regular procesos automáticos tales como los que se están considerando en este estudio. Para que la falla sea un éxito debe existir más que algunos eventos aislados fuera de un rango. Por el contrario, lejos de plantear un interés en un único evento, es más valioso considerar la tendencia central de los valores como indicador del comportamiento del sistema.

Se considera que la media muestral estima la media poblacional y que es un criterio apropiado para definir qué es una falla en la entrada al sistema de control. Tal como menciona Montgomery, el criterio de análisis consiste en construir una región de aceptación donde no es posible rechazar la hipótesis H_0 .

5.2 Descripción del hardware

Para el desarrollo del laboratorio de pruebas se utilizó, entre los principales componentes, un SLC 500 de la marca Allen Bradley, con una tarjeta de procesador 1747 – L553C 5/05 CPU y una tarjeta de adquisición de datos de 8 canales analógicos 1746 – N18. Adicionalmente se utilizó un transmisor de temperatura marca Rosemount modelo 3051, una RTD marca Rosemount, un termopozo Fluke 9142 Field MetrologyWell calibrado el 13 de Julio de 2012 y con un año de vigencia a partir de la fecha de emisión del certificado.

Por las características propias del sistema, el software debe tener la característica de portabilidad para poder insertarse en todos los PLC o SLC marca Allen Bradley mencionados en la tabla 1.1.2 bajo el rubro de ubicación. Para descargar la programación se utiliza el SLC 500 que se muestra en la figura 5.2.1.

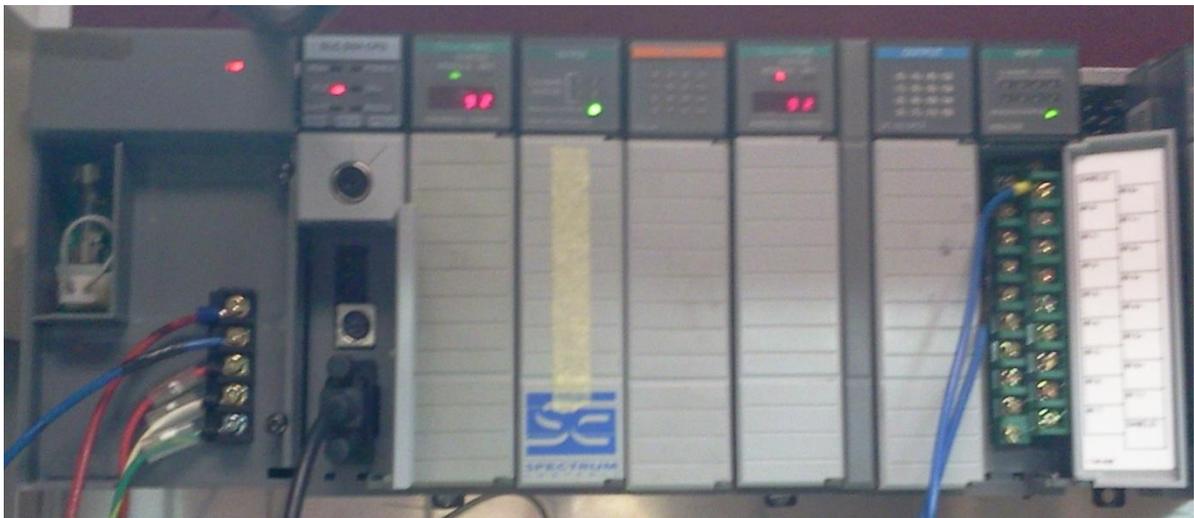


Figura 5.2.1 Equipo SLC - 500 utilizado con CPU 5/05 y tarjeta de adquisición de datos analógica.
(Fotografía)

Se selecciona el SLC – 500 de manera preeliminar por razones principalmente de costos. La implementación actual de los sistemas de control para las facilidades ya cuentan con micro controladores de la marca Allen Bradley, de variedad de

modelos de la familia ControlLogix. Los requerimientos del CPU de control no son estrictos en cuanto a capacidad de procesamiento, ya que cualquier procesador básico SLC marca Allen Bradley puede correr el sistema sin retardos. Sin embargo, se recomienda un mínimo de 64K de memoria para correr el sistema de detección de fallas, el *HoldLastStatey* un sistema de control patrón únicamente. Cualquier otra programación que se desee insertar en un micro controlador cualquiera va a incrementar el requerimiento de memoria dependiendo del tamaño de programa.

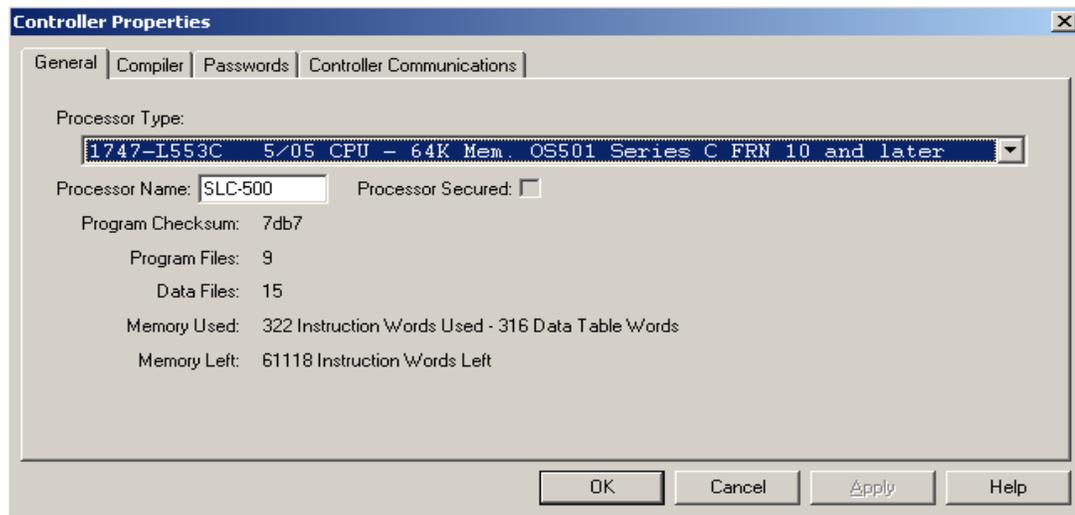


Figura 5.2.2 Propiedades del Controlador y Consumo de Memoria del Sistema Implementado (RSLogix 500)

De acuerdo con la figura 5.2.2, se puede apreciar que el sistema de detección de fallas, el sistema de control patrón, y el mecanismo para realizar un HLS consume 322 *Words*(espacios de 16 bits, o 2 bytes) de instrucciones en memoria y 316 *Words* de la tabla de datos. En el procesador utilizado, existe una memoria libre de 61118 *Words*para instrucciones que se podrían implementar en el control de algún sistema en particular.

El sensor y el transmisor utilizados son marca Rosemount, similares a los utilizados en los sistemas de control de la tabla 1.1.1.La figura 3.3.4 muestra al sensor de temperatura (RTD) en conjunto con el transmisor de temperatura.

5.3 Descripción del software

El software desarrollado para el sistema implementado utiliza el lenguaje de programación gráfico “Ladder” para el entorno de programación RSLogix 500, apto para el SLC-500 de Allen Bradley. Este desarrollo lógico es fácilmente modificable para trabajar con los PLC más modernos de la familia CompactLogix, no obstante se deben copiar las mismas subrutinas pero cambiar la forma en que se almacenan los datos. Por ejemplo, en el RSLogix 500 los datos se almacenan en una tabla, clasificable por tipo de dato, por fila y por columna. En otras palabras, se puede llenar una tabla con un solo tipo de dato, ya sean números enteros, puntos flotantes, bits entre otros. En el RSLogix 5000 nuevas funciones y algunos otros cambios fueron introducidos, entre los más importantes la declaración de una variable como dato, abandonando el viejo esquema de almacenar los valores en referencia a una tabla.

Los algoritmos implementados para el laboratorio de pruebas del sistema de detección de fallas con HLS incluyen dentro de su implementación en SLC las siguientes subrutinas:

1. Rutina principal o *main*

Esta rutina es la encargada de llamar a otros métodos. Es una máquina de estados que realiza una lógica de control digital para los procesos dentro del SLC. La figura DDD muestra el diagrama de flujo con la operación lógica del programa.

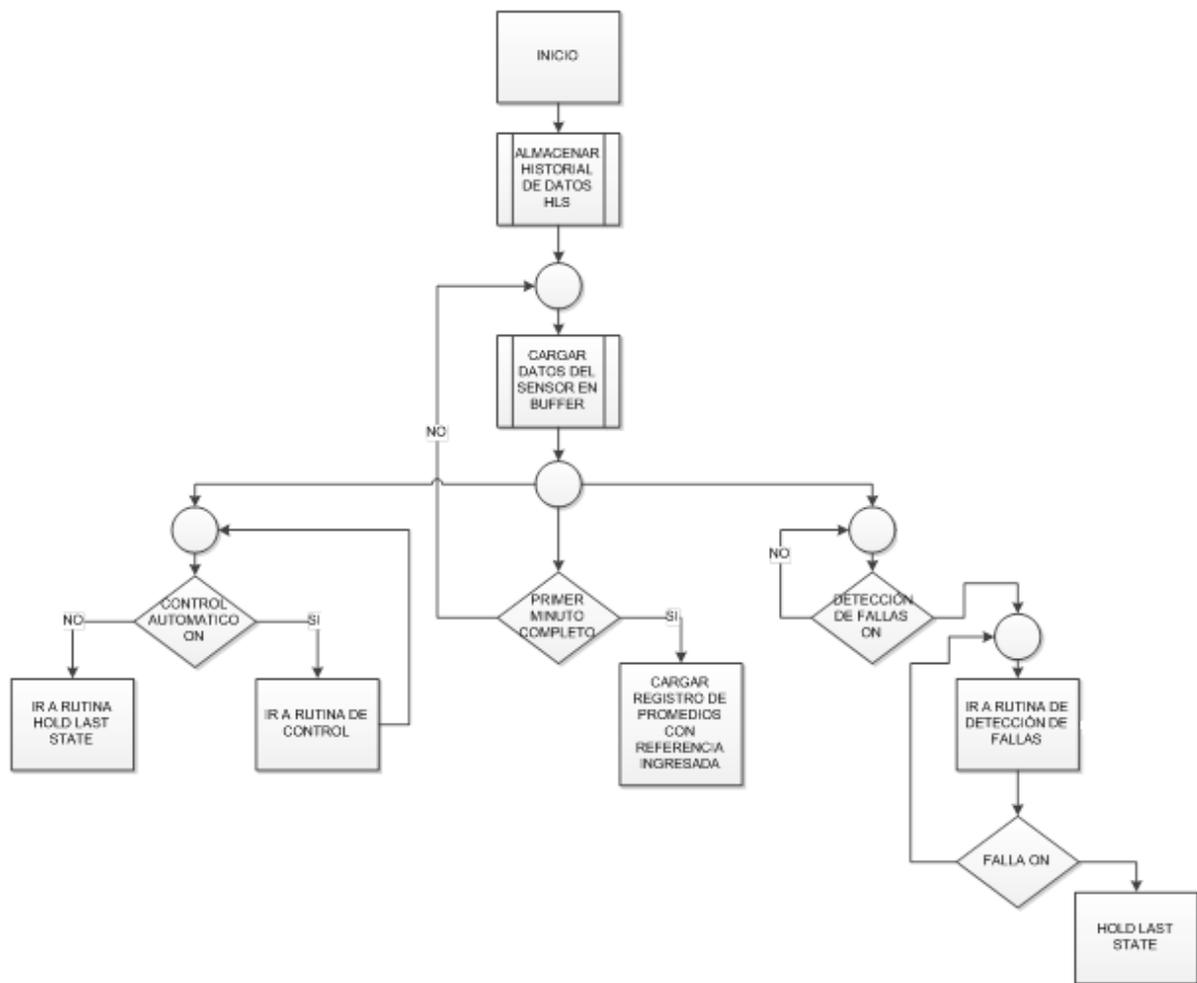


Figura 5.3.1 Diagrama de Flujo con los Estados del Programa (Visio)

La secuencia lógica de la figura 5.3.1 fue validada mediante pruebas con el sistema de control automático patrón implementado. En esta validación se realizaron posibles eventos de fallas, tales como cortocircuitos, circuitos abiertos, daños en el transmisor (con un transmisor dañado), entre otras fallas.

2. Lectura de entradas en el SLC

Esta rutina recibe los valores de las entradas declaradas para la tarjeta de adquisición de datos incorporada en uno de los *slots* o ranuras del SLC.

3. Escritura de salidas en el SLC

Esta rutina de escritura recibe las salidas del sistema de control y las coloca a la salida de la tarjeta de salidas en el SLC. Permite interactuar con los actuadores del sistema físico implementado.

4. Sistema de control patrón

La emulación de un sistema de control, permite conocer el comportamiento de un sistema de control real, implementado en un SLC. Recibe la variable de proceso directamente de los sensores, y su controlador PID coloca una salida escalada en porcentaje (0 a 100%).

5. Sistema de detección de fallas

Este módulo es fundamental en el proceso de detección de fallas. Se basa en un sistema estadístico de límites de control. Su funcionamiento básico se basa en un registro FIFO de treinta espacios. Cada uno de estos espacios es rellenado con el valor de la variable de proceso en períodos de muestreo de dos segundos, para un total de 30 muestras por minuto.

Inicialmente el registro está lleno con el punto de referencia hasta completar de llenar la tabla con los valores actuales. Cuando el usuario activa el sistema de límites de control para el detector de fallas, el mecanismo estadístico de límites de control utiliza el cálculo permanente de promedios para ir evaluando si la tendencia se mantiene dentro de los límites de control. Estos límites de control se calculan con la frecuencia establecida por el usuario, a través de las ecuaciones de límites de control mencionadas anteriormente. Cuando se detecta una falla, el sistema de detección de fallas activa una alerta, e inmediatamente corta la salida de control automático y coloca en su lugar una salida estática, del último promedio válido, previo al último cálculo de los límites de control.

6. HLS o retenedor del último estado

Cada vez que se realiza el cálculo de los límites de control, en el tiempo establecido por el usuario, se almacena el registro con los últimos valores que se calculó el promedio antes de implementarse los nuevos límites de control. Es decir, se almacena el último estado que funcionó. Cuando se dispara una alerta, el sistema de detección de fallas activa la rutina del HLS. Cuando esto ocurre, el sistema calcula el promedio de la tabla almacenada como la última que funcionó antes del disparo. Luego coloca el valor promediado en la salida del sistema de control, evitando así que un pico afecte los actuadores y por ende los procesos productivos.

La comunicación del SLC 500 con la computadora se realiza a través de una tarjeta de conexión Ethernet. Para realizar esta conexión es necesario utilizar el software de comunicación RSLinxClassic, de Rockwell Automation Inc.

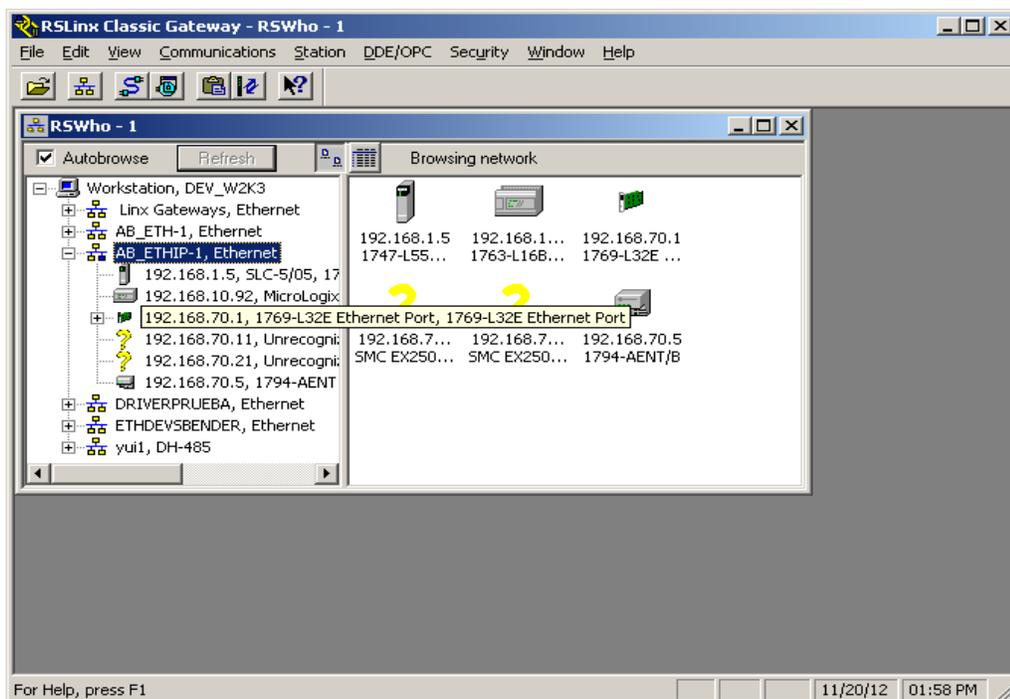


Figura 5.3.2 Vista del RSLinxClassic (RSLinx)

En la figura 5.3.2 se puede visualizar los dispositivos conectados a la red a través de su dirección IP. Al SLC 500 se le asigna la dirección IP 192.196.1.5. Una vez realizada la conexión, se deja la aplicación corriendo en el fondo del sistema operativo y se inicializa el software RSView de Rockwell Automation Inc. En este software de visualización de procesos se procede a crear una interfaz gráfica de usuario, donde el operario pueda interactuar con el software implementado anteriormente. La ventaja principal de este software es que la interfaz de usuario sería fácilmente agregable a los sistemas existentes del BMS, nada más arrastrando la pantalla implementada dentro de la carpeta graphics del proyecto BMS en RSView. Esta interfaz permite unificar criterios de operación con los análisis estadísticos propuestos. La vista del programa implementado se presenta en la figura 5.3.3.

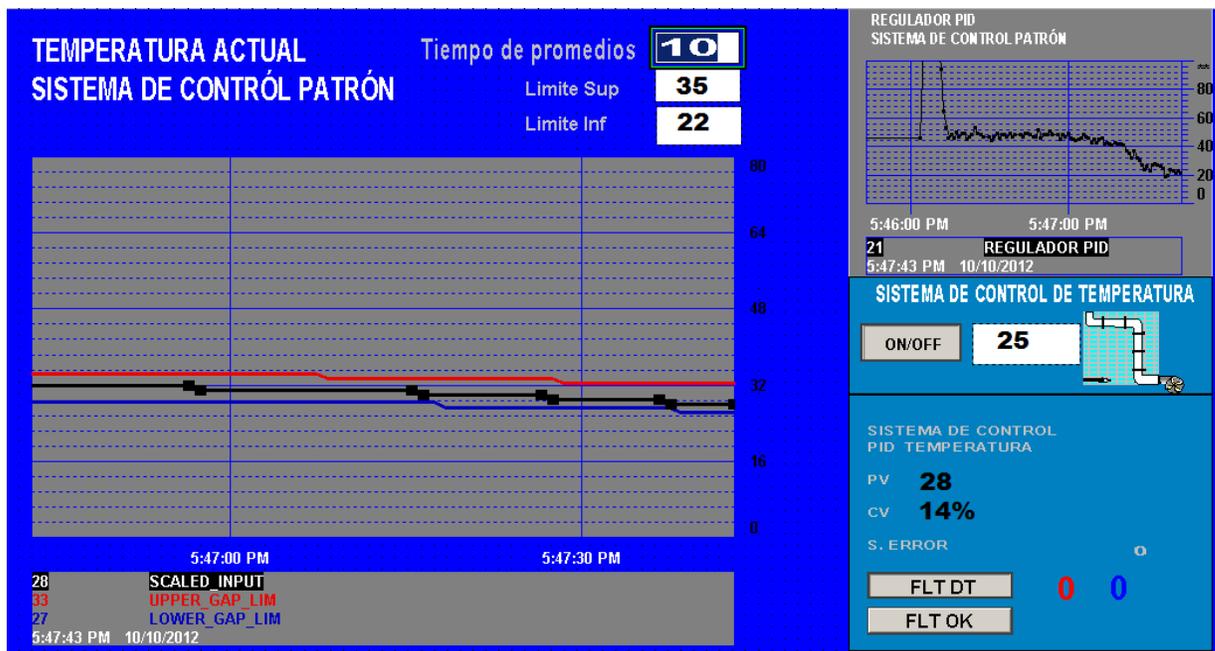


Figura 5.3.3 Vista del Programa Computacional Implementado (RSView)

A partir de la figura 5.3.3 se visualiza una gráfica del sistema de control patrón operando bajo el régimen del sistema de detección de fallas. En esta interfaz se observa como los valores muestreados se representa en forma de una tendencia promedio en la línea negra de la gráfica principal. En esa misma gráfica se observan

los límites de control superior (rojo) e inferior (azul). Se debe recordar que estos límites de control no son los que define el usuario. El usuario coloca de manera sencilla los rangos de operación deseada. Luego las ecuaciones de límites superior (4.3) e inferior (4.4) de control actúan sobre este rango, acoplando la teoría de gráficos de control de atributos a la interfaz de usuario. En la misma figura se observa que el valor actual para el límite superior es 33°C y para el límite inferior es 27°C mientras que el usuario ingresó un rango de operación entre 35°C y 22°C. Los límites de control también consideran los valores promediados de las mediciones fuera del rango ingresado por el usuario, conocido como unidades no conformes. A partir de esta consideración entonces se calculan los nuevos límites de manera que se ajusten apropiadamente a la tendencia de la gráfica.

En la esquina inferior derecha se aprecian un cero rojo y otro azul, que son las banderas que indican una falla, un botón de FLT DT y FLT OK. El cero rojo cambia a uno cuando se detecta una falla incremental mientras que el cero azul marca uno cuando se detecta una falla por decremento. En el caso de que ocurra un evento que active ambas fallas, ambos indicadores se activarán, además de una pantalla emergente notificando la falla. Conviene saber qué fue lo que falló, por lo que hacer diferencia entre ambos cruces es importante en la labor de detectar problemas en el sistema. El botón FLT DT habilita o deshabilita el sistema de detección de fallas, mientras que el botón FLT OK borra las banderas que indican que ha existido una falla, luego de que el técnico encargado revise el problema y el sistema pueda volver a trabajar normalmente.

Capítulo 6

Análisis de Resultados

6.1 Resultados

A partir de las mediciones realizadas se pueden extraer los datos siguientes, con la finalidad de demostrar el tipo de análisis seleccionado para el sistema de detección de fallas. De manera paralela también presentan las condiciones actuales de los equipos evaluados. El estado determinado para la operación de los sensores y transmisores se resume en la tabla 6.1.1

Tabla 6.1.1 Estado Actual de los Transmisores Estudiados

| TAG | ESTADO DEL TRANSMISOR |
|------------------------|------------------------------|
| CR1_PT_17_MEF_05_06_07 | OK |
| CR1_PT_18_MEF_12_13 | OK |
| CR1_PT_23_MEF_01_02 | OK |
| CR1_PT_26_MEF_08_09 | OK |
| CR3_FPST_Primary_RODI | OK |
| CR3_FPST_Backup_RODI | Medición Errónea |
| CR3_PT_26_27 MEF_26_27 | OK |
| CR3_PT_102_030A | OK |
| CR3_PT_104_030A | OK |

| | |
|-------------------------|--|
| CR3_PT_104_031A | OK |
| CR3_PT1_RODI | OK |
| CR3_PT22_MEF_10_11 | OK |
| CR3_SPST_RODI_PRIMARY | OK |
| CR3_SPST_Backup_RODI | Límites del sensor se arrastran al ajustarlo |
| CR1_PT1_N2 | OK |
| CR1_FT_N2 | Fuga en el ProBar® |
| CR3-PIT-241-0-A-Make-Up | OK |
| CR3-PIT-241-0-C-Make-Up | OK |

A partir de la tabla 6.1.1 se puede comprobar que efectivamente, a pesar de que se cuenta con un registro de todos sensores calibrados hace 4 años, esto no garantiza bajo ninguna circunstancia que los sistemas no puedan fallar por algún problema o defecto adquirido a lo largo del tiempo.

Se recolectaron datos a través de las tareas de calibración generadas para los sensores en estudio, en el rubro de valor encontrado. El propósito de la investigación era conocer el estado actual de algunos transmisores para valorar la calibración dentro del método estadístico que se utilizaría para el sistema detector de fallas. Es de importancia destacar que los ajustes posteriores a la calibración se efectúan sobre el transmisor y que el sensor por si solo no es configurable. Para medir valores a la salida del transmisor es necesario poner la magnitud de la variable física a la entrada del sensor.

Los transmisores de los sensores en la empresa están configurados para operar con corriente a su salida, en un rango de 4 a 20 mA. Se utilizan valores de corriente por dos motivos en particular. El primero es que la señal de corriente es más inmune al ruido electromagnético, mientras que una señal de tensión se podría ver distorsionada. El segundo es que a través de una corriente de 4 mA como mínimo se puede detectar la presencia del transmisor. Es decir, si la salida del transmisor se encuentra a 0 mA, se está en presencia de un circuito abierto.

En la investigación realizada se encontró, por ejemplo, que el transmisor CR3-PIT-241-0-C-Make-Up cuenta con una tubería de conexión gravemente afectada por la arena de filtración del agua, a pesar de que su estado de calibración era aceptado. Esta afectación se muestra claramente en la figura 6.1.1.



Figura 6.1.1 Impacto de la Arena en la Tubería de los Transmisores del Make Up en el Sistema Rodi (Fotografía)

El estudio también abarca la comprobación de los sensores de presión investigados con anterioridad. Por ejemplo, a continuación en la tabla 6.1.2, se presentan los valores recolectados para los sensores que manejan una presión con rango entre 0 a 150 PSI. Se justifica esta selección dado que en la empresa se exige un margen de error menor al 0.3%, y es de conocimiento del departamento FTS que los sensores con un rango ajustado (por ejemplo de 0 a 5 PSI) son más propensos a

estar fuera del margen establecido por la alta sensibilidad a la que deben operar los transmisores.

Tabla 6.1.2 Valores Encontrados en los Sensores Estudiados con Rango de 0 a 150 PSI

| | 4 mA | 8 mA | 12 mA | 16 mA | 20 mA |
|------------------|-------|-------|--------|--------|--------|
| CR1_PT1_NITROGEN | 4.009 | 3.005 | 12.000 | 15.996 | 19.998 |
| CR3_PT1_RODI | 4.001 | 6.002 | 11.998 | 15.940 | 19.993 |
| CR3-PIT-241-0-A | 4.014 | 8.008 | 12.006 | 16.006 | 20.006 |
| CR3-PIT-241-0-C | 4.004 | 6.000 | 11.998 | 15.996 | 20.000 |

Se encuentra que un sensor está desviado de la línea recta cuando algún valor se aleja de la línea recta. Por ejemplo, en la figura 6.1.2 se puede apreciar la desviación del sensor CR1_PT1_Nitrogen respecto a la línea recta.

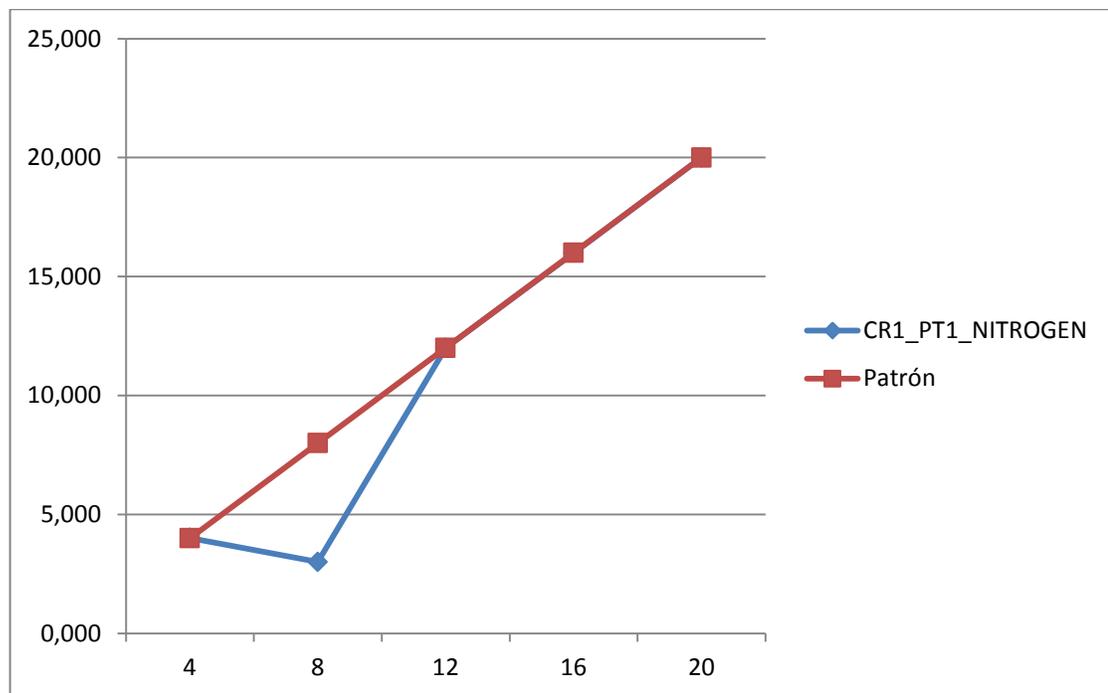


Figura 6.1.2 Desviación del sensor CR1_PT1_NITROGEN respecto a la línea recta. (Excel)

Este tipo de desviaciones hace que se generen fallas en los sistemas de control, porque el sensor se sale de su rango de operación (de 4 a 20 mA), y pone a su salida valores que no es posible asociar con una presión dentro del rango.

En el caso de la tabla 6 y su gráfica, la figura 11, el sistema debería ser capaz de detectar una falla y encender una alarma. Bajo el presente evento, el método de detector de ventana para un rango de 4 a 20 mA como forma de análisis para validar una falla hubiese sido el correcto, aunque no necesariamente contemplaría todos los casos de falla, siendo este un evento en particular.

Otro estudio realizado es el muestreo de 30 valores instantáneos para un sensor de temperatura que monitorea la temperatura del agua helada en el sistema RODI. Estos valores se tomaron con un período de muestreo de 30 segundos. Los datos se muestran en la tabla 6.1.3 (de izquierda a derecha y luego de arriba hacia abajo).

Tabla 6.1.3 Valores de Medición para el Proceso de Agua Helada en Grados Celsius

| | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 12.4 | 14.32 | 13.46 | 11.87 | 13.53 | 14.37 |
| 12.75 | 12.86 | 13.87 | 14.32 | 11.64 | 10 |
| 10.63 | 13.48 | 11.63 | 14.98 | 12.76 | 13.32 |
| 11.54 | 11.58 | 13.53 | 10.95 | 14.43 | 10.48 |
| 13.75 | 13.45 | 13.43 | 12.76 | 11.96 | 13.74 |

La gráfica de la figura 6.1.3 describe la tendencia de la temperatura según el número de muestra, a partir de los valores de la tabla 7.

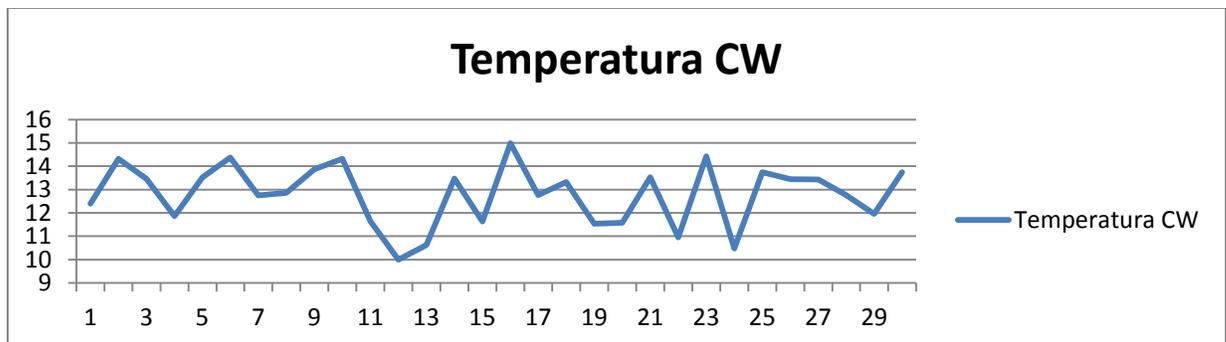


Figura 6.1.3 Temperatura en un sistema de agua helada con un tiempo de muestreo de 30 segundos (Excel)

A través de los cambios de temperatura en el tiempo se puede analizar el comportamiento del sistema de enfriamiento o *chiller*, e incluso diagnosticar fallas no solo del sensor, sino de todo el proceso. Este diagnóstico debe iniciarse con una revisión de la calibración del sensor. Si este se encuentra en buen estado, entonces la empresa deberá proceder con un proceso de revisión del sistema que se monitorea. Se realiza un análisis estadístico de la tabla 6.1.3 para considerar el tipo de tendencia que se sigue. El análisis estadístico se presenta en la tabla 6.1.4.

Tabla 6.1.4 Análisis Estadístico para los Valores de la Tabla 6.1.3

| Tipo de Estadístico | Valor |
|----------------------------|--------------|
| Media | 12.79 |
| Error típico | 0.24 |
| Mediana | 13.09 |
| Moda | 14.32 |
| Desviación estándar | 1.30 |
| Varianza de la muestra | 1.70 |
| Curtosis | -0.64 |
| Coefficiente de asimetría | -0.46 |
| Rango | 4.98 |
| Mínimo | 10.00 |
| Máximo | 14.98 |

A partir de la tabla 6.1.3 se pueden determinar ciertos aspectos de interés de la muestra para el sistema de detección de fallas. La figura 6.1.4 muestra un histograma de frecuencias donde se puede apreciar cómo están distribuidos los datos.

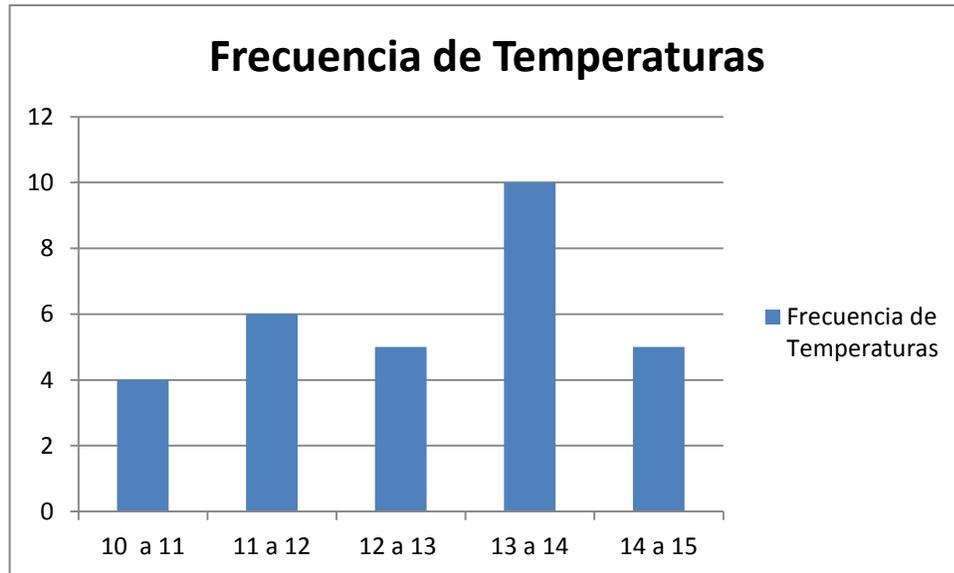


Figura 6.1.4 Frecuencia de las Temperaturas en Incrementos de 1°C (Excel)

La muestra tomada de este sistema de temperatura indica que la distribución de los datos es normal, con un sesgo negativo. Este sesgo también es evidente debido a que el promedio es menor a la mediana y esta a su vez es menor a la moda, de acuerdo con la tabla 6.1.4. Un rango de aproximadamente 5 grados para un sistema de enfriamiento no crítico es un valor aceptable ya que la temperatura siempre se mantiene por debajo de un valor máximo de aproximadamente 15°, lo cual es relativamente frío para la percepción humana. Estos detalles estadísticos son importantes ya que orientan la solución al problema en función de los resultados. A partir de la muestra anterior para sistemas de temperatura se llega a entender que los sistemas de control estables siempre van a tender a estabilizarse en o cerca de su referencia. Por lo tanto, tal como se demostró anteriormente con una distribución de datos normales, analizarlos con estadística de tendencia central es lo más

apropiado. Los datos obtenidos fueron documentados en su mayoría utilizando el equipo de documentación y calibración Fluke 744.

A través de este dispositivo es posible medir la variable de proceso con exactitud certificada por la empresa Fluke y su representante en Costa Rica, Elvatron S.A. También es posible almacenar las mediciones realizadas en documentos inalterables certificados por Fluke, conocidos como *InstrumentHistoryReport*. Un ejemplo de la forma de uno de estos reportes se presenta en la figura 6.1.5.

| INSTRUMENT HISTORY REPORT | | | |
|---------------------------|---|-------------------|------------------------|
| Tag ID | CR3_PT_FPST_Primary_R001 | Serial Number | 172761 |
| Test Type | 74X Analog | Manufacturer | Rosemount |
| Test Date | 10/17/2012 | Model Number | 3051S2PG2A2E11A1B4H5Q4 |
| Test Time | 10:10:21 | Function | Transmitter |
| | | Instrument Type | Pressure Transmitter |
| Final Status | Passed | Temperature | |
| Input Low | 0 | Humidity | |
| Input High | 2.7 | Output Low | 4 |
| Input Units | psi | Output High | 20 |
| Input Unit Type | Normal | Output Units | mA |
| Source Function | Pressure | Output Unit Type | Normal |
| Source Mode | Automatic | Measure Function | Current |
| Amplitude | 0.0 V | Measure Mode | Automatic |
| | | Square Root | No |
| | | Loop Power | off |
| Tolerance | 0.300 % | | |
| As Found | | | |
| Input | Output | %Error | Result |
| 0 | 4.784 | 4.900% | Failed |
| 0.675 | 8.694 | 4.340% | |
| 1.35 | 12.547 | 3.420% | Max. Dev. 4.900% |
| 2.025 | 16.5 | 3.130% | Linearity -0.382% |
| 2.7 | 20.516 | 3.230% | |
| As Left | | | |
| Input | Output | %Error | Result |
| 0 | 3.99 | -0.060% | Passed |
| 0.675 | 7.992 | -0.050% | |
| 1.35 | 11.997 | -0.020% | Max. Dev. -0.060% |
| 2.025 | 15.997 | -0.020% | Linearity 0.010% |
| 2.7 | 20.001 | 0.010% | |
| Sensor Data | | | |
| SN: 97604404 | | | |
| Model: FLUKE-700PD4 | | | |
| Date: 7/ 6/2012, 08:39:10 | | | |
| Zeroed: YES | | | |
| Procedure | | Testers | |
| Custom | | IngPro S.A. | |
| Reason For Work | Action(s) Taken | Problem(s) | |
| Scheduled | Adjusted Calibrated Checked Zeroed | | |
| Comments | | | |

Figura 6.1.5 Reporte “Historial del Instrumento” para un Sensor y Transmisor Especifico (DPC Track)

6.2 Análisis de Funcionamiento

La investigación del estado de algunos sensores y transmisores justifica la necesidad de un sistema capaz de prevenir y proteger los sistemas de control ante una enorme variedad de daños que puedan producirse en los sensores o transmisores a lo largo del tiempo. A partir de todos los resultados y la información recopilada se procede a analizar el comportamiento del sistema de detección de fallas implementado.

Un tipo de falla en el sistema no es necesariamente un daño en el sensor o el transmisor. Puede darse la situación en la que la relación del tiempo para calcular los límites y el tiempo en el que cambia la tendencia del promedio de muestras sea insuficiente. Quizá esto puede ser un indicador que se realizó un ajuste de tiempo para el cálculo de los límites incorrecto inclusive. Pero en el caso que esto ocurra también es una valiosa herramienta para poder alertar a tiempo de que un proceso está cambiando mucho más rápidamente de lo esperado tal como se muestra en la figura 6.2.1, donde se aprecia una falla por decremento acelerado de temperatura.

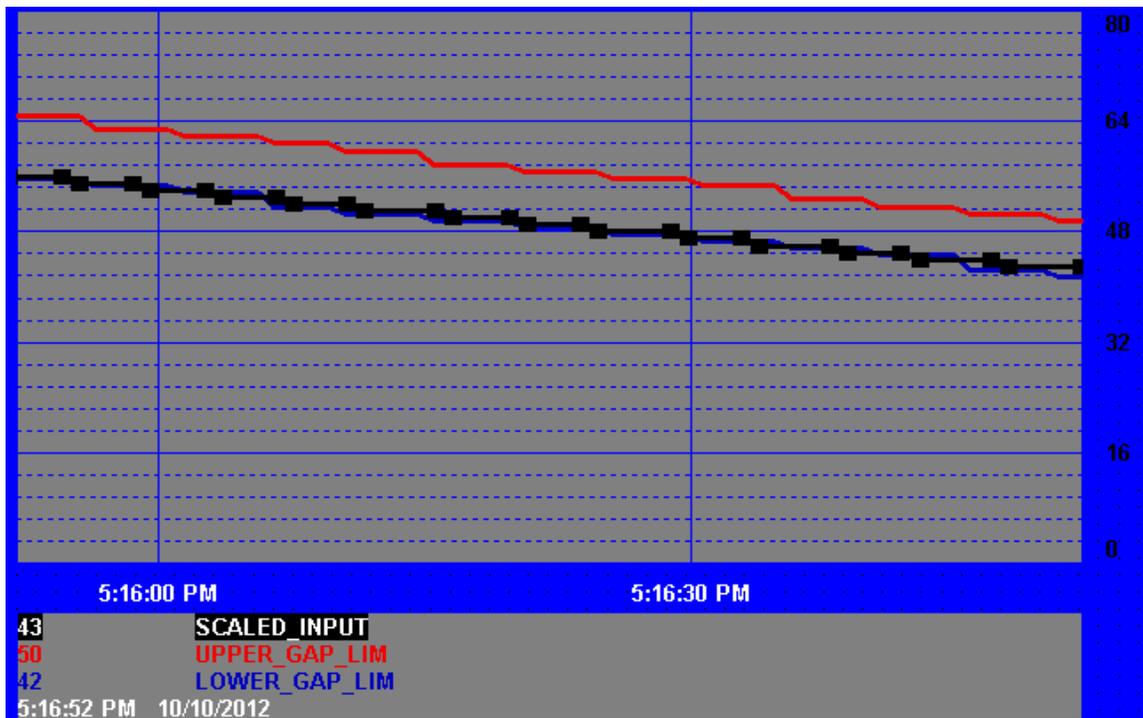


Figura 6.2.1 Falla por Decremento Acelerado de Temperatura(RSView)

En el caso de la operación normal, la tendencia del promedio de la distribución normal siempre debe mantenerse dentro de los límites de control. Este tipo de operación puede apreciarse en la figura 6.2.2, donde la línea del promedio se mantiene dentro de los límites de control. Se aprecia además que las bandas de los límites son asimétricas respecto al promedio. Esto ocurre debido a la teoría de límites de control, que calcula los umbrales de los límites de acuerdo al rango ingresado por el usuario y los datos no conformes, medidos a través de la variable de proceso. En este caso el tiempo de cálculo de los límites de control ocurre cada 10 segundos, mientras que el promedio se calcula permanentemente. No obstante los datos, en este caso ingresan con un tiempo de muestreo de 7 segundos.

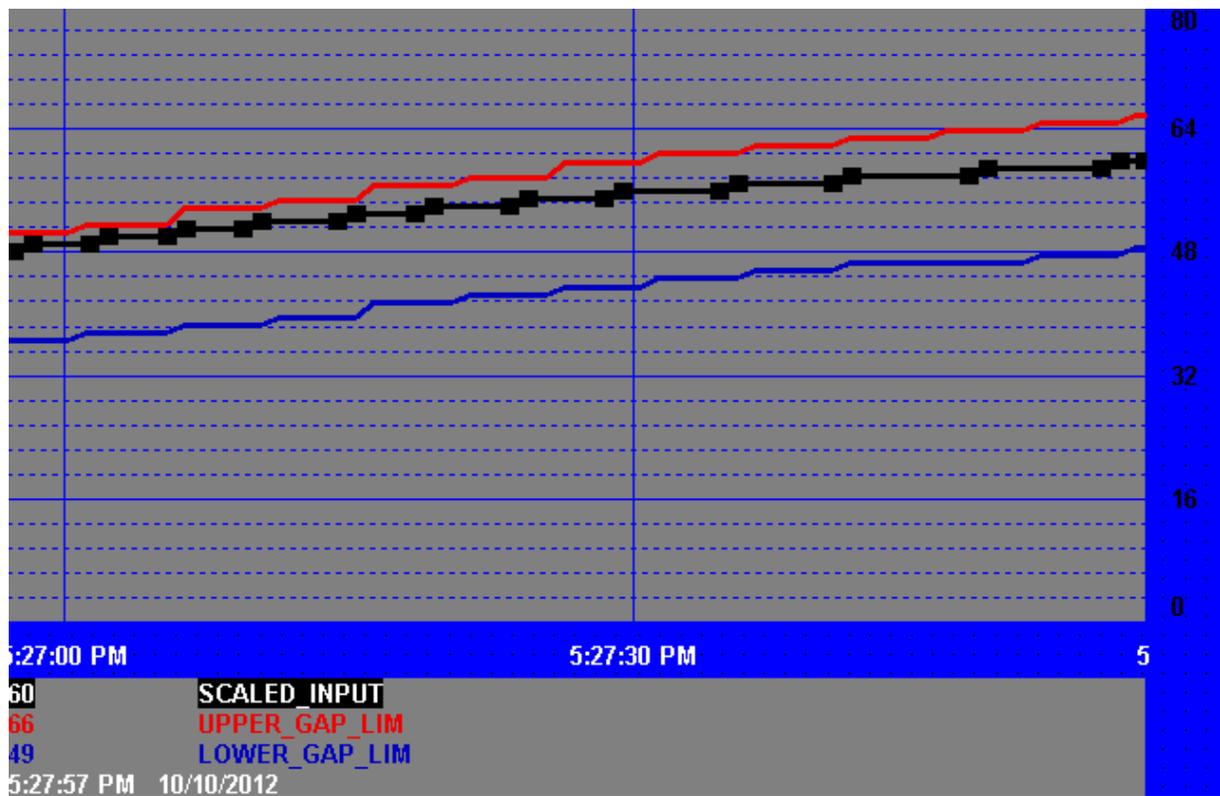


Figura 6.2.2 Operación Normal del Sistema de Detección de Fallas, Bajo un Régimen Incremental en la Variable de Proceso del Sistema de Control(RSView)

Una de las fallas más comunes puede ocurrir por un circuito abierto o por un cortocircuito en los cables del transmisor. La inducción de una corriente parásita también puede ocasionar fallas con comportamiento similar a los problemas anteriores. Para poder visualizar este efecto, se muestra la figura 6.2.3.

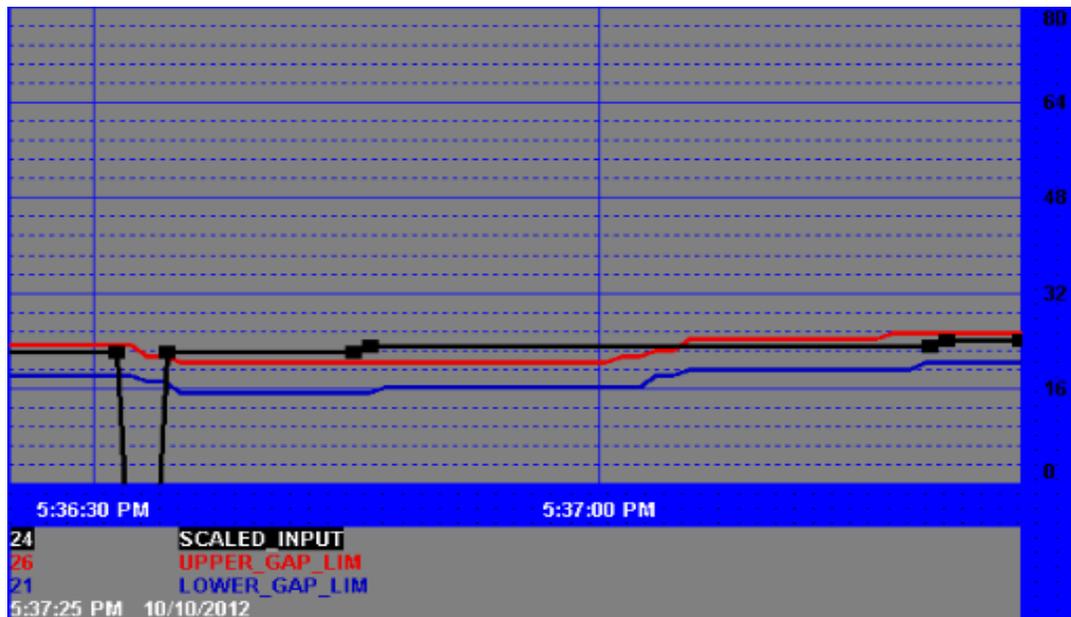


Figura 6.2.3 Falla en la Variable de Proceso del Sistema de Control Patrón Causada por unCortocircuito(RSView)

En la figura 6.2.3 se detecta una falla causada por cortocircuito. En este evento se puede apreciar como el promedio cruza drásticamente el límite inferior y superior de los límites de control. Esta característica es muy propia del tipo de fallos que ocurren de forma abrupta, por lo que es un indicador apropiado de que lo que puede estar ocurriendo en el sistema sea un daño en el cableado o en el propio transmisor.

Finalmente, el mecanismo retenedor del último estado del sistema de control, HLS muestra un funcionamiento apropiado para evitar cambios abruptos en los actuadores. De esta manera, se previenen daños importantes a costosos equipos y además se salvaguarda la integridad de la producción. En la figura 6.2.4 se puede apreciar el funcionamiento del sistema de control patrón antes, durante y después de atendida una falla.

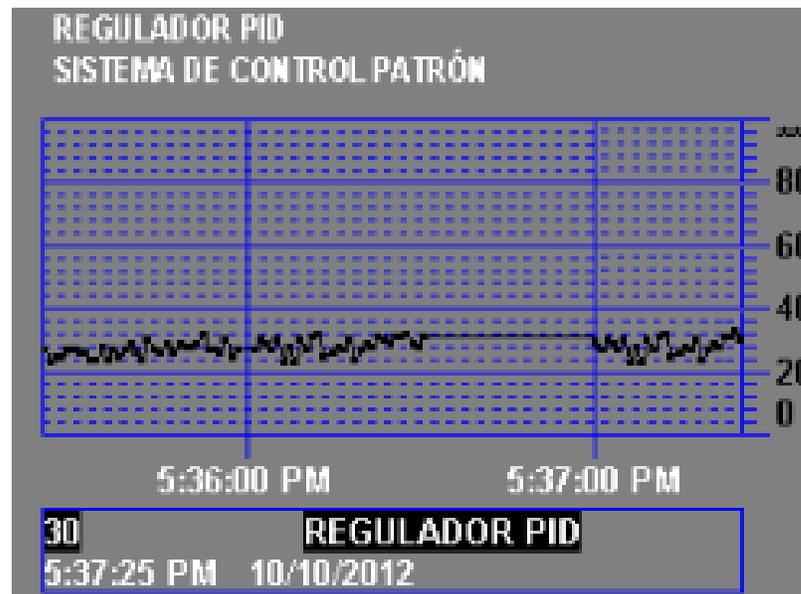


Figura 6.2.4 Efecto del HoldLastState a la Salida del Sistema de Control Durante y Después de Atendida la Alarma(RSView)

De acuerdo a la figura 6.2.4, se puede visualizar que no hay cambios abruptos a la salida del controlador PID, por lo que aún con una falla abrupta, tal como un cortocircuito, se mantendrá el último estado antes de la falla. Los beneficios de este mecanismo evitarán muchos daños en los actuadores de los sistemas de control al quitarle a la salida del sistema de control los eventos bajo los cuales no se desea una reacción importante.

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

- Las fallas en los sistemas de control de las facilidades de la empresa Componentes Intel de Costa Rica se detectan y atienden de una mejor manera cuando se implemente un sistema de detección de fallas con HLS, ya que se fusiona el criterio del experto con un sistema de atención estadística dedicada y en este caso, personalizada.
- El sistema de detección de fallas se valida apropiadamente con un sistema de control patrón, donde queda demostrada su capacidad de proteger el equipo actuador y el sistema de control ante cambios abruptos tales como circuito abierto y cortocircuito entre otros. Bajo estas y otras condiciones de fallo, la operación del mecanismo HLS demuestra ser una herramienta eficaz en la prevención de daños al sistema y a la producción.
- El método estadístico de límites de control es una selección apropiada para tratar un monitoreo de datos que siguen una distribución normal, tales como los de un sistema de control. El tipo de distribución se justifica en la referencia del sistema de control, ya que se busca que este sistema haga al proceso acercarse lo más que se pueda a dicho valor.

- Se debe tener precaución al iniciar un sistema de control con el mecanismo de detección de fallas encendido, ya que un sobre impulso que cruce los límites de control establecidos por el usuario podría activar la alerta y retener un valor de último estado muy bajo o insuficiente.

7.2 Recomendaciones

Se recomienda no arrancar un sistema de control con el sistema de detección de fallos encendido. Lo ideal es el sistema de control en operación estable previo a activar el sistema. Esto puede prevenir al sistema de activar una alerta al inicio de su operación, bajo un régimen de condiciones dinámicas iniciales que no representan bajo ninguna circunstancia una falla.

Además también se recomienda conocer apropiadamente el tiempo de refrescamiento de los límites de control de acuerdo al proceso establecido. No se deben cambiar los límites de control en un tiempo mayor al tiempo en que se conoce que cambiará una tendencia, ya que esto puede ocasionar que se reporten alarmas de manera injustificada, por la misma variación normal del sistema.

Capítulo 8

Bibliografía

- [1] Chávez, Ana C. “Normas para redactar citas bibliográficas”. Instituto Tecnológico de Costa Rica Vicerrectoría de Vida Estudiantil y Servicios Académicos. Cartago, Costa Rica. 1995.
- [2] Checa JoseAngel. “Termorresistencias de Platino de Película”. Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en :
tec.upc.es/ie/Jose%20Angel%20Checa.ppt. Consultado el 11/09/2012
- [3] Fluke. “744 Documenting Process Calibrator” User’s Manual. Rev. 1 , 2/99. Setiembre, 1998.
- [4] Montgomery C. Douglas, Runger C. George. “Probabilidad y Estadística Aplicada a la Ingeniería”. Segunda Edición. Editorial LimusWiley. México, 2002
- [5] OgataKatsuhiko. “Ingeniería de Control Moderna”. Tercera Edición. Editorial Pearson – Prentice Hall. México, 1997.
- [6] Potter C. Merle, Wiggert C. David. Mecánica de Fluidos.Tercera Edición. Editorial Thomson. México, 2002.
- [7] Triola F., Mario. “Estadística”. Novena Edición. Editorial Pearson - Prentice Hall, 2006
- [8] Universidad de la República de Uruguay.Instituto de Ingeniería Mecánica y de Producción Industrial. Facultad de Ingeniería. “Sensores de Presión”. Disponible en:
http://www.fing.edu.uy/iimpi/academica/grado/instindustrial/teorico/080306-Sensores-parte_III.presion.pdf. Consultado el 03/11/2012.

Capítulo 9

Apéndices

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

- **Calibración:** Comparación de un valor medido con un patrón certificado. No debe ser confundido con un ajuste
- **Fallas:** Cualquier evento no esperado que produzca un comportamiento indeseado en la salida del control del sistema. La dificultad de describir una falla radica en que es relativa al sistema y al impacto sobre el mismo, por eso se dice que es el experto del sistema el trabajador capacitado para definir los parámetros de detección de las mismas.
- **HLS:** *Holdlaststate* o retenedor del ultimo estado funcional. Es un mecanismo que permite retener y colocar a la salida el último valor funcional de un sistema.
- **RTD:** *Resistancetemperature detectoro* Detector de temperatura por resistencia. Es un tipo de sensor muy usado en la industria para medir temperatura por medio de la variación de la resistencia debido al cambio de temperatura.
- **Transmisor:** Sistema programable que permite acoplar un sensor analógico a un sistema de adquisición de datos. Es posible configurarle el nombre, número de serie, rango de operación y tipo de salida entre las características más importantes. Además se le puede brindar servicio de mantenimiento mediante algún dispositivo de servicio con protocolo HART, tal como el documentador Fluke 744.
- **Documentador:** Equipo certificado para realizar procedimientos de calibración y almacenamiento de información sobre el equipo calibrado. Permite cumplir normas internacionales de calidad tales como ISO9000.

A.2 Manual de usuario

La utilización del sistema de detección de fallas con *holdlaststate* se podrá utilizar a través de la interfaz de monitoreo BMS una vez incluido el sistema dentro del proyecto RSView que contiene dicho sistema. Este mecanismo deberá ser utilizado de manera exclusiva por el dueño del sistema a intervenir o por otro personal familiarizado con el sistema de control que se quiere monitorear.

Para utilizar el sistema de detección de fallas es importante conocer sus funciones. Algunas de las funciones más importantes son:

1. Realizar un análisis estadístico de la variable de proceso.
2. Calcular límites de control para la tendencia central de la variable de proceso.
3. Detectar fallas o comportamientos inesperados en el sistema.
4. Retener el último valor correcto en la salida antes de entrar en falla.

Para utilizar el sistema inicialmente se recomienda arrancar el sistema de control con el sistema de detección de fallas apagado, para prevenir falsas alarmas y que el retenedor de estados intervenga el proceso. Una vez que el sistema se encuentra en régimen estable, el operario deberá indicar el rango de operación segura del sensor y transmisor. Además, deberá indicar, en base a su experiencia con el equipo, un tiempo apto para refrescar el cambio en los límites de control, basado en la variabilidad del promedio. Es decir, si el promedio tiende a variar rápidamente por condiciones normales, se debe ingresar un tiempo de cálculo pequeño, para que los límites puedan cambiar rápidamente y no se active una falla por una variabilidad conocida. Sin embargo, si el sistema suele mantenerse cercano a un valor, se puede establecer que el sistema de recalcule de los límites de control sea grande, para que el mecanismo de detección asegure una tendencia con pocos cambios. Finalmente el usuario deberá activar el mecanismo de detección de fallas haciendo click en el botón FLT DT ON. En caso de una falla, es necesario que el operario revise y corrija la causa de la falla. Posteriormente las banderas de falla superior e inferior pueden ser borradas para reactivar el sistema y reanudar el sistema de control automático.

A.3 Protocolos de medición

A continuación se presentan los procedimientos de calibración utilizados para el estudio realizado de los sensores de temperatura, presión y presión diferencial. Este procedimiento es válido únicamente para el documentador Fluke 744 con sensores de la misma marca y modelos 700XXX en el caso de la presión y pozo seco Fluke 9142 Field MetrologyWell.

Instrumentos de Presión Absoluto

Procedimiento de calibración

- 1) Si el transmisor a calibrar es parte de un lazo de control, poner en manual el lazo de control de forma tal que quede deshabilitado el transmisor del control.

- 2) Ingresar al servidor primario de BMS, para realizar la desactivación de la alarma respectiva al sensor a calibrar, para evitar de esta manera que se muestren falsas alarmas en el sistema.

- 3) Verificar estado del Transmisor de presión (montaje, mangueras, llaves, biex, tipo de tubería) y notificar cualquier problema.

- 4) Conectar por Hart el Fluke 744 a la salida de 4 a 20 mA, en los terminales (+) y (-) del transmisor de presión absoluto.

- 5) Verificar por lectura Hart el tag del transmisor de presión absoluto y tomar nota de los datos de éste.

- 6) Verificar por lectura Hart la presión del transmisor de presión absoluto y compararla que corresponda con la medida mostrada en BMS.

- 7) Verificar con personal de BMS que el transmisor esté debidamente deshabilitado de cualquier lazo de control.
- 8) Tomar nota de la última medida en BMS del transmisor de presión absoluto antes de manipular.
- 9) Desconectar la conexión Hart del Fluke 744 de la salida del transmisor de presión.
- 10) Verificar y cerrar la válvula que alimenta de presión al transmisor de presión absoluto correspondiente.
- 11) Desmontar el transmisor de presión para despresurizar la presión en él, recoger con una bolsa plástica el desecho si es agua.
- 12) Realizar instalación mecánica de manifold para calibración (si aplica).
- 13) Montar el sensor si fue removido o desmontado de su instalación original para hacer la instalación mecánica.
- 14) Realizar conexiones del equipo de pruebas, abrir la válvula prevista para calibración para conectarse al transmisor y conectar las mangueras, pistola de presión, Fluke 744, módulo transmisor de presión absoluta.
- 15) Realizar pruebas de fuga de forma visual debido a la nueva instalación mecánica.
- 16) Conectar por Hart el Fluke 744 a la salida de 4 a 20 mA del transmisor de presión absoluta.

- 17) Realizar pruebas de fuga por medio del Fluke 744 y la bomba de presión.
- 18) Medir voltaje (24Vdc) en la salida de 4 a 20 mA del transmisor de presión para identificar y asegurar cuál es el cable negativo de éste.
- 19) Desconectar el cable negativo de la salida del transmisor de presión y conectarlo en serie con el calibrador de procesos Fluke 744, para medir la corriente de salida del transmisor de presión.
- 20) Hacer pruebas del valor encontrado con el Fluke 744, aplicando presión con la bomba, verificando cada punto de prueba con lo que se observa en el BMS.
- 21) Verificar las lecturas de los instrumentos menos cinco puntos de presión (0%, 25%, 50%, 75%, 100% de rango), incluyendo el superior e inferior del rango.
- 22) Sólo se comprueba medición, "NO" se ajusta un 0.
- 23) Desconectar la conexión Hart del Fluke 744 de la salida del transmisor de presión.
- 24) Conectar el cable negativo nuevamente al transmisor de presión.
- 25) Cerrar válvula de calibración.
- 26) Abrir la válvula que alimenta de presión al transmisor de presión absoluto correspondiente.

- 27) Coordinar con el personal de BMS para verificar la lectura del transmisor de presión absoluto que corresponda con la lectura antes de calibrar.
- 28) Colocar etiqueta de calibración con fecha en que se hizo la calibración, el consecutivo de calibración y la fecha de vencimiento de calibración.
- 29) Monitorear por 1 hora el comportamiento del sensor.
- 30) Si el comportamiento es correcto, coordinar con el personal de BMS para habilitar el transmisor de presión absoluto correspondiente.
- 31) Ingresar al servidor primario de BMS, para realizar la activación de la alarma respectiva al sensor a calibrar, para colocar el sistema en su estado normal.

Instrumentos de Presión Diferencial

Procedimiento de calibración

- 1) Si el transmisor a calibrar es parte de un lazo de control, poner en manual el lazo de control de forma tal que quede deshabilitado el transmisor del control.
- 2) Ingresar al servidor primario de BMS, para realizar la desactivación de la alarma respectiva al sensor a calibrar, para evitar de esta manera que se muestren falsas alarmas en el sistema.

- 3) Verificar estado del Transmisor de presión (montaje, mangueras, llaves, biex, tipo de tubería, tapones, manifold) e informar de cualquier problema.
- 4) Conectar por Hart el Fluke 744 a la salida de 4 a 20 mA, en los terminales (+) y (-) del transmisor de presión diferencial.
- 5) Verificar por lectura Hart el tag del transmisor de presión diferencial y tomar nota de los datos de éste.
- 6) Verificar por lectura Hart la presión del transmisor de presión diferencial y compararla que corresponda con la medida mostrada en BMS.
- 7) Verificar con personal de BMS que el transmisor esté debidamente deshabilitado de cualquier lazo de control.
- 8) Tomar nota de la última medida en BMS del transmisor de presión diferencial antes de manipular.
- 9) Desconectar la conexión Hart del Fluke 744 de la salida del transmisor de presión.
- 10) Verificar estado de la válvula de la pierna alta.
- 11) Verificar estado de la purga de la pierna alta (si aplica).
- 12) Verificar estado de la válvula de la pierna baja.
- 13) Verificar estado de la purga de la pierna baja (si aplica).

- 14) Verificar y cerrar la válvula que va en tubería (si es que aplica) que supe al transmisor de presión en las dos entradas de las piernas H y L (esto depende de como esté funcionando el transmisor, si es diferencial, manométrico o nivel, puede que solo tenga una válvula).
- 15) Si el manifold tiene válvulas (si es que aplica), hay que cerrar las válvulas que alimenten las piernas "H y L", (Esto depende de como esté funcionando el transmisor, si es diferencial, manométrico o nivel, puede que solo tenga una entrada).
- 16) Abrir las purgas para despresurizar el transmisor y verificar con BMS que sea así.
- 17) Dependiendo de la posición o ubicación se tendría que manipular las tuberías y desmontar momentáneamente el transmisor. Para poder hacer la instalación mecánica del manifold para calibración, (si aplica).
- 18) Realizar instalación mecánica de manifold para calibración (si aplica).
- 19) Montar el transmisor si fue removido o desmontado de su instalación original para hacer la instalación mecánica.
- 20) Realizar conexiones del equipo de pruebas, abrir la válvula prevista para calibración para conectarse al transmisor y conectar las mangueras, pistola de presión, Fluke 744, módulo transmisor de presión diferencial.
- 21) Realizar pruebas de fuga de forma visual debido a la nueva instalación mecánica.

- 22) Hacerle un cero al módulo de presión del Fluke (toma alta y toma baja, ambas abiertas a la misma presión).
- 23) Realizar pruebas de fuga por medio del Fluke 744 y la bomba de presión.
- 24) Para verificar si el 0 del sensor está correcto, se abre la válvula central del manifold para que la presión en ambas piernas sea la misma.
- 25) Las válvulas de las piernas (L y H), ambas tienen que estar cerradas y de las purgas abiertas.
- 26) Por medio del Hart del Fluke 744, la medición tiene que ser 0, si no es así, se realiza el ajuste a 0.
- 27) Se cierra válvula central nuevamente del manifold.
- 28) Dependiendo de cómo esté conectada la pierna baja en el sistema, si no hay nada en ella, se deja la válvula o la purga abierta para realizar las pruebas.
- 29) Medir voltaje (24Vdc) en la salida de 4 a 20 mA del transmisor de presión para identificar y asegurar cuál es el cable negativo de éste.
- 30) Desconectar el cable negativo de la salida del transmisor de presión y conectarlo en serie con el calibrador de procesos Fluke 744, para medir la corriente de salida del transmisor de presión.

- 31) Hacer pruebas del valor encontrado con el Fluke 744, aplicando presión con la bomba en la pierna alta, verificando cada punto de prueba con lo que se observa en el BMS.
- 32) Verificar las lecturas de los instrumentos menos cinco puntos de presión (0%, 25%, 50%, 75%, 100% de rango), incluyendo el superior e inferior del rango.
- 33) Dependiendo del resultado, realizar ajuste salida o ajuste sensor.
- 34) Hacer pruebas del valor dejado con el Fluke 744, aplicando presión con la bomba de presión en la pierna alta, verificando cada punto de prueba con lo que se observa en el BMS.
- 35) Desconectar la conexión Hart del Fluke 744 de la salida del transmisor de presión.
- 36) Conectar el cable negativo nuevamente a la salida de 4 a 20mA del transmisor de presión.
- 37) Cerrar válvula de calibración (corresponde a la instalada en la purga alta).
- 38) Cerrar purga de la pierna baja.
- 39) Colocar válvula de la pierna alta a su estado inicial.
- 40) Colocar la purga de la pierna alta a su estado inicial (si aplica).
- 41) Colocar la válvula de la pierna baja a su estado inicial.

- 42) Colocar la purga de la pierna baja a su estado inicial (si aplica)
- 43) Coordinar con el personal de BMS para verificar la lectura del transmisor de presión diferencial que corresponda con la lectura antes de calibrar.
- 44) Colocar etiqueta de calibración con fecha en que se hizo la calibración, el consecutivo de calibración y la fecha de vencimiento de calibración.
- 45) Monitorear por 1 hora el comportamiento del sensor.
- 46) Si el comportamiento es correcto, coordinar con el personal de BMS para habilitar el transmisor de presión absoluto correspondiente.
- 47) Ingresar al servidor primario de BMS, para realizar la activación de la alarma respectiva al sensor a calibrar, para colocar el sistema en su estado normal.

Instrumentos de Presión Manométrica

Procedimiento de calibración

- 1) Si el transmisor a calibrar es parte de un lazo de control, poner en manual el lazo de control de forma tal que quede deshabilitado el transmisor del control.
- 2) Ingresar al servidor primario de BMS, para realizar la desactivación de la alarma respectiva al sensor a calibrar, para evitar de esta manera que se muestren falsas alarmas en el sistema.

- 3) Verificar estado del Transmisor de presión (montaje, mangueras, llaves, biex, tipo de tubería, tapones, manifold) e informar de cualquier problema.
- 4) Conectar por Hart el Fluke 744 a la salida de 4 a 20 mA, en los terminales (+) y (-) del transmisor de presión manométrica.
- 5) Verificar por lectura Hart el tag del transmisor de presión manométrica y tomar nota de los datos de éste.
- 6) Verificar por lectura Hart la presión del transmisor de presión manométrica y compararla que corresponda con la medida mostrada en BMS.
- 7) Verificar con personal de BMS que el transmisor esté debidamente deshabilitado de cualquier lazo de control.
- 8) Tomar nota de la última medida en BMS del transmisor de presión manométrica antes de manipular.
- 9) Desconectar la conexión Hart del Fluke 744 de la salida del transmisor de presión.
- 10) Verificar y cerrar la válvula que alimenta de presión al transmisor de presión manométrico correspondiente.
- 11) Desmontar el transmisor de presión para despresurizar la presión en él, recoger con una bolsa plástica el desecho si es agua.

- 12) Realizar instalación mecánica de manifold para calibración (si aplica).
- 13) Montar el sensor si fue removido o desmontado de su instalación original para hacer la instalación mecánica.
- 14) Realizar conexiones del equipo de pruebas, abrir la válvula prevista para calibración para conectarse al transmisor y conectar las mangueras, pistola de presión, Fluke 744, módulo transmisor de presión manométrico.
- 15) Realizar pruebas de fuga de forma visual debido a la nueva instalación mecánica.
- 16) Hacerle un cero al módulo de presión manométrico del Fluke en condiciones sin presión.
- 17) Realizar pruebas de fuga por medio del Fluke 744 y la bomba de presión.
- 18) Conectar por Hart el Fluke 744 a la salida de 4 a 20 mA del transmisor de presión manométrico.
- 19) Verificar si el 0 del sensor está correcto, se abre la válvula para calibrar y se deja al aire la manguera.
- 20) Por medio del Hart la medida tiene que ser 0, si no, se realiza el ajuste del 0 al sensor.

- 21) Medir voltaje (24Vdc) en la salida de 4 a 20 mA del transmisor de presión para identificar y asegurar cuál es el cable negativo de éste.
- 22) Desconectar el cable negativo de la salida del transmisor de presión y conectarlo en serie con el calibrador de procesos Fluke 744, para medir la corriente de salida del transmisor de presión.
- 23) Conectar la conexión Hart del Fluke 744 en la salida de 4 a 20mA del transmisor de presión.
- 24) Hacer pruebas del valor encontrado con el Fluke 744, aplicando presión con la bomba, verificando cada punto de prueba con lo que se observa en el BMS.
- 25) Verificar las lecturas de los instrumentos menos cinco puntos de presión (0%, 25%, 50%, 75%, 100% de rango), incluyendo el superior e inferior del rango.
- 26) Dependiendo del resultado, se realiza ajuste salida o ajuste sensor.
- 27) Hacer pruebas del valor dejado con el Fluke 744, aplicando presión con la bomba de presión, verificando cada punto de prueba con lo que se observa en el BMS.
- 28) Desconectar la conexión Hart del Fluke 744 de la salida del transmisor de presión.
- 29) Conectar el cable negativo nuevamente a la salida de 4 a 20mA del transmisor de presión.
- 30) Cerrar válvula de calibración.

- 31) Abrir la válvula que alimenta de presión al transmisor de presión manométrico correspondiente.
- 32) Coordinar con el personal de BMS para verificar la lectura del transmisor de presión manométrico que corresponda con la lectura antes de calibrar.
- 33) Coordinar con el personal de BMS para habilitar (o monitorear) el transmisor de presión manométrico correspondiente.
- 34) Colocar etiqueta de calibración, con fecha en que se hizo y la fecha en que vence ésta.
- 35) Monitorear por 1 hora el comportamiento del sensor.
- 36) Si el comportamiento es correcto, coordinar con el personal de BMS para habilitar el transmisor de presión manométrico correspondiente.
- 37) Ingresar al servidor primario de BMS, para realizar la activación de la alarma respectiva al sensor a calibrar, para colocar el sistema en su estado normal.

Instrumentos de Temperatura

Procedimiento de calibración

- 1) Si el transmisor a calibrar es parte de un lazo de control, poner en manual el lazo de control de forma tal que quede deshabilitado el transmisor del control.

- 2) Ingresar al servidor primario de BMS, para realizar la desactivación de la alarma respectiva al sensor a calibrar, para evitar de esta manera que se muestren falsas alarmas en el sistema.
- 3) Verificar estado del Transmisor de temperatura (montaje, tubería, biex) y la RTD (montaje, termopozo), notificar cualquier problema.
- 4) Conectar por Hart el Fluke 744 a la salida de 4 a 20 mA, en los terminales (+) y (-) del transmisor Temperatura.
- 5) Verificar por lectura Hart el tag del transmisor de presión manométrica y tomar nota de los datos de éste.
- 6) Verificar por lectura Hart la temperatura del transmisor y compararla que corresponda con la medida mostrada en BMS.
- 7) Verificar con personal de BMS que el transmisor esté debidamente deshabilitado de cualquier lazo de control.
- 8) Tomar nota de la última medida en BMS del transmisor de Temperatura antes de manipular.
- 9) Si la RTD del proceso está situada lejos del transmisor, entonces se desconectan los cables de la RTD que van hacia el transmisor.
- 10) Desacoplar RTD del termopozo, si aplica esperar 15 minutos a que la temperatura en ella descienda verificando por Hart.
- 11) Se conectan los cables de la RTD del proceso en las terminales de entrada del transmisor de temperatura, lo más cerca posible de éste.

- 12) Desconectar la conexión Hart del Fluke 744 de la salida del transmisor de presión.
- 13) Colocar la RTD del proceso en el pozo seco.
- 14) Colocar la RTD de referencia calibrada en el pozo seco y conectar las terminales hacia el Fluke 744.
- 15) Si las lecturas del transmisor de temperatura NO están dentro de la Tolerancia, entonces se sustituye todo el juego completo (transmisor de temperatura y la RTD) por otro que ya está calibrado.
- 16) Una vez que pasó la prueba, la RTD del proceso se vuelve a montar en el termopozo y si aplica se conectan los cables nuevamente de la RTD que van hacia las terminales de entrada del transmisor.
- 17) Esperar 5 minutos para que la RTD del proceso obtenga la temperatura del proceso a la cual está midiendo.
- 18) Si el comportamiento es correcto, coordinar con el personal de BMS para habilitar el transmisor de presión manométrico correspondiente.
- 19) Ingresar al servidor primario de BMS, para realizar la activación de la alarma respectiva al sensor a calibrar, para colocar el sistema en su estado normal.

A.4 Hoja de Información del Proyecto

HOJA DE INFORMACIÓN DEL PROYECTO

Información del estudiante:

Nombre: JeffryAlexánder Chacón Ceciliano

Cédula: 304230088 **Carné ITCR:** 200640605

Dirección de su residencia en época lectiva: Residencial Montana, Casa 70.

Pozos de Santa Ana, San José Costa Rica

Dirección de su residencia en época no lectiva: Calle 1, Avenidas 13 y 15.

Cartago, Costa Rica

Teléfono en época lectiva:70766966 **Teléfono época no lectiva:**70766966

Email: jchacon@ingpro-tec.com

Fax: N/D

Información del proyecto:

Nombre del Proyecto: Diseño, implementación y validación de un sistema de detección de fallas con HoldLastState para los sistemas de control automático del laboratorio de pruebas de la empresa Componentes Intel de Costa Rica

Area del Proyecto: Control automático, sistemas digitales, electrónica analógica y programación

Información de la empresa:

Nombre: INGPRO S.A.

Zona: San Antonio de Belén, Heredia, Costa Rica

Dirección: 500 este de la Iglesia de San Antonio de Belén, sobre la calle 111

Teléfono: 8305-2481

Fax: 2297-5718

Apartado: N/D

Actividad Principal: Consultoría en ingeniería y proyectos de automatización, sistemas electrónicos y mecánicos

Información del encargado en la empresa:

Nombre: IngBelforth Salazar

Puesto que ocupa: Gerente

Departamento: Finanzas

Profesión: Ingeniero en Electrónica **Grado académico:** MEng

Teléfono: 6047- 4646 **Ext.:** N/D

Email: bsalazar@ingpro-tec.com

Información del asesor en la empresa:

Nombre: Luis Diego Salazar

Puesto que ocupa: Ingeniero de Aplicaciones

Departamento: Ingeniería de Aplicaciones

Profesión: Ingeniero en Electrónica **Grado académico:** Lic

Teléfono: 8305-2481 **Ext:** N/D

Información de la empresa que recibe el servicio (solo si es necesario):

Nombre: Componentes Intel de Costa Rica

Zona: La Ribera de Belén, Heredia

Dirección: La Ribera de Belén, Heredia

Teléfono: 2298-6000 **Fax:** 22317100 **Apartado:** <No. Apartado>

Actividad Principal: Ensamblar y probar microprocesadores, diseñar circuitos electrónicos y proveer servicios financieros a toda la corporación

Información del ingeniero encargado en la empresa que recibe el servicio (solo si es necesario):

Nombre: Mario Vega

Puesto que ocupa: Dueño del Sistema BuildingMonitoringSystem

Departamento: Servicios corporativos

Profesión: Ingeniero

Grado académico: Lic

Teléfono: 2298-7048

Ext.: <No. Ext.>

Email: mario.a.vega@intel.com

Capítulo 10

Anexos

Anexo A.1 Portadas de los Manuales



741B/743B
Users Manual

Table 1. Summary of Source and Measure Functions

| Function | Measure | Source |
|--------------------------|--|---|
| dc V | 0V to +/-300V | 0V to 15V (10 mA max) |
| ac V | 0V to 300V rms, 20 Hz to 5 kHz | No sourcing |
| Frequency | 1 Hz to 1 kHz (100 mV to 300V rms) 1 kHz to 30 kHz (0.5V to 30V rms) 30 kHz to 50 kHz (1V to 30V rms) | 0.1V to 10V pk zero-symmetric sine or square wave, 0 Hz to 50 kHz |
| Resistance | 0Ω to 11 kΩ | 0Ω to 11 kΩ |
| dc Current | 0 mA to 110 mA | 0 to 22 mA (28V max), sourcing or sinking |
| Continuity | Beep and the word Short indicates continuity | No sourcing |
| Thermocouple | Types E, N, J, K, T, B, R, S, C, L, or U | |
| RTD | 100Ω Platinum (3926) 100Ω Platinum (385) 120Ω Nickel (672) 200Ω Platinum (385) 500Ω Platinum (385) 1000Ω Platinum (385) 10Ω Copper (427) 100Ω Platinum (3916) | |
| Measure 2, 3, or 4 wire. | | |
| Source 2 wire. | | |
| Pressure | 27 modules ranging from 0 to 10 in. H ₂ O (2.5 kPa) to 0 to 10,000 psi (69,000 kPa) | Note |
| Loop Power | 24 or 28V (22 mA max) | |

Note: Use an external hand pump or other pressure source as a pressure stimulus for the source pressure function.

FLUKE.

Hart Scientific

914X Series Field Metrology Well User's Guide

Revision 7A1901-EN

914X Field Metrology Wells Parts and Controls



Figure 2 914X Field Metrology Well

3.2 Parts and Controls

This section describes the exterior features of the Field Metrology Well. All interface and power connections are found on the front of the instrument (see Figure 2).

700 Series Pressure Modules
FLUKE Instruction Sheet

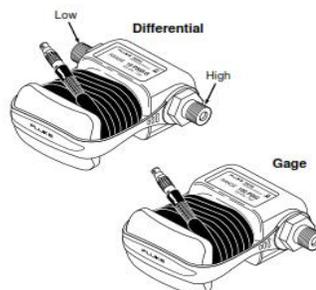


Figure 1.

yz11.eps

Fluke-725 Multifunction Process Calibrators: The Fluke-700P00 and P27 Pressure Modules will display correct pressure readings when used with Fluke-725 Multifunction Process Calibrators at internal software revision 1.9 and later. To view the software revision, power-on the calibrator while holding down the 0% key. Read the REV number in the display. Contact your Fluke Service Center for a free update of calibrators with lower revision numbers. Reference PCN 4578.

Box Contents

Pressure module, strap, 1/4 NPT to 1/4 ISO metric adapters, instruction sheet.

Protecting Yourself from Pressure Releases

To avoid a violent release of pressure in a pressurized system, shut off the isolation valve and slowly bleed off the pressure before you attach or remove the pressure module from the pressure line.

Avoiding Overpressure Damage

Applying pressure in excess of the BURST PRESSURE specified on the pressure module can destroy the pressure module. Burst pressure is 3X full scale (2X for 700P08, 30X for 700P00).

Table 1. Pressure Module Specifications¹

| MODEL | RANGE ² | GAGE OR DIFFERENTIAL | ISOLATED OR NONISOLATED | REFERENCE UNCERTAINTY (23° ± 3° C) | STABILITY (1 YEAR) | TEMP (0° to 50° C) | TOTAL UNCERTAINTY (% of Full Scale) ³ 1 YEAR |
|--------------|--|----------------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|---|
| FLUKE-700P00 | 0 to 1,000 in H ₂ O 0 to 0.249 kPa 0 to 0.002 bar | Differential | Nonisolated | 0.300% | 0.025% | 0.025% | 0.350% |
| FLUKE-700P01 | 0 to 10.00 in H ₂ O 0 to 2.49 kPa 0 to 0.02 bar | Differential | Nonisolated | 0.200% | 0.050% | 0.050% | 0.300% |
| FLUKE-700P02 | 0 to 1,000.0 psi 0 to 6,890 kPa 0 to 6.89 E-2 bar | Differential | Nonisolated | 0.150% | 0.070% | 0.080% | 0.300% |
| FLUKE-700P03 | 0 to 5,000.0 psi 0 to 34,000 kPa 0 to 0.3400 bar | Differential | Nonisolated | 0.050% | 0.020% | 0.030% | 0.100% |
| FLUKE-700P04 | 0 to 15,000 psi 0 to 100.00 kPa 0 to 1.0000 bar | Differential | Nonisolated | 0.025% | 0.010% | 0.015% | 0.050% |
| FLUKE-700P05 | 0 to 30,000 psi 0 to 200.00 kPa 0 to 2.0000 bar | Gage | Isolated | 0.025% | 0.010% | 0.015% | 0.050% |
| FLUKE-700P06 | 0 to 100.00 psi 0 to 700.00 kPa 0 to 7.0000 bar | Gage | Isolated | 0.025% | 0.010% | 0.015% | 0.050% |
| FLUKE-700P27 | 0 to 300.00 psi 0 to 2000.0 kPa 0 to 20.0000 bar | Gage | Isolated | 0.025% | 0.010% | 0.015% | 0.050% |
| FLUKE-700P07 | 0 to 500.00 psi 0 to 3400.0 kPa 0 to 34.0000 bar | Gage | Isolated | 0.025% | 0.010% | 0.015% | 0.050% |
| FLUKE-700P08 | 0 to 1000.0 psi 0 to 7000.0 kPa 0 to 70.0000 bar | Gage | Isolated | 0.025% | 0.010% | 0.015% | 0.050% |
| FLUKE-700P09 | 0 to 1500.0 psi 0 to 10000.0 kPa 0 to 100.0000 bar | Gage | Isolated | 0.025% | 0.010% | 0.015% | 0.050% |

1. Use of pressure zero function is required to achieve these specifications. Contact your Fluke Service Center for upgrade of your Fluke 701 or Fluke 702 V1.0, V1.1, or V1.2 calibrator.
2. Available pressure units (psi, kPa, bar, inHg, mmHg, inH₂O, ftH₂O, kg/cm², mmH₂O, cmH₂O) are determined by the calibrator being used.
3. Accuracy specifications apply for 0 to 100% of full scale, 0 to 50°C. 1% FS typical, -10 to 0°C. On 700P00 only, specification applies from 15 to 35°C.
4. Maximum Non-Destructive Pressure: 3X maximum rated pressure, including common mode pressure. (700P08: 2X, 700P00: 30X)
5. Maximum Common Mode Pressure: 3X maximum rated pressure. (700P08: 2X, 700P00: 30X)
6. Specifications reflect a confidence interval of 95%.



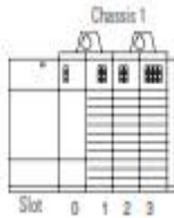
AB *Allen-Bradley*

SLC 500 Modular Hardware Style

Catalog Numbers

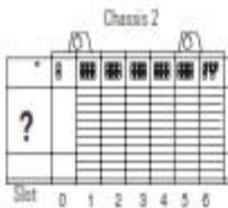
**1747-L511, 1747-L514, 1747-L524,
1747-L531, 1747-L532, 1747-L533,
1747-L541, 1747-L542, 1747-L543,
1747-L551, 1747-L552, 1747-L553**

User Manual



| Slot Numbers | Description | Cat. No. | Power Supply at 5V dc (Amps) | Power Supply at 24V dc (Amps) |
|-------------------|--------------------------|-----------|------------------------------|-------------------------------|
| 0 | Processor unit | 1747-L511 | 0.090 | 0.000 |
| 1 | Input module | 1747-IV8 | 0.050 | 0.000 |
| 2 | Transistor output module | 1746-OB8 | 0.135 | 0.000 |
| 3 | Triac output module | 1746-OA16 | 0.370 | 0.000 |
| Peripheral device | Isolated link coupler | 1747-AIC | 0.000 | 0.085 |
| Total Current: | | | 0.645 | 0.085 ⁽¹⁾ |

⁽¹⁾ The 1746-F1 power supply is sufficient for Chassis #1. The internal current capacity for this power supply is 2 A at 5V dc, 0.46 A at 24V dc.



| Slot Numbers | Description | Cat. No. | Power Supply at 5V dc (Amps) | Power Supply at 24V dc (Amps) |
|-------------------|-----------------------|-----------|------------------------------|-------------------------------|
| 0 | Processor unit | 1747-L514 | 0.090 | 0.000 |
| 1 | Output module | 1746-OW16 | 0.170 | 0.180 |
| 2 | Combination module | 1746-ID12 | 0.090 | 0.070 |
| 3, 4, 5, 6 | Analog output modules | 1746-NO4I | 0.220 (4 x 0.055) | 0.780 (4 x 0.195) |
| Peripheral device | Isolated link coupler | 1747-AIC | 0.000 | 0.085 |
| Peripheral device | Interface converter | 1746-PIC | Not applicable | Not applicable |
| Total Current: | | | 0.570 | 1.115 ⁽¹⁾ |

⁽¹⁾ The 1746-F4 power supply is sufficient for Chassis #2. The internal current capacity for this power supply is 10 A at 5V dc, 2.88 A at 24V dc, not to exceed 70 W.

Example Worksheet for Selecting a 1746 Power Supply

If you have a multiple chassis system, make copies of the Power Supply Worksheet found on page 230.

For a detailed list of device load currents, refer to the SLC 500 Modular Chassis and Power Supplies Technical Data, publication 1746-TD003.

TIP Consider future system expansion when selecting a power supply.