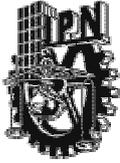


DESARROLLO DE UN SISTEMA DE SEGURIDAD DIGITAL PARA GENERADORES DE VAPOR POR COMPUTADORA.

INDICE

OBJETIVO DEL TEMA	2
INTRODUCCIÓN.....	2
JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA.....	4
CAPITULO 1 CONCEPTOS BÁSICOS DE CONTROL.....	6
CAPITULO 2 SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL.....	17
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS.....	17
2.2 CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR DE VAPOR.....	20
2.3 COMPONENTES BÁSICOS DEL SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL.....	21
2.4 DEFINICIÓN DE LA ECUACIÓN DEL NIVEL DEL TANQUE.....	23
2.5 SESORES Y TRANSMISORES.....	24
2.6 CONTROLADORES.....	25
2.7 ELEMENTO FINAL DE CONTROL (VÁLVULA).....	28
2.8 MODELADO DEL SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL.....	29
2.9 DISTRIBUCIÓN FÍSICA DEL EQUIPO EN LA PLANTA O PROCESO.....	31
2.10 CONTROL DIGITAL DEL SISTEMA DE NIVEL.....	32
CAPITULO 3 SISTEMA DE CONTROL DE COMBUSTIÓN.....	43
3.1 DETECCIÓN DE BAJO NIVEL.....	43
3.2 SISTEMA DE ENCENDIDO.....	44
3.3 CONTROL DE COMBUSTIÓN.....	44
3.4 APARATOS DE SEGURIDAD PARA IGNICIÓN DE COMBUSTIBLE.....	46
3.5 DETECCIÓN DE PRESIÓN.....	47
3.6 DETECCIÓN DE FLUJO ALTO DE COMBUSTIBLE.....	48
3.7 DETECCIÓN DE FLAMA.....	48
3.8 CONTROL TODO O NADA (ON-OFF).....	50
3.9 ELEMENTOS FINALES DE CONTROL.....	50
3.10 DISTRIBUCIÓN FÍSICA DEL EQUIPO.....	52
CAPITULO 4 UNIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMBUSTIÓN Y DE NIVEL POR MEDIO DE LA COMPUTADORA.....	54
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA LÓGICA DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ENCENDIDO Y COMBUSTIÓN.....	55
4.2 SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES RETROALIMENTADOS.....	59
4.3 ALGORITMO DE PID AVANZADO.....	60
4.4 USANDO EL SOFTWARE PID.....	61
4.5 EL VI PID.....	64
4.6 UBICACIÓN DE DISPOSITIVOS EN EL PANEL FRONTAL.....	65
CONCLUSIONES.....	67
BIBLIOGRAFÍA.....	68
ANEXOS.....	70



DESARROLLO DE UN SISTEMA DE SEGURIDAD DIGITAL PARA GENERADORES DE VAPOR POR COMPUTADORA.

OBJETIVO DEL TEMA

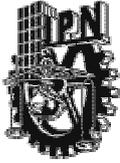
Desarrollar un sistema de seguridad integral que sea capaz de controlar una caldera por medio de una PC con un sistema de adquisición de datos y una herramienta de software (Labview) que proporciona elementos necesarios para desarrollar dicho sistema a bajo costo y de manera eficiente.

INTRODUCCIÓN

Las calderas modernas se componen de una serie de elementos cuidadosamente diseñados sobre bases técnicas. Las condiciones actuales de operación son muy diferentes a las que prevalecieron hace cincuenta años.

La multiplicidad de diseños y tipos de equipos que se ofrecen actualmente hacen de la selección de los componentes de una caldera un sistema bastante complejo, en especial el del sistema de control automático o de seguridad el cual es necesario que conozcan todos los operadores de calderas.

El propósito general de este trabajo consiste en controlar el sistema de seguridad y encendido de calderas por medio de una computadora personal que además utilizando dispositivos externos sea capaz de detectar las señales producidas por los sensores y que posteriormente ejecute ordenes dependiendo de dichas lecturas para activar elementos finales de control como válvulas o servomotores o en el caso del encendido, el piloto del sistema de combustión de la caldera y que sea capaz de servir como sistema de prevención en caso de operación crítica de la caldera en general, la cual posee sistemas externos de seguridad que en determinadas circunstancias llegan a ser doblemente redundantes dado el peligro de explosión de la caldera. Estos sistemas serán nombrados posteriormente con el fin de tener una clara perspectiva de la operación de las calderas y de su sistema de seguridad en general y para conocer también los límites del sistema de seguridad controlado por la PC.

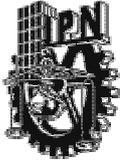


El sistema de seguridad para calderas se compone básicamente de dos sistemas que se pueden controlar separadamente por medio de la computadora; dichos sistemas son el de control de nivel y el de control de combustión los cuales al ser monitoreados por el sistema de seguridad pasan a una segunda etapa que es la de encendido de la caldera. Dichas etapas constan de varios elementos finales de control que requieren una cierta secuencia de actuación que será definida a su debido tiempo en el presente trabajo.

Se tomarán en cuenta para este trabajo las especificaciones técnicas generales de una caldera que proporcionarán una visión más apegada a circunstancias reales de modo que sea más entendible el objetivo del sistema de seguridad con ejemplos aplicables.

Durante el desarrollo y explicación de cada uno de los sistemas de seguridad y de encendido se proveerá del modelado matemático necesario, el cual implica dadas las características del sistema en general, la aplicación de herramientas matemáticas como Transformada de Laplace y de Transformada Z, las cuales son necesarias para obtener resultados congruentes y que posteriormente puedan ser interpretados por el controlador o PC, respetando la normatividad para el diseño de dichos sistemas que implica límites de operación preestablecidos.

La herramienta de software utilizada para este propósito es Labview, la cual facilita la operación del sistema de seguridad dadas sus características de operación y sus sistemas físicos de adquisición de datos y de interfaces de salida para la operación de los elementos finales de control.



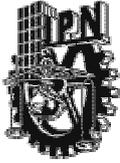
JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA.

Este sistema originalmente esta dirigido a la solución de problemas de la pequeña y mediana empresa que no cuentan con los suficientes recursos para solventar un sistema robusto el cual pueda cubrir necesidades únicamente para la industria de procesos o generación de energía. Este sistema además se adapta a las necesidades de expansión de la empresa mediante la adición de señales y monitoreo con un costo similar a las de su competencia pero con las capacidades mencionadas que muchos de los sistemas comunes no tienen, como la apertura en los algoritmos de programación que pueden realizar cualquier tipo de operación matemática y capacidades de comunicación en red que dependen del crecimiento del sistema en la empresa.

Se ha considerado un sistema capaz de medir y controlar cualquier tipo de caldera, ya que se han utilizado algunas de las variables más críticas del proceso teniendo en cuenta el aumento o disminución del número de las mismas y pudiendo desarrollar estrategias de control tanto analógico como digital que impliquen el manejo de dichas variables y sus correspondientes acciones de control, permitiendo así que la planta o proceso pueda ser monitoreado y que a su vez este tenga interacción con el operador de tal manera que este pueda identificar los estados en los que se presenta mayor riesgo durante la operación y mantener en condiciones estables y seguras la caldera. Esto también permite un paro de emergencia cuando sean detectadas las variables críticas de manera automática, esto hace aun más segura la operación de la caldera cuando el equipo está conectado a algún otro equipo como una turbina que requiere de suministro de vapor constante y que al fallar este necesita entrar en secuencia de paro en caso de que este funcionando, por citar un ejemplo.

Este sistema permite además agregar más etapas del proceso e incluir secuencias de operación capaces de monitorear señales remotas, por medio de un sistema de comunicación en red, lo cual es uno de los propósitos para aplicación de este sistema en el caso de estar instalado en una planta con requerimientos especiales de seguridad.

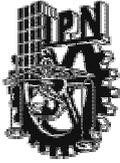
Al desarrollar un sistema de estas características se persiguen dos objetivos fundamentales: la eficiencia y unificación de los sistemas de seguridad electrónicos y la reducción en costo resultante de dicha unificación ya que un sistema de control de nivel además de un sistema de control de combustión para caldera generalmente son operados de forma individual por medio de módulos electrónicos programables o simplemente sistemas sencillos de medición dependiendo de las necesidades y características del equipo a controlar que definitivamente aumentan el costo de instalación y operación. Dichos módulos o controladores permiten la manipulación de pocas variables y requieren de herramientas especiales de software y de hardware en caso de que se requiera utilizar instrumentación más compleja como son los dispositivos inteligentes de campo que dadas las características de operación manejan varios tipos de señales. Estos módulos o controladores además únicamente permiten el control de una sola variable como es el caso de control de flama o encendido y el de nivel, que son las principales variables a manipular en este trabajo, lo que



hace que el sistema sea caro, y sin posibilidades de poderse incluir o monitorear en un sistema de control industrial de planta.

Las posibilidades que ofrece el software de realizar cualquier algoritmo de control son lo que hace viable adquirirlo ya que los controladores mantienen operaciones definidas a las que únicamente se les pueden variar algunos parámetros y no así toda la lógica ni la secuencia de operación para controlar los dispositivos de campo. Además de que tiene la ventaja de proporcionar sistemas de alarmas visuales en caso de operación crítica y las ventajas que el software de aplicación proporciona como adquisición de datos, operaciones matemáticas complejas, control y sistemas de comunicación a otros computadores que permitan ser operados como Sistemas de Control Distribuido en caso de ser requerido cuando se tengan varias calderas y las condiciones de operación sean críticas para el operador de la caldera o fogonero.

Este sistema es apto para aplicaciones industriales que requieran una demanda constante de vapor y que se requiera además de un monitoreo constante por razones de seguridad. Dicho rango de aplicaciones puede abarcar desde pequeña y mediana industria o comercio hasta plantas de generación de energía y/o procesos que implican estrategias de control complejas y sistemas de comunicación con protocolos industriales. De tal manera que el sistema pueda ajustarse a las necesidades del cliente sin que tenga una repercusión económica importante en el caso de que se requiera hacer modificaciones en la ingeniería de diseño.



CAPITULO 1 CONCEPTOS BÁSICOS DE CONTROL.

En el presente capítulo se darán las definiciones más importantes que se utilizarán a lo largo de toda la tesis con el fin de mantener una mejor comprensión de la misma. En algunos casos dichas definiciones se profundizaran dentro de los diferentes capítulos cuando así se requiera de manera que se de un concepto más amplio de lo que se pretenda explicar.

Sistema.

Un sistema es un arreglo, conjunto o colección de cosas conectadas o relacionadas de una manera que constituyen un todo.

Un sistema es un arreglo de componentes físicos conectados o relacionados de tal manera que formen una unidad completa o que puedan actuar como tal.

Control.

La palabra control generalmente se usa para designar regulación dirección o comando.

Sistema de Control.

Un sistema de control es un arreglo de componentes físicos conectados de tal manera que el arreglo se pueda comandar dirigir o regular a si mismo o a otro sistema.

Entrada.

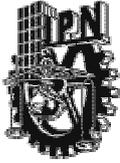
La Entrada es el estímulo o excitación que se aplica a un sistema de control desde una fuente de energía externa generalmente con el fin de producir, de parte del sistema de control una respuesta especificada.

Clasificación de los Sistemas de Control.

Los sistemas de control se clasifican en dos grandes categorías: sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado.

Un sistema de control de lazo abierto es aquel en el cual la acción de control es independiente de la salida.

Un sistema de control en lazo cerrado es aquel en el cual la acción de control es en cierto modo dependiente de la salida. Son llamados comúnmente sistemas de control por retroalimentación.



Retroalimentación.

Es esa propiedad de un sistema de lazo cerrado que permite que la salida(o cualquier otra variable controlada del sistema) sea comparada con la entrada al sistema (o con una entrada a cualquier componente interno del sistema o con un subsistema de este) de tal manera que se pueda establecer la acción de control apropiada como función de la entrada y la salida.

Diagrama en Bloque de un Sistema de Control por Retroalimentación.

Los bloques representan los diferentes componentes de un sistema de control están conectados de tal manera que caracterizan su relación funcional dentro del sistema. La configuración básica de un sistema de control simple de lazo cerrado por retroalimentación se ilustra en la figura 1.1. Las flechas que interconectan los bloques representan la dirección del flujo de energía del lazo de control o información y no la fuente principal de energía del sistema.

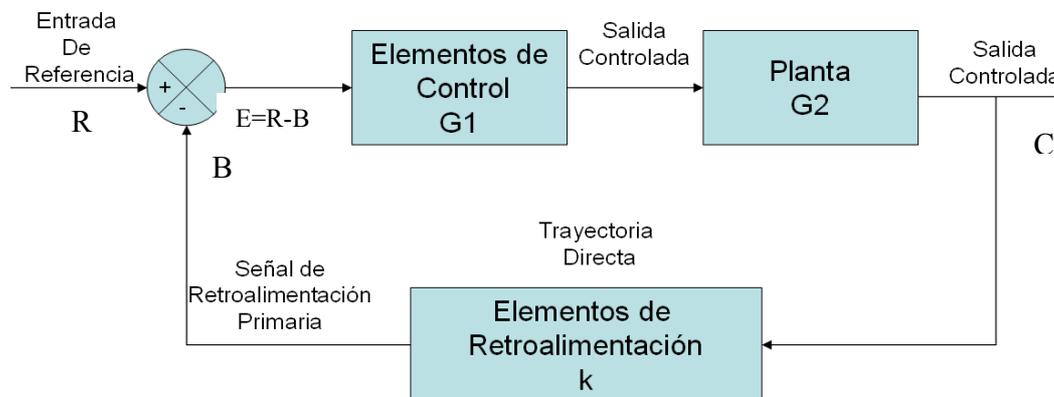
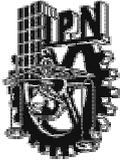


Fig.1.1 Sistema básico de control por Retroalimentación



Terminología del Diagrama en Bloque para Lazo Cerrado.

Para representar las variables de entrada y de salida de cada elemento se usan letras minúsculas tal como r para los símbolos de los bloques G_1 , G_2 y H . Estas cantidades representan funciones de tiempo a no ser que se especifique lo contrario.

Las letras mayúsculas representan transformadas de Laplace de cantidades que son funciones de la variable compleja s . Las funciones de s generalmente se abrevian con una letra mayúscula que aparece sola.

Las letras R , C , M etc., se escogieron para preservar la naturaleza genérica del diagrama en bloque.

Sistema Controlado.

La planta G_2 llamada también proceso, es el cuerpo proceso o maquina de la cual se va a controlar una cantidad o condición particular.

Elementos de Control.

Los elementos de control G_1 , también llamados controladores son los componentes requeridos para generar la señal de control apropiada m que se aplica a la planta.

Elementos de Retroalimentación

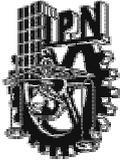
Los elementos B son los componentes que se requieren para establecer la relación funcional entre la señal de retroalimentación primaria B y la salida controlada C .

Entrada de Referencia

La entrada de referencia R es una señal externa aplicada a un sistema de control por retroalimentación con el fin de ordenar a una planta una acción especificada. Normalmente representa una salida ideal de la planta.

Salida Controlada.

La salida controlada es esa cantidad o condición de la planta que se controla.



Señal de Retroalimentación

La señal de retroalimentación B es una señal que es función de la salida controlada C y que se suma algebraicamente a la entrada de referencia R para obtener la señal impulsora E .

Señal Impulsora (Error)

La señal impulsora E también se denomina como error o acción de control, es la suma algebraica de la entrada de referencia R mas o menos usualmente la retroalimentación primaria B .

Variable Manipulada.

La variable manipulada M (señal de control) es la señal que los elementos de control G_1 aplica a la planta G_2 .

Perturbación.

Una perturbación U es una señal de entrada indeseable que afecta el valor de la salida controlada C . Puede entrar a la planta sumándose con m o a través de un punto intermedio.

Trayectoria Directa

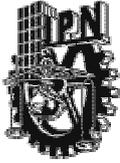
La trayectoria directa es la vía de transmisión desde la señal impulsora hasta la salida controlada C .

Trayectoria de Retroalimentación.

La trayectoria de retroalimentación es la vía de transmisión desde la salida controlada C hasta la señal de retroalimentación primaria B .

Transductor.

Es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra.



Controlador.

Instrumento que compara la variable controlada con un valor deseado y ejerce automáticamente una acción de corrección de acuerdo con la desviación.

Controlador de Acción Directa.

Controlador en el que la señal de salida aumenta (o disminuye) al aumentar (o disminuir) la señal de entrada.

Control de Acción Inversa.

Controlador en el que la señal de salida disminuye (o aumenta) al aumentar (o disminuir) la señal de entrada.

Controlador Programable.

Instrumento basado en microcontrolador que realiza funciones de secuencia y enclavamiento de circuitos y como complemento funciones de control PID.

Controlador Universal.

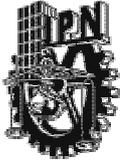
Basado en microprocesador sustituye al controlador convencional miniatura de panel. Realiza funciones de control PID, dispone de niveles de seguridad de protección de datos, acepta entradas universales (termopares, sondas de resistencia mA, mV y volts) y tiene varias opciones de comunicaciones.

Clasificación de Controladores Industriales

Los controladores industriales se clasifican, de acuerdo a sus acciones de control como:

1. De dos posiciones o controladores ON-OFF
2. Controladores Proporcionales.
3. Controladores Integrales
4. Controladores Proporcionales-Integrales
5. Controladores Proporcionales-Derivativos.
6. Controladores Proporcionales-Integrales-Derivativos.

La mayoría de los controladores industriales emplean como fuente de energía la electricidad o un fluido presurizado de aceite o el aire. Los controladores también se pueden clasificar según el tipo de energía que utilizan en su operación, como neumáticos hidráulicos o electrónicos. El tipo de controlador que se use debe decidirse basándose en la naturaleza de la planta y las condiciones de operación, incluyendo consideraciones tales como seguridad, costo, disponibilidad fiabilidad, precisión, peso y tamaño.



Acción de Control de Dos Posiciones ó Encendido y Apagado (On-Off).

En un sistema de control de dos posiciones el sistema de actuación solo tiene dos posiciones fijas, que en muchos casos son simplemente encendido y apagado. El control de dos posiciones o de encendido apagado es relativamente simple y barato, razón por la cual su uso es extendido en sistemas de control tanto industriales como domésticos.

Supóngase que la señal de salida del controlador es $u(t)$ y que la señal de error es $e(t)$. En el control de dos posiciones, la señal $u(t)$ permanece en un valor ya sea máximo o mínimo dependiendo de si la señal de error es positiva o negativa

Acción de Control Proporcional.

Para un controlador de acción de control proporcional, la relación entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ es:

$$u(t) = K_p e(t)$$

O bien en cantidades transformadas por el método de Laplace,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

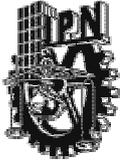
Donde K_p se considera la ganancia proporcional.

Cualquiera que sea el mecanismo real y la forma de la potencia de operación, el controlador proporcional es, en esencia, un controlador de ganancia ajustable.

Acción de Control Proporcional-Integral.

La acción de un controlador proporcional-integral (PI) se define

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$



O la señal de transferencia de un controlador es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Donde T_i se denomina tiempo integral.

Acción de Control Proporcional-Derivativa.

La acción de control de un controlador proporcional-derivativa se define mediante

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Y la función de transferencia es

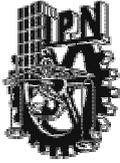
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s)$$

Donde T_d es el tiempo derivativo

Acción de Control Proporcional-Integral-Derivativa.

La combinación de la acción de control proporcional, la acción de control integral y la acción de control derivativa se denomina de control proporcional-integral-derivativa. Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada esta dada por

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$



O la función de transferencia¹ es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo. El diagrama a bloques de un controlador proporcional integral derivativo aparece en la siguiente figura

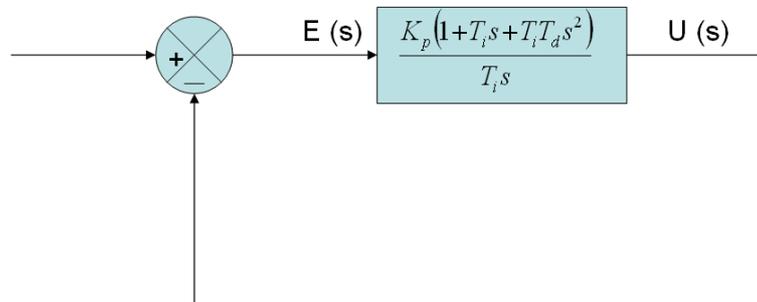


Fig.1.2 Diagrama a Bloques de un Controlador Proporcional- Integral-Derivativo (PID).

Tipos de Señales.

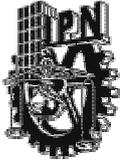
Señal en Tiempo Continuo.

Una señal en tiempo continuo es aquella que se define sobre un intervalo continuo de tiempo. La amplitud puede tener un intervalo continuo de valores o solamente un número finito de valores distintos. El proceso de representar una variable por medio de un conjunto de valores distintos se denomina cuantificación y los valores resultantes se denominan valores cuantificados. La variable cuantificada solo cambia en un conjunto finito de valores distintos.

Señal Analógica.

Una señal analógica es una señal definida en un intervalo continuo de tiempo cuya amplitud puede adoptar un intervalo continuo de valores.

¹ Ogata, Katsuhiko, *Ingeniería de Control Moderna*, Pearson Education, 4ta ed, 2003



Señal en Tiempo Discreto.

Una señal en tiempo discreto es una señal definida solo en valores discretos de tiempo (esto es, aquellos en que la variable independiente t esta cuantificada). En una señal en tiempo discreto, si la amplitud puede adoptar valores en un intervalo continuo entonces la señal se denomina señal de datos muestreados. Una señal de datos muestreados se puede generar muestreando una señal analógica en valores discretos de tiempo. Esta es una señal de pulsos modulada en amplitud.

Una señal digital es una señal en tiempo discreto con amplitud cuantificada. Dicha señal se puede representar mediante una secuencia de números, por ejemplo, en la forma de números binarios.

Sistemas de Control en Tiempo Continuo y Tiempo Discreto.²

Los sistemas de control en tiempo discreto son aquellos sistemas en los cuales una o más variables pueden cambiar solo en valores discretos de tiempo. Estos instantes, los cuales se denotaran mediante kT o t_k ($k=0, 1, 2, \dots$), pueden especificar los tiempos en que se lleva a cabo una medición de tipo físico o los tiempos en que se extraen los datos de la memoria de una computadora digital.

Los sistemas de control en tiempo discreto difieren de los sistemas de control en tiempo continuo en que las señales para los primeros están en forma de datos muestreados o en la forma digital. Si en el sistema de control esta involucrada una computadora digital como un controlador los datos muestreados se pueden convertir en datos digitales.

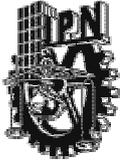
Computadora.

Aparato que recibe información de entrada y que la procesa dando información de salida según un programa preestablecido.

Computadora Digital.

Tipo de computador en el que la información se representa en forma numérica.

² Ogata, Katsuhiko, *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*, Pearson Education, 2da Ed.1996.



Sistemas de Control Digital.

En la figura 1.3 se muestra un diagrama a bloques de un sistema de control digital que presenta la configuración del esquema de control básico.

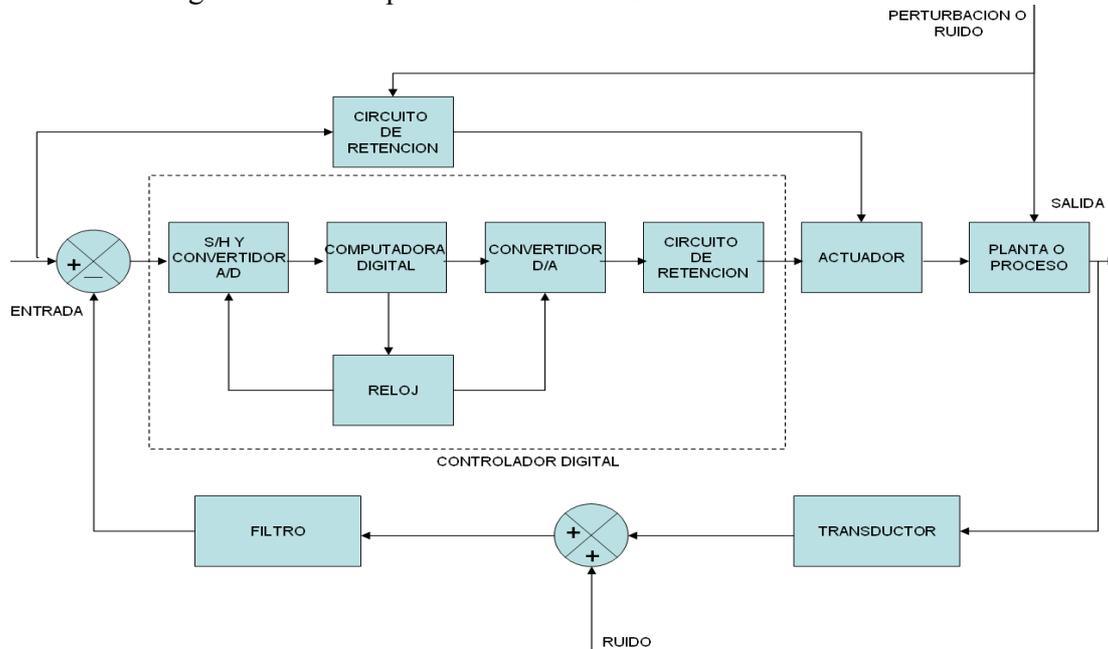


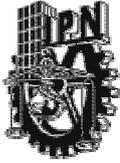
Fig. 1.3 Sistema de Control Digital

Muestreador y Retenedor (S/H).

Es un término general que se utiliza para un amplificador de muestreo y retención. Este término describe un circuito que recibe como entrada una señal analógica y mantiene dicha señal en un valor constante durante un tiempo específico. Normalmente la señal es eléctrica pero son posibles otras formas de esta, tales como óptica o mecánica.

Convertidor Analógico-Digital(A/D)

Un convertidor analógico-digital también es conocido como codificador, es un dispositivo que convierte una señal analógica en una señal digital, usualmente una señal codificada numéricamente. Dicho convertidor se necesita como una interfaz entre un componente analógico y uno digital. Con frecuencia un circuito de muestreo y retención es una parte integral de un convertidor A/D disponible comercialmente. La conversión de una señal analógica en la señal digital correspondiente (número binario) es una aproximación, ya que la señal digital puede adoptar un número infinito de valores, mientras que la variedad de números diferentes que se pueden formar mediante un conjunto finito de dígitos esta limitada. Este proceso de aproximación se denomina cuantificación.



Convertidor Digital Analógico (D/A).

Un convertidor digital analógico también denominado decodificador es un dispositivo que convierte una señal digital (datos codificados numéricamente) en una señal analógica. Dicho convertidor es necesario como una interfaz entre un componente digital y uno analógico.

Planta o Proceso.

Una planta es cualquier objeto físico a ser controlado.

Transductor.

Un transductor es un dispositivo que convierte una señal de entrada en una señal de salida de naturaleza diferente a la de entrada tal como los dispositivos que convierten una señal de presión en una salida de voltaje. En general, la señal de salida depende de la historia de la de entrada.

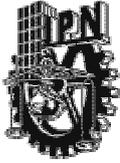
Los transductores se pueden clasificar como transductores analógicos, transductores de datos muestreados o transductores digitales.

Un transductor analógico es aquel en que las señales de entrada y salida son funciones continuas del tiempo. Las magnitudes de las señales pueden tomar cualquier valor dentro de las limitaciones físicas del sistema. Un transductor de datos muestreados es aquel en que las señales de entrada y salida se presentan en valores discretos de tiempo (normalmente periódicos), pero las magnitudes de las señales como en el caso de los transductores analógicos no están cuantificadas. Un transductor digital es aquel en el que las señales de entrada y salida se presentan solo en valores discretos de tiempo y las magnitudes de las señales están cuantificadas (esto es, solamente pueden adoptar ciertos valores discretos).

Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI).

Es la representación gráfica del proceso por medio de simbología estandarizada. En este caso la simbología de la ISA (Instrumentist Society of America).³

³ Ver Anexo 1



CAPITULO 2 SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL.

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

Una caldera es un recipiente cerrado en el cual por medio del calor que produce el combustible el agua es transformada en vapor a una presión más alta que la presión atmosférica. Para el funcionamiento de una caldera es necesario que existan agua aire y combustible.

El aire es indispensable para la combustión de la sustancia o materia empleada como combustible. El agua es indispensable porque al cambiar de estado físico se convertirá en vapor y el combustible es indispensable para proporcionar el calor necesario que hará cambiar de estado físico el agua. Dicho cambio físico se obtiene con un aumento o disminución de la temperatura.

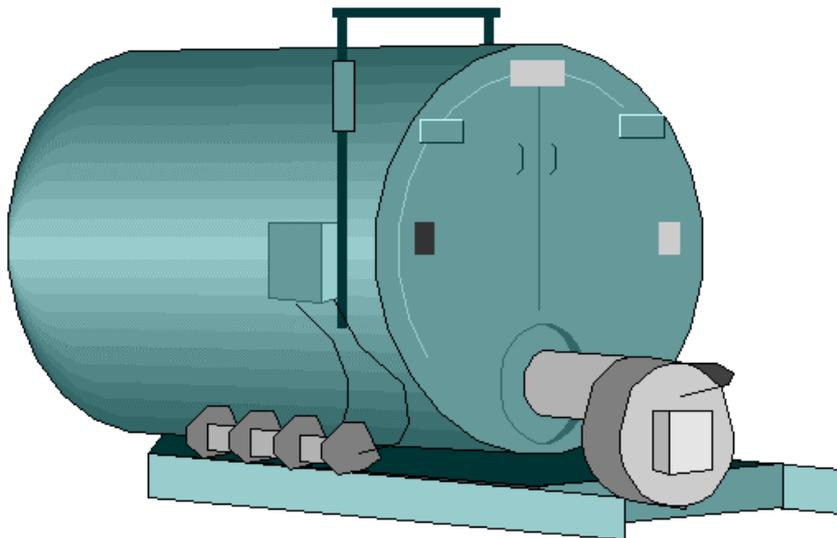
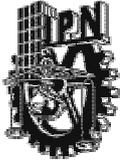


Fig. 2.1 Caldera



Problemas que se Presentan al operar una Caldera.

Los problemas que se pueden presentar durante la operación de una pequeña caldera como de una planta con varias calderas son: explosiones, incrustaciones, corrosiones, combustión, arrastre de agua, espuma, grietas en las láminas, conectar una caldera en batería, limpieza y tratamiento de agua.

Aquí nos enfocaremos principalmente a resolver los problemas para evitar explosiones. Dichas explosiones pueden ser de dos tipos:

- 1) Explosión súbita de caldera.
- 2) Explosión de hogar.

Explosión Súbita de Caldera.

Las causas por las que puede ocurrir una explosión súbita en una caldera son:

- a) Exceso de presión.
- b) Defectos y falla del material.
- c) Operación incorrecta, fallando el material humano.

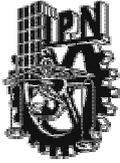
La explosión súbita de una caldera por exceso de presión tiene lugar cuando por alguna causa los mecanismos del manómetro y de la válvula de seguridad no trabajan, permitiendo que la presión del vapor sobrepase el límite de la resistencia del material de la caldera.

Se puede evitar este accidente con una constante y escrupulosa revisión del manómetro debiendo calibrarse y corregirse periódicamente.

La válvula o válvulas de seguridad deberán regularse y sellarse a presión máxima de trabajo admisible por la autoridad competente, haciéndose escapar la palanca de mano en sistemas regulares.

Los defectos de material que pueden ocasionar la explosión súbita de la caldera son: las grietas longitudinales, localizadas entre los agujeros de los remaches, en las costuras de las láminas superpuestas; la falta de tensión y la rotura de los tirantes.

La falla del material puede ocasionar la explosión súbita de una caldera es el adelgazamiento que sufren las láminas debido a la corrosión. Al disminuir su espesor disminuye su resistencia. Las explosiones por esta causa pueden evitarse con inspecciones minuciosas que deben practicarse a las calderas, antes de salir de la fábrica y periódicamente durante su funcionamiento.



La explosión súbita de una caldera por incorrecta operación se debe a una baja de agua durante su funcionamiento e imprudentemente le introduce agua, la persona encargada de su cuidado.

La explosión tiene lugar de la siguiente forma: al bajar el agua de su nivel peligroso, las superficies de calefacción quedan sin refrigeración, alcanzando la temperatura del rojo vivo, con lo que pierden su resistencia. Si en este momento se le introduce agua, la generación de vapor es tan rápida y con tan alta presión que vence la escasa resistencia de las láminas y se desgarran ocasionando la explosión.

Una baja de agua estando trabajando la caldera es el descenso del agua más abajo del límite de seguridad, dejando expuestas únicamente al calor del combustible las superficies de calefacción.

Para evitar la explosión de la caldera por baja de agua, de modo manual, el operador o fogonero al percatarse de que el agua ha desaparecido del indicador de nivel y no tiene la seguridad hasta donde se encuentra, deberá inmediatamente apagar el suministro de combustible; por ningún motivo se abrirá la válvula de alimentación del agua; no hará escapar las válvulas de seguridad y no moverá la válvula de cierre del vapor. Esperará que baje la presión y se enfríe la caldera para alimentarla nuevamente de agua y no deberá encender el combustible sin previa inspección.

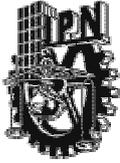
En el caso del control automático, el sistema de control de nivel es el que se encargara de realizar las acciones citadas en el párrafo anterior con todos los parámetros previamente establecidos.

¿Que es un Sistema de Seguridad?

Los sistemas de seguridad están diseñados para responder a condiciones de la planta que pueden ser peligrosas en si, o bien, que si no son atendidas, pueden originar una condición peligrosa. Deben de generar las salidas correctas para prevenir el peligro o para mitigar las consecuencias.

Modos de Falla

En un sistema de seguridad, la preocupación no debe ser tanto por como opera el sistema, sino más bien en como falla.



Los sistemas de seguridad pueden fallar de dos maneras:

Fallas Segura

Inicia acción
Evidente
Falso
Costo equipo fuera

Fallas Peligrosas

Inhiben acción
No evidente
Potencialmente peligrosas
Se localizan con pruebas

2.2 CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR DE VAPOR

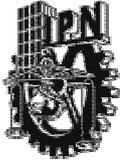
Con el fin de ejemplificar lo que requerimos representar en este trabajo se utilizaran valores característicos de Plantas Termoeléctricas de Generación de Energía⁴ el cual requiere de una demanda constante de vapor por las características inherentes a dicho proceso. Dichos valores son los siguientes

Presión de Vapor en el domo	183.5 kg/cm ²
Temperatura de vapor	541°C
Temperatura de Aire ambiente	20°C
Flujo de Vapor	1,191,3000 kg/hr

Domo de Vapor

Diámetro del domo	1775mm
Longitud total	15,840mm
Espesor	183/177mm
Material	SA 299
No. De Separadores ciclónicos	68

⁴ Comisión Federal de Electricidad, Instructivo de Central Termoeléctrica, 1995



Dimensiones del Hogar

Volumen del hogar	4650m ³
Superficie de Calefacción del hogar	2860m ³
Ancho	13,224mm
Fondo	11600mm

Bombas de Alimentación

Flujo Agua	600 lbr/hr
Presión Combustible	2000-8000 lb/inch ² (1406139-5624557 kg/m ²)

2.3 COMPONENTES BÁSICOS DEL SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL

El control se realiza según el lazo de control típico formado por el proceso para este caso de control de nivel de la caldera, el tanque, las tuberías, el transmisor, el controlador y el elemento final de control o válvula de control.

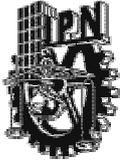
El proceso consiste en un sistema que ha sido desarrollado para llevar a cabo un objetivo determinado: tratamiento de material mediante una serie de operaciones específicas destinadas a llevar a cabo su transformación.

El transmisor capta la señal del proceso y la transforma a una señal neumática o electrónica o digital para enviarla al controlador.

El controlador permite al proceso cumplir su objetivo de la transformación del material y realiza funciones esenciales:

- a) Compara la variable medida (nivel del tanque) con la de referencia o deseada (punto de consigna o set point) para determinar el error.
- b) Estabiliza el funcionamiento dinámico del lazo de control mediante circuitos especiales (acciones de control o modos de control) para reducir o eliminar el error.

En este caso realizará algunas funciones más como la de la indicación de estado de las variables del proceso, así como la asignación de límites de operación de las mismas, los límites activarán alarmas o realizarán paros del proceso en caso de que así se requiera por cuestiones de seguridad.



El diagrama a bloques del sistema se representa en la siguiente figura

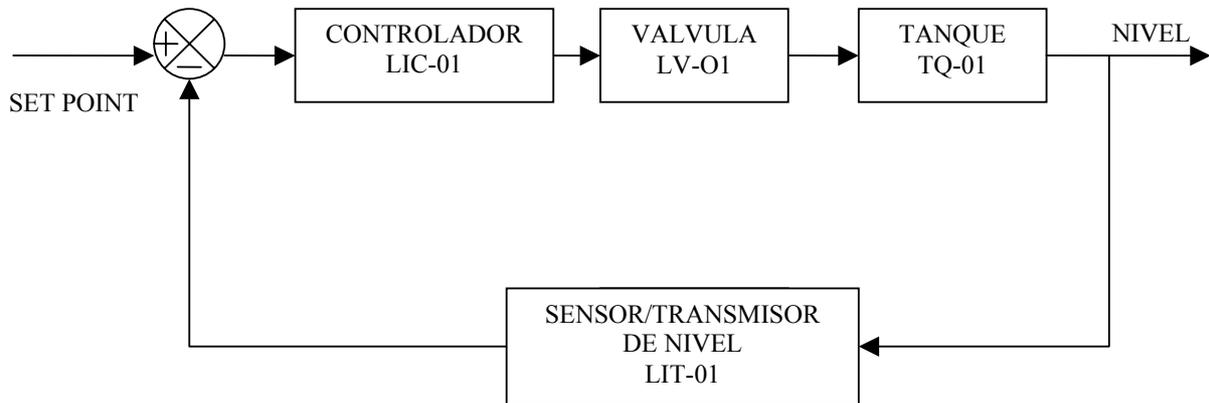


Fig. 2.2 Diagrama a Bloques del Sistema de Control de Nivel.

El sistema de control de control de nivel esta definido de manera que pueda proporcionar una mayor estabilidad en el proceso de llenado evaporación y vaciado del tanque, de manera que estas acciones se efectúen de una manera segura y evitar un mínimo de riesgos a causa de una explosión por bajo nivel de agua o en otro caso que se pueda dañar el equipo, en este caso la bomba de alimentación de agua, por el sobrellenado del tanque, proporcionando señales de alerta al operador y estableciendo un control automático del nivel estable. Esto se logrará por medio del uso de un controlador del tipo PI o PID tomando en cuenta las características propias del proceso en cuanto a la velocidad del mismo, lo cual depende en esencia del tamaño del tanque y de la velocidad en el suministro de agua.

El siguiente Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI) indica la forma en que se representa el sistema de control de nivel con simbología de la Sociedad de Instrumentistas de America (Instrumentists Society of America, I.S.A.) en la que se le han asignado identificadores a cada uno de los componentes del sistema para un sencillo manejo de la información dentro de la configuración de las señales en el sistema; para mayor referencia de las normas y simbología de la ISA ver el Anexo 1, ya que se incorpora simbología correspondiente a un Sistema de Control Distribuido con propósito de incorporar dicho sistema como parte de un proceso aun más grande y complejo.

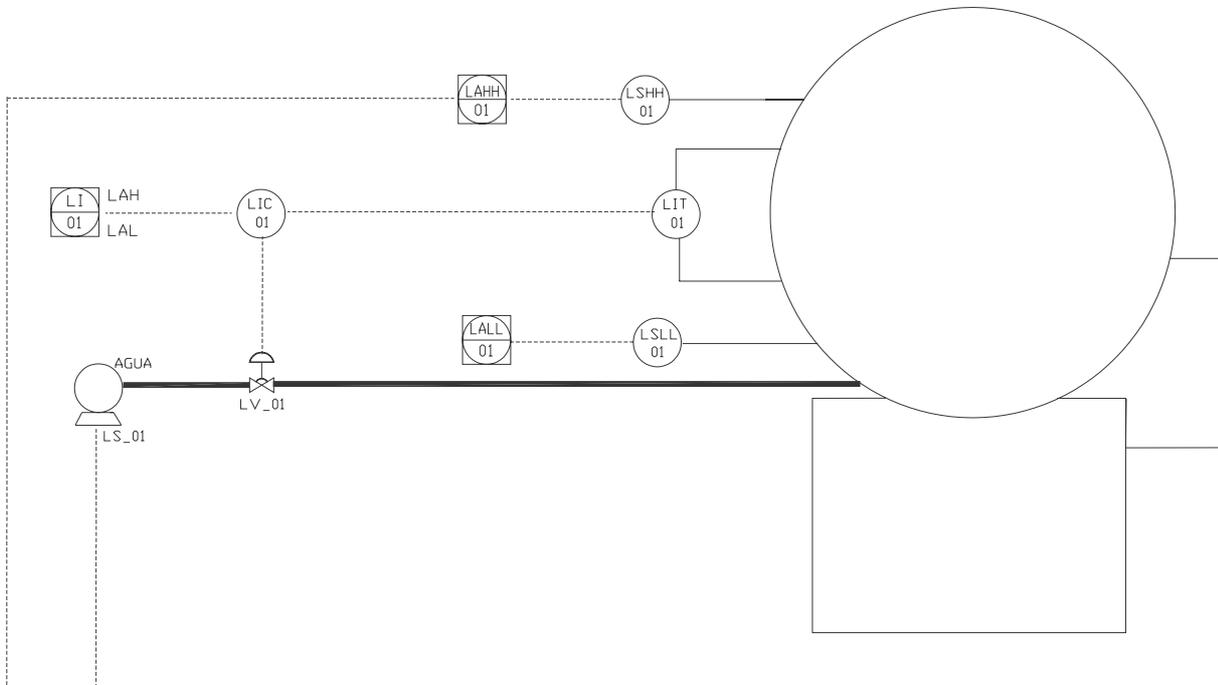
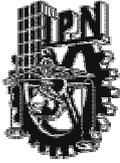
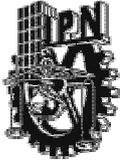


Fig. 2.3 Diagrama de Tubería e Instrumentación del Sistema de Control de Nivel.

2.4 DEFINICIÓN DE LA ECUACIÓN DEL NIVEL DEL TANQUE.

Desde el punto de vista de modelado el objetivo buscado es la representación de los fenómenos de esponjamiento y contracción del nivel de líquido en el tanque como consecuencia de aumentos o disminuciones en la demanda de vapor de la caldera y que provocan una variación del nivel en el sentido opuesto que originalmente se esperaría.

Si aumenta repentinamente la demanda de vapor: el nivel en lugar de disminuir al extraerse más vapor, aumenta temporalmente debido a una caída momentánea de la presión del vapor causada por el aumento del consumo. Esta disminución de presión inicial provoca una mayor evaporación y un aumento en el tamaño de las burbujas de vapor (esponjamiento) que hace aumentar el nivel del calderón hasta que el flujo de calor pueda incrementarse lo suficiente como para restaurar el valor de la presión.



Por el contrario, si disminuye repentinamente la demanda de vapor, se producirá una disminución temporal de nivel en el tanque (contracción). Un fenómeno parecido ocurre con el cambio de agua de alimentación.

Tan pronto entre agua fría al tanque, una cierta cantidad de burbujas son condensadas, dejando el espacio ocupado por ellas vacío y disminuyendo el nivel. El nivel aumenta eventualmente porque entra mas agua y nuevas burbujas son formadas.

Este proceso es llamado como respuesta inversa, y su función de transferencia que lo describe requiere de un cero positivo:

$$G_p(s) = \frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{K_1(-\tau_1 s + 1)}{\tau_2 s + 1} \quad 5$$

2.5 SESORES Y TRANSMISORES

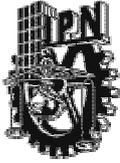
Los sensores y transmisores realizan las operaciones de medición del sistema de control. El sensor produce una medición, mecánica, eléctrica, o alguna otra relacionada a la variable de proceso a medir. El transmisor convierte esta medición en una señal que puede ser transmitida. La señal, entonces, es relacionada con la variable del proceso.

El medidor de presión diferencial consiste en un diafragma en contacto con el líquido, que mide la presión hidrostática en un punto del fondo del tanque. El diafragma forma parte de un transmisor neumático, electrónico o digital de presión diferencial.

En este caso como es un tanque cerrado y bajo presión, hay que corregir la indicación del aparato para la presión ejercida sobre el líquido debiendo señalar que la lectura será muy poco exacta si la presión es grande. Se suele conectar un tubo en la parte superior del tanque y medir la diferencia de presiones entre la toma inferior y superior, utilizando transmisores de presión diferencial.

De este modo el instrumento tendrá que esta indicar 0% a 3 psi y 100% a 15 psi en un transmisor neumático o bien señalar 0% a 4mA cc y 100% a 20 mA.

⁵ Smith, Carlos A. Corripio Armando B., *Principles and Practice of Automatic Process Control*, Wiley, 1985.



Para el análisis de este proceso se utilizarán parámetros que describan y simplifiquen el comportamiento del proceso. Se considera un sensor/transmisor de presión diferencial cuyo rango esta definido de 0 a 100% que es el total del nivel medido en el tanque y transmite en una escala de 4 a 20 mA lo cual permite establecer la constante de transferencia que define su comportamiento.

De tal manera que la constante del sensor/transmisor será definida por:

$$K_T = \frac{20mA - 4mA}{100\% - 0\%} = 0.16mA/\% \quad ^6$$

2.6 CONTROLADORES.

Control Proporcional.

En el sistema de posición proporcional, existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control (dentro de la banda proporcional). Es decir la válvula se mueve el mismo valor por cada unidad de desviación.

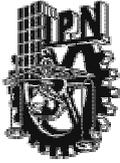
El grado de ajuste del controlador proporcional viene definido por

Ganancia: que es la relación entre la variación de la señal de entrada procedente del elemento primario o del transmisor.

Banda Proporcional, que es el porcentaje del campo de medida de la variable que la válvula necesita para efectuar una carrera completa, es decir, de pasar de completamente abierta a completamente cerrada.

La acción proporcional tiene un inconveniente, que es la desviación permanente de la variable una vez estabilizada con relación al punto de consigna llamado *Offset*.

⁶ Smith, Carlos A. Corripio Armando B., *Principles and Practice of Automatic Process Control*, Wiley, 1985.



Control Proporcional-Integral.

El control integral actúa cuando existe una desviación entre la variable y el Set Point, integrando dicha desviación en el tiempo y sumándola a la acción de la proporcional.

Se caracteriza por el llamado tiempo de acción integral en minutos por repetición (o su inversa: repeticiones por minuto) que es el tiempo en el que ante una señal en escalón, la válvula repite el mismo movimiento correspondiente a la acción proporcional. Como esta acción de control se emplea para obviar el inconveniente del Offset (desviación permanente de la variable con respecto al punto de consigna de la banda proporcional), se utiliza solo cuando es preciso mantener un valor de la variable que iguale siempre al punto de consigna.

Existe un fenómeno llamado saturación integral, que se presenta cuando la variable queda fuera de los límites de la banda proporcional. La acción continuada del integrador da lugar a que la señal de salida a la válvula de control se sature y tenga su valor máximo (o mínimo). La variable debe entonces cruzar el punto de consigna o Set Point para que, al cambiar de signo la desviación, varíe la señal de salida del controlador y la válvula inicie su cierre (o apertura). El resultado es una gran oscilación de la variable, que puede prevenirse eliminando la acción integral (el integrador deja de actuar) cuando la variable cae fuera de la banda proporcional. Esta función se llama desaturación integral y, en general, es utilizada en los procesos discontinuos (batch).

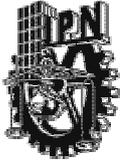
Control Proporcional - Derivativo.

En la regulación derivada existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variable controlada y la posición del elemento final de control. Es decir, el control derivativo actúa cuando existen cambios en la variable.

Esta acción es proporcional a la pendiente de la variable, es decir a su derivada.

La acción derivada se caracteriza por el tiempo de acción derivada en minutos de anticipo que es el intervalo durante el cual, la variación de la señal de salida del controlador, debida a la acción proporcional, iguala a la parte de variación de la señal debida a la acción derivativa, cuando se aplica al instrumento una señal en rampa.

La acción derivada es adecuada cuando hay retraso entre el movimiento de la válvula de control y su repercusión en la variable controlada. No obstante, un tiempo de acción derivada demasiado grande, da lugar a que la variable cambie demasiado rápidamente y rebase el punto de consigna con una oscilación que puede ser o no amortiguada es decir una acción derivada demasiado grande puede dar lugar a inestabilidades en el proceso. Un



tiempo de acción derivada que sea demasiado pequeño, permite que la variable este oscilando demasiado tiempo con relación al punto de consigna. El tiempo óptimo de acción

derivativa es aquel que retorna la temperatura al punto de consigna con el mínimo de oscilaciones.

La aplicación de la acción derivativa permite aumentar la ganancia del controlador durante los cambios de la variable, lo que compensa parte del retardo inherente al proceso y permite el uso de una ganancia más grande (banda proporcional) con un menor Offset.

La acción derivada puede ayudar a disminuir el retardo de la variable durante el arranque del proceso y puede emplearse en sistemas con tiempos de retardo considerables, porque permite una acción de recuperación rápida de la variable después de presentarse una perturbación en el proceso.

Control Proporcional-Integral-Derivativo.

La unión de un controlador de las tres acciones proporcional, integral y derivativa (PID) forma un instrumento controlador que presenta las siguientes características:

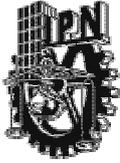
1. La acción proporcional cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al punto de consigna. La señal P (proporcional) mueve la válvula siguiendo fielmente los cambios de nivel multiplicados por la ganancia.
2. La acción integral mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de consigna.

La señal I (integral) va sumando las áreas de la diferencia entre la variable y el punto de consigna repitiendo la señal proporcional según su τ_i (minutos/repetición).

3. La acción derivativa corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada.

La señal D derivada es la pendiente (tangente) de la curva descrita por la variable con lo que anticipa la posición de la válvula en el tiempo debida a la acción proporcional según el valor de τ_d (minutos de anticipo).

La señal que llega a la válvula de control es en todo momento la suma de cada una de las señales de las acciones proporcional + integral + derivativa del controlador.



2.7 ELEMENTO FINAL DE CONTROL (VÁLVULA).

En el control automático de procesos la válvula de control juega un papel muy importante en el lazo de regulación. Realiza la función de variar el fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida comportándose como un orificio de área continuamente variable. Dentro del lazo de control tiene tanta importancia como el elemento primario, el transmisor y el controlador. La figura 2.4 muestra una válvula de control típica. Se compone básicamente del cuerpo y del servomotor.

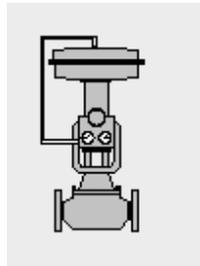
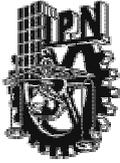


Fig. 2.4 Válvula Regulatoria

La válvula de control neumática consiste en un servomotor accionado por la señal neumática 3-15 psi. El servomotor está conectado directamente a un vástago que posiciona el obturador con relación al asiento la posición relativa entre el obturador y el asiento permite pasar el fluido desde un caudal nulo (o casi nulo), hasta el caudal máximo y con una relación entre el caudal y la carrera que viene dada por las curvas características de la válvula. El cuerpo de la válvula de control contiene en su interior el obturador y los asientos y está provista de rosca o de bridas para conectar la válvula a la tubería. El obturador es quien realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Está unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y que es accionada por un servomotor.

Con el fin de conservar la simplicidad del cálculo se incluirá una ganancia constante en el transductor corriente presión en la función de transferencia de la válvula de control, $G_v(s)$. La ganancia del transductor es



$$G_v(s) = \frac{\Delta P}{\Delta I} = \frac{(15-3) \text{psi}}{(20-4) \text{mA}} = 0.75 \text{psi/mA} \quad ^7$$

Y tomando en cuenta que la constante de la constante del caudal que circula a través de la válvula $K_v = 1$ únicamente se tomará en cuenta la ganancia del transductor.

2.8 MODELADO DEL SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL

El siguiente diagrama a bloque representa el lazo de control de nivel que se desea manipular, y su correspondiente modelo matemático

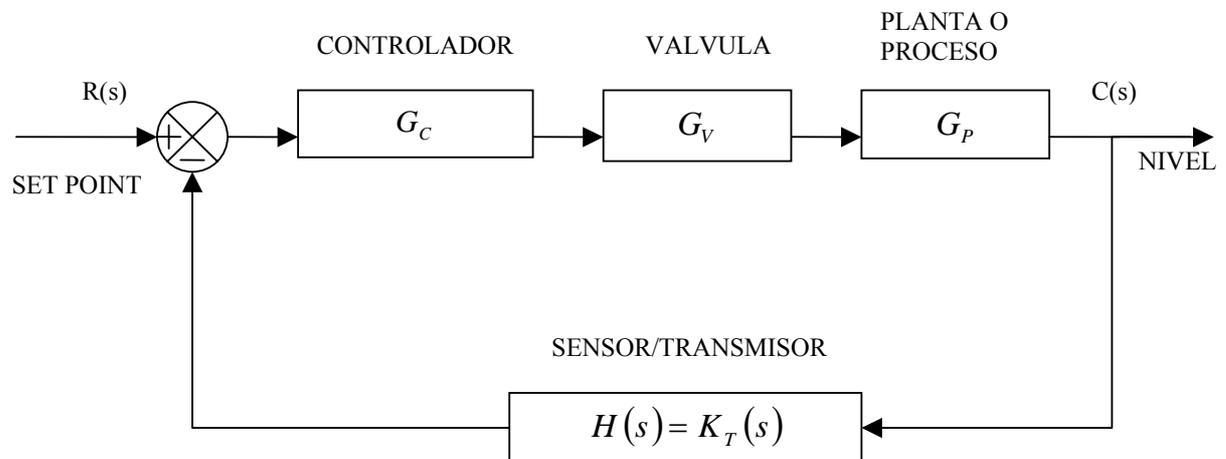


Fig. 2.5 Diagrama a Bloques del Sistema de Control de Nivel

De donde:

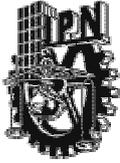
$R(s)$ Es la variable de consigna o Set Point

$C(s)$ Es la variable de proceso

$$G_v(s) = \frac{\Delta P}{\Delta I} = \frac{(15-3) \text{psi}}{(20-4) \text{mA}} = 0.75 \text{psi/mA}$$

$$G_p(s) = \frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{K_1(-\tau_1 s + 1)}{\tau_2 s + 1}$$

⁷ Smith, Carlos A. Corripio Armando B., *Principles and Practice of Automatic Process Control*, Wiley, 1985.



$$K_T(s) = \frac{20mA - 4mA}{100\% - 0\%} = 0.16mA/\%$$

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Aplicando las reglas del álgebra de bloques (Anexo 2).

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{0.75 \left(K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \right) \left(\frac{K_1(-\tau_1 s + 1)}{\tau_2 s + 1} \right)}{1 + (0.75)(0.16) \left(K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \right) \left(\frac{K_1(-\tau_1 s + 1)}{\tau_2 s + 1} \right)}$$



2.9 DISTRIBUCIÓN FÍSICA DEL EQUIPO EN LA PLANTA O PROCESO

La siguiente figura muestra la manera en que los componentes principales del lazo de control son conectados a modo de efectuar el control de nivel del tanque de la caldera.

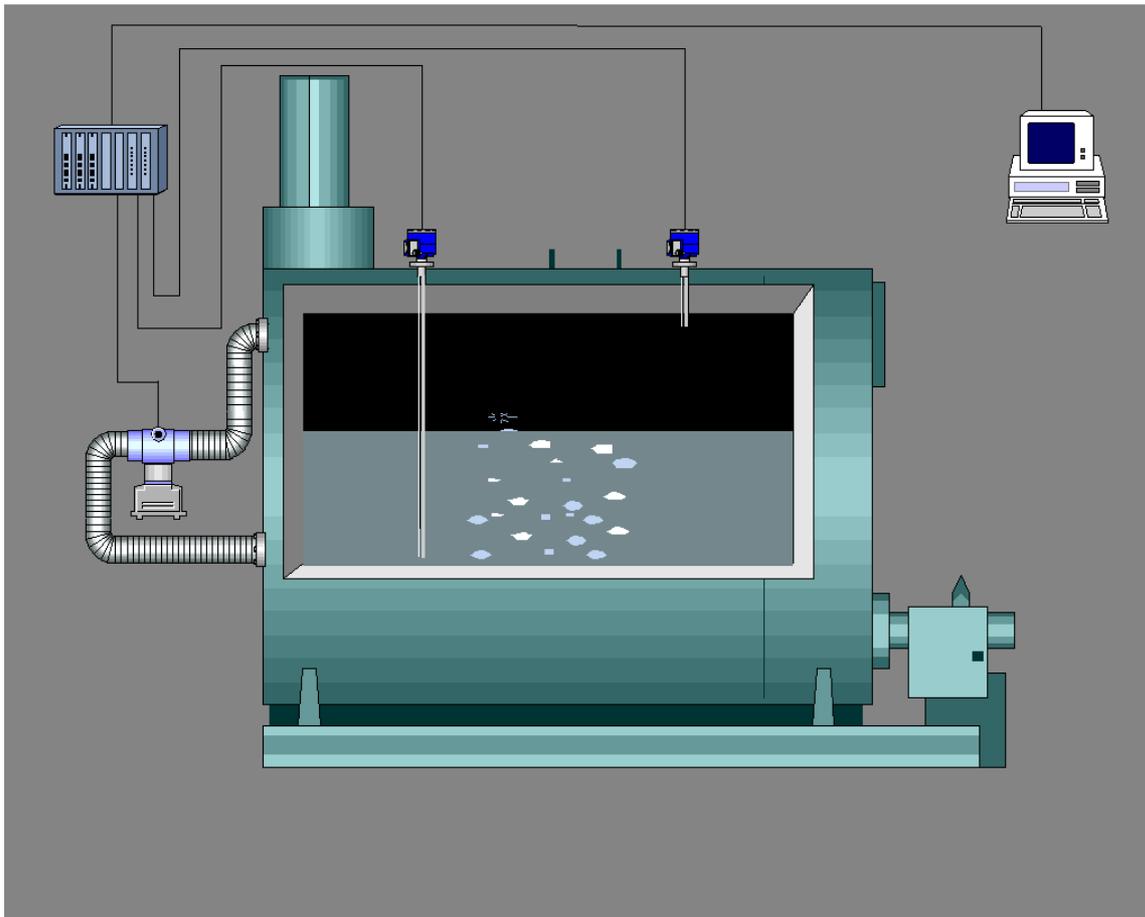
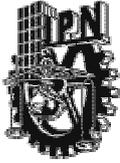


Fig. 2.6 Distribución física del equipo



2.10 CONTROL DIGITAL DEL SISTEMA DE NIVEL.

Sistemas de Control en Tiempo Continuo y Tiempo Discreto.

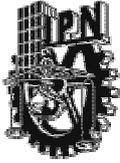
Los sistemas de control en tiempo continuo son aquellos sistemas en los cuales una o más variables pueden cambiar solo en valores discretos de tiempo. Estos instantes, los que se denotarán mediante kT o, pueden especificar los tiempos en los que se lleva a cabo alguna medición de tipo físico o los tiempos en los que se extraen datos de la memoria de una computadora digital.

Los sistemas de control en tiempo discreto difieren de los sistemas de control en tiempo continuo en que las señales para los primeros están en la forma de datos muestreados o en la forma digital. Si en el sistema de control esta involucrada una computadora digital como un controlador los datos muestreados se deben convertir a datos digitales.

Los sistemas de control en tiempo continuo, cuyas señales son continuas en el tiempo, se pueden describir mediante ecuaciones diferenciales. Los sistemas en tiempo discreto, los cuales involucran señales de datos muestreados o señales digitales y posiblemente señales en tiempo continuo, también se pueden escribir mediante ecuaciones diferenciales mediante la apropiada discretización de las señales en tiempo continuo.

Proceso de muestreo. El muestreo de las señales en tiempo continuo reemplaza la señal en tiempo continuo por una secuencia de valores en puntos discretos de tiempo. El proceso de muestreo se emplea siempre que un sistema de control involucre un controlador digital, puesto que son necesarias una operación de muestreo y una cuantificación para ingresar datos a ese controlador.

El proceso de muestreo es seguido por un proceso de cuantificación, el proceso de cuantificación, la amplitud analógica muestreada se reemplaza por una amplitud digital (representada mediante un número binario). Entonces la señal digital se procesa por medio de la computadora. La salida de la computadora es una señal muestreada que se alimenta a un circuito de retención. La salida del circuito de retención es una señal que se alimenta al actuador.



Formas de las Señales en un Sistema de Control Digital.

La figura 2.7 muestra un diagrama a bloques de un sistema de control digital. Los elementos básicos del sistema se muestran mediante los bloques, la operación del controlador se maneja por el reloj. En dicho sistema de control digital en algunos puntos del sistema pasan señales codificadas en forma numérica, como se muestra en la figura.

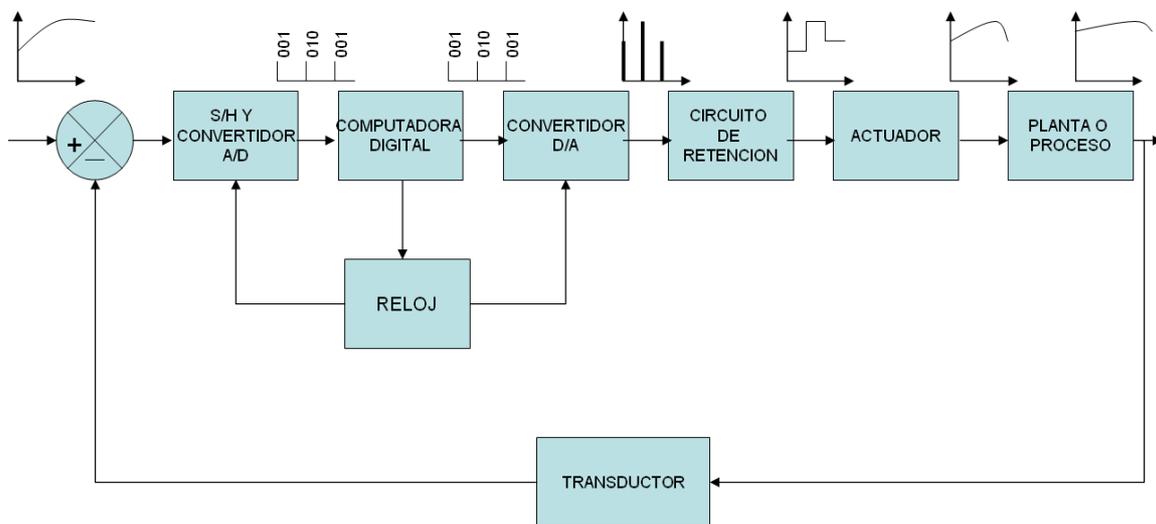
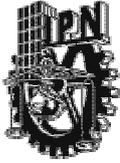


Fig. 2.7 Diagrama de bloques de un sistema de control digital que muestra las señales en forma binaria o gráfica.

La salida de la planta es una señal en tiempo continuo. La señal de error se convierte a forma digital mediante el circuito de muestreo y retención y el convertidor analógico-digital.

La conversión se hace en el tiempo de muestreo. La computadora digital procesa las secuencias de números por medio de un algoritmo y produce nuevas secuencias de números. En cada instante de muestreo se debe convertir un número codificado (en general un número binario que consiste en ocho o más dígitos binarios) en una señal física de control, la cual es normalmente es una señal en tiempo continuo o analógica. El convertidor digital analógico y el circuito de retención convierten la secuencia de números en código numérico a una señal continua por secciones. El reloj en tiempo real de la computadora sincroniza los eventos. La salida del circuito de retención, una señal en tiempo continuo se alimenta a la planta, ya sea de manera directa o a través de un actuador, para controlar su dinámica.



La operación que transforma las señales en tiempo continuo en datos en tiempo discreto se denomina muestreo o discretización. La operación inversa, que transforma datos en tiempo discreto en una señal en tiempo continuo, se conoce como retención de datos; esta realiza la reconstrucción de la señal en tiempo continuo a partir de la secuencia de datos en tiempo discreto. Esto por lo regular se logra al utilizar alguna de las muchas técnicas de extrapolación.

El circuito de muestreo y retención (S/H, del inglés Sample and Hold) y el convertidor analógico digital (A/D) convierten la señal en tiempo continuo en una secuencia de palabras binarias codificadas numéricamente. Dicho proceso de conversión A/D se conoce como codificación. La combinación del circuito S/H se puede visualizar como un interruptor que cierra instantáneamente en cada intervalo de tiempo T y genera una secuencia de números en código numérico. La computadora digital procesa dichos números en código numérico y genera una secuencia deseada de números. El proceso de conversión digital (D/A) se denomina decodificación.

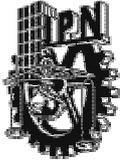
Sistemas de Adquisición Conversión y Distribución de Datos

Con el crecimiento rápido en el uso de las computadoras digitales para ejecutar las acciones de un control, tanto en los sistemas de adquisición de datos como en los de distribución, se han convertido en una parte importante de todo sistema de control. La conversión de señales que tiene lugar en el sistema de control digital involucra las siguientes operaciones.

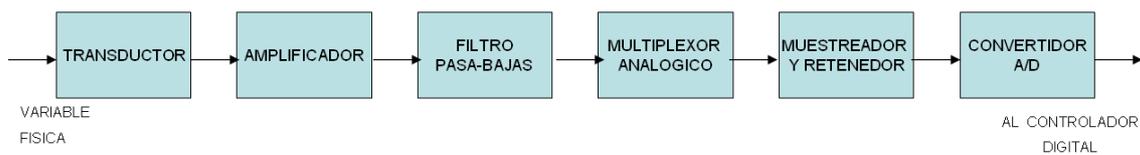
1. Múltiplexación y Demúltiplexación.
2. Muestreo y retención.
3. Conversión analógico-digital (cuantificación y codificación)
4. Conversión digital-analógico (decodificación).

En el sistema de adquisición de datos, la entrada al sistema es una variable física tal como posición velocidad, aceleración temperatura o presión. Dichas variables físicas primero se convierten en una señal eléctrica (una señal de voltaje o corriente) mediante un transductor apropiado. Una vez que la variable física se convierte en una señal de voltaje o corriente, el resto del proceso de adquisición de datos se hace por medios electrónicos.

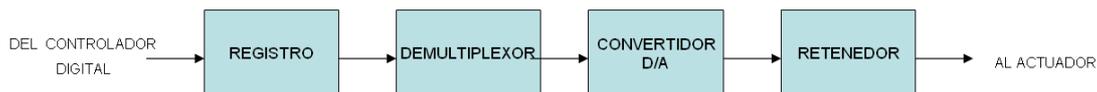
En la figura 2.8 a. el amplificador que sigue del transductor (frecuentemente un amplificador operacional ejecuta una o más de las siguientes funciones: amplificar el voltaje de salida del transductor; convertir la señal de corriente en una de voltaje; o aislar la señal. El filtro pasabajas que atenúa las componentes de alta frecuencia de la señal, tales como señales de ruido. La salida del filtro pasabajas es una señal analógica. Esta señal se alimenta a un multiplexor analógico. La salida del multiplexor se alimenta a un circuito de muestreo y



retención, cuya salida a su vez se alimenta al convertidor analógico-digital. La salida del multiplexor se alimenta al circuito de muestreo y retención, cuya salida a su vez, se alimenta al convertidor analógico y digital. La salida del convertidor D/A se alimenta al convertidor analógico-digital. La salida del convertidor es la señal en forma digital; esta se alimenta al controlador digital.



a)



b)

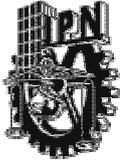
Fig.2.8.b Sistema de adquisición de datos; b) Sistema de distribución de datos.

El proceso inverso al de adquisición de datos es el de distribución de datos. Como se muestra en la figura 2.8 b un sistema de distribución de datos consiste en registros, un demultiplexor, convertidores digital analógico y circuitos de retención. Este sistema convierte la señal digital (números binarios) en otra forma analógica. La salida del convertidor D/A se alimenta al circuito de retención. La salida del circuito de retención se alimenta al actuador analógico, el cual a su vez controla la planta que se este considerando.

Controladores Digitales y Analógicos

Los controladores digitales solamente operan sobre números. La toma de decisiones es una de sus funciones importantes. Estos a menudo se utilizan para resolver los problemas relacionados con la operación global óptima de la planta industrial.

Los controladores industriales son muy versátiles. Estos pueden manejar ecuaciones de control no lineales que involucran cálculos complicados u operaciones lógicas. Se pueden utilizar con controladores digitales una variedad mucho más amplia de leyes de control que las que se pueden usar con controladores analógicos. También en el controlador digital mediante la edición de un nuevo programa, las operaciones que se están ejecutando se pueden cambiar por completo. Esta característica es en particular importante si el sistema



de control va a recibir información o instrucciones de operación desde algún centro de cálculo donde se hacen análisis económicos y estudios de optimización.

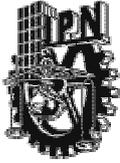
Los controladores digitales son capaces de ejecutar cálculos complejos con exactitud constante a alta velocidad y pueden tener casi cualquier grado deseado de exactitud de cálculo con un incremento relativamente pequeño en el costo.

En un principio los controladores digitales se usaron solo componentes en sistemas de control a gran escala. Actualmente, sin embargo, gracias a la disponibilidad de las microcomputadoras baratas, los controladores digitales se utilizan en muchos sistemas de control de gran y pequeña escala. De hecho los controladores digitales están remplazando a los controladores analógicos que han sido utilizados en muchos sistemas de control a pequeña escala. Los controladores digitales son a menudo superiores en desempeño y con un costo menor que sus contrapartes analógicas. Los controladores analógicos representan las variables en una ecuación mediante cantidades físicas continuas. Estos se pueden diseñar fácilmente para servir de manera satisfactoria como controladores que no tienen que tomar decisiones. Pero el costo de las computadoras o controladores analógicos se incrementa rápidamente a medida que la complejidad del cálculo se incrementa si se tiene que mantener una exactitud constante.

Existen ventajas adicionales de los controladores digitales sobre los controladores analógicos. Los componentes digitales tales como los circuitos de muestreo y retención, convertidores A/D y D/A y los transductores digitales, son de construcción robusta, alta confiabilidad y a menudos compactos y ligeros. Además los componentes digitales, tienen alta sensibilidad y con frecuencia son más baratos que sus contrapartes analógicas y son menos sensibles a señales de ruido, y como se mencionó en un principio los controladores digitales son más flexibles al permitir cambios en la programación.

Control Digital de Procesos.

En general en sistemas de control de procesos industriales, no es práctico operar por periodos de tiempo muy prolongados en estado estacionario, debido a que se pueden presentar ciertos cambios en los requerimientos de producción, materias primas, factores económicos y equipos y técnicas de procesamiento. Así el comportamiento transitorio de los procesos industriales debe siempre tomarse en consideración. Debido a que existen interacciones entre las variables de proceso al utilizar una sola variable de proceso para cada uno de los agentes de control no es apropiado para un control complejo real. Mediante el uso del controlador digital, es posible tomar en cuenta todas las variables del proceso, conjuntamente con los factores económicos, los requerimientos de producción, el desempeño del equipo y todas las demás necesidades y de este modo alcanzar el control óptimo de los procesos industriales.



Un sistema capaz de controlar un proceso completamente como se pueda, deberá resolver ecuaciones complicadas. En el control más completo, lo más importante es que se conozcan y empleen las relaciones correctas entre las variables de operación. El sistema debe ser capaz de aceptar instrucciones desde muy variadas fuentes como computadoras y operadores humanos también ser capaz de cambiar por completo su subsistema de control en un tiempo corto. Los controladores digitales son los más apropiados en dichas situaciones. De hecho una de sus ventajas es la flexibilidad, esto es, la facilidad de cambiar los esquemas de control mediante reprogramación.

En el control digital de un proceso complicado, el diseñador debe tener un buen conocimiento del proceso a ser controlado y debe ser capaz de obtener su modelo matemático. El diseñador debe estar familiarizado con la tecnología de medición asociada con la salida y otras variables relacionadas con el proceso. El diseñador debe tener un buen conocimiento con el trabajo con computadores digitales así como la teoría de control moderno. A este respecto sería útil un buen conocimiento con técnicas de simulación.

La Transformada Z y sus Propiedades.⁸

Una herramienta muy utilizada en el análisis y la síntesis de sistemas de control en tiempo discreto es similar al de la transformada de Laplace en sistemas en tiempo continuo.

La transformada z de una sucesión $f(k)$ se define como la serie infinita

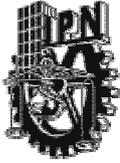
$$Z[f(k)] = F(z) = \sum_{k=0}^{\infty} f(k)z^{-k}$$

Esta transformada juega idéntico papel en la descripción de señales en tiempo discreto que la transformada de Laplace en el caso de las señales en tiempo continuo.

La tabla 2.1 contiene pares básicos de transformada z, junto con la correspondiente función de tiempo continuo que proporciona la sucesión cuando se muestra con periodo T. Utilizando la definición de transformada z, la transformada del impulso unitario es

$$Z[f(k)] = F(z) = \sum_{k=0}^{\infty} f(k)z^{-k} = z^0 = 1$$

⁸ Gomariz Castro, Spartacus, Biel Sole, Domingo, Matas Alcala, José, Reyes Moreno, Miguel, *Teoría de Control Diseño Electrónico, Alfaomega, 1999.*



La sucesión de impulso unitario $\delta(t)$, no consta de muestras de $\delta(t)$, la cual es infinita para $k = t = 0$.

La transformada z de la sucesión de impulso unitario es como sigue:

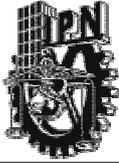
$$Z[u(k)] = \sum_{k=0}^{\infty} 1z^{-k}$$

Utilizando el hecho de que para una serie geométrica

$$\sum_{k=0}^{\infty} x^k = \frac{1}{1-x} \quad |x| < 1$$

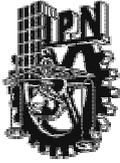
Entonces

$$Z[u(k)] = \sum_{k=0}^{\infty} z^{-k} = \sum_{k=0}^{\infty} z^k \left(\frac{1}{z}\right)^k$$



Transformada de Laplace E(s)	Función temporal e(t)	Transformada Z E(z)	Transformada Z modificada E(z, m)
$\frac{1}{s}$	$u(t)$	$\frac{z}{z-1}$	$\frac{1}{z-1}$
$\frac{1}{s^2}$	t	$\frac{Tz}{(z-1)^2}$	$\frac{mT}{z-1} + \frac{T}{(z-1)^2}$
$\frac{1}{s^3}$	$\frac{t^2}{2}$	$\frac{T^2 z(z+1)}{2(z-1)^3}$	$\frac{T^2}{2} \left[\frac{m^2}{z-1} + \frac{2m+1}{(z-1)^2} + \frac{2}{(z-1)^3} \right]$
$\frac{(k-1)!}{s^k}$	t^{k-1}	$\lim_{a \rightarrow 0} (-1)^{k-1} \frac{\partial^{k-1}}{\partial a^{k-1}} \left[\frac{z}{z-e^{-aT}} \right]$	$\lim_{a \rightarrow 0} (-1)^{k-1} \frac{\partial^{k-1}}{\partial a^{k-1}} \left[\frac{e^{-a m T}}{z-e^{-aT}} \right]$
$\frac{1}{(s+a)}$	e^{-at}	$\frac{z}{z-e^{-aT}}$	$\frac{e^{-a m T}}{z-e^{-aT}}$
$\frac{1}{(s+a)^2}$	$t e^{-at}$	$\frac{Tz e^{-aT}}{(z-e^{-aT})^2}$	$\frac{T e^{-a m T} [e^{-aT} + m(2-e^{-aT})]}{(z-e^{-aT})^2}$
$\frac{(k-1)!}{(s+a)^k}$	$t^k e^{-at}$	$(-1)^k \frac{\partial^k}{\partial a^k} \left[\frac{z}{z-e^{-aT}} \right]$	$(-1)^k \frac{\partial^k}{\partial a^k} \left[\frac{e^{-a m T}}{z-e^{-aT}} \right]$
$\frac{a}{s(s+a)}$	$1-e^{-at}$	$\frac{z(1-e^{-aT})}{(z-1)(z-e^{-aT})}$	$\frac{1}{z-1} - \frac{e^{-a m T}}{z-e^{-aT}}$
$\frac{a}{s^2(s+a)}$	$t - \frac{1-e^{-at}}{a}$	$\frac{z[(aT-1+e^{-aT})z + (1-e^{-aT} - aT e^{-aT})]}{a(z-1)^2(z-e^{-aT})}$	$\frac{T}{(z-1)^2} + \frac{amT-1}{a(z-1)} + \frac{e^{-a m T}}{a(z-e^{-aT})}$
$\frac{a^2}{s(s+a)^2}$	$1-(1+at)e^{-at}$	$\frac{z}{z-1} - \frac{z}{z-e^{-aT}} - \frac{aT e^{-aT} z}{(z-e^{-aT})^2}$	$\frac{1}{z-1} - \left[\frac{1+amT}{z-e^{-aT}} + \frac{aT e^{-aT}}{(z-e^{-aT})^2} \right] e^{-a m T}$
$\frac{b-a}{(s+a)(s+b)}$	$e^{-at} - e^{-bt}$	$\frac{(e^{-aT} - e^{-bT})z}{(z-e^{-aT})(z-e^{-bT})}$	$\frac{e^{-a m T}}{z-e^{-aT}} - \frac{e^{-b m T}}{z-e^{-bT}}$
$\frac{a}{s^2+a^2}$	$\text{sen}(at)$	$\frac{z \text{sen}(aT)}{z^2 - 2z \text{cos}(aT) + 1}$	$\frac{z \text{sen}(amT) + \text{sen}(1-m)aT}{z^2 - 2z \text{cos}(aT) + 1}$
$\frac{s}{s^2+a^2}$	$\text{cos}(at)$	$\frac{z(z - \text{cos}(aT))}{z^2 - 2z \text{cos}(aT) + 1}$	$\frac{z \text{cos}(amT) - \text{cos}(1-m)aT}{z^2 - 2z \text{cos}(aT) + 1}$
$\frac{1}{(s+a)^2 + b^2}$	$\frac{1}{b} e^{-at} \text{sen}(bt)$	$\frac{1}{b} \left[\frac{z e^{-aT} \text{sen}(bT)}{z^2 - 2z e^{-aT} \text{cos}(bT) + e^{-2aT}} \right]$	$\frac{1}{b} \left[\frac{e^{-a m T} [z \text{sen}(bmT) + e^{-aT} \text{sen}(1-m)bT]}{z^2 - 2z e^{-aT} \text{cos}(bT) + e^{-2aT}} \right]$
$\frac{s+a}{(s+a)^2 + b^2}$	$e^{-at} \text{cos}(bt)$	$\frac{z^2 - z e^{-aT} \text{cos}(bT)}{z^2 - 2z e^{-aT} \text{cos}(bT) + e^{-2aT}}$	$\frac{e^{-a m T} [z \text{cos}(bmT) + e^{-aT} \text{sen}(1-m)bT]}{z^2 - 2z e^{-aT} \text{cos}(bT) + e^{-2aT}}$
$\frac{a^2 + b^2}{s[(s+a)^2 + b^2]}$	$1 - e^{-at} \left(\text{cos}(bt) + \frac{a}{b} \text{sen}(bt) \right)$	$\frac{z(Az+B)}{(z-1)(z^2 - 2z e^{-aT} \text{cos}(bT) + e^{-2aT})}$ $A = 1 - e^{-aT} \left(\text{cos}(bT) + \frac{a}{b} \text{sen}(bT) \right)$ $B = e^{-aT} + e^{-aT} \left(\frac{a}{b} \text{sen}(bT) - \text{cos}(bT) \right)$	$\frac{1}{z-1} - \frac{e^{-a m T} [z \text{cos}(bmT) + e^{-aT} \text{sen}(1-m)bT]}{z^2 - 2z e^{-aT} \text{cos}(bT) + e^{-2aT}}$ $+ \frac{\frac{a}{b} \{ e^{-a m T} [z \text{sen}(bmT) - e^{-aT} \text{sen}(1-m)bT] \}}{z^2 - 2z e^{-aT} \text{cos}(bT) + e^{-2aT}}$
$\frac{1}{s(s+a)(s+b)}$	$\frac{1}{ab} + \frac{e^{-at}}{a(a-b)} + \frac{e^{-bt}}{b(b-a)}$	$\frac{(Az+B)z}{(z-e^{-aT})(z-e^{-bT})(z-1)}$ $A = \frac{b(1-e^{-aT}) - a(1-e^{-bT})}{ab(b-a)}$ $B = \frac{ae^{-aT}(1-e^{-bT}) - be^{-bT}(1-e^{-aT})}{ab(b-a)}$	

Tabla 2.1 Tabla de transformadas



Función de Transferencia Pulso de un Controlador PID Digital.⁹

El esquema de control PID analógico ha sido usado de manera exitosa en muchos sistemas de control industrial por más de medio siglo. El principio básico del esquema de control PID es que actúa sobre la variable a ser manipulada a través de una apropiada combinación de las tres acciones de control: acción de control proporcional (donde la acción de control es proporcional a la señal de error actuante, la cual es la diferencia entre la entrada y la señal de retroalimentación); la acción de control integral (donde la acción de control es proporcional a la integral de la señal de error actuante) y la acción de control derivativa (donde la acción de control es proporcional a la derivada de la señal de error actuante).

En situaciones donde muchas plantas de control se controlan directamente mediante una sola computadora digital (como un esquema de control en el que se controlan desde unos cuantos lazos hasta cientos de estos mediante un solo controlador digital) la mayoría de los esquemas de control se pueden manipular mediante esquemas de control PID.

La acción de controlador PID en controladores analógicos esta dada por

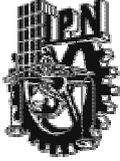
$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Donde $e(t)$ es la entrada del controlador (señal actuante), $m(t)$ es la salida del controlador (la señal manipulada) K_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo (o tiempo de adelanto).

Para obtener la función de transferencia pulso del controlador PID digital se puede discretizar la ecuación anterior

$$m(kT) = K \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{h=1}^k \frac{e((h-1)T) + e(hT)}{2} + \frac{T_d}{T} [e(kT) - (e(k-1)T)] \right\}$$

⁹ Ogata, Katsuhiko, *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*, Pearson Education, 2da Ed.1996.



Tomando la transformada Z de la expresión anterior se tiene

$$M(z) = K \left[1 + \frac{T}{2T_i} + \frac{T}{T_i} \frac{1}{1-z^{-1}} + \frac{T_d}{T} (1-z^{-1}) \right] E(z)$$
$$= \left[K_p + \frac{K_I}{1-z^{-1}} + K_D (1-z^{-1}) \right] E(z)$$

Donde

$$K_p = K - \frac{KT}{2T_i} = K - \frac{K_I}{2} = \text{Ganancia proporcional}$$

$$K_I = \frac{KT}{T_i} = \text{Ganancia integral}$$

$$K_D = \frac{KT_d}{T} = \text{Ganancia derivativa}$$

Nótese que la ganancia proporcional K_p para el controlador PID digital es más pequeña que la ganancia K para el controlador PID analógico por un factor $K_I / 2$.

La función de transferencia pulso para el controlador PID digital se convierte en

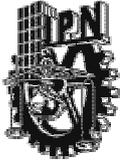
$$G_D(Z) = \frac{M(z)}{E(z)} = K_p + \frac{K_I}{1-z^{-1}} + K_D (1-z^{-1})$$

La función de transferencia pulso del controlador PID digital dada por la ecuación anterior se conoce comúnmente como forma posicional del esquema de control PID.

Transformación del Modelo Matemático del Tanque de la Caldera.

Tomando en cuenta el modelo matemático propuesto anteriormente podemos deducir su equivalente en el dominio de Z, la función de transferencia obtenida del tanque es la siguiente:

$$G_p(s) = \frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{K_1(-\tau_1 s + 1)}{\tau_2 s + 1}$$



Representando la ecuación anterior en función de la entrada de tal manera que se represente como la señal de entrada $Q(s)$ como escalón unitario tenemos

$$H(s) = \frac{K_1(-\tau_1 s + 1)}{\tau_2 s + 1} Q(s)$$

Para simplificación del cálculo se proponen los siguientes valores para las constantes $K_1 = 1, \tau_1 = 1, \tau_2 = 1$ quedando la ecuación anterior de la siguiente forma:

$$H(s) = \frac{-s + 1}{s + 1} Q(s)$$

Aplicando la función escalón para la Ecuación se obtiene

$$H(s) = \left(\frac{1}{s}\right) \left(\frac{-s + 1}{s + 1}\right) = \frac{-s + 1}{s(s + 1)}$$

Resolviendo por fracciones parciales se tiene

$$H(s) = \frac{-s + 1}{s(s + 1)} = \frac{1}{s} + \frac{-2}{s + 1}$$

Usando la tabla de transformadas propuestas anteriormente se obtiene

$$H(z) = \frac{z}{z - 1} + \frac{-2z}{z - e^{-T}}$$

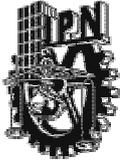
Igualando T a 1, tomando en cuenta el primer segundo de muestreo

$$H(z) = \frac{z}{z - 1} + \frac{-2z}{z - e^{-1}}$$

Por lo tanto

$$H(z) = \frac{z}{z - 1} + \frac{-2z}{z - 0.367}$$

Con lo que se concluye que dicha función es estable debido a que los polos en z son menores que la unidad.



CAPITULO 3 SISTEMA DE CONTROL DE COMBUSTIÓN.

3.1 DETECCIÓN DE BAJO NIVEL

Las estadísticas de accidentes nos indican que la mayor parte de ellos se debe al bajo nivel de agua que provoca el sobrecalentamiento y debilitamiento de los tubos, hundimiento del hogar y en algunas ocasiones la destrucción total de la caldera por una explosión desastrosa que produce grandes pérdidas.

Cuando el nivel del agua haya desaparecido del cristal de nivel se debe:

1. Parar inmediatamente de la caldera.
2. Cerrar la válvula general de vapor.
3. No alimentar agua a la caldera.
4. Esperar que la caldera se enfríe.
5. Comprobar que no hubo daños antes de encender nuevamente.

La detección del nivel en el sistema será realizada por electrodos los cuales enviarán una señal al controlador el cual emitirá una señal de control para que se arranque o pare la bomba de alimentación de agua, según sea el caso. En el caso de muy alto nivel únicamente se parará la bomba, en el caso de muy bajo nivel realizará la secuencia de pasos anteriormente mencionada con el fin de mantener condiciones seguras, para esto cada una de estas indicaciones podrá ser visualizada y/o escuchada en el controlador (computadora) para que el operador tenga el conocimiento de dichas condiciones.

La figura 3.1.a muestra un sensor de nivel del tipo interruptor y además de un esquema en el que se muestra su conexión física dentro del tanque.

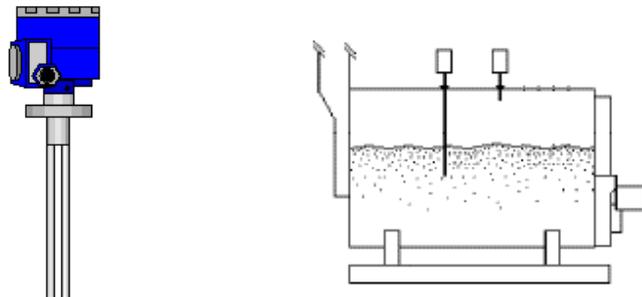
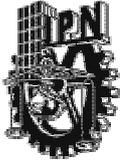


Fig. 3.1 a) Sensor-interruptor de nivel; b) Ubicación física del Sensor-interruptor en el tanque.



Los pasos anteriores se pueden realizar mediante la programación del software, en el cual también se pueden establecer condiciones críticas de operación así como el monitoreo de las variables ligadas al mismo lo que se verá en el siguiente capítulo del presente trabajo.

3.2 SISTEMA DE ENCENDIDO.

El sistema de control automático es necesario que sea conocido por los operadores de la caldera para una correcta manipulación de la misma. La secuencia de encendido será de vital importancia ya que de esta depende la seguridad de la misma.

-Encendido caldera

1. Encendido bomba de aire (pre-purga)
2. Apertura válvula de combustible
3. Encendido de piloto (transformador)
4. Corte del piloto
5. Fin de ciclo de combustión y encendido.

Una de las condiciones para inhibir la secuencia de operación de encendido es la detección de muy bajo nivel. Dicha acción el controlador debe ser capaz de aplicarla.

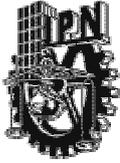
3.3 CONTROL DE COMBUSTIÓN

El estudio de las explosiones, nos indica que la mayor parte de estas ocurren en el hogar o cámara de combustión de las calderas.

Las explosiones de lado del fuego se producen básicamente por la falta de una pre-purga y post purga adecuada con el barrido de gases o bien por la anormal dosificación de combustible al iniciarse un ciclo de operación.

La función de la pre-purga es la eliminación de vestigios indeseables de combustible y comburentes antes de alimentar los pilotos de combustión.

Los operadores con poca experiencia o exceso de confianza han reducido o eliminado intencionalmente el tiempo de pre-purga de una caldera, provocando accidentes de características irremediables.



Esta clase de accidentes es más común en las unidades que queman gas natural.

En este punto se debe advertir que es necesario tener la absoluta seguridad de que antes de iniciar un ciclo de operación por cualquier medio, debe existir una intensa purga que elimine el riesgo de explosión en el hogar y que puede ser tanto o más desastrosa que la explosión del propio recipiente a presión.

Dentro del control de combustión se establecen los parámetros que se regularán principalmente mediante una lógica desarrollada en el software que se utilizará dentro del control general de la caldera. Dicho control a diferencia del control de nivel estará manipulado por secuencias lógicas booleanas que al detectarse cada una de las variables como son presión, muy bajo nivel en el tanque, de detección de flama y de baja o alta presión de combustible realizarán operaciones internas en el controlador y ejecutará acciones de control. Se toman estas variables como las más importantes para el desarrollo de este proyecto ya que son las que directamente influyen sobre el desarrollo de un sistema de seguridad confiable, teniendo además la flexibilidad de aumentar el número de variables dependiendo de que tan seguro se requiera el sistema. Estas variables críticas contribuyen al paro de alimentación de combustible, obstruyendo el flujo con una válvula solenoide que requiere ser accionada mediante el sistema digital de control, hasta que se restablezcan a su condición normal dichas variables críticas.

La justificación de la utilización de este tipo de sistemas se expone a continuación mediante los siguientes conceptos:

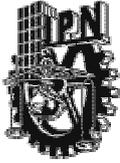
Explosión de hogar.

Es la combustión súbita de gas o de los gases de un combustible líquido acumulados en el hogar de una caldera, con las consecuencias, según la intensidad, en desperfectos de la instalación y accidentes del personal.

La explosión del hogar tiene lugar en los siguientes casos:

- 1) Si antes de encender el combustible, si es gas o petróleo, no se ventila bien el hogar.
- 2) Cuando el combustible es petróleo, si se apaga un quemador y pasados algunos minutos luego se enciende.
- 3) Cuando el combustible es gas y se suspende su suministro intempestivamente por alguna causa, se dejan abiertas las válvulas de los quemadores.

En el caso del control automático de seguridad, el sistema de control de combustión realizará las acciones correspondientes y en la secuencia predeterminada para tener una correcta operación de la caldera.



Todas las calderas de operación automática tienen que estar equipadas con un interruptor de bajo nivel de agua, el cual impide el funcionamiento del quemador, mientras no exista la suficiente cantidad de agua en la caldera, otro interruptor controla la alimentación de agua.

Todas las calderas están equipadas con un indicador de nivel de agua que permite la observación visual de la cantidad de agua que contienen la caldera.

Para el caso del controlador automático se toma en cuenta la señal de un medidor de presión diferencial, que genera y transmite una corriente en el rango de 4-20 mA dependiendo del nivel que contenga el tanque hacia la tarjeta de adquisición de datos para que esta se comunique con la PC; posteriormente se evalúan los datos y se envía una señal que sea manipule la válvula o elemento final de control en caso de que no haya condición de emergencia.

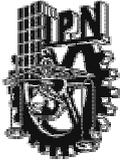
Para el caso en el que se tenga condición de emergencia o bajo nivel de agua se efectuará un corte en el suministro de agua y posteriormente en el suministro de combustible hasta que la caldera se enfríe y pueda iniciarse el proceso nuevamente en modo automático

El estudio de las explosiones, nos indica que la mayor parte de estas ocurren en el hogar o cámara de combustión de las calderas. Otra causa importante de las explosiones, como se ha mencionado anteriormente es la falta de protección contra un exceso de presión.

3.4 APARATOS DE SEGURIDAD PARA IGNICIÓN DE COMBUSTIBLE.

El sistema automático de seguridad para una caldera encendida con combustible múltiple debe disponerse en tal forma que evite la inyección de combustible mas allá del abastecimiento disponible de aire para combustión. Se pueden usar medidas para reducir automáticamente la velocidad de alimentación de combustible, haciendo funcionar relevadores neumáticos o eléctricos en el sistema de control de la combustión. Las condiciones de emergencia que resultan del mal funcionamiento de los equipos exigen la clausura inmediata de las válvulas de control de combustible.

El reencendido después de una emergencia puede hacerse seguro si los aparatos de seguridad están entrelazados debidamente para exigir una secuencia definida en el ciclo de encendido.



3.5 DETECCIÓN DE PRESIÓN.

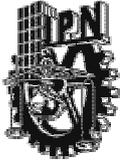
Prácticamente de cualquier sustancia que exista en estado sólido, líquido o gaseoso se puede lograr un vapor. Sabemos de proceso en donde participan vapores de gasolina, de sodio, mercurio, etc. El vapor es una fase del estado gaseoso en donde la sustancia no se comporta de acuerdo con las leyes de los gases perfectos y gran parte de sus variables se determinan por experimentación en el laboratorio y se consignan en tablas de propiedades termodinámicas. Para este caso nos interesa el vapor de agua producido en un recipiente a presión, que es la caldera.

El vapor puede estar “seco” cuando no contenga en su seno partículas de agua y “húmedo” en el caso contrario. El grado de “sequedad” en el vapor se define como la calidad del mismo. Por ejemplo, si de una caldera sale vapor con un 2% de humedad, la calidad del vapor es del 98%; si el vapor saliese con 0.5% de humedad, la calidad del vapor será de 99.5%, etc.

El vapor está “seco” a determinadas condiciones de presión y entonces se dice también que está saturado. Aquí ya participa el concepto presión que, en general, es una carga P , distribuida en una superficie unitaria. Si P es la carga total sobre una superficie total A , la presión unitaria será la relación P/A .

Existe una presión que se manifiesta de por vida en nosotros y esta es la atmosférica que por medirse con un barómetro, también se le llama “presión barométrica”. Es menor a medida que la altitud sobre el nivel del mar es mayor y es mayor a medida que nos aproximamos al nivel del mar. Al nivel del mar $p = 1.033 \text{ Kg./cm.}^2$, $14.65 \text{ lb./pulg.}^2$, 760 mm. de mercurio, etc. Todos estos son valores familiares según el sistema de unidades que se emplee.

El agua a nivel del mar hierve (se satura) a 100° C (212° F) en donde la presión barométrica es de 1.033 Kg/cm^2 . ($14.65 \text{ lb./pulg.}^2$). Si el agua que se evapora la confinamos en un recipiente y seguimos agregando calor, la presión aumenta y el punto de saturación también aumenta. Esta presión puede ser registrada con un manómetro, pero el manómetro marca cero cuando la presión es la atmosférica, es decir, solo marca presiones relativas o “manométricas” (en el sistema inglés PSIG-pounds per sq. inch gauge). Esta medida de presión es satisfactoria para recipientes a presión como las calderas. Sin embargo para cálculos termodinámicos es indispensable utilizar el término “presión absoluta” (PSIA) que es la suma de la presión atmosférica y de la relativa (presión barométrica más presión manométrica).



El calor sensible es el que se “siente”, el que percibe un termómetro ordinario; el calor latente no acusa una elevación de la temperatura del vapor. En una caldera, la temperatura del agua es exactamente la misma que la del vapor, sea este húmedo o seco.

El detector de presión esta calibrado para enviar una señal cuando se alcance su límite preestablecido de tal forma que también este exceso de presión al ser detectado es transformado en una señal eléctrica que al ser recibida por el controlador activa una secuencia capaz de detener la alimentación de combustible y de agua.

3.6 DETECCIÓN DE FLUJO ALTO DE COMBUSTIBLE.

La detección de flujo de combustible es necesaria en el caso de un sobre flujo que pueda saturar el hogar o cámara de combustión provocando así una explosión. De tal forma se deberán de tomar acciones correspondientes para realizar el paro de la bomba de combustible deteniendo así el suministro del mismo. La detección del flujo de combustible puede realizarse mediante un sensor-interruptor que envíe una señal de flujo alto o mediante cualquiera de los sensores de presión que hay disponibles en el mercado.

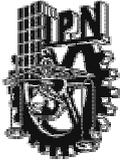
En el caso de utilizar un sensor que produzca una señal analógica se deberá indicar un límite de corte el cual se cerrará la válvula de alimentación y parará la bomba de alimentación. Esta secuencia de operación será ejecutada por el controlador o PC, el cual interrumpirá a su vez la secuencia de trabajo en la que se encuentre.

3.7 DETECCIÓN DE FLAMA.

Los detectores de flama que se sugieren para usarse en esta aplicación debido al tipo de caldera que se propone por su uso mas común son los detectores de radiación que tienen como principio de funcionamiento captar la radiación que la llama emite en forma luz y de calor.

Estos tipos de sensores pueden clasificarse como sigue:

a) Los detectores de radiación visible son de dos tipos: sulfuro de cadmio y oxido de cesio. El primero que es el más utilizado consiste en un elemento de sulfuro de cadmio que varia su resistencia de forma inversamente proporcional a la intensidad luminosa, mientras que el otro consiste en un tubo de vacío que contiene un cátodo y ánodo emitiendo aquel electrones cuando la luz incide en su superficie.



La aplicación de estos detectores consiste en una llama luminosa quedando su uso limitado a quemadores de combustibles líquidos.

Son incapaces de diferenciar la luz precedente de una llama de la de otras fuentes (luz natural, refractaria, etc.).

b) Los detectores de radiación infrarroja emplean la célula de sulfuro de plomo cuya resistencia eléctrica decrece al aumentar la intensidad de radiación. La célula de sulfuro de plomo no distingue entre la radiación infrarroja emitida por el refractario o por la llama. Sin embargo la emisión de energía radiante de la llama tiene una característica parpadeante que permite a un circuito electrónico especialmente concebido, discriminar entre la señal de llama y la señal uniforme del refractario; no obstante el movimiento de los gases calientes frente al refractario puede simular este parpadeo excitando a la célula.

c) Los detectores de radiación ultravioleta consisten en un tubo que contiene dos electrodos, normalmente de tungsteno. El tubo es de material permeable a la radiación ultravioleta, cuarzo por ejemplo y esta lleno de un gas inerte.

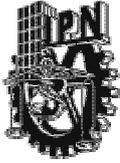
Si una radiación ultravioleta penetra en el tubo e incide sobre el cátodo emite electrones que son atraídos por el ánodo a causa del campo eléctrico establecido entre ambos. Este proceso ioniza el gas en el tubo donde este conduce una corriente.

Para asegurar una verificación constante de la presencia de la llama, es preciso interrumpir periódicamente la tensión del cátodo y ánodo, con el fin de que establezca la conductividad del tubo un número de veces por segundo, dado que dicho tubo presenta, una vez excitado una carga auto mantenida en tanto que exista un campo eléctrico entre los electrodos.

La ventaja principal de los detectores de radiación ultravioleta es su total insensibilidad a las radiaciones infrarrojas y visibles, no siendo afectados por este motivo, por las radiaciones del refractario caliente. Dado que ambas llamas de gas y de combustible generan radiaciones ultravioletas, estos detectores son idóneos para instalaciones mixtas. La figura 3.2 nos muestra un ejemplo de un sensor de flama de tipo ultravioleta.



Fig. 3.2 Sensor de Flama



3.8 CONTROL TODO O NADA (ON-OFF).

En la regulación todo o nada la válvula de control adopta únicamente dos posiciones o abierta o cerrada, para un valor único de la variable controlada. Este tipo de control se caracteriza por un ciclo continuo de variación de la variable controlada.

El control todo o nada se emplea usualmente con una banda diferencial o zona neutra, dentro de la cual el elemento final de control permanece en su última posición, para valores de la variable comprendidos dentro de la banda diferencial. Los ajustes de control se basan en variar el punto de consigna y la gama diferencial. El control todo-nada funciona satisfactoriamente si el proceso tiene una velocidad de reacción lenta y posee un tiempo de retardo mínimo. Se caracteriza porque las dos posiciones extremas de la válvula permiten una entrada y salida de energía al proceso ligeramente superior e inferior a las necesidades de operación normal. Este tipo de control se emplea usualmente en controladores eléctricos.

3.9 ELEMENTOS FINALES DE CONTROL

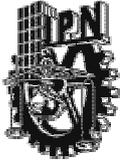
Válvula-Solenóide.

El solenoide es un componente electromecánico el cual se puede encontrar en muchos servomecanismos digitales. Es un dispositivo que convierte energía eléctrica en movimiento. Un voltaje suministrado genera una corriente que fluye a través de una bobina montada en una armadura metálica. La corriente crea un campo magnético la cual tiende a poner un embolo metálico dentro de la bobina hasta que este se coloca firmemente contra la armadura.

Para una máxima seguridad la válvula de solenoide esta continuamente excitada; de este modo si falla la corriente de la válvula de control esta pasa a la posición de seguridad.



Fig. 3.3 Válvula-Solenóide



Bombas

Uno de los factores principales para la operación óptima es el de contar con un sistema de suministro de agua que sea adecuado para cada caso en particular.

Existen dos sistemas de alimentación de agua

- Operación Continua
- Operación Intermitente

Es importante conocer el tipo de operación, debido a que la capacidad presión de descarga y tipo de la bomba seleccionada dependerá de esta consideración.

Existen dos tipos de bombas:

- Bomba tipo turbina.
- Bomba Centrífuga.

Como una regla general, la bomba tipo turbina es frecuentemente seleccionada para operación intermitente y la bomba tipo centrífuga para operación continua.

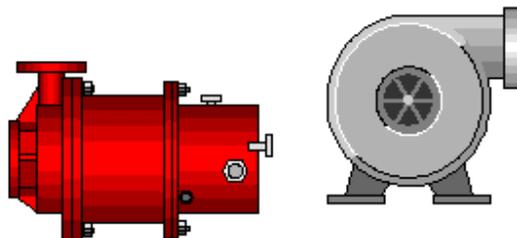
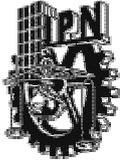


Fig. 3.4 Bombas de agua



3.10 DISTRIBUCIÓN FÍSICA DEL EQUIPO.

El siguiente diagrama de tubería e instrumentación permite visualizar la distribución del equipo y sus correspondientes identificadores del sistema de combustión.

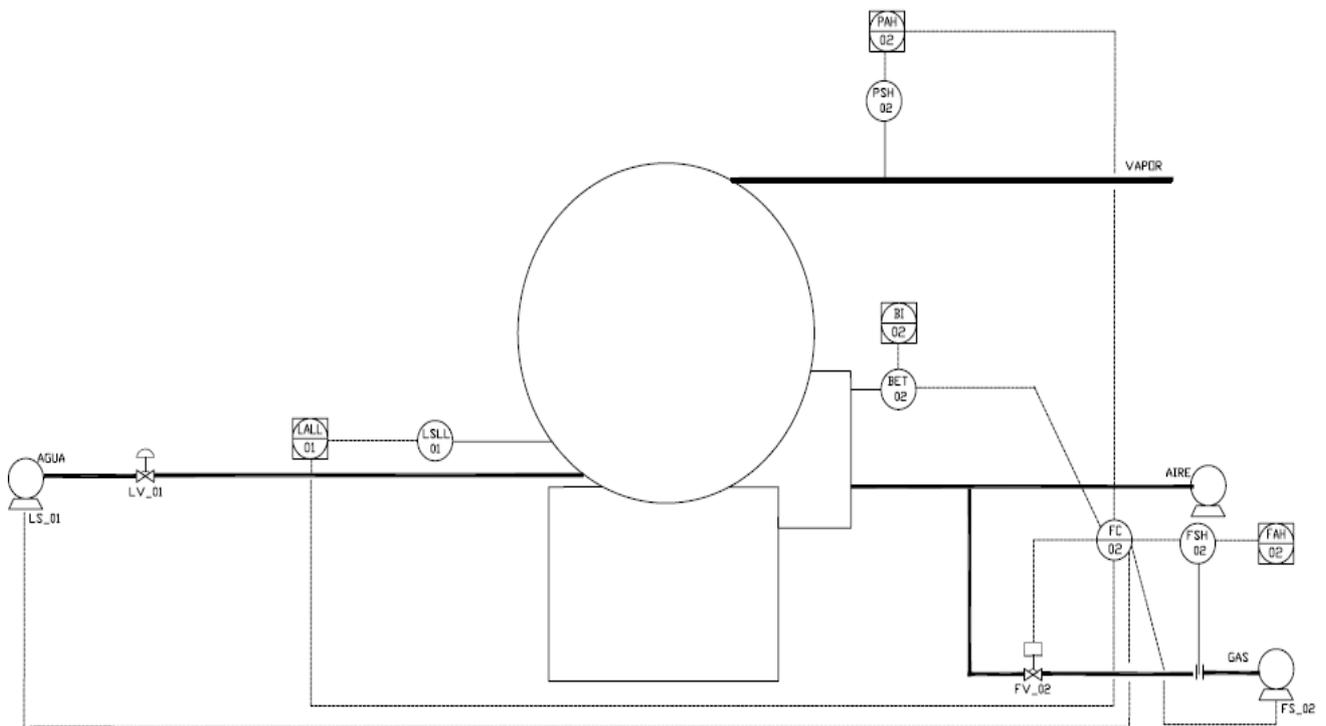
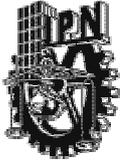


Fig. 3.5 Diagrama de Tubería e Instrumentación del Sistema de Encendido y Combustión.



La figura 3.6 muestra la distribución física del equipo propuesta para este sistema de tal forma que se logre una mayor comprensión del mismo. En ambas figuras se puede observar la interacción de los sensores para lograr una eficiente etapa de encendido y posteriormente de combustión. En el siguiente capítulo se definirá la secuencia de operación de cada uno de los elementos que conforman tanto el sistema de combustión como el de control de nivel y sus respectivos paros de emergencia en caso de que se requiera.

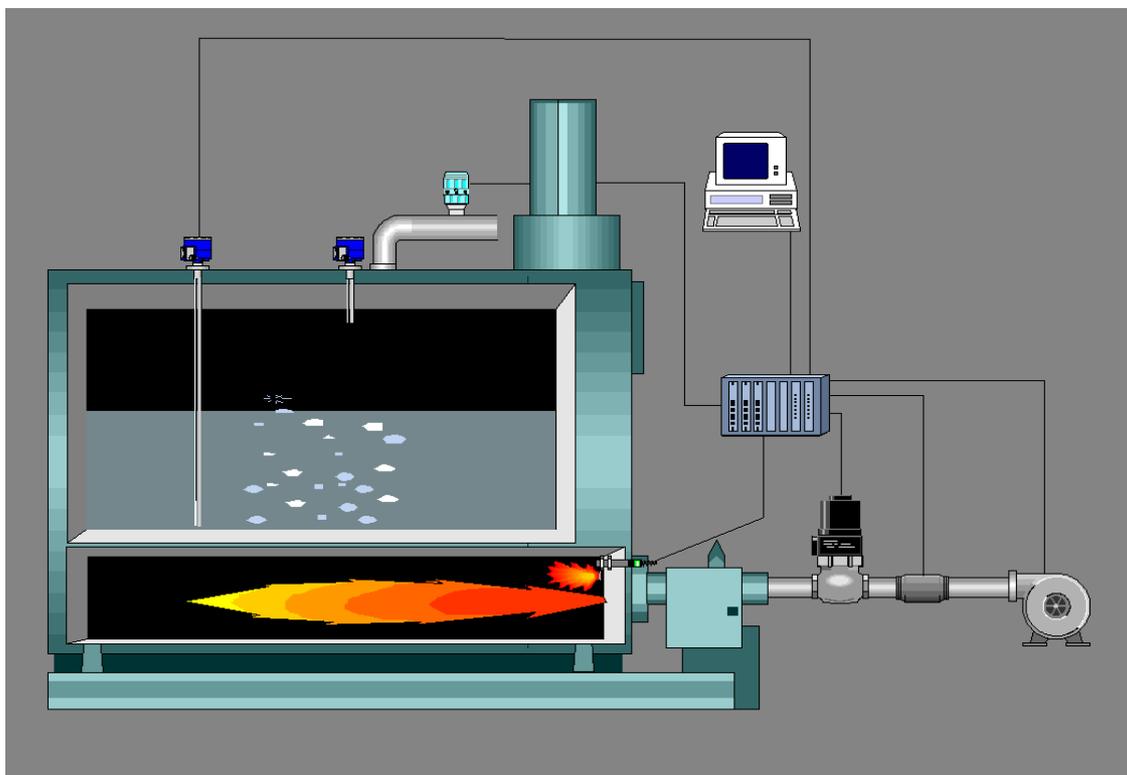


Fig. 3.6 Distribución Física del Equipo en la Caldera Para encendido y Combustión.



CAPITULO 4 UNIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMBUSTIÓN Y DE NIVEL POR MEDIO DE LA COMPUTADORA.

Como primer punto se analizará el sistema de encendido, tomando en cuenta que el sistema debe mantener al inicio condiciones iniciales para esta etapa. Dichas condiciones iniciales serán evaluadas por el sistema en caso de que se detecte alguna señal de los sensores de variables críticas y el PID será puesto en modo manual para su fácil operación

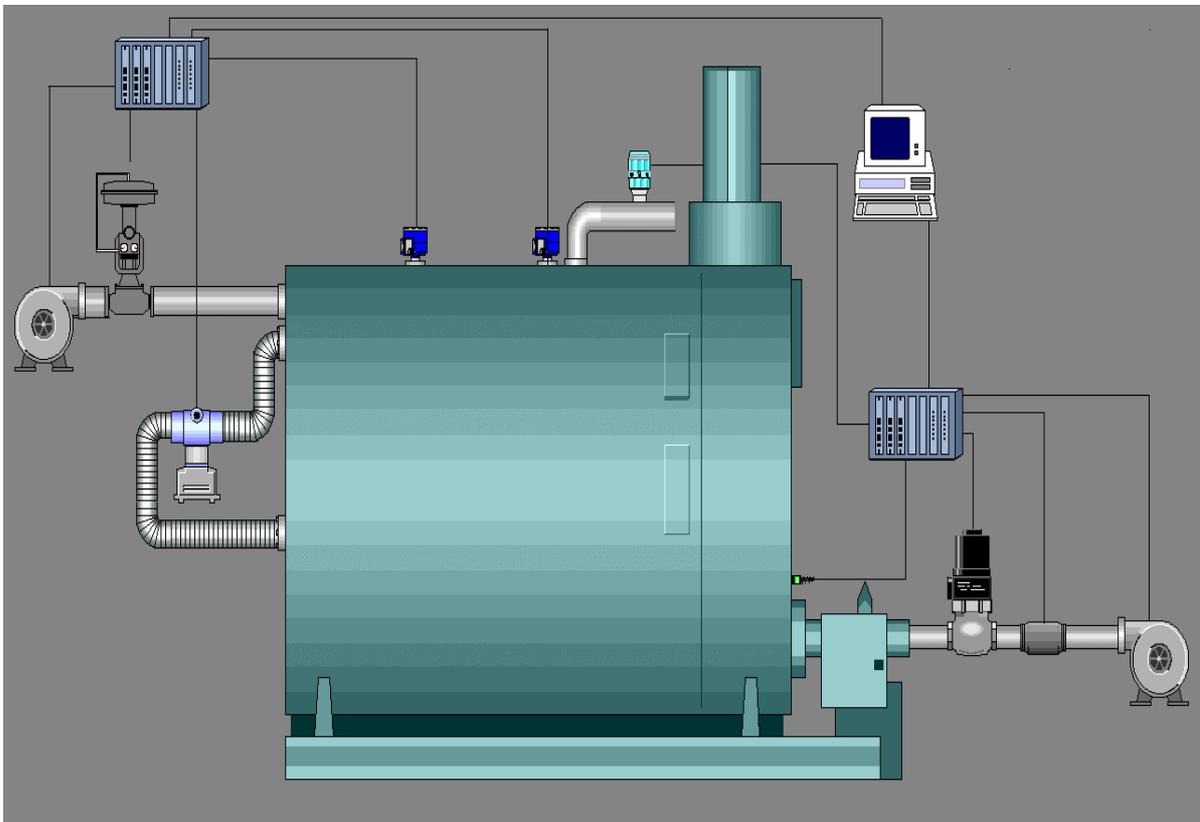
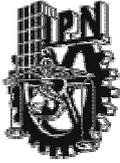


Fig. 4.1 Distribución física del Equipo



En el *encendido* hay que considerar los siguientes *tiempos*:

–*Tiempo de pre-barrido*: es el periodo de funcionamiento del ventilador antes de encender la llama; elimina gases residuales.

–*Tiempo de preencendido*: desde que se provoca la chispa hasta que se empieza a suministrar combustible, con esto se logra un encendido suave.

–*Tiempo de seguridad*: es el tiempo máximo en el que se puede suministrar combustible a la caldera sin que aparezca la llama.

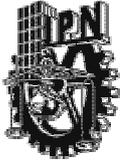
–*Tiempo de post encendido*: es el periodo en el que se mantiene el sistema de encendido después de haber provocado la aparición de la llama.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA LÓGICA DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ENCENDIDO Y COMBUSTIÓN

El controlador evaluará las condiciones de operación de los sensores de las variables críticas de tal manera que ninguno este detectando alguna variable crítica en caso de detectar alguna, el sistema procederá a desactivar la secuencia de encendido para no permitir el incremento de presión o de nivel de agua dentro de la caldera.

En lo que respecta a la lógica de operación se ejecutará mediante la siguiente secuencia.

1. Motor de ventilador. Esta etapa se puede identificar como tiempo de pre-barrido. Para facilidad del proceso se dejará permanente el funcionamiento de la bomba de aire. Únicamente se detectará el flujo de aire por medio de un interruptor de baja presión de aire el cual tendrá como función principal detener el proceso hasta que se restablezcan las condiciones normales de operación.
2. Apertura válvula de combustible. La válvula se abrirá para permitir el paso del combustible por un tiempo breve hasta que el sensor de flama logre detectar el encendido del piloto y posteriormente del quemador principal.
3. Encendido del Piloto. En esta etapa se produce una señal que activará un relevador que a su vez es parte del circuito del transformador que genera la chispa de combustible. Si no se detecta la flama la válvula cerrará y se tendrá un tiempo adicional de pre-barrido para la eliminación de exceso combustible del hogar o cámara de combustión.

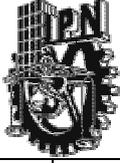


4. Corte del piloto. El corte del piloto se determinará por la apertura del relevador del circuito del transformador con lo que se finaliza el ciclo de combustión y encendido.
5. En caso de exceso de presión implicará que la temperatura también esta aumentando, el interruptor de presión ubicado en la tubería de vapor enviará una señal que detendrá la alimentación de combustible y cerrará la válvula de alimentación del mismo.
6. Cuando se detecte un alto flujo de combustible se detendrá la bomba de alimentación y también se cerrará la válvula de combustible.
7. Para el caso de la detección de muy bajo nivel en el tanque, se detendrá el flujo de combustible así como el flujo de agua parando ambas bombas y cerrando la válvula de combustible. Este caso detendrá el funcionamiento del PID colocándolo en modo manual hasta que se restablezcan las condiciones de operación normal, ya que al estar el nivel muy bajo puede generar un exceso de presión en poco tiempo.
8. En el caso de muy alto nivel de agua en el tanque se tendrá únicamente paro de la alimentación de la bomba de agua.

En todos los casos mencionados anteriormente que implican paro de emergencia el PID no operará de manera automática y se posicionará a manual hasta que se restablezcan las condiciones normales de operación, las cuales implican que no haya ningún interruptor activado o en el caso del sensor de flama que no la detecte.

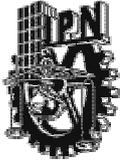
La siguiente tabla muestra las señales consideradas para el control del sistema. Dicha tabla especifica el tipo de señal, es decir de entrada o salida analógica y de entrada o salida digital con sus respectivos nombres de acuerdo a la nomenclatura de la ISA.

En el caso de las señales analógicas se pueden observar los rangos de operación de las mismas, así como sus disparos o alarmas que indican condiciones críticas de operación, de tal manera que el operador se pueda dar cuenta por medio de indicaciones audiovisuales de las condiciones de operación.



TAG	DESCRIPCION	TIPO DE SEÑAL	TIPO INSTRUMENTO	RANGO	ALARMA A BAJA	ALARMA MUY BAJA	ALARM A ALTA	ALARMA MUY ALTA
LAHH_01	NIVEL MUY ALTO TANQUE AGUA	ENTRADA DIGITAL	INTERRUPTOR DE NIVEL					X
LALL_01	NIVEL MUY BAJO TANQUE AGUA	ENTRADA DIGITAL	INTERRUPTOR DE NIVEL			X		
LIT_01	DETECCION DE NIVEL TANQUE DE AGUA	ENTRADA ANALOGICA	SENSOR-TRANSMISOR DE NIVEL	4-20 mA	X		X	
LIC_01	CONTROLADOR DE NIVEL EN TANQUE DE AGUA	CONTROLADOR ANALOGICO	CONTROLADOR					
LV_01	VALVULA DE CONTROL DE NIVEL	SALIDA ANALOGICA	VALVULA REGULATORIA	4-20 mA				
PAH_02	PRESION ALTA DE VAPOR DE SALIDA	ENTRADA DIGITAL	INTERRUPTOR PRESION				X	
BET_02	DETECCION DE FLAMA EN HOGAR	ENTRADA DIGITAL	SENSOR DE FLAMA					
FSH_02	ALTO FLUJO DE COMBUSTIBLE	ENTRADA DIGITAL	INTERRUPTOR DE FLUJO				X	
FC_02	CONTROLADOR VALVULA DE FLUJO DE COMBUSTIBLE	CONTROLADOR DIGITAL	CONTROLADOR					
FV_02	VALVULA DE CONTROL DE FLUJO DE COMBUSTIBLE	SALIDA DIGITAL	VALVULA SOLENOIDE					
BS_02	RELEVADOR PARA APERTURA/CIERRE DE TRANSFORMADOR PARA ENCENDIDO DEL PILOTO	SALIDA DIGITAL	TRANSFORMADOR					

TABLA 4.1 Relación de Señales de Entrada y Salida al Sistema



Las señales de tipo digital serán controladas por una lógica de compuertas que implica ambos tipos de señales, digital de entrada y digital de salida, para el control de los elementos de campo como son el encendido de las bombas y el cierre y apertura de la válvula solenoide. Dicha lógica esta representada por el siguiente esquema:

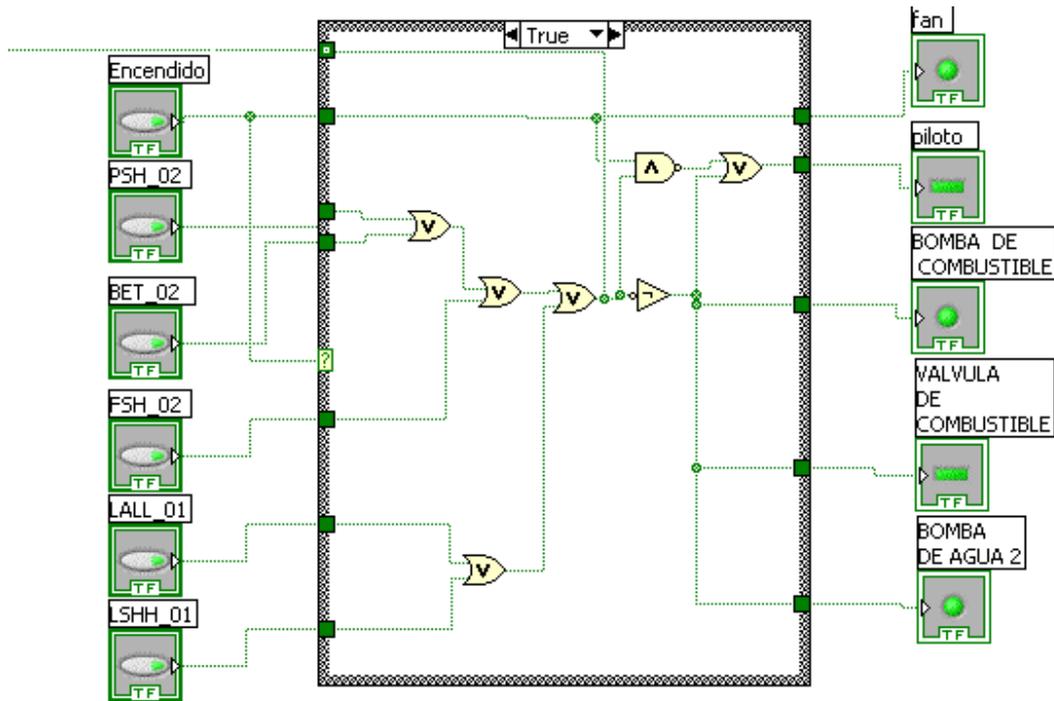
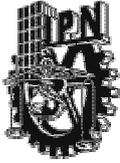


Fig. 4.2 Lógica de Operación Sistema de Combustión



4.2 SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES RETROALIMENTADOS

Sintonización es el procedimiento para ajustar los parámetros de un controlador para obtener una respuesta específica en un lazo cerrado. Como solamente un parámetro o perilla necesita ser regulado, el procedimiento consiste en mover en una dirección u otra hasta que la respuesta deseada sea obtenida. Con dos parámetros, como la ganancia y el tiempo de restablecimiento, el proceso de sintonización es significativamente más complicado que cuando un único parámetro debe ser ajustado. Finalmente la sintonización de tres modos o de controladores proporcional, integral y derivativo (PID) represente el siguiente grado de dificultad de tres parámetros, la ganancia, el tiempo de reset y el tiempo derivativo, deben ser ajustados.

Algunos lazos de control tienen repuestas rápidas, sin embargo para muchos lazos procesos se tiene que esperar varios minutos y posiblemente hasta horas para observar la respuesta que resulta de los ajustes de sintonización. Esto hace de la sintonización de controladores retroalimentados por prueba y error una actividad tediosa y consumidora de tiempo. Por eso se han probado varios métodos para la sintonización en la industria.

Método de ganancia al límite.

Este método de lazo cerrado fue desarrollado por Ziegler y Nichols, en 1941 y permite calcular los tres términos de ajuste del controlador a partir de los datos obtenidos en una prueba rápida de características del lazo cerrado de control. El método consiste en estrechar gradualmente la banda proporcional con los ajustes de integral y derivada en su valor más bajo, mientras se crean pequeños cambios en el punto de consigna, hasta que el proceso comienza a oscilar de modo continuo.

Esta banda proporcional se denomina banda proporcional límite (PBu=Proporcional Band Ultimate). Se toma en cuenta el periodo del ciclo de las oscilaciones P_u en minutos y la última banda proporcional PBu.

-Control Proporcional

$$\text{Banda Proporcional (\%)} = 2PBu$$

-Controlador Proporcional + Integral

$$\text{Banda Proporcional (\%)} = 2.2PBu$$

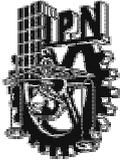
$$\text{Banda Integral (min/rep)} = Pu/1.2$$

-Controlador Proporcional + Integral +Derivativo

$$\text{Banda Proporcional (\%)} = 1.7 PBu$$

$$\text{Banda Integral (min/rep)} = Pu /2$$

$$\text{Banda Derivada (minutos)} = Pu /8$$



4.3 ALGORITMO DE PID AVANZADO ¹⁰

Cálculo de Error

La siguiente formula representa el error actual usado en el cálculo de la acción proporcional, integral y derivativa.

$$e(k) = (SP - PV_f)(L + (1 - L)) * \frac{|SP - PV_f|}{SP_{range}}$$

El error calculado por la acción proporcional es mostrado en la siguiente formula:

$$eb(k) = (\beta SP - PV_f)(L + (1 - L)) * \frac{\beta |SP - PV_f|}{SP_{range}}$$

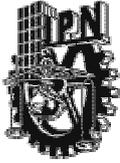
Donde SP_{range} es el rango del Set Point, β es el factor del Set Point para el algoritmo de un PID con dos grados de libertad y L es el factor de Linealidad que produce un término de ganancia no lineal en el cual la ganancia del controlador incrementa con la magnitud del error. Si L es uno, el controlador es lineal. Un valor de 0.1 determina la ganancia mínima del controlador 10% Kc . El uso de un término de ganancia no lineal es referido como un error cuadrático del algoritmo del PID.

Acción Proporcional

En aplicaciones, los cambios de SP son usualmente más grandes y rápidos que los disturbios en la carga, mientras que los disturbios en la carga aparecen como una salida lenta de la variable controlada desde el SP.

La sintonización de PID para buenas repuestas debidas a los disturbios en la carga ocasionalmente resultan con una oscilación inadecuada. En cambio la sintonización para una buena repuesta frecuentemente produce movimientos en la respuesta a disturbios en la carga. El factor β , cuando es puesto a un valor menor que uno, reduce el disparo de la respuesta del SP sin afectar la respuesta en el disturbio de la carga del algoritmo de PID,

¹⁰ National Instruments, PID Control Toolset User Manual, 2001.



intuitivamente, β es un indicador de la respuesta del SP de cero a uno. Por ejemplo si se considera la respuesta de la carga como el lazo de más alto rendimiento, colocar β a 0.0. Por otro lado si se quiere que la variable de proceso sea más rápida al seguir los cambios de SP, colocar β a 1.

4.4 USANDO EL SOFTWARE PID

Diseñando una Estrategia de Control

Cuando se diseña una estrategia de control se dibuja un Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI) que incluye un proceso físico y elementos de control así como válvulas y mediciones. Agregando una retroalimentación del proceso y cualquier cálculo requerido. Entonces se usan la VIs de Control de esta caja de herramientas combinando las matemáticas, los VIs lógicos y las funciones en Labview, para convertir el diagrama de flujo en un diagrama de bloques.

La siguiente figura es un ejemplo de un Diagrama de Tubería e Instrumentación flujo y su equivalente en diagrama de bloques de Labview.

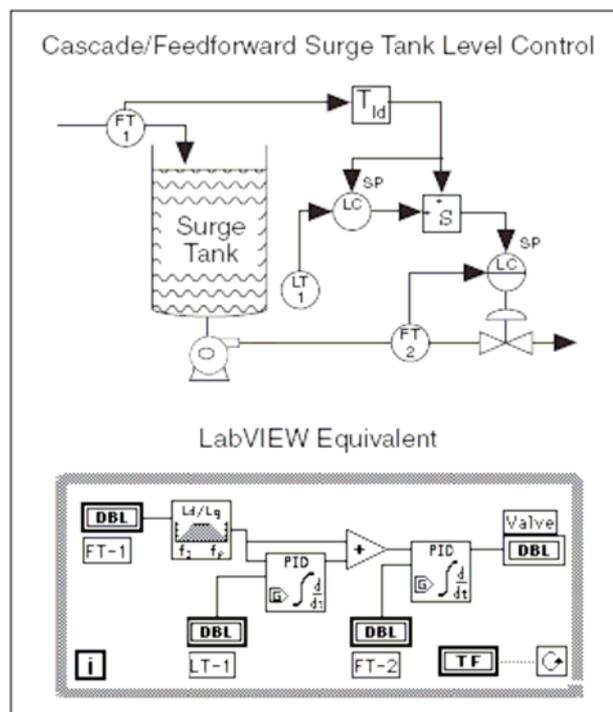
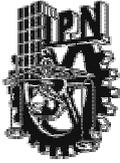


Fig. 4.3 Ejemplo de Representación de un DTI con bloques de Labview



Se pueden manipular entradas y salidas a través de dispositivos DAQ, módulos de terminales de campo I/O, Instrumentos GPIB o puertos I/O. Se pueden ajustar valores en tiempo real.

Ajustando el tiempo

El VI PID en esta caja de herramientas es dependiente del tiempo. Un VI puede adquirir información del tiempo desde un valor que externamente el usuario le da para el control de ciclo de tiempo, **dt**, o desde un vigilante de tiempo como aquellos que se construyen dentro del VI PID. Si **dt** es menor o igual a cero, el VI calcula nueva información de tiempo cada vez que Labview lo requiera. En cada llamada, el VI mide el tiempo desde la última llamada de información y usa la diferencia en estos cálculos.

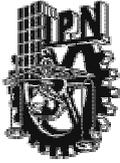
Si **dt** tiene un valor positivo en segundos, El VI utiliza el valor calculado almacenado en el ciclo anterior. Se debe usar este método para ciclos rápidos como cuando se usa hardware de adquisición para temporizar la entrada del controlador.

De acuerdo con la teoría de control, un sistema de control debe muestrear un proceso físico con una relación de 10 veces más rapidez que la constante de tiempo en el proceso físico. Por ejemplo, tenemos una constante de tiempo de 60s que es típica para lazos de control de temperatura en un pequeño sistema. En este caso un ciclo de tiempo de alrededor de 6s es suficiente. Un ciclo más rápido no ofrece mejoras en el rendimiento. De hecho, corriendo todos los VIs de control muy rápido, se degrada la respuesta en tiempo de la aplicación de usuario en Labview.

Todos los VIs dentro de un ciclo se ejecutan una vez por iteración en el mismo ciclo de tiempo. Si se utilizan diferentes ciclos de tiempo compartiendo datos entre estas se deben separar los VIs en ciclos While diferentes independientemente.

Sintonizando controladores manualmente

Los siguientes procedimientos de sintonización están basados en el trabajo de Ziegler y Nichols, que desarrollaron las técnicas de sintonización de la razón Cuarto-Década derivadas de una combinación de teoría y observaciones empíricas. Para los diferentes procesos un método puede ser más fácil o más preciso que otro. Por ejemplo, algunas técnicas que trabajan bien cuando son usadas con controladores en línea no son viables para estas aplicaciones.



Procedimiento de Sintonización de Lazo Cerrado (Última Ganancia).

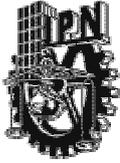
Además de ser muy preciso el procedimiento de sintonización de lazo cerrado, se puede poner el proceso en oscilación de estado estacionario y observar la **PV** en una grafica. Se deben completar los siguientes pasos para realizar el proceso de sintonización de lazo cerrado.

1. Colocar un 0 en el tiempo derivativo y en el tiempo integral en el controlador PID.
2. Con el controlador en modo automático incrementar cuidadosamente la **ganancia proporcional (Kc)** en pequeños incrementos. Hacer un pequeño incremento en el **SP** para alterar el lazo después de cada incremento. Como se incremento Kc, el valor de PV comenzara a oscilar.
3. Continuar haciendo los cambios hasta que la oscilación se establezca y que no se incremente ni decremente durante el tiempo.
4. Establecer la banda proporcional (PBu) como porcentaje donde $PBu=100/Kc$.
5. Establecer el periodo de oscilación (T_u) en minutos.
6. Multiplicar los valores de las mediciones por los factores mostrados en la siguiente tabla y aplicar los nuevos parámetros de sintonización en el controlador. La tabla proporciona los valores de la relación cuarto-década. Si se requiere menor limite de disparo, incrementar la ganancia Kc.

Controller	PB (percent)	Reset (minutes)	Rate (minutes)
P	$2.00PB_u$	—	—
PI	$2.22PB_u$	$0.83T_u$	—
PID	$1.67PB_u$	$0.50T_u$	$0.125T_u$

Nota: la ganancia proporcional es relacionada a la banda proporcional (PB) como $Kc=100/PB$.

Tabla 4.2 Modos de Sintonización de PID



4.5 El VI PID

El VI PID tiene entradas para Set Point, variable de proceso, ganancias PID, dt , rango salida y reiniciación. Las entradas ganancias de PID son parte de un cluster de tres valores-ganancia proporcional, tiempo integral y tiempo derivativo.

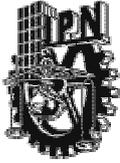
Se puede usar el rango de salida para especificar el rango de salida del controlador. El rango predeterminado para la salida del controlador es de -100 a 100, el cual corresponde a valores especificados en porcentaje de la escala total. Por lo tanto, se puede cambiar este rango por uno que sea más apropiado para el sistema de control en el que se este aplicando, es decir, la ganancia del controlador relaciona unidades de ingeniería con unidades de ingeniería en lugar de porcentaje con porcentaje. El VI PID convierte la salida del controlador a un rango específico.

Podemos usar dt para especificar ciclo de tiempo del lazo de control. El valor predeterminado es -1, por eso el VI PID usa el reloj del sistema operativo para cálculos que implican ciclo de tiempo en el lazo. Si el ciclo de tiempo del lazo es determinístico, se puede utilizar esta entrada para el VI PID. Se debe de notar que el reloj del sistema operativo tiene una resolución de 1 ms, debido a esto podemos especificar un valor explícitamente si el ciclo de tiempo es menor que 1 ms.

El VI PID iniciará todos sus estados internos en la primera llamada al VI. Todas las llamadas subsecuentes del VI harán que este llame la información de llamadas previas. Por lo tanto es posible reiniciar el VI PID a su estado inicial en cualquier momento únicamente colocando un valor verdadero (**true**) en la entrada **reinitialize?** Se debe usar esta función si la aplicación debe parar y reiniciar el lazo de control sin reestablecer la aplicación completa.

El VI PID Avanzado.

El VI PID avanzado tiene las mismas entradas que el VI PID normal, con la adición de entradas como rango del Set Point, beta, linealidad y auto?, y control manual. Es posible especificar el rango del Set Point utilizando la entrada **Set Point range**, que también establece el rango de la variable de proceso. El rango predeterminado del Set Point es de 0 a 100, que corresponde a valores especificados en términos de porcentaje de la escala completa. Por lo tanto se puede cambiar este rango por uno apropiado para el proceso de un sistema de control específico.



El VI PID Avanzado utiliza el rango del set point en una acción de cálculo integral no lineal y la entrada linealidad (**linearity**) para cálculos factores de ganancia no lineales.

Utilizando las entradas **auto?** y **manual control** es posible cambiar los modos manual y automático. El valor predeterminado de **auto?** es **verdadero**, lo cual significa que el VI usa el algoritmo de PID para calcular la salida del controlador. Se puede establecer el modo de control manual si se cambia el valor de **auto?** a falso, por lo que el VI convierte el valor de control manual a través de la salida.

4.6 UBICACIÓN DE DISPOSITIVOS EN EL PANEL FRONTAL

El diagrama de Tubería e Instrumentación que se muestra a continuación muestra la distribución del equipo y la interacción de la señales con sus respectivos sistemas de alarmas

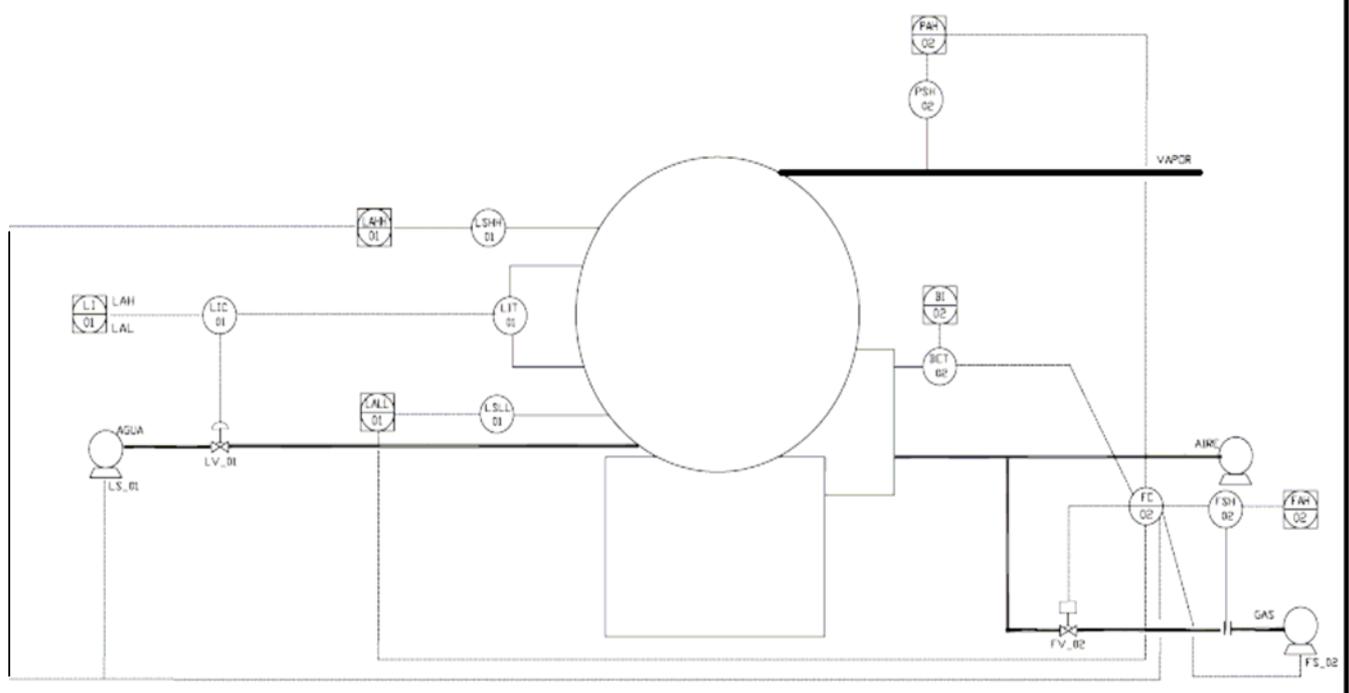
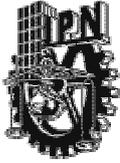


Fig. 4.5 Diagrama de Tubería e Instrumentación del Sistema Completo



En la siguiente figura se tiene la carátula principal del panel de control, en donde se pueden visualizar las acciones que realiza el sistema automáticamente, por medio de indicadores visuales como los botones de encendido/apagado de las bombas y válvulas, así como de los interruptores que simulan las entradas digitales o disparos de condiciones críticas.

De la misma forma, se puede realizar la sintonización del controlador PID de nivel así como su operación en modo manual.

Se muestra además el comportamiento de las variables analógicas por medio de una graficadora virtual ubicada dentro de la pantalla.

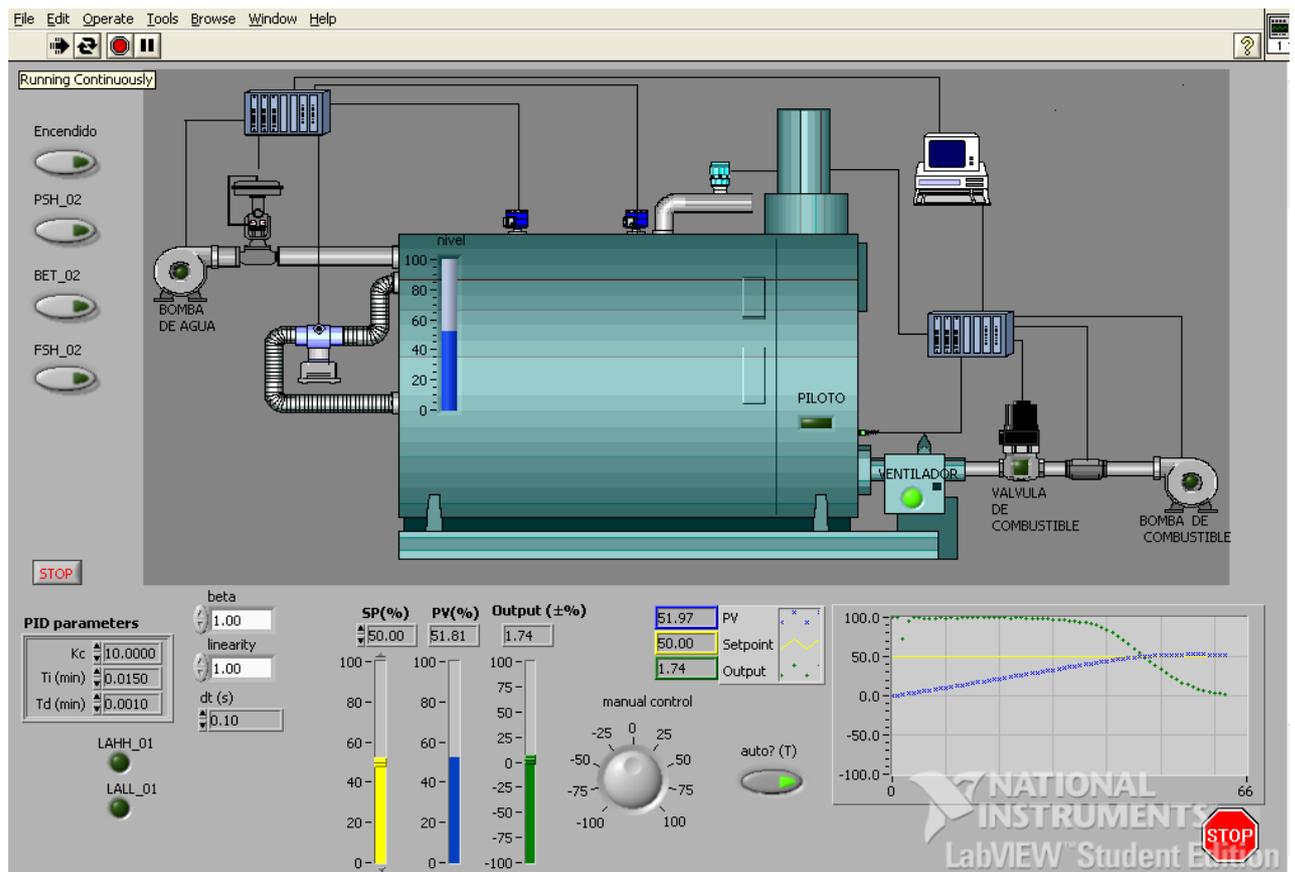
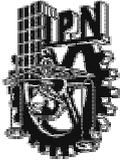


Fig. 4.6 Ubicación de los elementos del sistema en el panel frontal de operación.



CONCLUSIONES.

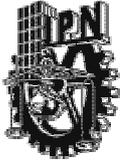
Mediante la representación y simulación del sistema es posible realizar el control de seguridad de la caldera de manera eficiente. El software utilizado para esta practica es Labview, ya que cuenta con una amplia gama de funciones que permiten que el control tanto analógico como digital pueda ser fusionado y con la posibilidad de seguir incrementando las funciones a realizar e inclusive con la posibilidad de ampliar las capacidades del mismo por medio de la comunicación entre diferentes estaciones de operación que permiten la interacción del hombre con el proceso por medio de la representación grafica del mismo. La lógica de operación puede ser cambiada en cualquier momento dependiendo de las características del proceso a controlar. Esto implica un mejor y eficiente control con posibilidades de expansión del mismo ya que la disponibilidad de Labview así lo permite.

Este sistema se propone para el caso de que se utilice en el presente trabajo como un sistema redundante, sin embargo dependiendo del proceso, requiere de especificaciones técnicas de seguridad estandarizadas que rigen el comportamiento del mismo. Sin embargo, dichas especificaciones son fácilmente configurables con este software debido a su disponibilidad.

Permite además la adición de cualquier tipo de señal y la implementación de técnicas de control avanzadas, que en determinado momento pueden ser requeridas en la industria.

El desarrollo de este sistema puede ser ampliado por medio de la adición de señales y de algunas otras variables que no fueron tomadas en cuenta para este efecto ya que se sería más difícil debido a las limitantes en cuanto a hardware ya que se deben determinar dependiendo de los canales disponibles de la tarjeta de adquisición que se desee utilizar.

Se puede concluir además que este sistema es viable para aplicaciones de mediano y gran alcance debido a la operabilidad del sistema en el que se desarrollan proyectos y lógicas de operación capaces de operar prácticamente cualquier proceso.



BIBLIOGRAFÍA

Ávalos Arzate Guillermo, Montufar Navarro, Marcela Adriana, Ortiz Hernández, Fernando Eli, Villalobos Ordaz, Gustavo. *Teoría de Control, Ajuste de Controladores*, IPN, 1ra ED, 2002.

Ogata, Katsuhiko, *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*, Pearson Education, 2da Ed.1996.

Ogata, Katsuhiko, *Ingeniería de Control Moderna*, Pearson Education, 4ta ed, 2003

Hostetter, G.H., Savant C.J., Stefani R.T., *Sistemas de Control*, Mc Graw Hill, 1ra Ed., 1990.

Creus Sole Antonio, *Instrumentación Industrial*, Alfaomega, 7ma Ed., 2006.

Vázquez Ortega Alfonso, *Generadores de Vapor*, Offset Virginia S.A., 1980.

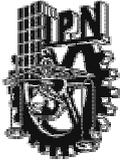
Selmec Equipos Industriales SA de CV, *Manual para operadores de Calderas*, 1984

Diestefano III, Stubberud y Williams, *Retroalimentación y Sistemas de Control*, Schaum Mc Graw Hill. 1986.

Smith Carlos A., Corripio Armando B., *Principles and Practice of Automatic Process Control*, Wiley, 1985.

Graham Frank D., *Power Plant Engineers Guide*, Audels 1945.

Doebelin, Ernest E., *Sistemas de Medición e Instrumentación*, Mc. Graw Hill, 5ta ED, 2005.



National Instruments, *Labview 7 Express* 2003.

National Instruments, PID Control Toolset User Manual, 2001.

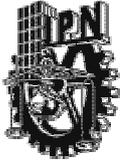
Comisión Federal de Electricidad, Instructivo de Central Termoeléctrica, 1995

Gomariz Castro, Spartacus, Biel Sole, Domingo, Matas Alcalá, José, Reyes Moreno, Miguel, *Teoría de Control Diseño Electrónico*, Alfaomega, 1999.

ANSI/ISA-5.1-1984 (R1992), Instrumentation Symbols and Identification, American National Standard, Reaffirmed 13 July 1992.



ANEXOS

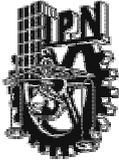


ANEXO 1 NORMAS DE LA ISA PARA IDENTIFICACION DE EQUIPO¹¹

	FIRST-LETTER (4)		SUCCEEDING-LETTERS (3)		
	MEASURED OR INITIATING VARIABLE	MODIFIER	READOUT OR PASSIVE FUNCTION	OUTPUT FUNCTION	MODIFIER
A	Analysis (5,19)		Alarm		
B	Burner, Combustion		User's Choice (1)	User's Choice (1)	User's Choice (1)
C	User's Choice (1)			Control (13)	
D	User's Choice (1)	Differential (4)			
E	Voltage		Sensor (Primary Element)		
F	Flow Rate	Ratio (Fraction) (4)			
G	User's Choice (1)		Glass, Viewing Device (9)		
H	Hand				High (7, 15, 16)
I	Current (Electrical)		Indicate (10)		
J	Power	Scan (7)			
K	Time, Time Schedule	Time Rate of Change (4, 21)		Control Station (22)	
L	Level		Light (11)		Low (7, 15, 16)
M	User's Choice (1)	Momentary (4)			Middle, Intermediate (7,15)
N	User's Choice (1)		User's Choice (1)	User's Choice (1)	User's Choice (1)
O	User's Choice (1)		Orifice, Restriction		
P	Pressure, Vacuum		Point (Test) Connection		
Q	Quantity	Integrate, Totalize (4)			
R	Radiation		Record (17)		
S	Speed, Frequency	Safety (8)		Switch (13)	
T	Temperature			Transmit (18)	
U	Multivariable (6)		Multifunction (12)	Multifunction (12)	Multifunction (12)
V	Vibration, Mechanical Analysis (19)			Valve, Damper, Louver (13)	
W	Weight, Force		Well		
X	Unclassified (2)	X Axis	Unclassified (2)	Unclassified (2)	Unclassified (2)
Y	Event, State or Presence (20)	Y Axis		Relay, Compute, Convert (13, 14, 18)	
Z	Position, Dimension	Z Axis		Driver, Actuator, Unclassified Final Control Element	

Tabla A1.1 Letras de Identificación

¹¹ ANSI/ISA-5.1-1984 (R1992), Instrumentation Symbols and Identification, AMERICAN NATIONAL STANDARD, Reaffirmed 13 July 1992

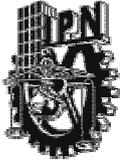


First-Letters	Initiating or Measured Variable	Controllers				Readout Devices		Switches and Alarm Devices*			Transmitters			Solenoids, Relays, Computing Devices	Primary Element	Test Point	Well or Probe	Viewing Device, Glass	Safety Device	Final Element
		Recording	Indicating	Blind	Self-Actuated Control Valve	Recording	Indicating	High**	Low	Comb	Recording	Indicating	Blind							
A	Analysis	ARC	AIC	AC		AR	AI	ASH	ASL	ASHL	ART	AIT	AT	AY	AE	AP	AW			AV
B	Burner/Combustion	BRC	BIC	BC		BR	BI	BSH	BSL	BSHL	BRT	BIT	BT	BY	BE		BW	BG		BZ
C	User's Choice																			
D	User's Choice																			
E	Voltage	ERC	EIC	EC		ER	EI	ESH	ESL	ESHL	ERT	EIT	ET	EY	EE					EZ
F	Flow Rate	FRC	FIC	FC	FCV, FICV	FR	FI	FSH	FSL	FSHL	FRT	FIT	FT	FY	FE	FP		FG		FV
FQ	Flow Quantity	FQRC	FQIC			FQR	FQI	FQSH	FQSL			FQIT	FQT	FQY	FQE					FQV
FF	Flow Ratio	FFRC	FFIC	FFC		FFR	FFI	FFSH	FFSL					FE						FFV
G	User's Choice																			
H	Hand		HIC	HC						HS										HV
I	Current	IRC	IIC			IR	II	ISH	ISL	ISHL	IRT	IIT	IT	IY	IE					IZ
J	Power	JRC	JIC			JR	JI	JSH	JSL	JSHL	JRT	JIT	JT	JY	JE					JV
K	Time	KRC	KIC	KC	KCV	KR	KI	KSH	KSL	KSHL	KRT	KIT	KT	KY	KE					KV
L	Level	LRC	LIC	LC	LCV	LR	LI	LSH	LSL	LSHL	LRT	LIT	LT	LY	LE		LW	LG		LV
M	User's Choice																			
N	User's Choice																			
O	User's Choice																			
P	Pressure/Vacuum	PRC	PIC	PC	PCV	PR	PI	PSH	PSL	PSHL	PRT	PIT	PT	PY	PE	PP			PSV, PSE	PV
PD	Pressure, Differential	PDRC	PDIC	PDC	PDCV	PDR	PDI	PDOSH	POSL		PDRT	PDIT	PDT	PDY	PE	PP				PDV
Q	Quantity	QRC	QIC			QR	QI	QSH	QSL	QSHL	QRT	QIT	QT	QY	QE					QZ
R	Radiation	RRC	RIC	RC		RR	RI	RSH	RSL	RSHL	RRT	RIT	RT	RY	RE		RW			RZ
S	Speed/Frequency	SRC	SIC	SC	SCV	SR	SI	SSH	SSL	SSHSL	SRT	SIT	ST	SY	SE					SV
T	Temperature	TRC	TIC	TC	TCV	TR	TI	TSH	TSL	TSHL	TRT	TIT	TT	TY	TE	TP	TW	TSE		TV
TD	Temperature, Differential	TDRC	TDIC	TDC	TDCV	TDR	TDI	TDSH	TDSL		TDRT	TDIT	TDI	TDY	TE	TP	TW			TDV
U	Multivariable					UR	UI							UY						UV
V	Vibration/Machinery Analysis					VR	VI	VSH	VSL	VSHL	VRT	VIT	VT	VY	VE					VZ
W	Weight/Force	WRC	WIC	WC	WCV	WR	WI	WSH	WSL	WSHL	WRT	WIT	WT	WY	WE					WZ
WD	Weight/Force, Differential	WDRC	WDIC	WDC	WDCV	WDR	WDI	WDOSH	WDSL		WDRT	WDIT	WDT	WDY	WE					WDZ
X	Unclassified																			
Y	Event/State/Presence		YIC	YC		YR	YI	YSH	YSL				YT	YY	YE					YZ
Z	Position/Dimension	ZRC	ZIC	ZC	ZCV	ZR	ZI	ZSH	ZSL	ZSHL	ZRT	ZIT	ZT	ZY	ZE					ZV
ZD	Gauging/Deviation	ZDRC	ZDIC	ZDC	ZDCV	ZDR	ZDI	ZDSH	ZDSL		ZDRT	ZDIT	ZDT	ZDY	ZDE					ZDV

Note: This table is not all-inclusive.
 *A, alarm, the annunciating device, may be used in the same fashion as S, switch, the actuating device.
 **The letters H and L may be omitted in the undefined case.

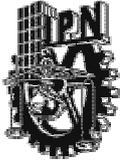
Other Possible Combinations:
 FO (Restriction Orifice) PFR (Ratio)
 FRK, HIK (Control Stations) KQI (Running Time Indicator)
 FX (Accessories) QQI (Indicating Counter)
 TJR (Scanning Recorder) WKIC (Rate-of-Weight-Loss Controller)
 LLH (Pilot Light) HMS (Hand Momentary Switch)

Tabla A1.2 Combinaciones Típicas de Letras



(1) INSTRUMENT SUPPLY * OR CONNECTION TO PROCESS	
(2) UNDEFINED SIGNAL	
(3) PNEUMATIC SIGNAL **	
(4) ELECTRIC SIGNAL	
(5) HYDRAULIC SIGNAL	
(6) CAPILLARY TUBE	
(7) ELECTROMAGNETIC OR SONIC SIGNAL *** (GUIDED)	
(8) ELECTROMAGNETIC OR SONIC SIGNAL *** (NOT GUIDED)	
(9) INTERNAL SYSTEM LINK (SOFTWARE OR DATA LINK)	
(10) MECHANICAL LINK	
<u>OPTIONAL BINARY (ON-OFF) SYMBOLS</u>	
(11) PNEUMATIC BINARY SIGNAL	
(12) ELECTRIC BINARY SIGNAL	

Tabla A1.3 Identificación de Señales Para Diagramas de Tubería e Instrumentación



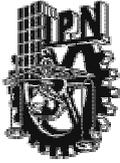
	PRIMARY LOCATION ***NORMALLY ACCESSIBLE TO OPERATOR	FIELD MOUNTED	AUXILIARY LOCATION ***NORMALLY ACCESSIBLE TO OPERATOR
DISCRETE INSTRUMENTS	1 *  IP1**	2 	3 
SHARED DISPLAY, SHARED CONTROL	4 	5 	6 
COMPUTER FUNCTION	7 	8 	9 
PROGRAMMABLE LOGIC CONTROL	10 	11 	12 

Tabla A1.4 Simbología General de Instrumentos



<p>13</p>	<p>14</p>  <p>INSTRUMENT WITH LONG TAG NUMBER</p>	<p>15</p>  <p>INSTRUMENTS SHARING COMMON HOUSING *</p>
<p>16</p>  <p>PILOT LIGHT</p>	<p>17</p>  <p>PANEL MOUNTED PATCHBOARD POINT 12</p>	<p>18</p>  <p>**</p> <p>PURGE OR FLUSHING DEVICE</p>
<p>19</p>  <p>**</p> <p>REST FOR LATCH-TYPE ACTUATOR</p>	<p>20</p>  <p>DIAPHRAGM SEAL</p>	<p>21</p>  <p>*** ***</p> <p>UNDEFINED INTERLOCK LOGIC</p>

Tabla A1.4 Simbología General de Instrumentos (Cont.)



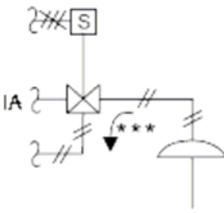
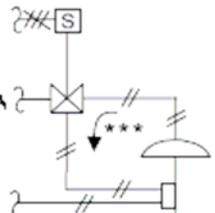
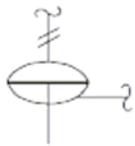
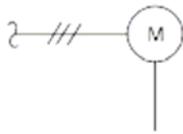
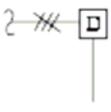
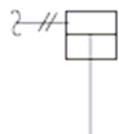
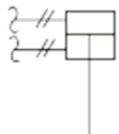
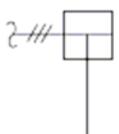
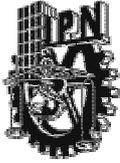
<p>1</p>  <p>WITH OR WITHOUT POSITIONER OR OTHER PILOT</p>	<p>2</p>  <p>PREFERRED FOR DIAPHRAGM ASSEMBLED WITH PILOT*. ASSEMBLY IS ACTUATED BY ONE INPUT (SHOWN TYPICALLY WITH ELECTRIC INPUT)</p>	<p>3</p>  <p>PREFERRED ALTERNATIVE</p>	<p>4</p>  <p>OPTIONAL ALTERNATIVE</p>
<p>DIAPHRAGM, SPRING-OPOSED OR UNSPECIFIED ACTUATOR</p>		<p>DIAPHRAGM, SPRING-OPOSED, WITH POSITIONER** AND OVERRIDING PILOT VALVE THAT PRESSURIZES DIAPHRAGM WHEN ACTUATED</p>	
<p>5</p>  <p>DIAPHRAGM, PRESSURE-BALANCED</p>	<p>6</p>  <p>ROTARY MOTOR (SHOWN TYPICALLY WITH ELECTRIC SIGNAL, MAY BE HYDRAULIC OR PNEUMATIC)</p>	<p>7</p>  <p>DIGITAL</p>	
<p>8</p>  <p>SPRING-OPOSED SINGLE-ACTING</p>	<p>9</p>  <p>DOUBLE-ACTING</p>	<p>10</p>  <p>PREFERRED FOR ANY CYLINDER THAT IS ASSEMBLED WITH A PILOT* SO THAT ASSEMBLY IS ACTUATED BY ONE CONTROLLED INPUT</p>	
<p>CYLINDER, WITHOUT POSITIONER OR OTHER PILOT</p>			

Tabla A1.5 Simbología de Actuadores



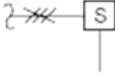
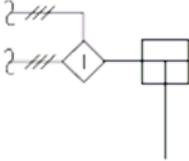
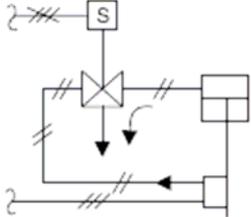
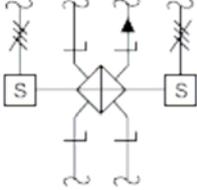
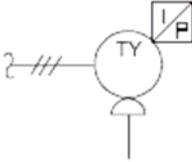
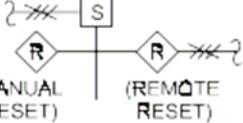
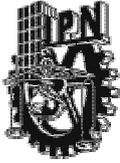
<p>11</p>  <p>SOLENOID</p>	<p>12</p>  <p>PREFERRED ALTERNATIVE. A BUBBLE WITH INSTRUMENT TAGGING, E.G., TY-I, MAY BE USED INSTEAD OF THE INTERLOCK SYMBOL </p> <p>CYLINDER WITH POSITIONER AND OVERRIDING PILOT VALVE</p>	<p>13</p>  <p>SINGLE-ACTING CYLINDER (IMPLIED I/P)</p>
<p>14</p>  <p>DUAL SOLENOIDS SWITCHING 4-WAY HYDRAULIC VALVE</p>	<p>15</p>  <p>ELECTROHYDRAULIC</p>	<p>16</p>  <p>VALVE ACTUATOR WITH ATTACHED ELECTRO-PNEUMATIC CONVERTER</p>
<p>17</p>  <p>LATCH-TYPE ACTUATOR WITH RESET (SHOWN TYPICALLY FOR SOLENOID ACTUATOR AND TYPICALLY WITH ELECTRIC SIGNAL FOR REMOTE RESET, WITH MANUAL RESET ALTERNATIVE)</p>	<p>18</p>  <p>FOR PRESSURE RELIEF OR SAFETY VALVES ONLY; DENOTES A SPRING, WEIGHT, OR INTEGRAL PILOT</p>	<p>19</p>  <p>HAND ACTUATOR OR HANDWHEEL</p>

Tabla A1.5 Simbología de Actuadores (Cont.)

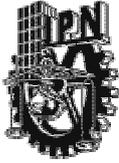


ANEXO 2 REGLAS DEL ALGEBRA DE LOS DIAGRAMAS DE BLOQUES¹²

	Diagramas de bloques originales	Diagramas de bloques equivalentes
1		
2		
3		
4		
5		

Tabla A 2.1 Reglas del Algebra de los diagramas de Bloques

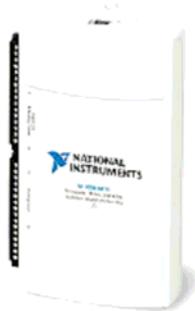
¹² Ogata, Katsuhiko, *Ingeniería de Control Moderna*, Pearson Education, 4ta ed, 2003



ANEXO 3 TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS PROPUESTA¹³

Last Revised: 2008-07-25 07:57:01.0

Bus-Powered M Series Multifunction DAQ for USB - 16-Bit, up to 400 kS/s, up to 32 Analog Inputs, Isolation



- Up to 32 analog inputs at 16 bits, up to 400 kS/s (250 kS/s scanning)
- Up to 2 analog outputs at 16 bits
- Up to 32 TTL/CMOS digital I/O lines
- Two 32-bit, 80 MHz counter/timers

- NI-PGIA 2 and NI-MCal calibration technology for improved measurement accuracy
- NI signal streaming for 4 high-speed data streams on USB
- Bus-powered design
- Available with CAT I isolation

Overview

With recent bandwidth improvements and new innovations from National Instruments, USB has evolved into a core bus of choice for measurement and automation applications. NI M Series devices for USB deliver high-performance data acquisition in an easy-to-use and portable form factor through USB ports on laptop computers and other portable computing platforms. National Instruments designed the new and innovative patent-pending NI signal streaming technology that enables sustained bidirectional high-speed data streams on USB. The new technology, combined with advanced external synchronization and isolation, helps engineers and scientists achieve high-performance applications on USB.

NI M Series bus-powered multifunction data acquisition (DAQ) devices for USB are optimized for superior accuracy in a small form factor. They provide an onboard NI-PGIA 2 amplifier designed for fast settling times at high scanning rates, ensuring 16-bit accuracy even when measuring all available channels at maximum speed.

All bus-powered devices have a minimum of 16 analog inputs, digital triggering, and two counter/timers. USB M Series devices are ideal for test, control, and design applications including portable data logging, field monitoring, embedded OEM, in-vehicle data acquisition and academic.

Requirements and Compatibility

OS Information

- Windows 2000/XP
- Windows Vista x64/x86
- Linux®
- Mac OS X

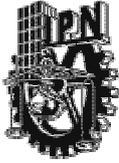
Driver Information

- NI-DAQmx Base
- NI-DAQmx

Software Compatibility

- ANSI C/C++
- LabVIEW
- LabVIEW SignalExpress
- Measurement Studio
- LabWindows/CVI

¹³ www.ni.com

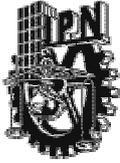


Detailed Specifications

Specifications listed below are typical at 25 °C unless otherwise noted. Refer to the NI USB-621x User Manual for more information about USB-621x devices.

Analog Input

Number of channels	
USB-6210/6211/6212/6215/6216	8 differential or 16 single ended
USB-6218	16 differential or 32 single ended
ADC resolution	
USB-6218	16 bits
DNL	
	No missing codes guaranteed
INL	
	Refer to the AI Absolute Accuracy Tables
Sampling rate	
Maximum	
USB-6210/6211/6215/6216	250 kS/s single channel, 250 kS/s multichannel (aggregate)
USB-6212/6216	400 kS/s single channel, 400 kS/s multichannel (aggregate)
Minimum	
	0 S/s
Timing accuracy	
	50 ppm of sample rate
Timing resolution	
	50 ns
Input coupling	
	DC
Input range	
	± 10 V, ± 5 V, ± 1 V, ± 0.2 V
Maximum working voltage for analog inputs (signal + common mode)	
	± 10.4 V of AI GND
CMRR (DC to 60 Hz)	
	100 dB
Input Impedance	
Device on	
AI+ to AI GND	>10 G Ω in parallel with 100 pF
AI- to AI GND	>10 G Ω in parallel with 100 pF
Device off	
AI+ to AI GND	1200 Ω
AI- to AI GND	1200 Ω
Input bias current	
	± 100 pA
Crosstalk (at 100 kHz)	



Adjacent channels	-75 dB
Non-adjacent channels	-90 dB
Small signal bandwidth (-3 dB)	
USB-6210/6211/6215/6218	450 kHz
USB-6212/6216	1.5 MHz
Input FIFO size	4,095 samples
Scan list memory	4,095 entries
Data transfers	USB Signal Stream, programmed I/O
Overvoltage protection (AI <0..31>, AI SENSE)	
Device on	±30 V for up to two AI pins
Device off	±20 V for up to two AI pins
Input current during overvoltage condition	±20 mA max/AI pin
Settling Time for Multichannel Measurements	
Accuracy, full scale step, all ranges	
USB-6210/6211/6215/6218	
±90 ppm of step (±6 LSB)	4 µs convert interval
±30 ppm of step (±2 LSB)	5 µs convert interval
±15 ppm of step (±1 LSB)	7 µs convert interval
USB-6212/6216	
±90 ppm of step (±6 LSB)	2.5 µs convert interval
±30 ppm of step (±2 LSB)	3.5 µs convert interval
±15 ppm of step (±1 LSB)	5.5 µs convert interval
Typical Performance Graphs	

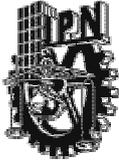
6

www.ni.com

Analog Output

Number of channels	
USB-6210	0
USB-6211/6212/6215/6216/6218	2
DAC resolution	16 bits
DNL	±1 LSB
Monotonicity	16 bit guaranteed

7



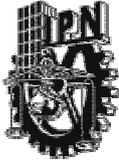
Maximum update rate	
1 channel	250 kS/s
2 channels	250 kS/s per channel
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Timing resolution	50 ns
Output range	±10 V
Output coupling	DC
Output impedance	0.2 Ω
Output current drive	±2 mA
Overdrive protection	±30 V
Overdrive current	2.4 mA
Power-on state	±20 mV
Power-on glitch	±1 V for 200 ms
Output FIFO size	6,191 samples shared among channels used
Data transfers	USB Signal Stream, programmed I/O
AO waveform modes:	
• Non-periodic waveform	
• Periodic waveform regeneration mode from onboard FIFO	
• Periodic waveform regeneration from host buffer including dynamic update	
Setting time, full scale step 15 ppm (1 LSB)	32 μs
Slew rate	5 V/μs
Glitch energy	
Magnitude	100 mV
Duration	2.6 μs

Calibration (AI and AO)

Recommended warm-up time	15 minutes
Calibration interval	1 year

AI Absolute Accuracy Table (USB-6210/6211/6215/6218)

Nominal Range		Residual Gain Error (ppm of Reading)	Gain Tempco (ppm/°C)	Reference Tempco	Residual Offset Error (ppm of Range)	Offset Tempco (ppm of Range/°C)	INL Error (ppm of Range)	Random Noise, σ (μVrms)	Absolute Accuracy at Full Scale ¹ (μV)	Sensitivity ² (μV)
Positive Full Scale	Negative Full Scale									
10	-10	75	7.3	5	20	34	76	229	2,690	91.6



Digital I/O/PFI

Static Characteristics

Number of channels

Digital input

USB-6210/6211/6215	4 (PFI <0..3>/P0.<0..3>)
USB-6218	8 (PFI <0..3>/P0.<0..3>, PFI <8..11>/P0.<4..7>)

Digital output

USB-6210/6211/6215	4 (PFI <4..7>/P1.<0..3>)
USB-6218	8 (PFI <4..7>/P1.<0..3>, PFI <12..15>/P1.<4..7>)

Digital input or output

USB-6212/6216 Screw Termination	32 total, 16 (P0.<0..15>), 16 (PFI <0..7>/P1.<0..7>, PFI <8..15>/P2.<0..7>)
USB-6212/6216 Mass Termination	24 total, 8 (P0.<0..7>), 16 (PFI <0..7>/P1.<0..7>, PFI <8..15>/P2.<0..7>)

Ground reference

D GND

Pull-down resistor

USB-6210/6211/6215/6218	47 k Ω \pm 1%
USB-6212/6216	50 k Ω typical, 20 k Ω minimum

Input voltage protection ¹

\pm 20 V on up to 8 pins

PFI Functionality

USB-6210/6211/6215/6218

PFI <0..3>, PFI <8..11>/Port 0

Functionality

Static digital input, timing input

Debounce filter settings

125 ns, 6.425 μ s, 2.56 ms, disable; high and low transitions; selectable per input

PFI <4..7>, PFI <12..15>/Port 1

Functionality

Static digital output, timing output

Timing output sources

Many AI, AO, counter timing signals

USB-6212/6216 PFI <0..15>

Functionality

Static digital input, static digital output, timing input, timing output

Timing output sources

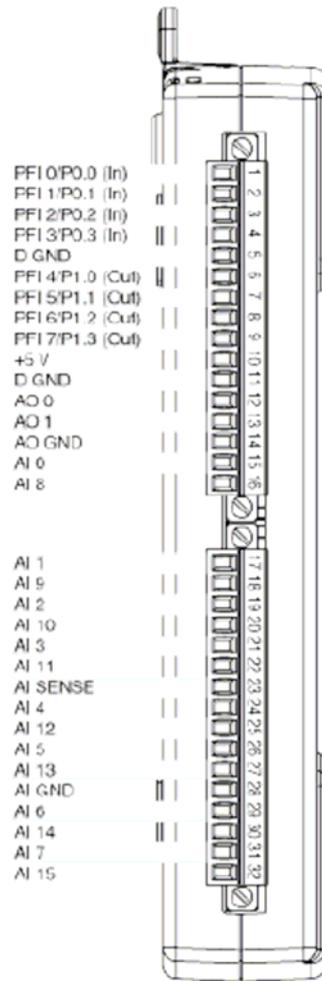
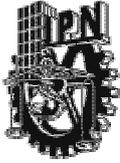
Many AI, AO, counter timing signals

Debounce filter settings

125 ns, 6.425 μ s, 2.56 ms, disable; high and low transitions; selectable per input

Maximum Operation Conditions

Level	Min	Max
I_{O_L} output low current	—	16 mA
I_{O_H} output high current	—	-16 mA



USB-6211/6215 Pinout