

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA UNA CALDERA
PIROTUBULAR CON ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE
SU FUNCIONAMIENTO**

Informe de Habilitación Profesional
presentado en conformidad a los requisitos
para optar al Título de Ingeniero Civil
Mecánico

Profesor Guía:

Sr. LUIS CERDA MISKULINI

ALAN FABIÁN GODOY ARROYO

CONCEPCIÓN – CHILE

2017

Dedicatoria

El presente trabajo se lo dedico a las personas más importantes en mi vida, mis padres, Mónica Arroyo Osses y Jorge Godoy Reyes por su apoyo incondicional durante estos 6 años y a lo largo de todos mis estudios, por el gran esfuerzo que han hecho para darme la oportunidad de estudiar y ser alguien en la vida, por creer en mí, entregarme lo mejor y enseñarme a nunca rendirme.

También a mis hermanas y hermano que han sido parte importante de vida desde el día en que nací, por estar conmigo en los momentos buenos y aún más en los malos, apoyándome, aconsejándome y dándome ánimo.

Agradecimientos

Le agradezco a Dios por haberme acompañado, guiado, darme las fuerzas y salud para finalizar el presente tema de Habilitación Profesional.

Le agradezco a mi profesor guía el Sr. Luis Cerda Miskulini por brindarme su paciencia, apoyo, disposición, simpatía, entusiasmo, conocimientos y experiencias a lo largo de este importante trabajo. Asimismo, por su orientación y consejos que me ayudaron muchísimo. Además, agradecer al Sr. Daniel Pradenas Villalobos por su colaboración, disposición y simpatía que me entregó de principio a fin en la elaboración del presente proyecto.

También quisiera agradecer al Sr. César Garrido Garrido por su disposición, orientación y apoyo desde un principio en la confección del presente tema y desarrollo de este mismo.

Muchas gracias, a todos ustedes.

RESUMEN

El presente informe de Habilitación Profesional tuvo como objetivo diseñar un sistema de monitoreo que permitiera la adquisición de variables de operación y rendimiento térmico de una caldera pirotubular ubicada en el edificio de laboratorios y talleres del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Bío-Bío.

Para llevar a cabo lo anterior, se procedió a estudiar y aplicar conocimientos del mundo de la adquisición de datos, en cuanto a tarjetas o módulos de adquisición de datos, software LabVIEW, controladores y módulos complementarios que ayudaron a programar la adquisición de datos y el cálculo de su rendimiento térmico.

En segundo lugar, se definieron aquellas variables que influyen de manera directa en el cálculo del rendimiento térmico directo e indirecto. Una vez identificadas se seleccionó un sensor de presión de vapor, un caudalímetro y una termocupla tipo J para el agua de alimentación, un caudalímetro para el combustible gas propano y un termómetro a tensión con señal de salida eléctrica para los gases de combustión. Asimismo se eligió el módulo NI 9229 debido a su capacidad de resolución, frecuencia de muestreo y rango de entrada para adquirir las señales de presión manométrica de vapor, flujo volumétrico de agua, flujo de combustible y temperatura de los gases. El otro módulo NI 9219 se escogió puesto que posee una característica de compensación por unión fría que permite eliminar automáticamente el voltaje generado por punta fría proveniente de la termocupla. Por último se efectuó el código de programación para la obtención de las variables más importantes de operación y para el cálculo del rendimiento térmico, en el software LabVIEW, tanto en la ventana de panel frontal como, en la de diagrama de bloques.

Realizado un ensayo de simulación con el programa, utilizando mediciones de una experiencia anterior, los resultados obtenidos de rendimiento térmico directo e indirecto arrojaron una diferencia de un 0,72%. Por tanto, se comprueba la concordancia entre ambos rendimientos y se comprobó que las mayores pérdidas de energía son: por evaporación agua formada (8,93%), por gases secos (8,28%) y por radiación conducción y convección a través de las paredes de la caldera (6,08%), lo que sumado representa un 23,29% en energía desaprovechada.

Efectuado el estudio de inversión correspondiente para implementar el diseño del sistema de adquisición de datos, se obtuvo un valor de US\$ 9179.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Generalidades..... | 1 |
| 1.2. Origen del tema..... | 2 |
| 1.3. Alcances del presente trabajo..... | 3 |
| 1.4. Objetivos..... | 3 |
| 1.4.1. Objetivo general..... | 3 |
| 1.4.2. Objetivos específicos..... | 3 |
| 2. TIPOS DE CALDERAS Y SUS CARACTERÍSTICAS | 4 |
| 2.1. Descripción de una caldera..... | 4 |
| 2.1.1. Funcionamiento..... | 4 |
| 2.2. Clasificación de las calderas..... | 5 |
| 2.3. Características principales de calderas pirotubulares y acuotubulares..... | 7 |
| 2.3.1. Calderas acuotubulares..... | 7 |
| 2.3.2. Calderas pirotubulares..... | 10 |
| 2.3.3. Accesorios de control de calderas..... | 14 |
| 3. DESCRIPCIÓN DEL GENERADOR DE VAPOR DEL LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS | 22 |
| 3.1. Características técnicas de la caldera..... | 22 |
| 3.1.1. Dimensiones del generador de vapor..... | 23 |
| 3.1.2. Operación apropiada de la caldera..... | 26 |
| 3.2. Características técnicas del quemador de la caldera..... | 27 |
| 3.3. Controles de funcionamiento seguro de la caldera..... | 29 |
| 3.3.1. Control de presión..... | 29 |
| 3.3.2. Control de nivel de agua..... | 30 |
| 3.4. Alimentación de Agua a la Caldera..... | 31 |
| 3.5. Características de la bomba de alimentación..... | 32 |

| | |
|---|-----------|
| 3.5.1. Principales características | 32 |
| 3.5.2. Características del motor | 33 |
| 4. MARCO TEÓRICO | 34 |
| 4.1. Balance térmico..... | 34 |
| 4.1.2. Balance térmico simplificado..... | 34 |
| 4.1.3. Cálculo de las ganancias de calor | 35 |
| 4.1.4. Cálculo del calor al agua o capacidad calórica (Q) | 36 |
| 4.1.5. Cálculo de las pérdidas de calor | 36 |
| 4.1.5.1. Energía perdida en los productos de combustión ($E_{p.c.}$)..... | 36 |
| 4.1.5.2. Energía perdida por radiación a través de paredes de la caldera ($E_{r.p.}$).... | 37 |
| 4.1.5.3. Energía perdida por evaporación agua formada y humedad del combustible | 38 |
| 4.1.5.4. Pérdidas de energía que considera la norma ASME PTC 4.0..... | 38 |
| 4.2. Rendimiento térmico..... | 41 |
| 4.2.1. Rendimiento Térmico directo (η_D) | 41 |
| 4.2.2. Rendimiento Térmico indirecto (η_I)..... | 41 |
| 4.2.2.1. Valores prácticos de rendimientos | 42 |
| 5. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS..... | 43 |
| 5.1. ¿Qué es la Adquisición de Datos (DAQ)?..... | 43 |
| 5.1.1. ¿Qué es un Sensor?..... | 43 |
| 5.2. Dispositivos y tarjetas DAQ | 44 |
| 5.2.1. ¿Qué es un Dispositivo DAQ? | 44 |
| 5.2.3. Componentes clave de medidas para un dispositivo DAQ..... | 47 |
| 5.2.3.1. Acondicionamiento de señales | 47 |
| 5.2.3.2. Convertidor Analógico Digital (ADC) | 48 |
| 5.2.3.3. Bus del PC..... | 48 |
| 5.2.3.4. PC y software | 48 |

| | |
|--|-----------|
| 5.2.3.5. Software controlador..... | 49 |
| 5.2.3.6. Software de aplicación..... | 49 |
| 5.3. Software de adquisición de datos | 49 |
| 6. DISEÑO DEL SISTEMA DE MONITOREO PARA EL GENERADOR DE VAPOR | 53 |
| 6.1. Identificación y caracterización de los sensores o transductores | 53 |
| 6.1.1. Sensores para medición de temperatura | 54 |
| 6.1.1.1. Detector de temperatura resistivo (RTD)..... | 54 |
| 6.1.1.2. Termocupla..... | 54 |
| 6.1.2. Sensores para medición de presión..... | 55 |
| 6.1.2.1. Transductor de presión | 55 |
| 6.1.3. Sensores para medición de nivel | 55 |
| 6.1.3.1. Medición de nivel | 55 |
| 6.1.4. Sensores para medición de caudal..... | 56 |
| 6.1.4.1. Medición de caudal..... | 56 |
| 6.1.5. Sistema de interconexión..... | 57 |
| 6.2. Hardware para adquisición de datos National Instruments | 58 |
| 6.2.1. Módulo NI 9219 (módulo de entradas analógicas)..... | 58 |
| 6.2.2. Módulo NI 9229 (módulo de entradas analógicas)..... | 61 |
| 6.3. Levantamiento del sistema de medición del generador de vapor | 63 |
| 6.3.1. Caracterización de instrumentos de medición del generador de vapor | 64 |
| 6.4. Selección de sensores para variables de presión de vapor, temperatura y caudal de agua y caudal de combustible..... | 64 |
| 6.4.1. Sensor de presión | 64 |
| 6.4.1.1. Montaje del transductor de presión | 65 |
| 6.4.2. Sensor de temperatura | 65 |
| 6.4.2.1. Montaje de los sensores de temperatura | 65 |
| 6.4.3. Caudalímetros | 66 |

| | |
|---|------------|
| 6.4.3.1. Montaje caudalímetro para agua de alimentación caldera | 66 |
| 6.4.3.2. Montaje caudalímetro para combustible propano..... | 66 |
| 6.5. Diseño del sistema adquisición de datos y estudio teórico experimental del generador de vapor | 67 |
| 6.5.1. Procedimiento para crear un dispositivo simulado DAQmx..... | 69 |
| 6.5.1.1. Consideraciones para el uso de Dispositivos Simulados NI-DAQmx | 70 |
| 6.5.2. Entorno de configuración del DAQ Assistant | 71 |
| 6.5.2.1. Configuración DAQ Assistant para una entrada analógica..... | 77 |
| 6.5.3. Diseño de la interfaz en el panel frontal..... | 83 |
| 6.5.4. Programación gráfica en el diagrama de bloques de LabVIEW | 86 |
| 6.5.4.1. Programación gráfica rendimiento térmico directo | 86 |
| 6.5.4.2. Programación pérdidas de calor por gases de combustión, por radiación y por evaporación agua formada y humedad del combustible | 89 |
| 6.5.4.3. Programación gráfica para determinar rendimiento térmico indirecto..... | 93 |
| 6.5.4.4. Programación gráfica DAQ Assistant en el diagrama de bloques de LabVIEW | 94 |
| 6.6. Verificación de operación del sistema de adquisición de datos y estudio teórico experimental..... | 97 |
| 6.7. Estudio de costos de inversión | 102 |
| 7. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES | 103 |
| 7.1. Recomendaciones..... | 103 |
| 7.2. Conclusiones..... | 103 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA Y LINKOGRAFÍA..... | 106 |
| 8.1. Bibliografía | 106 |
| 8.2. Linkografía..... | 106 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

Los sistemas de adquisición de datos, como su nombre da a entender, son procesos que se usan para recoger información y documentar o analizar un fenómeno. En su forma más sencilla, un técnico que registra la temperatura de un horno en un papel está ejecutando una adquisición de datos. A medida que el avance de la tecnología ha progresado se ha simplificado el proceso de adquisición de datos, lo que ha llevado a desarrollar sistemas inteligentes que resuelvan los más diversos problemas de manera precisa, versátil y fiable. En consecuencia, se han desarrollado métodos modernos para la inspección y visualización de parámetros de funcionamiento de equipos en todos los ámbitos de la vida humana, no tan solo en la industria propiamente tal, sino que también en el hogar, la agricultura, la ganadería, los comercios, el transporte, las comunicaciones, etc.

Por otro lado, los generadores de vapor son parte esencial en la industria hoy en día, por lo que es indispensable llevar un control y monitoreo de sus variables de operación relevantes. Es por eso que el uso de sistemas de adquisición de datos se ha transformado en una herramienta de gran provecho para el monitoreo continuo y la toma de decisiones de forma adecuada y eficaz en muchos procesos industriales.

Las denominadas señales eléctricas procedentes de los sensores implementados en equipos o maquinarias de procesos industriales monitoreados se introducen en instrumentos de adquisición de datos que digitalizan las señales y las envían a un disco duro o a otro medio de almacenamiento desde el que puedan manipularse y analizarse para mejorar la eficiencia de una empresa, garantizar la fiabilidad o para asegurar el funcionamiento de algunas maquinarias, haciendo uso de herramientas de software especializadas.

El software Lab-VIEW en la actualidad es una herramienta muy utilizada debido a que permite diseñar sistemas de control y adquisición de datos (SCADA) con interfaz de visualización muy amigable con el usuario además de tener funciones avanzadas para el desarrollo de los sistemas.

Es así como la adquisición de datos desempeña un papel fundamental en campos como la investigación en las ciencias de la vida, la ingeniería civil y el mantenimiento industrial. Dicho proceso es adaptable a cualquier espacio, utilidad pública o laboratorio de investigación, entre otros ámbitos en los que se requiera el uso de un dispositivo de adquisición de datos que supervise en silencio un parámetro u otro.

1.2. Origen del tema

De acuerdo a las nuevas exigencias académicas y actualización de la malla curricular, el Departamento de Ingeniería Mecánica ha establecido la necesidad de realización de actividades prácticas de laboratorios que refuerzan los conceptos teóricos de las máquinas de termofluidos. En consecuencia se hace indispensable actualizar los protocolos de laboratorios (guías, objetivos de la experiencia, tópicos de análisis de resultados, entre otros).

El avance tecnológico hace posible la utilización de nuevos y modernos sistemas de monitoreo y control de señales analógicas (presión, temperatura, flujo volumétrico), lo que permite modernizar los actuales sistemas. En tal sentido se propone diseñar un sistema de adquisición de datos y la aplicación de software de visualización con el objetivo de facilitar el aprendizaje de los contenidos para los alumnos(as) durante las actividades de laboratorio, para un generador de vapor.

Asimismo los estudiantes, además de conocer los procesos correspondientes, podrán relacionarse en el ámbito de la instrumentación y programación, de tal manera que se motiven a realizar mejoras al sistema de monitoreo, como por ejemplo desarrollar nuevos programas de instrumentación virtual que les permita observar nuevas características de la caldera o un desafío más grande como diseñar un sistema de control para dicha máquina.

Por estos motivos se pretende entregar al alumno(a) un medio de interacción en el cual pueda visualizar mediante un ordenador y el software LabView, las variables físicas de operación relevantes y obtener el rendimiento térmico de la caldera.

1.3. Alcances del presente trabajo

El presente trabajo es la primera etapa de diseño del sistema de adquisición de datos del generador de vapor y que incorporará tanto la programación gráfica en el software LabVIEW, como la obtención de señales analógicas de entrada, las cuales permitirán determinar parámetros de operación bajo diferentes condiciones de trabajo del generador de vapor.

Finalmente se obtendrán el rendimiento térmico directo e indirecto del generador de vapor a efecto de comparar y analizar la concordancia entre ellos o concluir las causas que influyen en sus diferencias.

También se incorporará el presupuesto detallado de los sensores, tarjetas de adquisición de datos, cables de conexión, y otros elementos, para que en una segunda etapa se pueda implementar físicamente y así obtener lecturas de datos de variables analógicas de entrada en tiempo real de funcionamiento. A través de gráficos y tablas se ilustrará el comportamiento del generador de vapor. Lo anterior basado en la imposibilidad de poder adquirir, en un plazo razonable todos los insumos que se detallaran en el estudio.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de monitoreo que permita la adquisición de señales de las variables de operación, de una caldera pirotubular ubicada en el edificio de laboratorios y talleres del Departamento de Ingeniería Mecánica, para determinar su rendimiento térmico.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar y seleccionar los sensores específicos para cada una de las variables.
- Identificar y seleccionar los dispositivos de adquisición de datos (DAQ) necesarios para digitalizar señales analógicas.
- Configurar las tarjetas de adquisición de datos (National Instruments) con respecto al software seleccionado.
- Programación de código en plataforma LabVIEW, que permita visualizar las señales obtenidas en los respectivos sensores.
- Asociar una experiencia práctica de balance térmico de la caldera que permita utilizar el sistema de monitoreo como herramienta de aprendizaje para los estudiantes.

2. TIPOS DE CALDERAS Y SUS CARACTERÍSTICAS

2.1. Descripción de una caldera

Es un recipiente metálico, cerrado, destinado a producir vapor o calentar agua, mediante la acción del calor a una temperatura superior a la del ambiente y presión mayor que la atmosférica.



Figura 2.1 Caldera Pirotubular

2.1.1. Funcionamiento

Funcionan mediante transferencia de calor, producido generalmente al quemarse un combustible, al agua contenida o circulando dentro de un recipiente metálico.

En toda caldera se distinguen dos zonas importantes:

a) Zona de liberación de calor u hogar o cámara de combustión:

Es el lugar donde se quema el combustible. Puede ser interior o exterior con respecto al recipiente metálico.

Interior: El hogar se encuentra dentro del recipiente metálico o rodeado de paredes refrigeradas por agua.

Exterior: Hogar construido fuera del recipiente metálico. Esta parcialmente rodeado o sin paredes refrigeradas por agua.

La transferencia de calor en esta zona ocurre principalmente por radiación.

b) Zona de tubos:

Es la zona donde los productos de la combustión (gases o humos) transfieren calor al agua principalmente por convección (gases-agua). Está constituida por tubos, dentro de los cuales pueden circular los gases de combustión o el agua.

2.2. Clasificación de las calderas

En nuestro país la clasificación de las calderas de acuerdo al mayor uso sería el siguiente:

2.2.1. Atendiendo a su posición:

- Horizontales
- Verticales

2.2.2. Atendiendo a su instalación:

- Fija o estacionaria
- Móviles o portátiles

2.2.3. Atendiendo a la ubicación del hogar:

- De hogar interior
- De hogar exterior

2.2.4. Atendiendo a la circulación de los gases:

- Recorrido en un sentido (de un paso)
- Con retorno simple (de dos pasos)
- Con retorno doble (de tres pasos)

2.2.5. Con respecto a su forma de calefacción:

- Cilíndrica sencilla de hogar exterior
- Con un tubo hogar (liso o corrugado)
- Con dos tubos hogares (liso o corrugado)
- Con tubo Galloway (calderas horizontales o verticales)
- Con tubos múltiples de humo (igneotubulares o piro tubulares)
- Con tubos múltiples de agua (hidrotubulares o acuotubulares)
- Con tubos múltiples de agua y tubos múltiples de humo (acuopiro tubular o mixtas)

2.2.6. De acuerdo a la presión del vapor que producen:

- De baja presión : de 0 a menos de 3,5 kg/cm²
- De mediana presión : de 3,5 a menos de 15 kg/cm²
- De alta presión : de 15 a menos de 42 kg/cm²
- De gran presión : más de 42 kg/cm²

2.2.7. Con respecto al volumen de agua que contienen en relación con su superficie de calefacción:

- De gran volumen de agua (más de 150 lt. x m² de superficie de calefacción SC)
- De mediano volumen de agua (entre 70 y 150 lt. x m² de SC)
- De pequeño volumen de agua (menos de 70 lt. x m² de SC)

2.2.8. Según su utilización:

- De vapor: - saturado (húmedo seco)
- sobrecalentado
- De agua caliente

2.2.9. Según la circulación del agua dentro de la caldera:

- Circulación natural: El agua circula por efecto térmico
- Circulación forzada: El agua se hace circular mediante bombas.

2.2.10. Según el tipo de combustible:

- De combustible sólido
- De combustible líquido
- De combustible gaseoso

2.2.11. Según la circulación del agua y de los gases calientes en la zona de tubos de las calderas. Se tienen dos tipos generales de calderas.

a) Piro-tubulares o de tubos de humos

En estas calderas los humos pasan por dentro de los tubos cediendo su calor al agua que los rodea.

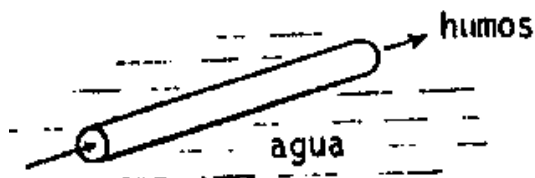


Figura 2.2 Circulación del humo o gases

b) Acuotubulares o de tubos de agua:

El agua circula por dentro de los tubos, captando calor de los gases calientes que pasan por el exterior.



Figura 2.3 Circulación del agua

2.3. Características principales de calderas pirotubulares y acuotubulares

2.3.1. Calderas acuotubulares

Se componen de uno o más cilindros que almacenan el agua y vapor (colectores) unidos por tubos de pequeño diámetro por cuyo interior circula el agua.

Estas calderas son apropiadas cuando los requerimientos de vapor, en cantidad y calidad son altos. Se construyen para capacidades mayores a 5000 kg/h de vapor (5 ton/h), con valores máximos en la actualidad de 2000 ton/h. Permiten obtener vapor a temperaturas del orden de 500 °C y presiones de 200 kg/cm² o más.

Entre sus características se puede mencionar:

- Debido a que utilizan tubos de menor diámetro, aceptan mayores presiones de trabajo, absorben mejor las dilataciones y son más seguras.
- Su peso en relación a la capacidad es reducido
- Requieren poco tiempo de puesta en marcha
- Son más eficientes.
- No se construyen para bajas capacidades debido a que su construcción más compleja las hacen más caras que las calderas pirotubulares.
- Son empleadas casi exclusivamente cuando interesa obtener elevadas presiones y rendimiento, debido a que los esfuerzos desarrollados en los tubos por las altas presiones se traducen en esfuerzos de tracción en toda su extensión.

2.2.1.1. Clasificación

Las calderas acuotubulares se distinguen de acuerdo a la siguiente clasificación:

- Tubos rectos
- Tubos curvados de dos o más colectores
- Circulación forzada

2.2.1.2. Principio de funcionamiento

En la figura 2.4 se representa una caldera con un solo tubo de agua. Sólo una rama del tubo se calienta, ya que la otra se encuentra protegida por una pantalla aisladora. En la rama izquierda, el calor calienta el agua, generando vapor y haciendo que ambos (agua y vapor) se muevan hacia arriba.

Esta mezcla entra al colector y el agua fría pasa a ocupar su lugar en el tubo calentado. El agua fría se encuentra en el tubo no calentado y en la parte inferior del colector.

De esta forma, existe un movimiento continuo de agua-vapor en la dirección que señalan las flechas, en las que siempre la mezcla de agua caliente y vapor sube al colector, mientras el agua fría del fondo del colector baja y ocupa el lugar de esta mezcla.

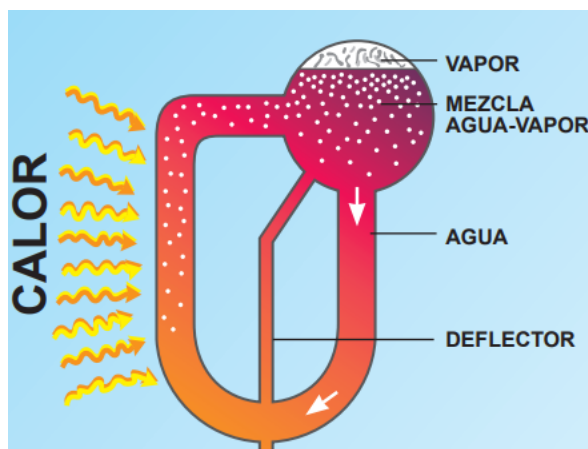


Figura 2.4 Esquema de funcionamiento

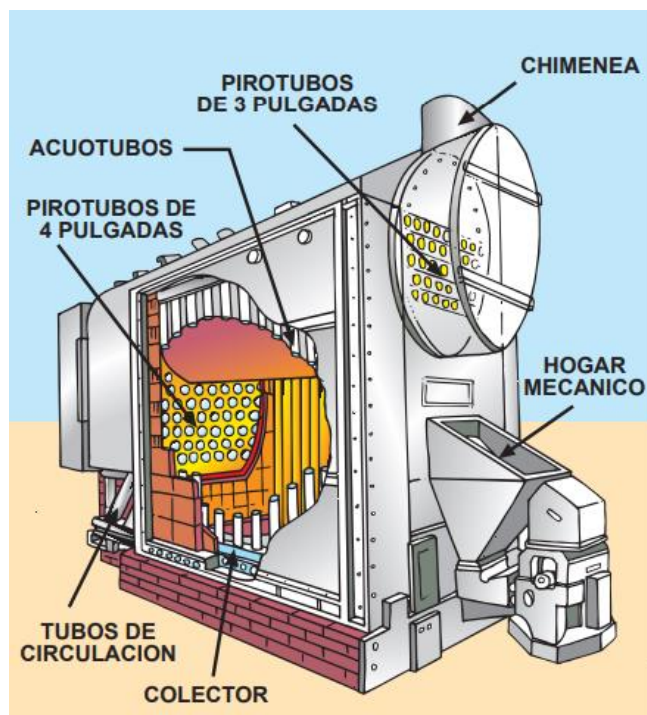


Figura 2.5 Caldera ERIC CITY Acuotubular

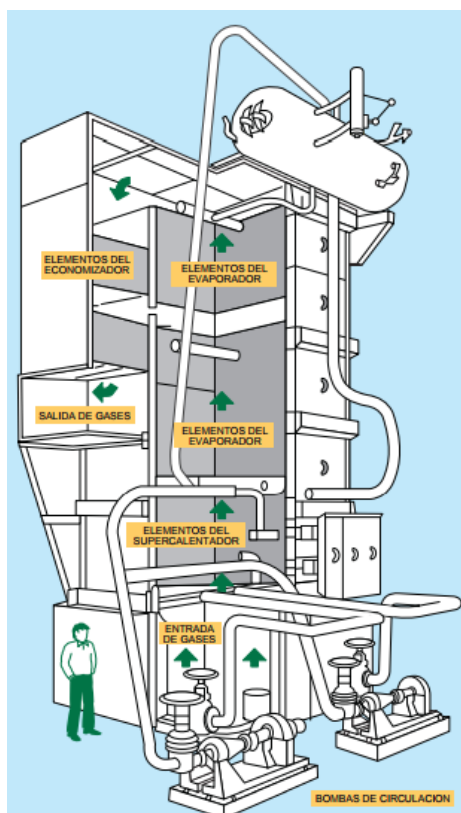


Figura 2.6 Caldera LA MONT

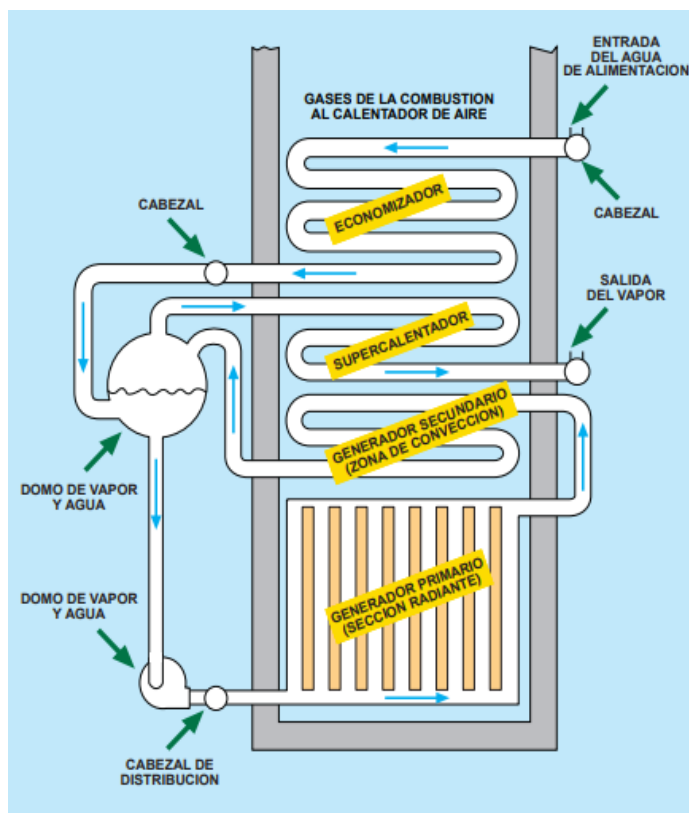


Figura 2.7 Funcionamiento Caldera LA MONT

2.3.2. Calderas piro-tubulares

Recipientes metálicos, comúnmente de acero, de formas cilíndricas o semicilíndricas, atravesados por grupos de tubos por cuyo interior circulan los gases de combustión. Por problemas de resistencia de materiales, su tamaño es limitado, sus dimensiones alcanzan a 5 m de diámetro y 10 m de largo. Se construyen para flujos máximos de 20.000 kg/h de vapor y sus presiones de trabajo no superan los 18 kg/cm².

Estas calderas son denominadas también igneotubulares y pueden ser verticales u horizontales. Entre las calderas verticales pueden encontrarse dos tipos con respecto a los tubos:

a) De tubos semisumergidos: El agua no cubre totalmente los tubos

b) De tubos totalmente sumergidos: Los tubos están totalmente cubiertos de agua

Pueden producir agua caliente o vapor saturado. En el primer caso se les instala un estanque de expansión que permite absorber las dilataciones de agua. En el caso de vapor poseen un nivel de agua a 10 o 20 cm sobre los tubos superiores. Están diseñadas para generar moderados caudales de vapor de baja y media presión superiores a las atmosféricas, aplicables en gran variedad de industrias para procesos de calentamiento.

Entre sus características se pueden mencionar:

- Sencillez de construcción
- Facilidad de inspección, reparación y limpieza
- Gran peso
- Lenta puesta en marcha
- Gran peligro en caso de explosión o ruptura por el gran volumen de agua almacenada

Las calderas horizontales con tubos múltiples de humo, hogar interior y retorno simple o doble retorno son las llamadas calderas escocesas y son las de aplicación más frecuente en nuestro país. Estas calderas, como cualquier otro tipo, pueden ser utilizadas con hogar para quemar carbón, leña o bien con quemadores de petróleo.

2.3.2.1. Clasificación

Las calderas pirotubulares se clasifican de acuerdo al esquema que se exhibe a continuación:

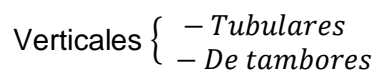
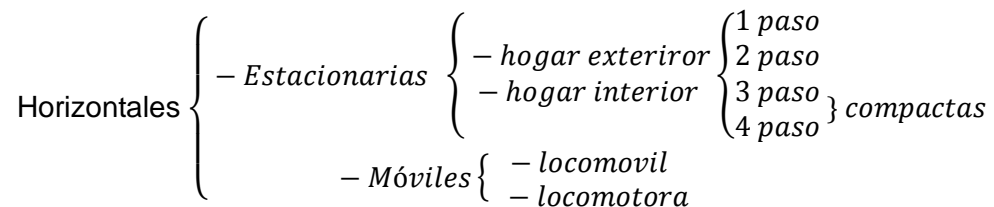


Figura 2.8. Esquema de clasificación



Figura 2.9 Pirotubular vertical



Figura 2.10 Pirotubular horizontal



Figura 2.11 Locomóvil

2.3.2.2. Principio de funcionamiento

El principal factor de funcionamiento son los gases calientes procedentes de la combustión. El combustible se quema en el hogar, donde tiene lugar la transmisión de calor por radiación, los gases resultantes, circulan a través de tubos que constituyen el haz tubular de la caldera, y donde tiene lugar el intercambio de calor por conducción y convección absorbiendo la energía generada por la flama.

Las puertas frontal y trasera proveen el hermetismo necesario para contener los gases de combustión calientes, según sea una o varias las veces que los gases pasan a través del haz tubular, se tienen las calderas de uno o de varios pasos. En el caso de calderas de varios pasos, en cada uno de ellos, los humos solo atraviesan un determinado número de tubos, cosa que se logra mediante las denominadas cámaras de humos. Una vez realizado el intercambio térmico, los humos son expulsados al exterior a través de la chimenea.

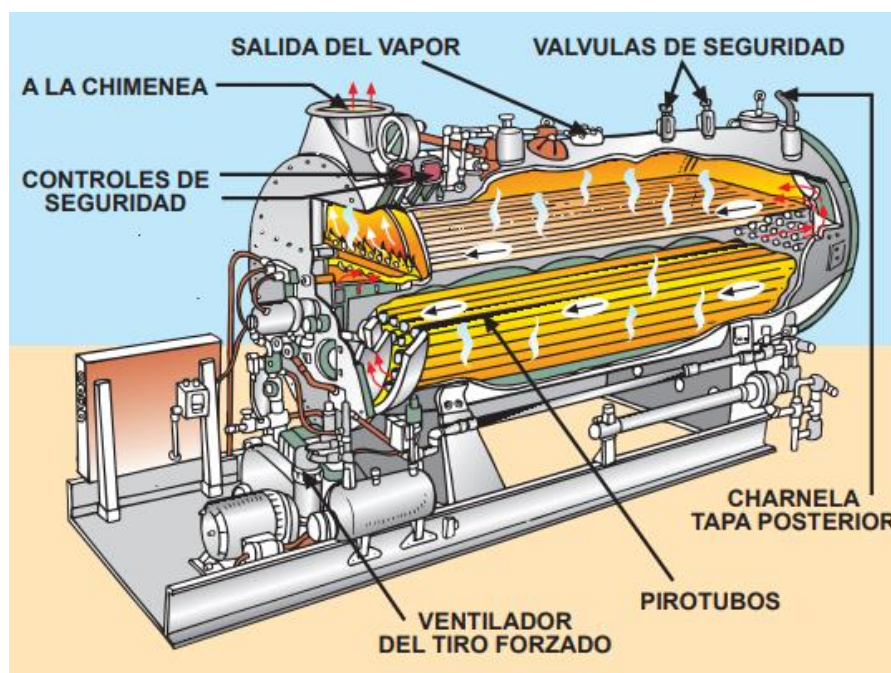


Figura 2.12 Caldera CLEAVER-BROOKS, de 4 pasos

2.3.2.3. Partes principales de una caldera pirotubular

Una caldera pirotubular está compuesta principalmente por tres partes bien definidas:

- a) Una caja de fuego donde va montado el hogar; esta caja puede ser de sección rectangular o cilíndrica; es de doble pared, por lo que el hogar queda rodeado de una masa de agua. Debido a esta doble pared las planchas tienen que reforzarse con tirantes o estayes (pernos o refuerzos con un orificio central para detectar filtraciones cuando se cortan por corrosiones o exceso de tensiones).
- b) Un cuerpo cilíndrico atravesado, longitudinalmente, por tubos de pequeño diámetro, por cuyo interior circulan los gases calientes.
- c) Una caja de humos, que es la prolongación del cuerpo cilíndrico, a la cual llegan los gases después de pasar por el haz tubular, para salir hacia la chimenea. Estas calderas trabajan, casi siempre, con tiraje forzado, el cual se consigue mediante un chorro de vapor de la misma caldera (vapor vivo) o utilizando vapor de escape de la máquina.

En síntesis, en una caldera pirotubular se pueden identificar las siguientes partes:

- **Quemador:** Sirve para quemar el combustible.
- **Hogar:** Alberga el quemador en su interior y en él se realiza la combustión del combustible utilizado y la generación de los gases calientes.
- **Tubos de intercambio de calor:** El flujo de calor desde los gases hasta el agua se efectúa a través de su superficie. También en ella se generan burbujas de vapor.
- **Separador líquido-vapor:** Es necesario para separar las gotas de agua líquida con los gases aún calientes, antes de alimentarla a la caldera.
- **Chimenea:** Es la vía de escape de los humos y gases de combustión después de haber cedido calor al fluido.
- **Carcasa:** Contiene el hogar y el sistema de tubos de intercambio de calor.

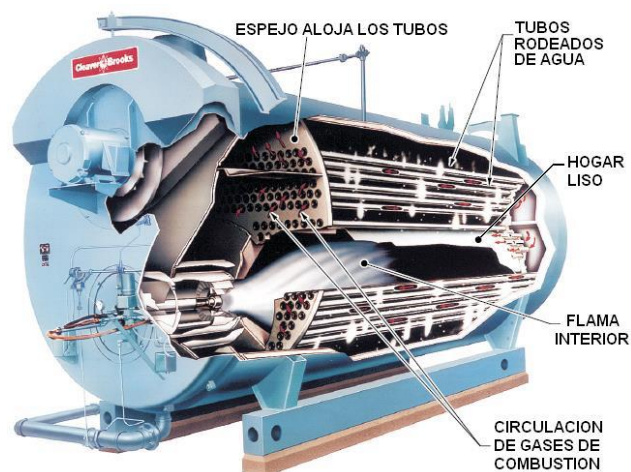


Figura 2.13 Cuerpo de la caldera

2.3.3. Accesorios de control de calderas

Para el control operativo de una caldera se han diseñado múltiples elementos. Dentro de los cuales se dan a conocer:

2.3.3.1. Controles límites de seguridad

Son aquellos controles que están destinados a suspender el funcionamiento del quemador. Una caldera está provista por los siguientes controles límites de seguridad.

- Control Límite Aire
- Control Límite de Alta Presión (Calderas que generan vapor).
- Control Límite de Alta Temperatura (Calderas que calientan agua).
- Control Límite de bajo Nivel de agua.
- Control Límite de Combustible.

Cada uno de ellos se calibra de acuerdo a la variable que se va a controlar y están conectados en serie, normalmente sus contactos están cerrados (en conducción) lo que permite el paso de una señal de corriente normalmente hacia el control principal de operación, este lo receipta y ordena que el quemador cumpla con el proceso que está destinado a realizar, en el caso de que uno de los controles detecte un sobre límite de cualquiera de las variables que están controlando, estos deben suspender el paso de la corriente.

2.3.3.2. Controles de llama

Es aquel sistema que gobierna el correcto funcionamiento del quemador, activando y desactivando elementos tales como: ventilador, dámper de entrada de aire, válvulas de combustible, bomba de combustible, transformador de ignición, sistema de ingreso de gas, y el más importante el control de seguridad de llama (FOTOCELDA).

El principio de funcionamiento de una fotocelda es que ante la presencia de luz este disminuye la resistencia eléctrica, hasta el punto en el que pueda pasar una corriente a través de ella y así activar al programador. En el caso de producir alguna falla de señal de llama, la fotocelda deja de conducir provocando que el valor de resistencia aumente e impida el paso de la corriente produciendo el bloqueo del programador.

En la actualidad, todos estos controles son automáticos, con capacidad de controlar todas las funciones del quemador, incluyendo los sistemas de seguridad y confiabilidad, sin necesidad de la atención constante del operador de calderas. Los detectores se basan en la emisión de rayos infrarrojos y ultravioletas, la señal de este es enviada al programador en forma de corriente eléctrica de orden de los miliamperios y de voltaje de 1.5 a 5 VDC. Es de gran importancia tener en cuenta que el valor de corriente es demasiado pequeño por tal razón se utiliza un circuito de amplificación especial para procesar esta señal con el tipo de sensor de llama que se está utilizando. Los amplificadores para el tipo de sensor de llama se distinguen por el color: rojo para infrarrojos y púrpura o morado para los ultravioletas.



Figura 2.14 Control de llama

2.3.3.3. Controles de nivel de agua.

La regulación del agua de alimentación que establece el nivel de la caldera depende de múltiples factores: del tipo de caldera, de la carga, del tipo de bomba y del control de presión del agua de alimentación.

Todas las calderas vienen equipadas con uno y hasta tres controles de nivel de agua que cumple las siguientes funciones:

- Indicar el nivel de agua.
- Suministrar agua de reposición.
- Interruptor de seguridad de bajo nivel.
- Válvulas de Prueba y Purga.

Generalmente los controles más utilizados son de tipo flotador colocado en el exterior de la caldera.

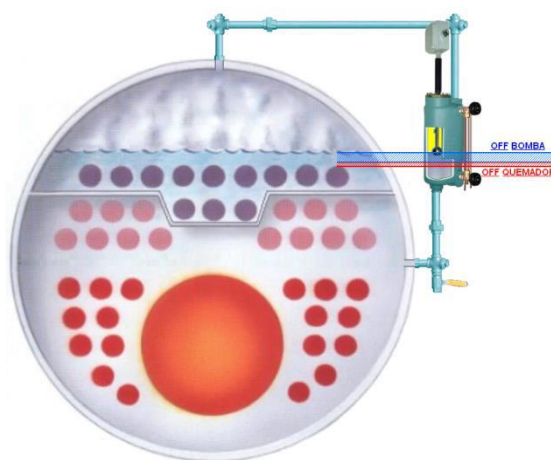


Figura 2.15 Control del nivel de agua en una caldera

En la figura 2.15 se visualiza el interior de una caldera conjuntamente con el control de nivel de tipo ON – OFF, en este se muestran dos zonas, la franja de color azul que representa el nivel normal de un correcto funcionamiento y la de color rojo que indica una zona de alerta para que el quemador se apague ya que es el nivel mínimo requerido de agua que debe contener para evitar daños en su interior.

El control de nivel contiene un espacio en el que se deslaza un flotador el mismo que activa y desactiva switches eléctricos. Cuando la caldera se encuentra vacía el flotador permanecerá en una posición baja y los contactos eléctricos en modo de conducción (ON), permitiendo el paso de corriente para la activación de la bomba de suministro de agua, en cambio cuando el flotador haya alcanzado una posición alta este se apagará debido a que los contactos eléctricos se abrieron por la presencia de agua en el interior del control de nivel.

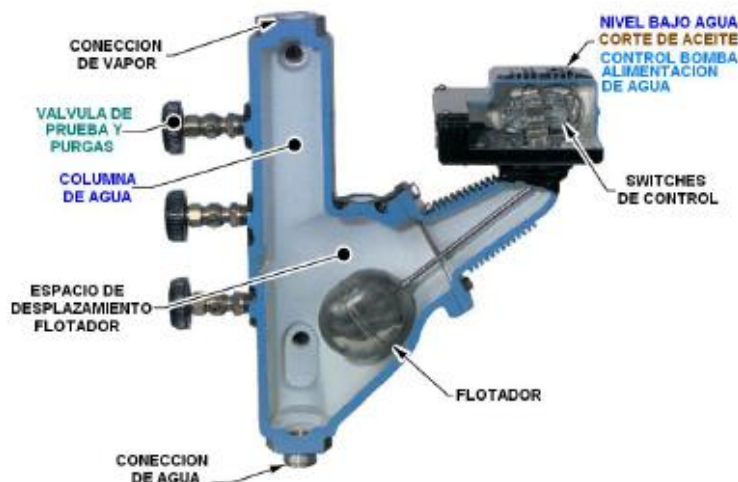


Figura 2.16 Partes de un control de nivel de agua

El control de nivel que se aprecia en la figura 2.17, cuenta con un vidrio indicador en el que se observa el nivel de apagado del quemador como también el nivel de encendido y apagado de la bomba de alimentación de agua.

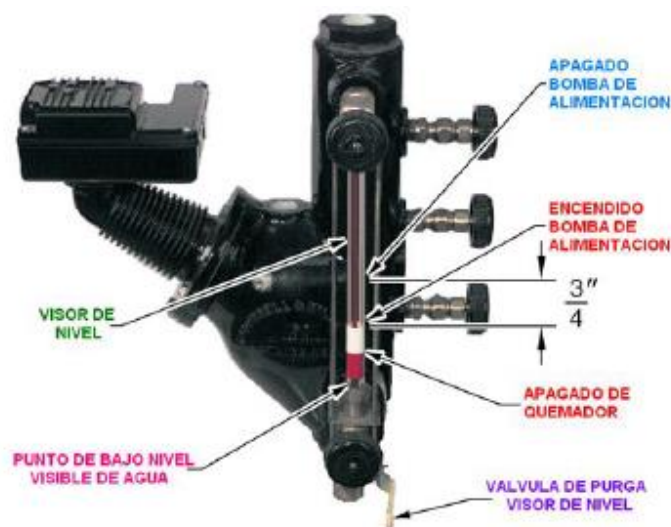


Figura 2.17 Control de nivel de tipo flotador con visor

La válvula de prueba y purga son usadas para verificar el nivel de agua en el interior de la caldera en caso de que en el vidrio no se evidencie o por falla del mismo, se pone a consideración otro método de control de nivel de agua por medio de estas válvulas.

2.3.3.4. Control de la Presión

Su función principal es apagar el quemador de la caldera cuando la presión de trabajo calibrada sobrepase sus límites por defectos del presostato de operación. La cantidad y cualidades de estos controles, varían de acuerdo a las condiciones operacionales de una caldera.

- Presostato de Operación: Es aquel control que registra la presión de vapor y automáticamente envía señales para encender el quemador cuando la demanda ha descendido.
- Presostato de Alto Límite: Es el control de presión que registra presiones superiores a la de operación y automáticamente apaga el quemador si el control de operación ha fallado.
- Presostato de Cambio Fuego Bajo a Fuego Alto: Este control trabaja con el control de operación para regular la cantidad de fuego en el quemador, el mismo que varía entre fuego bajo y fuego alto.



Figura 2.18 Presiones en caldera

Cuando la caldera empieza a funcionar la presión de arranque será de 0 PSI, a fuego bajo, a medida que se vaya generando vapor y la presión llegue a un intervalo de 25 a 30 PSI, se dará el cambio de fuego bajo a fuego alto desde ese momento entra en la presión de trabajo la misma será calibrada de acuerdo a los requerimientos del proceso mediante un presostato. Cuando la presión sobrepase en un 2 a 5 % la calibración del presostato, este desactivará el quemador. En casos extremos en que el presostato no desactive el quemador y la presión sobrepase de un 3 a 5% la presión máxima de trabajo, se dispara la válvula de seguridad permitiendo evacuar la sobrepresión del interior.

Es importante conocer que estos tipos de elementos de seguridad deben ser de acero inoxidable, generalmente las calderas son fabricadas para generar vapor a presiones superiores a la atmosférica, por tanto, se incluyen controles que funcionan en base a este parámetro.

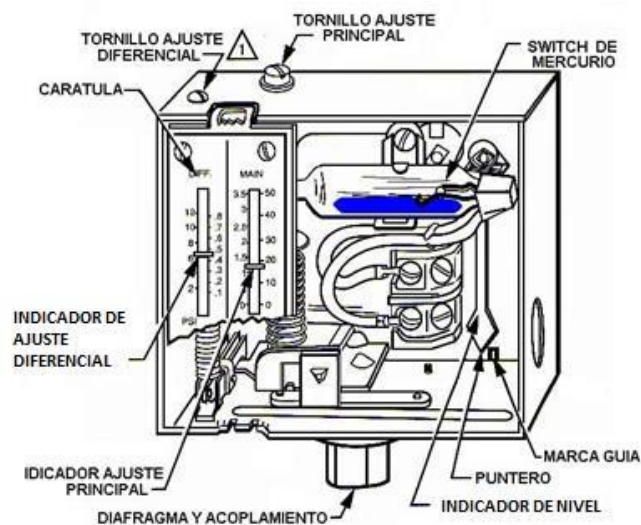


Figura 2.19 Presostato de alto límite

2.3.3.5. Controles de la cantidad de aire.

En la actualidad muchas calderas están equipadas con un switch de seguridad para el flujo de aire, el cual monitorea la fuerza de flujo de aire que envía el ventilador, este es un switch de presión diferencial que da la señal de entrada al circuito de control de llama, y es activado por la presión estática del ventilador. Este está ubicado o conectado en el cañón de aire del quemador.



Figura 2.20 Switch de flujo de aire

2.3.3.6. Controles de temperatura

El control de la temperatura en una caldera de vapor se puede realizar mediante la utilización de elementos primarios de medición ya sean termómetros, termocupla o RTD, se debe tomar en cuenta la medición de temperatura del vapor, así como también la temperatura de los gases en la chimenea.

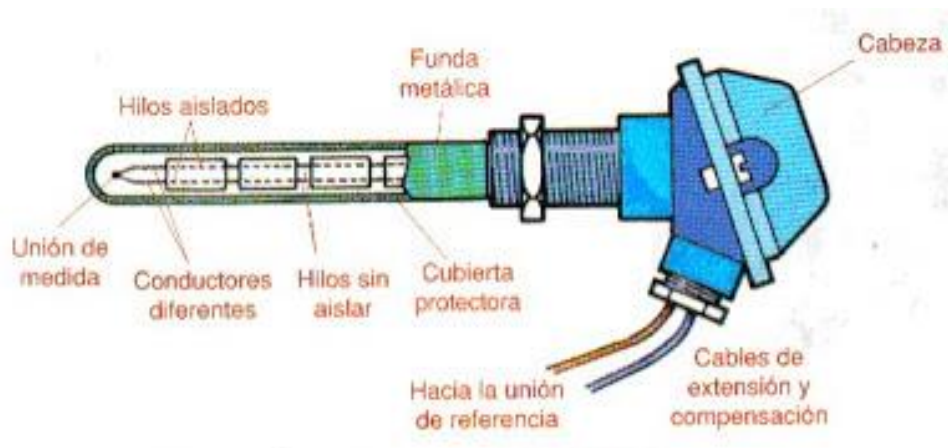


Figura 2.21 Partes de una termocupla

2.3.3.7. Control primario o Programador

El programador es el corazón del sistema de control, establece todos los parámetros operacionales de la caldera, él recibe señales de todos los controles, los analiza y ejecuta una operación acorde a la señal recibida.

El conjunto programador consta de cuatro partes básicas y son:

- Base
- Chasis
- Amplificador
- Programador



Figura 2.22 Programador

El programador ejecuta la secuencia del encendido de la caldera, paso a paso hasta completar el ciclo. Dicha secuencia se muestra en la figura 2.23.



Figura 2.23 Secuencia del programador

3. DESCRIPCIÓN DEL GENERADOR DE VAPOR DEL LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS

3.1. Características técnicas de la caldera

La caldera es de tipo pirotubular y está ubicada en el edificio de laboratorios y talleres del Departamento de Ingeniería Mecánica. Específicamente en el laboratorio de máquinas de termofluidos. Su uso está destinado sólo a desarrollar la experiencia de laboratorio denominada “generadores de vapor” perteneciente a la guía de máquinas de termofluidos. A continuación se presenta en tabla 3.1 las especificaciones técnicas principales del generador de vapor.

Tabla 3.1 Especificación técnica del generador de vapor

| Especificaciones técnicas | |
|----------------------------------|---|
| Tipo de caldera | Escocés pirotubular, horizontal de dos pasos de los gases |
| Tipo de tubos | Acero DIN 17175 sin costura |
| Espejos | Acero ASTM A515 de 10 mm de espesor |
| Fogón | Acero ASTM A515 de 8 mm de espesor |
| Superficie de calefacción | 10,5 m ² |
| Capacidad calórica (Q) | 156,68 kW o 134.750 kcal/h |
| Generación (masa nominal) | 250 kg _{vapor} /h |
| Presión de diseño | 7,5 kg/cm ² |
| Presión de operación | 5,0 kg/cm ² |
| Combustible | LPG (liquid petroleo gas) |
| Año fabricación | 2014 |
| Fabricante | RIGOBERTO MULLER L. FABRICACION CONSTRUCCION Y MONTAJE CALDERAS-ESTANQUES-PIPING-INTERCAMBIADORES |

3.1.1. Dimensiones del generador de vapor

En las imágenes 3.2 y 3.3 se aprecian las dimensiones de fabricación de la caldera de acuerdo a sus características de diseño predefinidas.

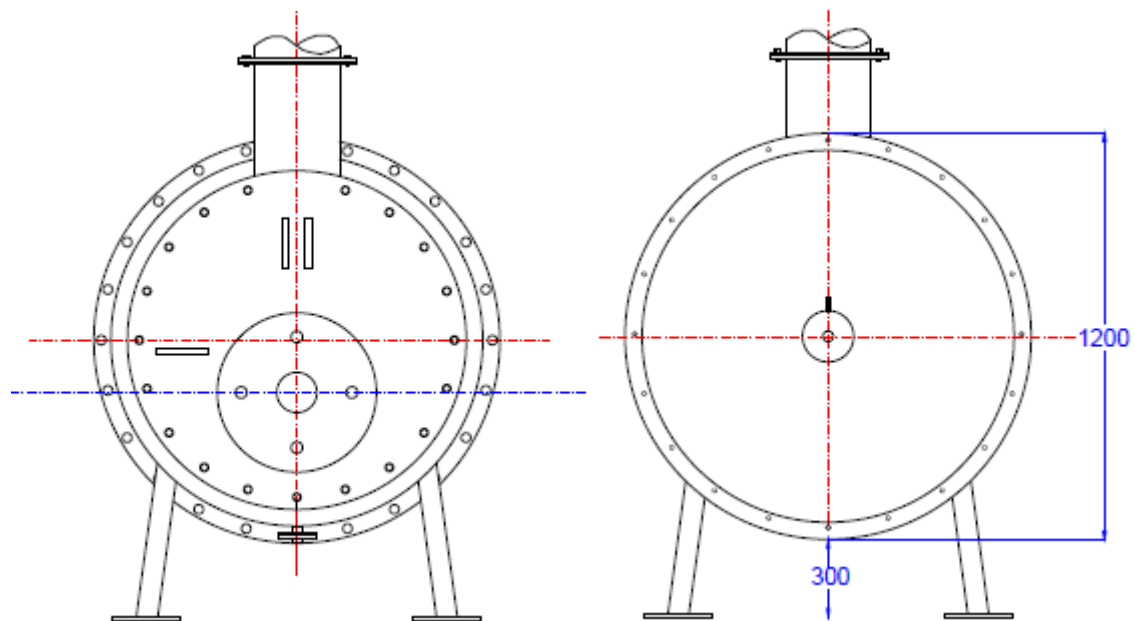


Figura 3.1 Vista Frontal

Figura 3.2 Vista Posterior

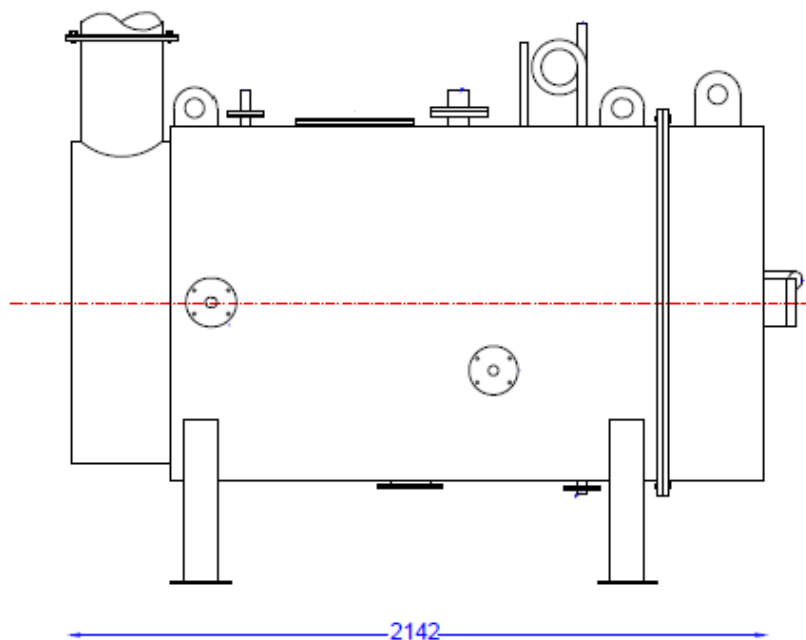


Figura 3.3 Vista Lateral

En las imágenes 3.4 y 3.5 se visualizan las características de fabricación por el interior de la caldera.

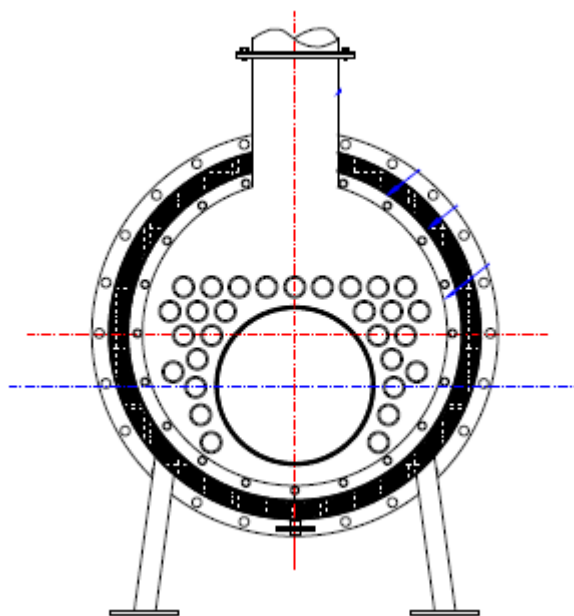


Figura 3.4 Vista interior Frontal

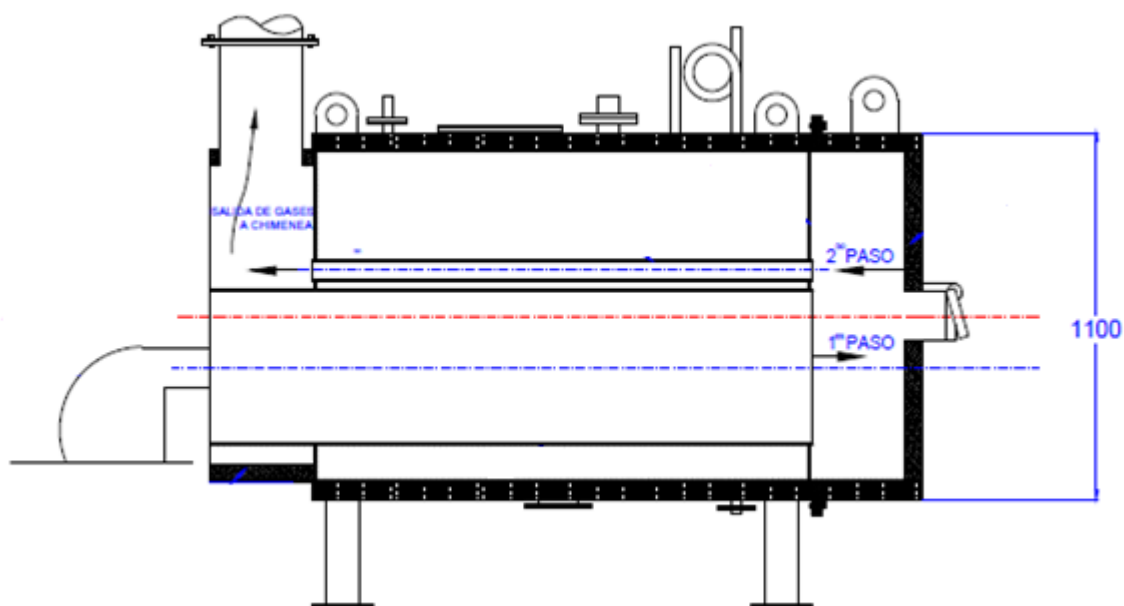


Figura 3.5 Vista interior Lateral

Nota: Para mayor información se adjunta plano de fabricación en el anexo A.

En las imágenes 3.6 y 3.7 se exhiben la sala de caldera y el generador de vapor

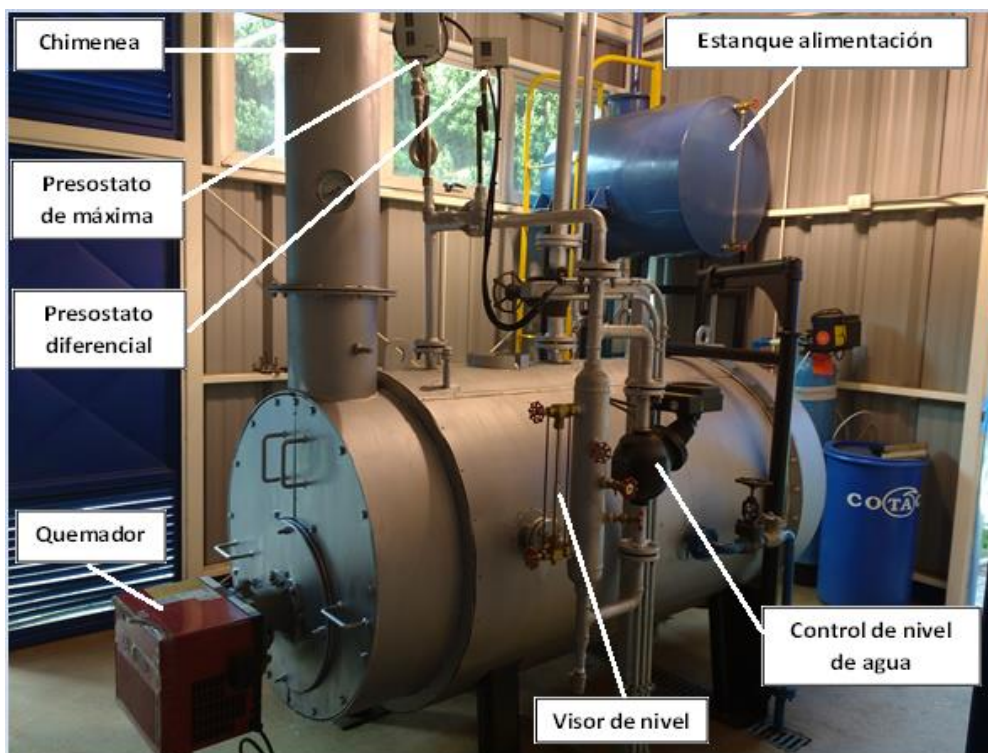


Figura 3.6 Generador de vapor

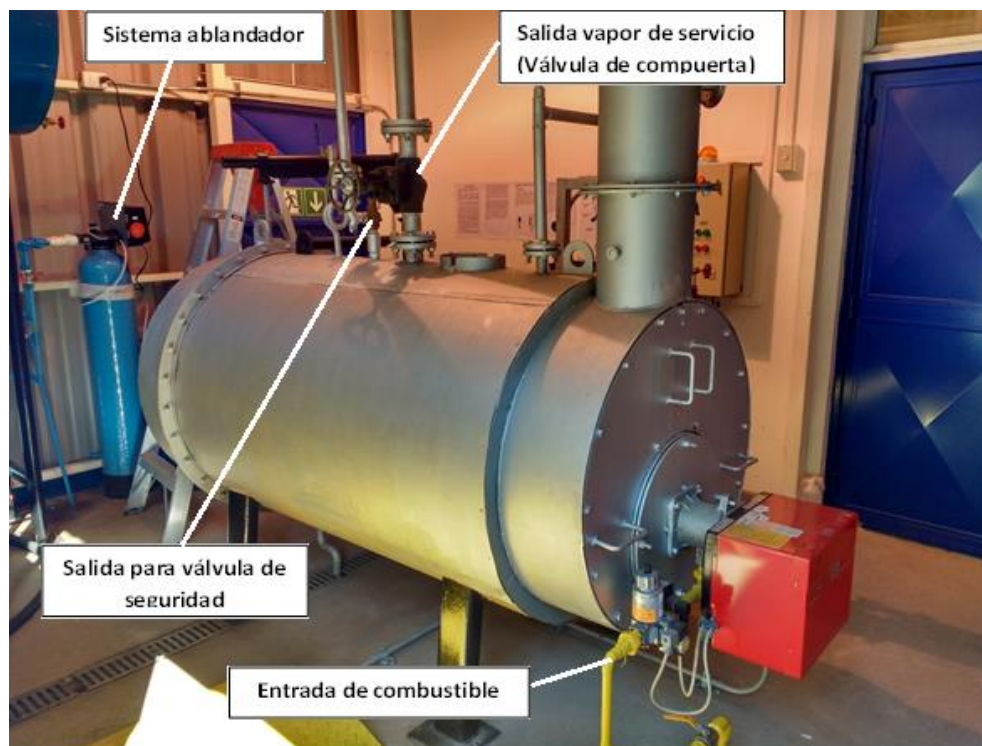


Figura 3.7 Sala caldera

3.1.2. Operación apropiada de la caldera

Para operar correctamente esta caldera deberá tenerse presente las siguientes consideraciones que son básicas:

Antes que nada realice una observación detenida y minuciosa tratando de detectar visualmente alguna anormalidad antes de comenzar a poner en marcha la caldera. Siempre se debe comenzar reconociendo y revisando el alineamiento de los distintos elementos y circuitos de “comienzo a final”, que estén en correcto funcionamiento, en cada alineamiento tratando de detectar alguna falla, conexión debilitada por fuerza mayor o accidentalmente (ej. un leve sismo anterior) para funcionar en forma segura evitando cualquier posible accidente al hacer la habilitación del respectivo circuito, especial atención merece y requiere el tren de gas ó “Circuito de GAS”., que incluye: estanque, filtro, fitting, relief, solenoides, válvulas, cañerías que incluso la línea que va en la parte exterior enterrada, donde puede haber posible daños, rotura, falla de soldaduras, fugas, acumulación de gas en algún rincón, esquina, alta o baja a veces de muy difícil detección, etc.

Para operar un generador de vapor (caldera más sus accesorios y anexos) por pequeña que sea la unidad, primero hay que conocer todas sus partes y segundo estar capacitado lo suficientemente bien para intervenir, y no cometer “errores” por desconocimiento o peor aún por negligencia que puedan conducir a ser causante de algún tipo de incidente o accidente con posibilidades de heridos o daños materiales, fenómenos que son más comunes de lo que se cree.

Debe tenerse presente que estos equipos especiales llegan a funcionar con altas presiones y temperaturas, por lo que una mala práctica o acción negligente podría ser conducente al desarrollo y a la generación de un “accidente”, lo cual producirá una serie de trastornos, contratiempos y malos ratos.

Ejemplo de estas malas prácticas acumulativas puede ser, no purgar periódicamente el sistema de control de nivel (Mc Donnell & Miller) y puede llegar a suceder que el flotador del controlador de nivel se atasque o quede pegado sin actuar, motivado por la acumulación de suciedad, óxido, mugre etc., debido a que no ha sido purgado con la frecuencia necesaria, por lo que este flotador no actuará cuando deba actuar conectando los switch, energizando la bomba primero, luego actuando sobre la alarma de nivel, parando el quemador finalmente, si se debió operar normal y así apurar la reposición de nivel de agua de manera que si no se realiza con prontitud ocurrirá un fenómeno físico inevitable lo que puede significar que la caldera se puede llegar a secar, quemar, romper o explotar.

Hay que tener presente que el decreto N° 84 de S.N.S., fue derogado y reemplazado por el nuevo reglamento con fuerza de Ley **DECRETO N° 10 del Reglamento de Calderas, Autoclaves y Equipos que utilizan Vapor de Agua, vigente del 17 de Abril del 2014**, este plantea y exige requisitos indispensables a las personas que manipulen o manejen equipos como los generadores de vapor, los que deben ser **operadores capacitados, calificados e idóneos y responsables**.

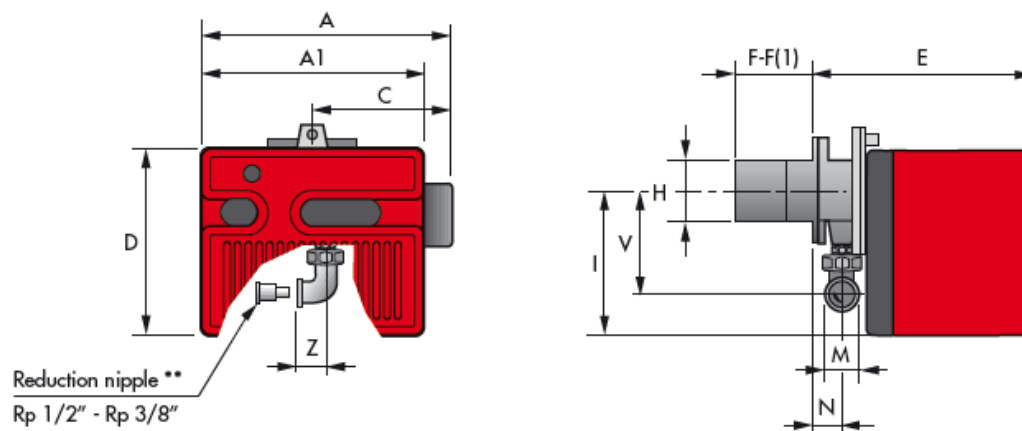
3.2. Características técnicas del quemador de la caldera

- a) Marca Riello, Italiano, Modelo 40 GS20 de 1 etapa de operación.
- b) Potencia térmica del quemador: Rango de 70.000 a 190.000 kcal/h. (81- 220 kW) con presión de Gas de 4,1 a 6,9 mbar.
- c) Funcionamiento del quemador:

Una etapa, on-off, con un ciclo que comienza en el segundo 0 con la energización de su termostato, dos segundos después con el prebarrido de 40 segundos de su motor-ventilador, luego en el segundo 42 simultáneamente debe abrir la electroválvula (solenoides) de combustible y la chispa por 2 segundos de ignición de alta tensión producida por su respectivo transformador, momento en el cual debe haber llama permanente ya en forma normal. Si a los 43 segundos transcurridos no hay llama constante se sucederá el “lockout” cerrando la electroválvula, pero continuando unos segundos con el barrido de gases residuales para evitar riesgo de explosiones de hogar.



Figura 3.8 Quemador RIELLO 40 GS20



| MODEL | A | A1 | C | D | E | F - F(1) | H | I | M | N | V | Z |
|------------|-----|-----|-------|-----|-----|-----------|-----|-----|----------|----|-----|----|
| ▶ GS3 | - | 252 | - | 215 | 230 | 100 | 91 | 165 | Rp 3/8"* | 37 | 132 | 25 |
| ▶ GS5 | - | 272 | - | 233 | 295 | 100 | 91 | 180 | Rp 1/2" | 48 | 138 | 28 |
| ▶ GS10 | 341 | - | 188,5 | 262 | 346 | 110 | 105 | 204 | Rp 3/4" | 61 | 142 | 33 |
| ▶ GS10 *** | - | 305 | - | 262 | 346 | 110 - 170 | 105 | 204 | Rp 3/4" | 61 | 142 | 33 |
| ▶ GS20 | 387 | - | 212 | 298 | 389 | 120 - 280 | 125 | 230 | Rp 3/4" | 67 | 152 | 33 |
| ▶ GS20 *** | - | 350 | - | 298 | 389 | 120 | 125 | 230 | Rp 3/4" | 67 | 152 | 33 |



Figura 3.9 Dimensiones quemador RIELLO 40 GS20

3.3. Controles de funcionamiento seguro de la caldera

3.3.1. Control de presión

Consta de 2 presostatos conectados en “serie” eléctricamente, y regulados previamente por el usuario para detener oportunamente la caldera cuando ésta llegue a la presión de operación establecida de trabajo normal, más el control de funcionamiento automático del quemador que también hace funcionar o parar el quemador a través de un presostato propio interior.

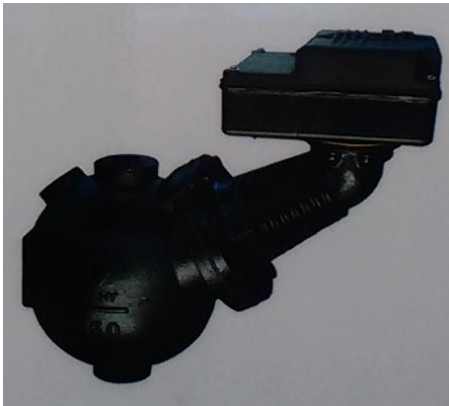
Tabla 3.2. Elementos de control de presión, función y activación

| Elemento de control | Función y activación |
|---|---|
| <p>Presostato diferencial</p>  | <p><u>Función:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Detención quemador <p><u>Activación:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Presión 4,5 bar g |
| <p>Presostato de máxima</p>  | <p><u>Función:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Detención quemador <p><u>Activación:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Presión 5 bar g |

3.3.2. Control de nivel de agua

Instrumento marca Mc Donnell & Miller Serie 150S de rango de presión máxima de trabajo de 150 (P.S.I). Su función es mantener automáticamente lo más constante posible el nivel de agua de la caldera, para ello hace partir cuando el nivel de agua llega a su punto mínimo y parar la bomba de alimentación de agua cuando el nivel vuelve a su punto máximo. Además éste tiene un segundo switch que activa dos alarmas automáticas una de ruido y otra de luz para llamar fuertemente la atención del operador a cargo, ahora si el nivel sigue bajando y no hay corrección de la falta de agua. Por último hay un switch que bloquea el funcionamiento total del quemador apagando la caldera.

Tabla 3.3. Elemento de control de nivel, función y activación

| Elemento de control | Función y activación |
|---|---|
| <p>Control de nivel de agua</p>  | <p><u>Función:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Detención quemador • Encendido de alarmas sonora y visual <p><u>Activación:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Presión 4,5 bar g |

3.4. Alimentación de Agua a la Caldera

Esta pequeña unidad térmica también incluye un estanque para el agua y un sistema de tratamiento del agua. Se consta de un estanque de “almacenamiento intermedio” entre la llegada de agua del exterior y la caldera; esto es por seguridad tal como lo exige el reglamento Artículo N° 19; la alimentación debe estar siempre alineado, ya que debe garantizarse mantener un nivel de agua permanente de seguridad, para ello este nivel se controla en forma automática a través de un sistema de flotador al que debe verificarse su buen funcionamiento.

Además existe un equipo para el tratamiento del agua denominado ablandador de agua marca Aquaflex modelo WQA-25-A importado de U.S.A. comercializado por Cotaco Ltda.

Este equipo de funcionamiento automático de hora y fecha, para el control de las operaciones de servicio (ablandamiento), regeneración, retro lavado y lavado del equipo.



Figura 3.10 Estanque de alimentación de agua

3.5. Características de la bomba de alimentación

El agua de alimentación es suministrada por una bomba de turbina acoplada, modelo 330CS7M Burks Pump. Construida de hierro fundido de bronce, con motor trifásico de potencia de 3 HP, 3450 RPM, 230/460 V. Los puertos son 1-1/4 pulgadas de entrada NPT, 1 pulgada de salida NPT.



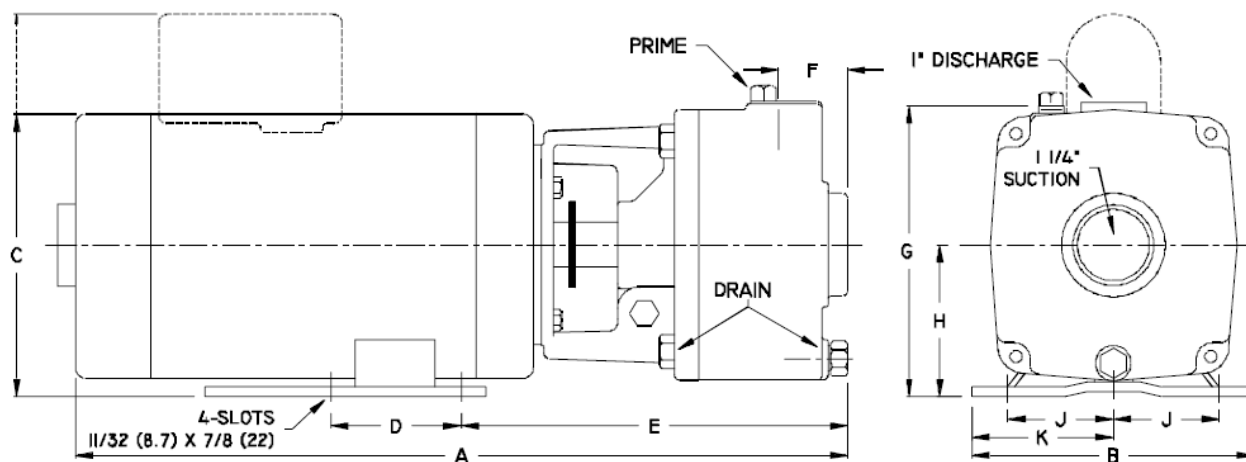
Figura 3.11 Bomba modelo 330CS7M

3.5.1. Principales características

- Bomba autocebante
- Tamaño compacto y ahorro de espacio
- Sin acoplamiento, así que esto elimina los problemas de desalineación.
- Fiable sello de eje mecánico de cerámica / cerámica para las mismas temperaturas a 225 ° F (107 ° C).
- Eje de la bomba de acero inoxidable # 303
- BURKS es la única bomba de turbina con ajuste de impulsor externo Life-Lok®. Esta característica permite volver a ajustar el impulsor sin molestar la tubería, desmontar la bomba o reemplazar las piezas. Esto, como resultado, brinda hasta 40% de vida útil más larga que las bombas de turbina de otros diseños.
- Están diseñadas para manejar agua clara además de muchos otros líquidos no abrasivos y de menor viscosidad en alta presión. Además de aplicaciones de baja capacidad con la mayor eficiencia posible.
- Para temperaturas hasta 500 ° F (260 ° C). Las bombas serie CS están disponibles en un diseño de cavidad de sello con camisa para bombear aceite caliente, agua caliente y fluidos de transferencia de calor de uso común en aplicaciones de calefacción o refrigeración de alta temperatura.

3.5.2. Características del motor

Los motores trifásicos Serie CS de 3 y 5 HP – 208-230 / 460 V, 60 Hz, 3450 RPM tienen una construcción a prueba de goteo abierta y están clasificadas con factores de servicio de bomba de chorro para el funcionamiento continuo en todas sus clasificaciones. Los motores trifásicos requieren un arrancador de tipo magnético que proporciona una protección de sobrecarga completa de 3 patas.



| SERIES | HP | Tappings | | DIMENSIONS IN MILLIMETERS | | | | | | | | | | | |
|--------|-------|----------------|----------------|---------------------------|--------|-----|--------|--------|----|-----|----|-----|----|----|----|
| | | Disc. NPT (in) | Suct. NPT (in) | 1 PH A | 3 PH A | B | 1 PH C | 3 PH C | D | E | F | G | H | J | K |
| 4CS | 1/3 | 1 1/4 | 1 | 447 | 415 | 165 | 168 | 168 | 76 | 228 | 44 | 171 | 89 | 62 | 82 |
| | 1/2 | 1 1/4 | 1 | 447 | 422 | 165 | 168 | 168 | 76 | 228 | 44 | 171 | 89 | 62 | 82 |
| CS | 1 | 1 1/4 | 1 | 465 | 465 | 165 | 168 | 168 | 76 | 228 | 44 | 171 | 89 | 62 | 82 |
| | 1-1/2 | 1 1/4 | 1 | 484 | 484 | 165 | 223 | 168 | 76 | 228 | 44 | 171 | 89 | 62 | 82 |
| | 2 | 1 1/4 | 1 | 496 | 484 | 165 | 223 | 168 | 76 | 228 | 44 | 171 | 89 | 62 | 82 |
| | 3 | 1 1/4 | 1 | --- | 496 | 165 | --- | 168 | 76 | 228 | 44 | 171 | 89 | 62 | 82 |
| | 5 | 1 1/4 | 1 | --- | 531 | 165 | --- | 168 | 76 | 228 | 44 | 171 | 89 | 62 | 82 |

Figura 3.12 Dimensiones de la bomba

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Balance térmico

Consiste en aplicar el **Principio de Conservación de la Energía** a una caldera o generador de vapor, trabajando a régimen estable. Su objetivo **es cuantificar las energías** (o flujos de calor) que entran y salen del equipo, permitiendo evaluar la importancia relativa de cada una de ellas.

Un balance térmico realizado correctamente, exige la identificación de todas las energías (o flujos de calor) transferidas. Sin embargo, por razones prácticas o por limitaciones en la adquisición de datos, es frecuente la aplicación de un **Balance Térmico Simplificado**, que considera sólo a aquellas energías de mayor relevancia.

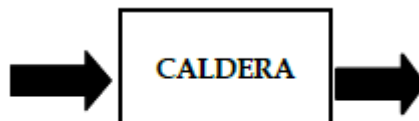
En el balance térmico se debe definir una temperatura de referencia que en general es de 0 °C, además, se consideran las ganancias y las pérdidas de energía asociada a masas o flujos másicos, como asimismo algunas pérdidas de calor que no están vinculadas a una masa o flujo másico, como por ejemplo las pérdidas por radiación y convección al ambiente.

4.1.2. Balance térmico simplificado

Energías que entran = Energías que salen

Flujos que entran:

m_{H_2O} (agua)
 m_a (aire)
 m_c (combustible)



Flujos que salen:

m_{H_2O} (vapor)
 $m_{p.c.}$ (combustible)

Pérdidas de calor:

- Paredes
- Purgas
- Cenizas calientes
- Fugas
- Combustible no quemado
- Otras

Midiendo las energías a estos flujos, respecto a una temperatura de referencia ($T_{ref} = 0^{\circ}\text{C}$), se tiene:

Energías (o flujos de calor) que entran = Energías (o flujos de calor) que salen

$$E_{Comb}(PCI) + E_{Comb}(sensible) + E_{aire} + E_{agua} = E_{vapor} + E_{p.c.} + E_{perdida}$$

$$\underbrace{E_{Comb}(PCI) + E_{Comb}(sensible) + E_{aire}}_{\text{Ganancias de Calor}} = \underbrace{E_{vapor} - E_{agua}}_{\text{Calor de agua}} + \underbrace{E_{p.c.} + E_{perdida}}_{\text{Pérdidas de energía}}$$

Ganancias de Calor = Calor de agua + Pérdidas de energía

En las ecuaciones siguientes “E” se calcula como energía en la unidad de tiempo.

4.1.3. Cálculo de las ganancias de calor

$E_{comb}(PCS)$: Energía entregada por el poder calorífico superior del combustible. Es el aporte más importante de energía, en forma de calor.

$$E_{comb}(PCI) = m_c \cdot PCS \quad (kcal/h)$$

m_c : Consumo de Combustible ($kcal/h$)

PCI: Poder Calorífico Superior combustible ($kcal/kg$)

$E_{comb}(S)$: Energía sensible del combustible. Depende de la temperatura con que ingresa el combustible a la cámara de combustión (hogar). Es importante sólo si existe pre calentamiento de combustible.

$$E_{comb}(S) = m_c \cdot h_c \quad (kcal/h)$$

h_c : Entalpía de combustible ($kcal/kg$). Se obtiene del gráfico de la figura 4.2. Debe medirse temperatura.

E_{aire} : Energía sensible del aire. Depende de la temperatura con que ingresa el aire al hogar. Es importante sólo si existe pre calentamiento del aire.

$$E_{aire} = m_c \cdot R_{a/c} \cdot h_a \quad (kcal/h)$$

$R_{a/c}$: Razón aire combustible real de la combustión. Se obtiene de un análisis de combustión y determina la cantidad de aire que debe suministrarse a una combustión, por unidad de combustible. Puede expresarse en masa ($kg_{aire} / kg_{combustible}$) o en volumen ($m^3_{aire} / m^3_{combustible}$).

h_a : Entalpía de aire ($kcal/kg$). Se obtiene del gráfico de la figura 4.2. Debe medirse temperatura.

$$h_a = C_{p_{aire}} \cdot (T_{aire} - T_{ref}) \quad (kcal/kg)$$

$C_{p_{aire}}$ = Calor específico del aire a $p=cte$, que equivale a 0,24 ($kcal/kg \text{ } ^\circ C$).

T_{aire} : Temperatura de ingreso del aire a la cámara de combustión, en $^\circ C$.

4.1.4. Cálculo del calor al agua o capacidad calórica (Q)

Es la cantidad de calor por hora absorbido por el agua desde los productos de combustión, considerando rendimiento máximo. Determina la capacidad de la caldera.

$$Q = E_{vapor} - E_{agua}$$

$$Q = m_v \cdot (h_2 - h_1) \quad (kcal/h)$$

m_v : Cantidad de agua consumida (o vapor generado), en (kg/h).

h_1, h_2 : Entalpías del agua a la entrada y salida ($kcal/kg$). Se obtienen de tablas de vapor o diagrama de Mollier.

4.1.5. Cálculo de las pérdidas de calor

4.1.5.1. Energía perdida en los productos de combustión ($E_{p.c.}$)

Es la energía que se pierde en los productos de la combustión que salen por la chimenea al ambiente. Es la pérdida más importante e implica un análisis detallado de la combustión. A continuación se indica una forma de cálculo aproximada.

$$E_{p.c.} = m_c \cdot Q_g \quad (kcal/h)$$

$E_{p.c.}$: Energía que se pierde en los productos de la combustión, en ($kcal/h$).

Q_g : Calor perdido por gases calientes de combustión en ($kcal/kg_{combustible}$). En rigor se obtiene midiendo la temperatura y la composición de los P.C. o también a partir del gráfico de la figura 4.3.

En rigor:

$$Q_g = R_{g/c} \cdot C_{p_{gases}} \cdot (T_{ch} - T_{amb}) \quad (kcal/kg_{combustible})$$

Donde:

$R_{g/c}$: Razón gases combustible real de la combustión. También se obtiene de un análisis de combustión y determina la cantidad de gases que se liberan por unidad de combustible, expresada ($kg_{gases}/kg_{combustible}$).

Su expresión general de cálculo es:

$$R_{g/c} = \frac{\sum n_{productos} \cdot PM_{productos}}{n_{Combustible} \cdot PM_{combustible}}$$

$C_{p_{gases}}$: Calor específico a p=cte de los gases que equivale a 0,26 ($kcal/kg \text{ } ^\circ C$)

T_{ch} : Temperatura de los gases que se mide en la base de la chimenea, en $^\circ C$.

T_{amb} : Temperatura del aire atmosférico, en $^\circ C$.

4.1.5.2. Energía perdida por radiación a través de paredes de la caldera ($E_{r.p.}$)

Se acostumbra a expresarla como un porcentaje del poder calorífico inferior del combustible. Fluctúa entre un 1% y 10%, dependiendo de la capacidad calorífica (Q), en kcal/h del equipo de transferencia de calor.

En general para generadores de vapor de pequeñas capacidades el porcentaje de pérdidas es alto, ya que para capacidades de generación más grandes se aprovecha mejor la energía de los gases de combustión, como en economizadores, sobrecalentadores y precalentadores de aire.

$$Q_{r.p.} = \% \text{ PCS} \quad (kcal/kg_{combustible})$$

Donde:

$Q_{r.p.}$: Porcentaje perdido de calor por radiación a través de las paredes. Este valor se determina a partir del gráfico de la figura 4.1. Cuya variable de entrada es la capacidad calorífica (Q) del generador de vapor expresada en ($kcal/h$).

PCS: Poder calorífico superior del combustible, en ($kcal/kg_{combustible}$).

Por lo tanto la energía perdida por radiación se expresa como:

$$E_{r.p.} = m_c \cdot Q_{r.p.} \quad (kcal/h)$$

4.1.5.3. Energía perdida por evaporación agua formada y humedad del combustible

$$Q_{agua} = (X + 9 \cdot H_2) \cdot (h_v - h_l) \quad (kcal/kg_{combustible})$$

Donde:

Q_{agua} : Calor perdido por evaporación agua formada y humedad del combustible, en $(kcal/kg_{combustible})$

X: Humedad del combustible, en $(kg_{agua}/kg_{combustible})$.

H_2 : Composición gravimétrica del H_2 en el combustible, en $(kg_{H_2}/kg_{combustible})$.

h_v : Entalpía del vapor de agua a la temperatura de los gases (T_{ch}). Donde $h_v = 59,2 + 0,45 \cdot T_{ch}$, en $(kcal/kg_{H_2O})$.

h_l : Entalpía del agua líquida a la temperatura del aire atmosférico (T_{amb}), en $(kcal/kg)$.

Por ende, la energía perdida por evaporación agua formada y humedad del combustible se determina como:

$$E_{agua} = m_c \cdot Q_{agua} \quad (kcal/h)$$

4.1.5.4. Pérdidas de energía que considera la Norma ASME PTC 4.0

La norma ASME PTC 4.0 fue publicada en el año 1998 e indica los procedimientos para la prueba de rendimiento de la caldera (o generador de vapor) de una central termoeléctrica. Se aplica a calderas de carbón, diésel y gas así como también a hidrocarburos. Además, se incluyen calderas que poseen un sistema de captura de azufre mediante algún sorbente (lecho fluidizado).

La norma establece las pérdidas de energía que existen dentro de la caldera y de las cuales se reconocen las siguientes:

- a. Pérdida por gases secos.
- b. Pérdida por agua formada en la combustión de H_2 en el combustible.
- c. Pérdida por H_2O en un combustible sólido o líquido.
- d. Pérdida por humedad en el aire.
- e. Pérdida por carbono no quemado.
- f. Pérdida por calor sensible en el residuo.
- g. Pérdida por calcinación y deshidratación del sorbente.
- h. Pérdida por humedad en el sorbente.

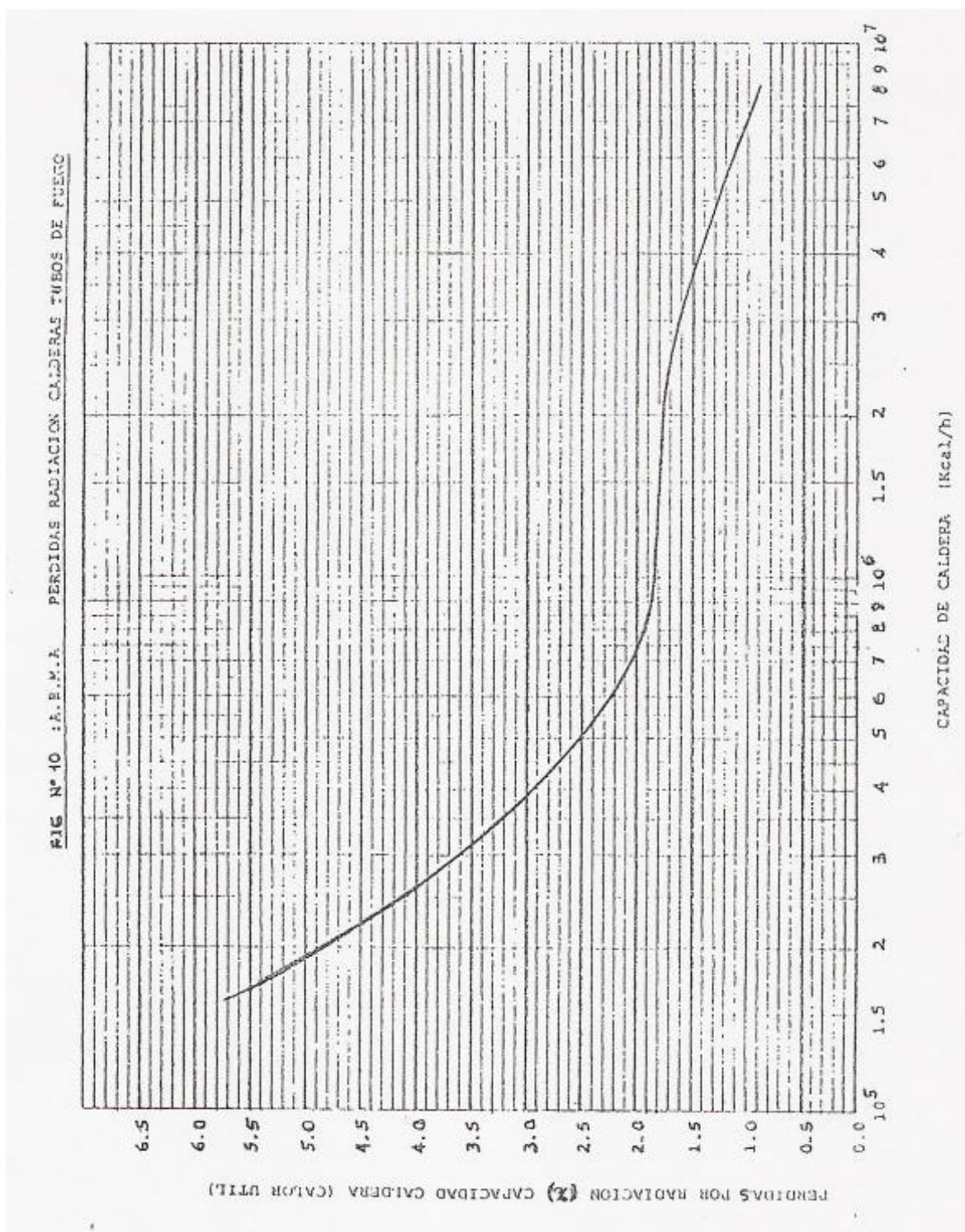


Figura 4.1 Gráfico de pérdidas de calor por radiación porcentaje PCS

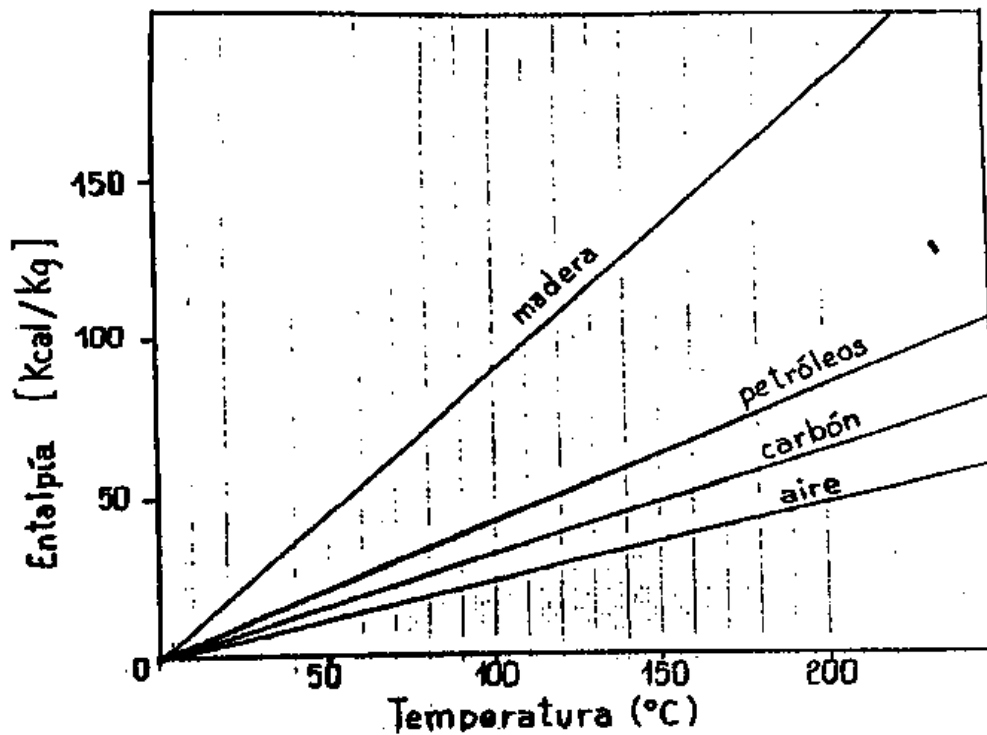


Figura 4.2 Gráfico entalpías de combustible y aire

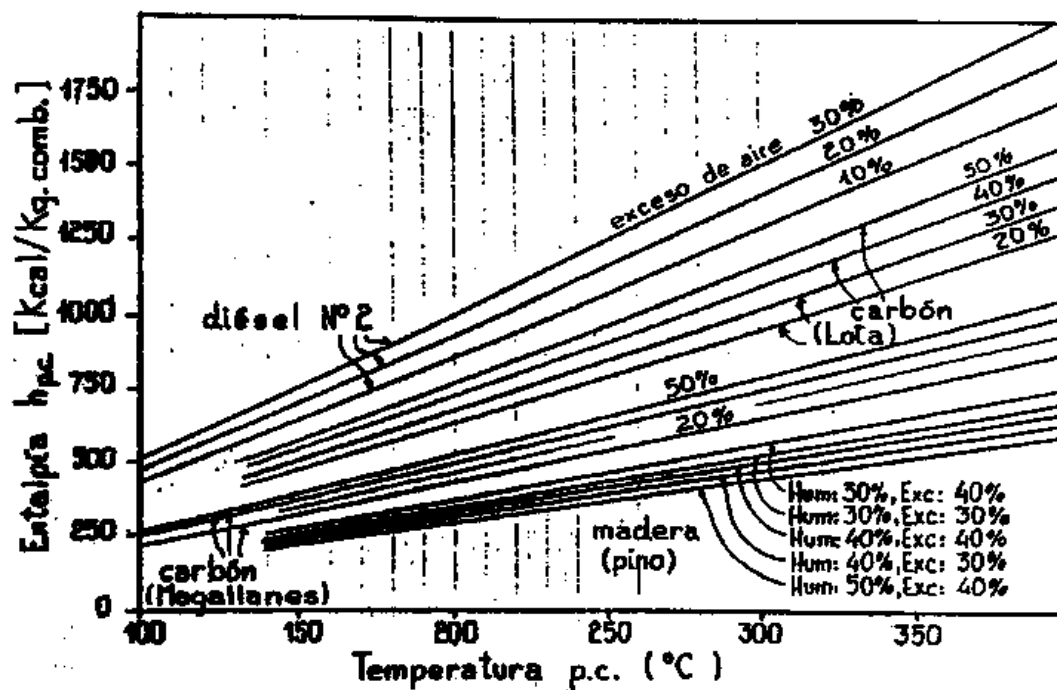


Figura 4.3 Gráfico entalpías de productos de combustión

4.2. Rendimiento térmico

Es el índice del aprovechamiento de la energía en una caldera. Mide el porcentaje de calor entregado a la caldera (Ganancias) que es absorbido por el agua (calor al agua). Se define como:

$$\eta_D = \frac{CALOR\ AL\ AGUA}{CALOR\ DEL\ COMBUSTIBLE} \times 100$$

Para determinarlo, se establecen dos mecanismos.

- Medición del rendimiento directo
- Medición del rendimiento indirecto

4.2.1. Rendimiento Térmico directo (η_D)

Se miden directamente las energías involucradas en la definición. Normalmente, las ganancias de calor son iguales a la energía entregada por el PCS del combustible, por lo tanto:

$$\eta_D = \frac{m_v \cdot (h_2 - h_1)}{m_c \cdot PCS} \times 100$$

Para determinar η_D , se requiere medir el consumo de combustible, el vapor generado, la presión, la temperatura del agua a la entrada y salida y el tipo de combustible.

4.2.2. Rendimiento Térmico indirecto (η_I)

A partir del balance térmico, el rendimiento se puede expresar indirectamente como:

$$\eta_I = \frac{GANANCIAS - PERDIDAS}{GANANCIAS} \cdot 100 = \frac{E_{comb(PCS)} - E_{p.c.} - E_{r.p.} - E_{agua}}{E_{comb(PCS)}} \cdot 100$$

El rendimiento térmico indirecto tiene la ventaja de requerir pocas mediciones. Solo se necesita realizar un análisis de los productos de combustión (composición y temperatura) y conocer el combustible que se está quemando. Su principal inconveniente es una menor precisión con respecto al rendimiento directo. Se aplica cuando se desea conocer en forma rápida y aproximada, el rendimiento de una caldera.

Es importante destacar que el combustible utilizado en el generador de vapor del laboratorio, es gas licuado, por lo que no existirán las pérdidas número c, d, e, f, g y h indicadas en el punto 4.1.5.4. Por lo tanto, se considerará las pérdidas por evaporación agua formada y humedad del combustible, por gases secos y por radiación conducción y convección a través de las paredes de la caldera. Esta última pérdida no aparece en el listado de la norma.

4.2.2.1. Valores prácticos de rendimientos

En general el rendimiento depende del tipo de caldera, la capacidad y el tipo de combustible.

Tabla 4.1 Tipos de caldera y rendimientos

| TIPO DE CALDERA | RENDIMIENTO (%) |
|--|-----------------|
| De calefacción pequeña, combustión carbón, hogar exterior. Vertical pequeña, hogar interior | 55-65 |
| Tubos de humo, horizontal 2 pasos, hogar exterior, madera | 65-70 |
| Escocesa de petróleo y carbón. Compactas de carbón | 70-80 |
| Tubos de agua, sin sobrecalentador. Sin economizador. | 78-80 |
| Tubos de agua, plantas termoeléctricas | 80-90 |
| Bocamina (sobre PCS) | 86,5 |

Tabla 4.2 Capacidad de caldera y pérdidas de calor por radiación al ambiente

| Capacidad caldera (masa nominal) kg/h | Pérdidas por radiación ($Q_{r.p.}$) % PCI |
|---------------------------------------|---|
| Mayor a 18.000 | Menores a 1% |
| 5.000 a 18.000 | 5% a 1% |
| 1.000 a 5.000 | 10% a 5% |
| Menores a 1.000 | 20% a 10% |

5. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

5.1. ¿Qué es la Adquisición de Datos (DAQ)?

La adquisición de datos es el proceso de medir con un PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y un PC con software programable. En la figura 5.1 se visualiza los componentes antes descritos. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs estándares en la industria, proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable.



Figura 5.1 Componentes de un sistema de adquisición de datos

5.1.1. ¿Qué es un Sensor?

La medida de un fenómeno físico, como la temperatura de una habitación, la intensidad de una fuente de luz o la fuerza aplicada a un objeto, comienza con un sensor. Un sensor, también llamado un transductor, convierte un fenómeno físico en una señal eléctrica que se puede medir. Dependiendo del tipo de sensor, su salida eléctrica puede ser un voltaje, corriente, resistencia u otro atributo eléctrico que varía con el tiempo. Algunos sensores pueden requerir componentes adicionales y circuitos para producir correctamente una señal que puede ser leída con precisión y con toda seguridad por un dispositivo DAQ. En la tabla 5.1 se expone tipos de sensores y sus fenómenos físicos.



Figura 5.2 Sensor

Tabla 5.1 Sensores y fenómenos físicos

| Tipos de Sensor | Fenómeno |
|---|---------------------------|
| Termopar, RTD, Termistor | Temperatura |
| Fotosensor | Luz |
| Micrófono | Sonido |
| Galga Extensiométrica, Transductor Piezoeléctrico | Fuerza y Presión |
| Potenciómetro, LVDT, Codificador Óptico | Posición y Desplazamiento |
| Acelerómetro | Aceleración |
| Electrodo pH | pH |

5.2. Dispositivos y tarjetas DAQ

5.2.1. ¿Qué es un Dispositivo DAQ?

El hardware DAQ actúa como la interfaz entre una PC y señales del mundo exterior. Funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que un PC pueda interpretarlas.

Los tres componentes clave de un dispositivo DAQ usado para medir una señal, son: el circuito de acondicionamiento de señales, convertidor analógico-digital (ADC) y un bus de PC. Varios dispositivos DAQ incluyen otras funciones para automatizar sistemas de medidas y procesos. Por ejemplo, los convertidores digitales-analógicos (DACs) envían señales analógicas, las líneas de entrada y salida (E/S) digital reciben y envían señales digitales y los contadores/temporizadores cuentan y generan pulsos digitales.



Figura 5.3 Dispositivo de adquisición

5.2.2. Componentes y parámetros relevantes de las tarjetas de adquisición de datos

Este tipo de dispositivos son tarjetas de circuito impreso que se conectan al computador a través de las ranuras de expansión. Por lo general, se conectan a través del bus PCI, siendo el bus de comunicación con dispositivos periféricos que más se utiliza.

Las tarjetas de adquisición van desde las más sencillas compuestas únicamente por un hardware de adquisición que convierte una salida analógica en digital a otras más complejas, las cuales son capaces de realizar un tratamiento de los datos a través de un procesador especializado.

También existen otras tarjetas de adquisición que se consideran propiamente como instrumentos, dándoles el nombre de instrumentos en tarjeta. Funcionan gracias a que aprovechan la capacidad de comunicación y representación de datos del computador, sin embargo no pierden las características que les permite funcionar como instrumento autónomo.

5.2.2.1. Parámetros relevantes de las tarjetas de adquisición de datos (DAQ)

- **Número de entradas**

Es el número de canales de entrada disponibles de la tarjeta. Es necesario conocer el número de variables que se va a considerar, por lo que esta característica es crítica para el diseño de una instalación. Se puede llegar a aumentar el número de entradas en cierto momento, si resulta que con el paso del tiempo es necesario tener en cuenta otras variables.

Existen dos modelos para la captura de las señales de entrada. En primer lugar es utilizar un único convertidor Analógico/Digital (A/D) compartido entre varias entradas o utilizar convertidores independientes en cada entrada analógica. Para el primer caso, se resuelve mediante el uso de un multiplexor que seleccionará la entrada que corresponda. El otro caso se soluciona a través de un muestreo simultáneo.

- **Configuración de las entradas analógicas**

Existen dos configuraciones:

- a) **Entradas referidas a masa**

Un terminal de entrada en todos los canales está referido a la tierra del sistema de adquisición, donde el otro se conecta a la entrada del sensor. Es una configuración que se puede utilizar si la diferencia de tensión entre la entrada a la masa del sistema de adquisición y el común analógico no sea significativo.

Su principal uso se encuentra en el tratamiento de señales de nivel alto donde existe un error introducido por la señal en modo común despreciable.

b) Entradas en modo diferencial

Aquí no existe ningún terminal referido a masa. Los dos terminales de entrada se corresponden con los dos terminales de entrada que tiene la tarjeta de adquisición de datos. Como principal ventaja, permite operar a niveles muy pequeños de señal, eliminando casi la totalidad del ruido. El único aspecto negativo, es que al necesitar dos terminales, disminuye el número de entradas que se pueden capturar.

Es importante conocer el valor de impedancias de entrada y el sistema de protección que posea la tarjeta contra tensiones excesivas.

- **Velocidad de adquisición**

Sin duda, uno de los factores que más críticos a la hora de seleccionar un modelo de tarjeta de adquisición de datos, se define como la velocidad máxima con que el hardware de adquisición realiza la toma de muestras, siendo lo inverso al tiempo de adquisición. No es lo mismo al tiempo de conversión del convertidor A/D, puesto que este no tiene en cuenta múltiples factores relacionados con retardos. Es algo lógico que el aumentar este parámetro influye directamente en el precio, ya que proporciona una mayor calidad de definición en el tiempo aunque aumenta el flujo de datos hacia el procesador.

- **Resolución**

Está íntimamente ligado con la precisión de la medida que se quiera obtener.

- **Exactitud**

Se suele especificar como el porcentaje del valor de fondo de escala o en número de bits, donde un 0,01% corresponde a tarjetas de alta gama. Aquí se recogen todos los errores que están mayoritariamente en el circuito analógico de entrada.

Algunas tarjetas presentan la posibilidad de realizar auto-calibración del conversor A/D, eliminando los errores de offset y de ganancia de cada canal de entrada.

- **Margen de entrada**

Es un parámetro bastante intuitivo, que se puede definir como los límites de tensión de entrada de la tarjeta.

Existen dos configuraciones:

- ✓ Unipolares, donde sólo pueden tener niveles de tensión positiva, por ejemplo: 0 a 10 V
- ✓ Bipolares, permiten las dos polaridades, por ejemplo: -10 a 10 V
- **Tipo de convertidor A/D.** Dependerá de las prestaciones de la tarjeta.
- **Transferencia de datos.** Se pueden clasificar en: DMA, interrupciones y programada.

5.2.3. Componentes clave de medidas para un dispositivo DAQ

5.2.3.1. Acondicionamiento de señales

La mayoría de las señales analógicas requieren alguna forma de preparación antes de que puedan digitalizarse. El acondicionamiento de la señal es la manipulación de una señal de una manera que la prepara para la siguiente etapa de procesamiento. Muchas aplicaciones implican mediciones ambientales o estructurales, como la temperatura y la vibración, de los sensores. Estos sensores, a su vez, requieren acondicionamiento de señal antes de que un dispositivo de adquisición de datos pueda medir de manera efectiva y precisa la señal.

Por ejemplo, las señales de termopar tienen niveles de voltaje muy pequeños que deben amplificarse antes de que puedan digitalizarse. Otros sensores, como los detectores de temperatura de resistencia (RTD), los termistores, las galgas extensométricas y los acelerómetros, requieren excitación para operar. Todas estas tecnologías de preparación son formas de acondicionamiento de señales.

Las señales de los sensores o del mundo exterior pueden ser ruidosas o demasiado peligrosas para medirse directamente. El circuito de acondicionamiento de señales manipula una señal de tal forma que es apropiado para entrada a un ADC. Este circuito puede incluir amplificación, atenuación, filtrado y aislamiento. Algunos dispositivos DAQ incluyen acondicionamiento de señales integrado diseñado para medir tipos específicos de sensores.

5.2.3.2. Convertidor Analógico Digital (ADC)

Las señales analógicas de los sensores deben ser convertidas en digitales antes de ser manipuladas por el equipo digital como un PC. Un ADC es un chip que proporciona una representación digital de una señal analógica en un instante de tiempo. En la práctica, las señales analógicas varían continuamente con el tiempo y un ADC realiza "muestras" periódicas de la señal a una razón predefinida. Estas muestras son transferidas a una PC a través de un bus, donde la señal original es reconstruida desde las muestras en software.

5.2.3.3. Bus del PC

Los dispositivos DAQ se conectan a un PC a través de una ranura o puerto. El bus de la PC sirve como la interfaz de comunicación entre el dispositivo DAQ y la PC para pasar instrucciones y datos medidos. Los dispositivos DAQ se ofrecen en los buses de PC más comunes, incluyendo USB, PCI, PCI Express y Ethernet. Recientemente, los dispositivos DAQ han llegado a estar disponibles para 802.11 Wi-Fi para comunicación inalámbrica. Hay varios tipos de buses y cada uno de ellos ofrece diferentes ventajas para diferentes tipos de aplicaciones.

5.2.3.4. PC y software

a) ¿Cuál es la función de un PC en un sistema DAQ?

Un PC con software programable controla la operación del dispositivo DAQ y es usada para procesar, visualizar y almacenar datos de medida. Diferentes tipos de PCs son usados en diferentes tipos de aplicaciones. Un PC de escritorio se puede utilizar en un laboratorio por su poder de procesamiento, una laptop se puede utilizar por su portabilidad o un PC industrial se puede utilizar en una planta de producción por su robustez.



Figura 5.4 PC

b) ¿Cuáles son los diferentes componentes de software en un sistema DAQ?**5.2.3.5. Software controlador**

El software controlador ofrece al software de aplicación la habilidad de interactuar con un dispositivo DAQ. Simplifica la comunicación con el dispositivo DAQ al abstraer comandos de hardware de bajo nivel y programación a nivel de registro. Generalmente, el software controlador DAQ expone una interfaz de programación de aplicaciones (API) que es usada en un entorno de programación para construir software de aplicación.

5.2.3.6. Software de aplicación

El software de aplicación facilita la interacción entre el PC y el usuario para adquirir, analizar y presentar datos de medidas. Puede ser una aplicación pre-construida con funcionalidad predefinida o un entorno de programación para construir aplicaciones con funcionalidad personalizada. Las aplicaciones personalizadas generalmente son usadas para automatizar múltiples funciones de un dispositivo DAQ, realizar algoritmos de procesamiento de señales y mostrar interfaces de usuario personalizadas.

5.3. Software de adquisición de datos

En la actualidad uno de los programas más utilizados en la adquisición de datos es LabVIEW, el mismo que cuenta con un sinnúmero de elementos que permiten realizar dicha operación.

LabVIEW es el acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (Banco de trabajo de ingeniería de instrumentos virtuales de laboratorio). Es un lenguaje y a la vez un entorno de programación gráfica en el que se pueden crear aplicaciones de una forma rápida y sencilla. Originalmente este programa estaba destinado a aplicaciones para control de instrumentos electrónicos, usados en sistemas de instrumentación conocidos como instrumentación virtual.

LabVIEW cuenta con dos partes fundamentales:

- **Panel frontal (Front Panel):** Es la parte que verá el usuario por lo general tiene un fondo de color gris.

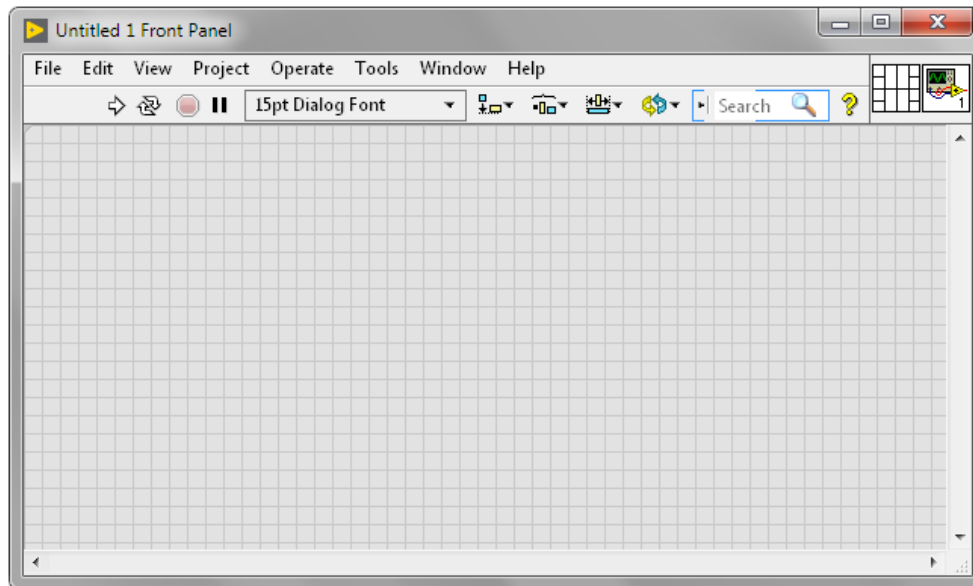


Figura 5.5 Ventana panel frontal

- **Diagrama de bloques (Block Diagram):** Es la ventana que visualizará el usuario que tiene un fondo de color blanco, en la cual se realiza la programación de cualquier instrumento virtual.

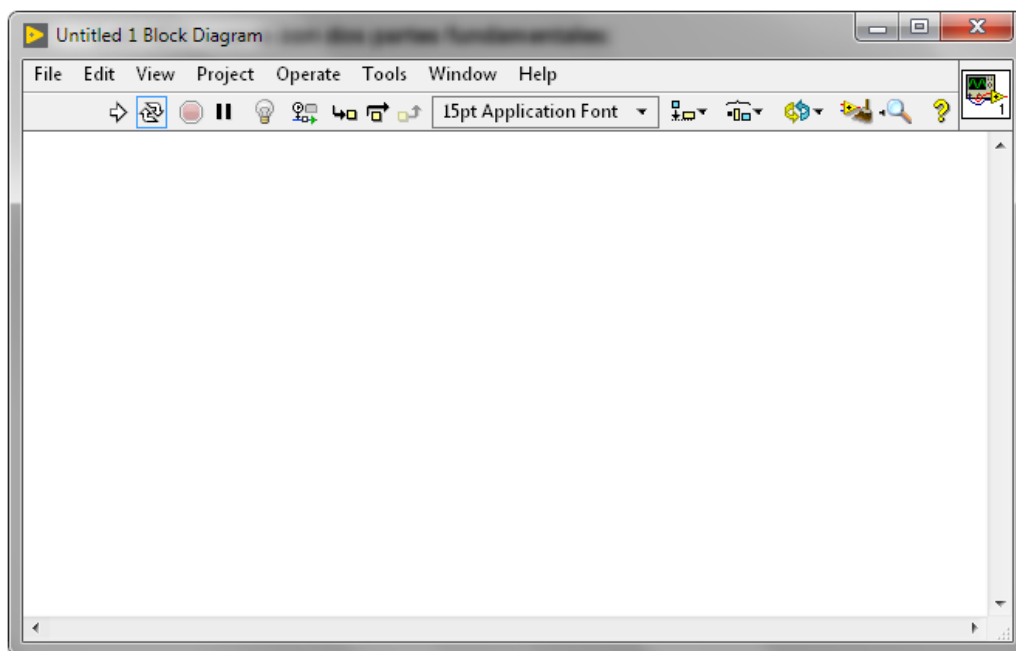


Figura 5.6 Ventana diagrama de bloques

Tanto el panel frontal como el diagrama de bloques se encuentran conectados a través de elementos que sirven para el ingreso y salida de datos.

En la ventana del panel frontal de LabVIEW al hacer clic derecho sobre el mismo se muestra una paleta de controles e indicadores, la cual se puede visualizar en la figura 5.7.

Mientras que en la pantalla del diagrama de bloques dando clic derecho sobre el mismo se exhibe una paleta de funciones con las cuales se realiza la programación de cualquier instrumento virtual. Dicha paleta se puede observar en la figura 5.8.

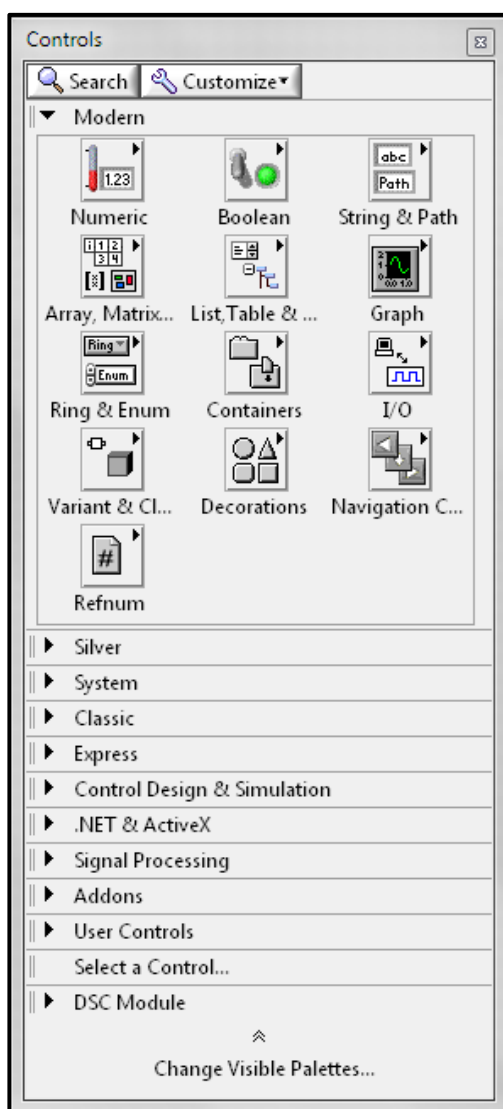


Figura 5.7 Paleta de controles e indicadores

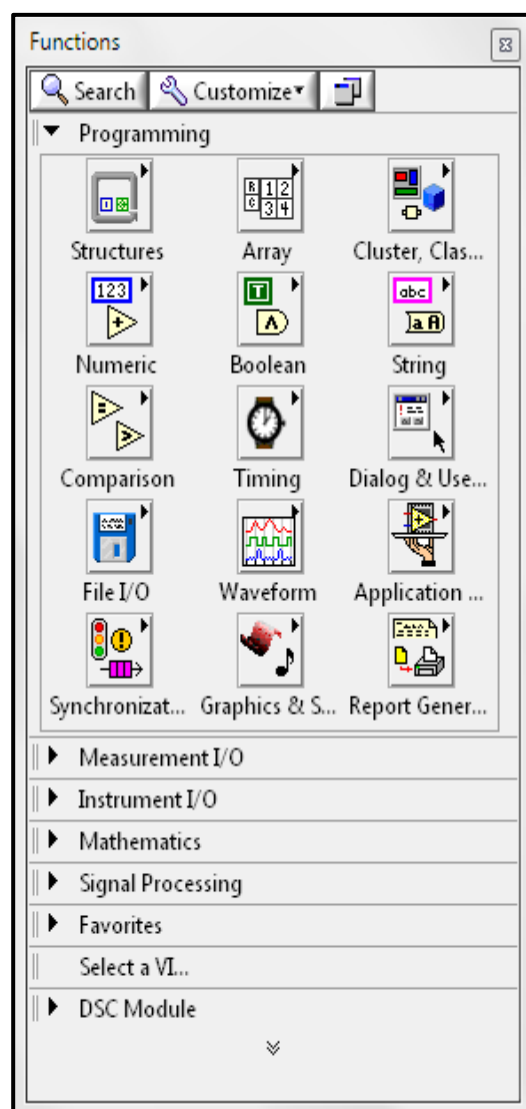


Figura 5.8 Paleta de funciones

En el software LabVIEW se manejan muchos tipos de datos, entre los más usados están los numéricos, booleanos, cadena de caracteres, y datos dinámicos. En la tabla 5.2 se muestra los más importantes.

Tabla 5.2 Datos básicos en LabVIEW

| Tipo de dato | Icono de LabVIEW |
|----------------------|--|
| Numéricos |   |
| Booleano |  |
| Cadena de caracteres |  |
| Dinámicos |  |

LabVIEW permite el diseño de sistemas de control y adquisición de datos con interfaces amigables con el usuario. Este software posee controladores, módulos, complementos los mismos que permiten la comunicación con PLC, tarjetas de adquisición de datos y otros dispositivos con mucha facilidad, además posee múltiples herramientas para poder realizar la lectura, y análisis de señales analógicas o digitales.

6. DISEÑO DEL SISTEMA DE MONITOREO PARA EL GENERADOR DE VAPOR

El software LabVIEW permite la utilización de instrumentos virtuales, que ayudan a la adquisición de datos a través de las diferentes tarjetas de la National Instruments, de igual forma es de gran relevancia la selección de instrumentos de medición adecuados para las condiciones de operación del generador de vapor.

6.1. Identificación y caracterización de los sensores o transductores

En un generador de vapor entre las principales magnitudes físicas que pueden ser monitoreadas se encuentran la presión y temperatura del vapor, si este fuese sobrecalentado y en el caso de vapor saturado seco bastaría solo con la presión. La temperatura del agua de alimentación que ingresa a la caldera y los gases de combustión que escapan por la chimenea son otras variantes trascendentales. Dichas variables pueden ser registradas mediante termómetros, termocuplas o R.T.D. en el caso de la temperatura y para el caso de la presión mediante manómetros o diferentes sensores de presión.

El nivel de agua en el interior de una caldera es de vital importancia en el funcionamiento del mismo, este puede ser observado mediante un visor en paralelo, o puede ser detectado por elementos eléctricos, o transductores de nivel de cualquier tipo. Asimismo es de gran relevancia llevar un registro de la cantidad de litros o metros cúbicos de agua por unidad de tiempo que ingresan a la caldera, como también la cantidad de kilogramos o litros de combustible consumidos en el quemador. Dicho registros se pueden realizar mediante dispositivos denominados caudalímetros o flujómetros electrónicos.

Cada uno de los transductores existentes en el mercado posee ciertas ventajas y desventajas individuales, por el cual se debe seleccionar instrumentos para ser utilizados en aplicaciones donde mejor sean adaptados acordes al contexto operacional y características de funcionamiento.

Para una correcta selección del transductor hay que tomar en consideración los siguientes parámetros:

- Exactitud en la medición de las magnitudes.
- Exactitud en el rango de las variables.
- Condiciones físicas:
Conexiones eléctricas y mecánicas, condiciones de montaje y resistencia a la corrosión.
- Condiciones de ambiente:
Efectos de no linealidad, efectos de histéresis, respuesta en frecuencia y resolución.

- Condiciones de ambiente de proceso:
Efectos de la temperatura, aceleración, golpes y vibraciones.

De la correcta selección de los elementos de medición dependerá la calidad del sistema de adquisición de datos.

A continuación, se describen los equipos de instrumentación a elegir para la adquisición de datos, en un sistema de generación de vapor.

6.1.1. Sensores para medición de temperatura

6.1.1.1. Detector de temperatura resistivo (RTD)

Es un instrumento encargado de percibir la señal de temperatura y transformarla en una señal eléctrica. Su funcionamiento se basa en la variación de la resistencia por efecto de la temperatura. Hoy en día existen detectores térmicos de resistencia de dos, tres y cuatro hilos, comúnmente se utilizan los de 3 hilos.



Figura 6.1 Detector térmico de resistencia

6.1.1.2. Termocupla

Son sensores de temperatura que consisten en dos alambres de diferentes materiales unidos en un extremo, que al aplicar temperatura en la unión de los materiales se genera un voltaje del orden de los milivoltios y éste aumenta con el incremento de la temperatura.



Figura 6.2 Termocupla tipo K



Figura 6.4 Sonda de cable capacitiva para la medición continua de nivel

6.1.4. Sensores para medición de caudal

6.1.4.1. Medición de caudal

Existen diferentes técnicas e instrumentos para medir el caudal, la técnica a utilizar dependerá de la necesidad y condiciones en las cuales se esté. Su objetivo en breves palabras es determinar que tanta cantidad de fluido en masa o volumen está pasando por un determinado punto dentro de un periodo específico de tiempo.

Los cuatro grandes grupos que permiten medir el caudal son los medidores de presión diferencial, de velocidad, medidores másicos y volumétricos. Estos instrumentos están basados en la ecuación de Bernoulli que establece que la suma de energía cinética más la energía potencial de altura más la energía debido a la presión que tiene un fluido permanece constante en una misma sección.

De ahí se puede deducir que frente a un aumento de velocidad, por ejemplo al pasar por una restricción en la cañería, se producirá una disminución en la presión, y de acuerdo a esto establecer una relación entre la velocidad circulante y la diferencia de presión que se produce. Esta diferencia de presión se puede medir y de ahí determinar la velocidad, al multiplicar esa velocidad por el área de la cañería se obtendrá el caudal volumétrico.

Por lo general, un sensor de caudal instalado en línea con una tubería, permite determinar el flujo másico de un fluido. El dispositivo llamado caudalímetro electrónico de turbina opera a través de una circulación de flujo que hace rotar una turbina encapsulada en las paredes, proporcionalmente al caudal. La turbina, fabricada con un compuesto de resina y polvo de alnico, genera un campo magnético que es leído y codificado por un sensor de efecto Hall.

Los caudalímetros de turbina van provistos de una hélice que gira cuando la corriente de líquido incide sobre ella. La velocidad de giro es proporcional al caudal, y para determinarla, se emplea un captador que genera pulsos cuando gira la hélice. Este captador genera: 1 pulso cada vez que un aspa de la hélice pasa frente a él, en caso de los caudalímetros de turbina de acero inoxidable y los de plástico de líquidos corrosivos, y 2 pulsos por cada vuelta de la hélice, en el caso de turbinas económicas.



Figura 6.5 Caudalímetros tipo turbina

6.1.5. Sistema de interconexión

Por lo general la transmisión de las señales se lleva a cabo mediante cable apantallado para evitar la interferencia del ruido y agentes externos.

Un cable apantallado o blindado es un tipo de cable recubierto por una malla o un tubo metálico, que actúa de Jaula de Faraday para evitar el acople de ruidos y otras interferencias, tanto del entorno hacia el cable, como del cable al entorno. En la figura 6.6 se exhibe un modelo de cable apantallado.

En ocasiones se debe considerar el ambiente en el cual se van a encontrar los instrumentos por lo que se hace necesario la utilización de tubería EMT.



Figura 6.6 Cable apantallado CY-JZ/JB 300/500 V

6.2. Hardware para adquisición de datos National Instruments

El Departamento de Ingeniería Mecánica dispone de 5 diferentes tarjetas o módulos de adquisición de datos de la National Instruments y un Chasis CompactDAQ, por ende el proceso de selección de la(s) tarjeta(s) a utilizar depende de los requerimientos de medición y características de cada una de las tarjetas.

En consecuencia, se describe a continuación las características principales de los módulos a utilizar para la realización del presente trabajo.

6.2.1. Módulo NI 9219 (módulo de entradas analógicas)

El NI-9219 es un módulo universal de la serie C, para la adquisición simultánea de cuatro entradas analógicas con una resolución de 24 bits. Diseñado para pruebas multipropósito en cualquier chasis NI CompactDAQ o CompactRIO. Con el cual se puede medir varias señales de sensores tales como galgas extensométricas, RTD, termopares, celdas de carga y otros sensores alimentados.

Los canales se pueden seleccionar individualmente, por lo que puede realizar un tipo de medición diferente en cada uno de los cuatro canales. Los rangos de medición difieren para cada tipo de medición e incluyen hasta ± 60 V para voltaje y ± 25 mA para corriente.

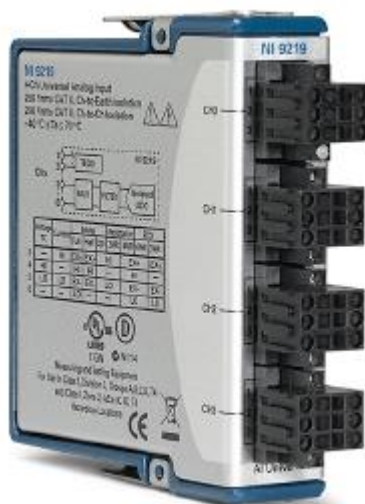


Figura 6.7 Tarjeta de adquisición NI 9219

La tabla 6.1 indica las especificaciones que son típicas para el rango de -40 °C a 70 °C a menos que se indique lo contrario.

Tabla 6.1 Especificaciones de entrada del módulo NI 9219

| Características de entrada | |
|----------------------------|---|
| Cantidad de canales | 4 canales de entrada analógica |
| Resolución ADC | 24 bits |
| Tipo de ADC | Delta-sigma (con prefiltrado analógico) |
| Modo de muestreo | Simultaneo |
| Tipos de TEDS compatibles | IEEE 1451.4 TEDS Class 2 (Interface) |

Como se muestra en la figura 6.8 cada canal tiene un conector de seis terminales. Los sensores se conectan en estas terminales dependiendo del tipo de señal analógica que se requiera detectar.

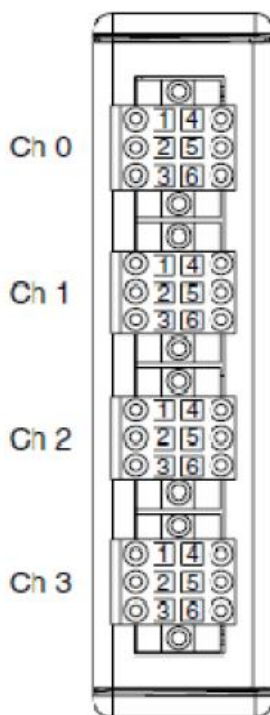


Figura 6.8 Canales del módulo NI 9219

La tabla 6.2 muestra el nombre de las señales que se conectan a las terminales del módulo. Dependiendo de la modalidad, las terminales 3 y 5 pueden ser señales de excitación o bien señales de entrada.

Tabla 6.2 Nombres de las señales para el modulo NI 9219

| Terminal | Nombre de la señal | Descripción de la señal |
|----------|--------------------|--|
| 1 | T+ | TEDS datos |
| 2 | T- | TEDS común |
| 3 | EX+ / HI | Excitación o señal de entrada positiva |
| 4 | HI | Señal de entrada positiva |
| 5 | EX / LO | Excitación o señal de entrada negativa |
| 6 | LO | Señal de entrada negativa |

La Tabla 6.3 exhibe las diferentes modalidades que posee el módulo NI-9219 y las terminales asociadas a las señales en cada modalidad.

Tabla 6.3 Asignación de terminales en el NI 9219 por modalidad

| Modalidad | Terminal | | | | | |
|----------------------------------|----------|----|-----|----|-----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Voltaje | T+ | T- | - | HI | LO | - |
| Corriente | T+ | T- | HI | - | LO | - |
| Resistencia de cuatro hilos | T+ | T- | EX+ | HI | EX- | LO |
| Resistencia de dos hilos | T+ | T- | HI | - | LO | - |
| Termopar | T+ | T- | - | HI | LO | - |
| Termoresistencia de cuatro hilos | T+ | T- | EX+ | HI | EX- | LO |
| Termoresistencia de tres hilos | T+ | T- | EX+ | - | EX- | LO |
| Cuarto de puente | T+ | T- | HI | - | LO | - |
| Medio puente | T+ | T- | EX+ | HI | EX- | - |
| Puente completo | T+ | T- | EX+ | HI | EX- | LO |
| Entrada digital | T+ | T- | - | HI | LO | - |
| Contacto abierto | T+ | T- | HI | - | LO | - |

El módulo NI-9219 se encuentra aislado canal por canal. Cuatro convertidores analógicos a digital de 24 bits convierten simultáneamente todos los canales analógicos de entrada. El NI-9219 habilita un circuito de excitación para todas las modalidades de entrada que requieran excitación, y reconfigura el ADC y los circuitos de excitación en cada modalidad para que se acople cada tipo de sensor.

6.2.2. Módulo NI 9229 (módulo de entradas analógicas)

El NI 9229 es un módulo de entrada analógica para adquisición simultánea de 4 entradas analógicas y para uso en sistemas NI CompactDAQ o CompactRIO. Cada canal proporciona un rango de medición de ± 60 V con una resolución de 24 bits. Las salidas NI 9229 soportan 50 kS/s (50.000 muestras por segundo) de datos por canal a la velocidad máxima de muestreo.

Diseñado para velocidad y precisión, el NI 9229 es un módulo analógico eficaz de uso general debido a su resolución, frecuencia de muestreo, y rango de entrada.



Figura 6.9 Tarjeta de adquisición NI 9229

La tabla 6.4 indica las especificaciones que son típicas de entrada para el módulo NI 9229.

Tabla 6.4 Especificaciones de entrada del módulo NI 9229

| Características de entrada | |
|----------------------------|---|
| Cantidad de canales | 4 canales de entrada analógica |
| Resolución ADC | 24 bits |
| Tipo de ADC | Delta-sigma (con prefiltrado analógico) |
| Modo de muestreo | Simultáneo |

Como se muestra en la figura 6.10 cada canal tiene un conector de dos terminales. Los sensores que se conectan a estos terminales son de señal de salida tipo voltaje principalmente, pero también se pueden de señal de salida tipo corriente teniendo en cuenta

que es necesario usar resistencias eléctricas para transformar la intensidad de corriente a valores de voltaje.

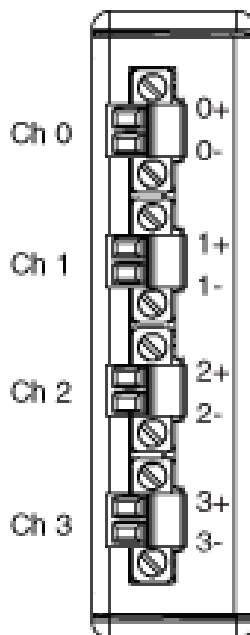


Figura 6.10 Canales del módulo NI 9229

Las señales de entrada en cada canal se acondicionan, se almacenan en búfer y luego se toman muestras de un ADC. Cada canal AI proporciona una ruta de señal independiente y ADC, lo que le permite tomar muestras todos los canales simultáneamente.

La Tabla 6.5 exhibe las diferentes modalidades que posee el módulo NI-9229 y los terminales asociados a las señales en cada modalidad.

Tabla 6.5 Asignación de terminales en el NI 9229 por modalidad

| Channel | Terminal | Signal |
|---------|----------|--------|
| 0 | 0+ | AI 0+ |
| | 0- | AI 0- |
| 1 | 1+ | AI 1+ |
| | 1- | AI 1- |
| 2 | 2+ | AI 2+ |
| | 2- | AI 2- |
| 3 | 3+ | AI 3+ |
| | 3- | AI 3- |

Para el sistema de adquisición, medición y análisis que se presenta se configura el módulo NI 9229 para que trabaje en la modalidad de voltaje.

6.3. Levantamiento del sistema de medición del generador de vapor

La instrumentación y control empleada en las industrias de proceso tienen su propia terminología, los términos empleados definen las características propias de medida y de control y las estáticas y dinámicas de los diversos instrumentos utilizados. Es por eso que todo sistema de medición, en especial para un generador de vapor, debe tener un desempeño más que tolerable para medir la variable física de interés. Dentro de los términos más usados están:

- La exactitud

Es la cualidad o grado de un instrumento de medida de dar una lectura próxima al verdadero valor de la magnitud medida. La “exactitud en la medida” no es una magnitud y no se expresa numéricamente. Se dice que una medición es más exacta cuanto más pequeño es el error de la medición. La unidad de exactitud puede ser expresada en términos de la variable medida: por ejemplo $\pm 1^{\circ}\text{C}$, en porcentaje del span: por ejemplo $\pm 0.5\%$ del span. Asimismo en porcentaje del valor máximo: por ejemplo $\pm 0,2\%$ de 300 PSI, en porcentaje de la longitud de la escala: por ejemplo $\pm 0,1\%$ F.S. y en porcentaje de la lectura actual: por ejemplo $\pm 0,2\%$ de la lectura.

- La precisión

Es la proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, bajo condiciones especificadas. La precisión se puede expresar numéricamente mediante medidas de dispersión tales como desviación típica, variancia o el coeficiente de variación bajo las condiciones especificadas. La precisión, se utiliza para definir a la repetibilidad de medida.

- El rango

Es el conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medición y transmisión del instrumento, es decir, los valores para los cuales el aparato proporciona una lectura fiable y que viene expresado en los dos valores extremos.

- La resolución

Es la mínima variación de la magnitud medida que da lugar a una variación perceptible de la indicación correspondiente.

6.3.1. Caracterización de instrumentos de medición del generador de vapor

De acuerdo a lo investigado el generador de vapor goza del sistema de medición y control mostrado en la tabla 6.6.

Tabla 6.6 Instrumentos de medición y control existentes

| Dispositivo | Marca | Modelo | Rango | Resolución | Exactitud | Señal de salida |
|-------------------------|--------------------|----------|--------------|------------|------------------|-----------------|
| Manómetro estándar seco | Winters | - | 0 a 150 bar | 0,2 bar | ± 1,5 % del span | N/A |
| Presóstato diferencial | Danfoss | KPI35 | -0,2 a 8 bar | 0,2 bar | - | N/A |
| Presóstato de máxima | Danfoss | RT116 | 1 a 10 bar | 1 bar | - | N/A |
| Termómetro bimetálico | Winters | TBM40040 | 0 a 500 °C | 5 °C | ± 1 % del span | N/A |
| Control de nivel | McDonnell & Miller | 150s | 150 PSI | - | - | Corriente |

6.4. Selección de sensores para variables de presión de vapor, temperatura y caudal de agua y caudal de combustible

Como se indicó en el punto 6.1 los aspectos principales para una correcta selección de un sensor van desde una buena exactitud en la medición de las magnitudes y sobre el rango de las variables. Como también de las condiciones físicas, de ambiente y de ambiente de proceso.

Para realizar el montaje del instrumento en las partes adecuadas del generador de vapor se debe utilizar ciertos elementos de acople, por ende debe tomarse en consideración el tipo y tamaño de la rosca tanto del sensor o transductor, así como de la cañería donde se va a ubicar.

6.4.1. Sensor de presión

Para la selección de dicho dispositivo se consideran datos de presión y temperatura en relación a las tablas de vapor, las características de fabricación del generador de vapor y simultáneamente con las condiciones de operación de éste, ya que la máxima presión de funcionamiento es de 5 kg/cm² manométrica.

En base a lo descrito, se ha seleccionado el siguiente sensor:

| Marca | Modelo | Rango | Exactitud | Señal de salida |
|-------|--------|---------|------------|---------------------|
| Wika | S-20 | 0-6 bar | 0,5 % F.S. | Corriente (4-20 mA) |

Nota: Para mayor información ver anexo B.

6.4.1.1. Montaje del transductor de presión

El sensor de presión se puede instalar en la tubería externa junto al manómetro, dicha tubería es de acero Norma DIN 17175 de 33,7 mm diámetro exterior y espesor de 2,6 mm, mientras el sensor posee una conexión roscada M 20x1,5.

6.4.2. Sensor de temperatura

Para la medición de la variación de temperatura del agua que ingresa a la caldera, se instalará un detector de temperatura en el estanque de agua de alimentación. Para tal caso se considerará una termocupla tipo J, ya que la variación de temperatura al interior del estanque fluctúa entre 10 a 30 °C. Asimismo, se consideró la selección de un termómetro a tensión con salida eléctrica, cuyo objetivo será medir la variación de temperatura de los gases en la base de la chimenea. Su selección se realiza a partir de la temperatura máxima que alcanzan dichos gases y que es alrededor de 250°C.

En base a lo anterior, se ha seleccionado los siguientes instrumentos:

| Instrumento | Marca | Modelo | Rango | Exactitud | Señal de salida |
|----------------------|-------|---|----------|-----------|-----------------------|
| Termocupla | - | J con enganche tipo bayoneta y niple hilo ¼ NPT | 0-350 °C | 55 µV/°C | Voltaje (0...69 mV) |
| Termómetro a tensión | Wika | TGT70.100 | 0-250 °C | ± 1% F.S. | Corriente (4...20 mA) |

Para mayor información ver anexos C y D.

6.4.2.1. Montaje de los sensores de temperatura

El primer detector de temperatura se puede instalar en el estanque de agua junto al dispositivo de medición de nivel. En cambio el termómetro a tensión se instalará en la base de la chimenea, junto al termómetro bimetálico ya existente.

6.4.3. Caudalímetros

La selección del transductor de caudal para medir el flujo volumétrico de agua que ingresa a la caldera se inicia con un análisis de la capacidad mínima y máxima de impulsión en litros por minuto (l/m) de la bomba de turbina modelo 330CS7M. Según el estudio de la hoja técnica de datos, se identificó que el caudal impulsado va desde 45 hasta 77,4 (l/m).

Después se procedió a verificar el rango de operación de la bomba, al llevar a cabo una medición de caudal a través de un medidor de flujo de tiempo de tránsito digital marca Thermo Polysonics DCT7088. Los resultados arrojaron que el rango de operación se encuentra entre 57,6 a 64,8 (l/m).

En cambio la selección del caudalímetro para medir la cantidad de combustible que se consume en el quemador se realiza, a partir, de mediciones registradas en experiencias de laboratorio anteriores y que mostraron que para tiempos de ciclos de funcionamiento del generador de vapor que fluctuaban entre 5 a 10 minutos, el consumo de combustible variaba de 0,4 a 0,8 m^3 .

En base a lo descrito, se ha seleccionado lo siguiente:

| Instrumento | Marca | Modelo | Rango | Exactitud | Señal de salida |
|----------------------------|-------|-------------|------------------|------------------|-----------------------|
| Caudalímetro para líquidos | GPI | G2 1500 PSI | 19...190 (l/min) | $\pm 1\%$ F.S. | Corriente (4...20 mA) |
| Caudalímetro para gases | OMEGA | FMA-1610A | 0 a 100 (sl/min) | $\pm 0,2\%$ F.S. | Voltaje (0...5 Vcc) |

Nota: Para mayor información ver anexos E y F.

6.4.3.1. Montaje caudalímetro para agua de alimentación caldera

El montaje se puede realizar en la tubería de agua de alimentación a la caldera, dicha tubería es de acero Norma DIN 17175 de 33,7 mm diámetro exterior y espesor de 2,6 mm. La posición específica de instalación sería en un tramo de más o menos 1 metro de tubería ubicada después del paso del agua por la respectiva bomba de turbina.

6.4.3.2. Montaje caudalímetro para combustible propano

El caudalímetro se puede instalar en la tubería justo antes de la válvula de bola que suspende el suministro de combustible. Dicho tubería de cobre tipo L posee un diámetro exterior de 28,57 mm (DN 1") y un espesor 1,27 mm.

6.5. Diseño del sistema adquisición de datos y estudio teórico experimental del generador de vapor

El diseño del sistema de adquisición de datos y estudio teórico experimental comienza con la instalación del software LabVIEW 2017 32 bits en un ordenador portátil, cuyas características mínimas requeridas son un procesador Intel Pentium 2.1 GHz, una memoria RAM 4GB y con un sistema operativo de 64 bits. Se prosigue con la instalación del controlador NI-DAQmx versión 17 y el módulo DSC de National Instruments. Dicho controlador proporciona un software adicional con una sola interfaz de programación para configurar entrada analógica, salida analógica, E/S digital y contadores en cientos de dispositivos de hardware DAQ denominado Measurement & Automation Explorer (MAX).

MAX es una utilidad para acceder, configurar, diagnosticar y correr tareas sencillas en hardware de National Instruments como DAQ Assistant. Ver figura 6.16.

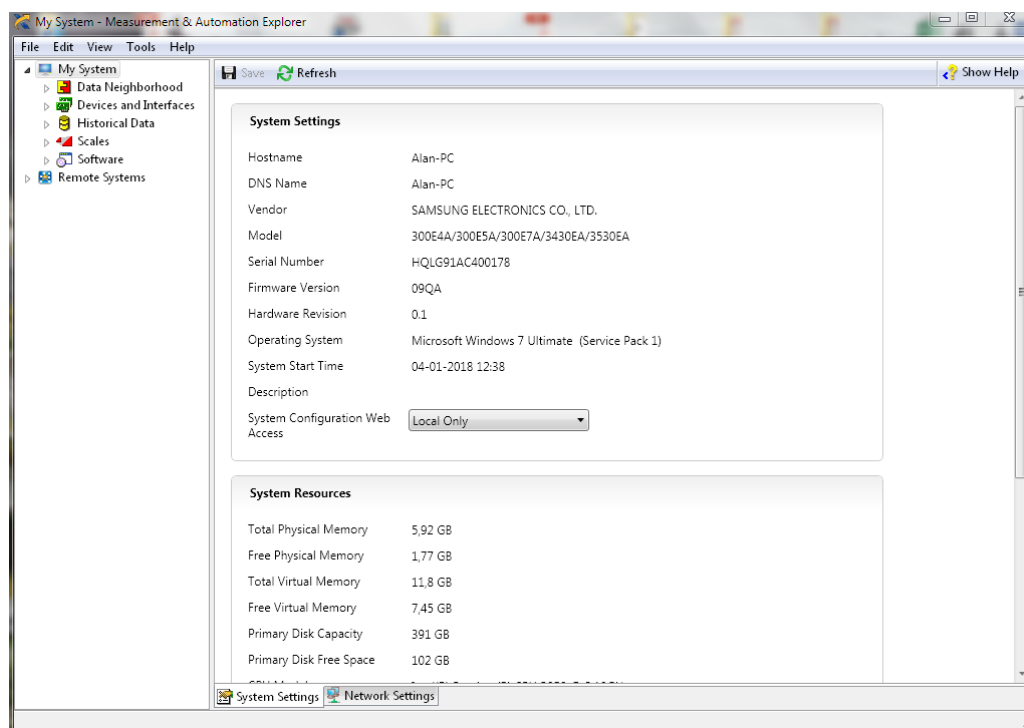


Figura 6.16 Ventana de comunicación con MAX

DAQ Assistant es un asistente basado en ventanas de diálogo que viene incluido en el controlador NI-DAQmx, el cual puede ser accesado desde MAX o LabVIEW para crear canales virtuales y tareas de medición sin tener que programar. El uso de MAX, DAQ Assistant y software LabVIEW, ahorran tiempo de configuración, desarrollo y registro de datos.

El diseño continúa con la creación de un dispositivo simulado NI-DAQmx, que no es más que un réplica de un módulo o tarjeta de adquisición usando la opción de dispositivo simulado NI-DAQmx en el menú Create New de MAX, con el fin de operar una función o un programa sin necesidad de hardware. Por lo tanto, el(los) dispositivo(s) simulado(s) se comporta(n) de manera similar a un dispositivo real, y mediante el software LabVIEW se puede programar tareas de adquisición de datos en el diagrama de bloques por medio del asistente DAQ (DAQ Assistant).

Los dispositivos simulados NI-DAQmx permiten realizar lo siguiente:

- Iniciar el desarrollo y lógica de aplicaciones sin necesidad de hardware.
- Desarrollar la lógica de aplicación en otro equipo que no sea el sistema de destino.
- Evaluar la funcionalidad de adquisición del software de National Instruments sin poseer ningún tipo de hardware.

Una vez creado el(los) dispositivo(s) simulado(s) se procede a realizar tareas de adquisición de datos, de acuerdo a los diferentes sensores o transductores seleccionados. Esto es configurar cada canal físico de la(s) tarjeta(s) de adquisición en base al tipo de tarea de medición a realizar. Cabe señalar que cuando se simulan uno o varios dispositivos, éste o éstos crean una onda sinusoidal para representar el comportamiento de una señal analógica proveniente de un sensor característico.

Las tareas de medición a realizar son presión manométrica de vapor, caudal de agua que ingresa a la caldera, temperatura de los gases que escapan por la chimenea, flujo volumétrico de combustible y temperatura del agua contenida en un estanque. Para llevar a cabo el proceso de obtención de datos es necesario utilizar el asistente DAQ (DAQ Assistant). En el punto 6.5.2.1 se explica cómo realizar el proceso de configuración del asistente DAQ para una entrada analógica.

Luego en el panel frontal, se seleccionan indicadores tipo gráfico, de tal manera que se puedan visualizar lecturas de datos con respecto al tiempo de funcionamiento. Con fines de complementar la adquisición de datos, se agrega un indicador tipo tabla junto a los gráficos referidos a cada variable de medición (ver figura 6.36), y además una función encargada de almacenar los datos de las mediciones hechas por los sensores en aquellos casos que se desee. En el punto 6.5.4.4. se da una explicación de los controles, indicadores y funciones utilizados en el diagrama de bloques para la obtención de datos.

Concluido lo anterior, inicia la etapa de programación gráfica para determinar el rendimiento térmico directo e indirecto en el diagrama de bloques del software LabVIEW. Esto se lleva a cabo a través de la función Formula Node que permite plantear expresiones matemáticas y de acuerdo a variables de entrada que se soliciten e ingresen, automáticamente se determinan las incógnitas requeridas o variables de salidas, una vez que se ejecuta la programación. En el punto 6.5.4 se describe todo lo referido al cálculo del rendimiento térmico a través de la ventana diagrama bloques.

6.5.1. Procedimiento para crear un dispositivo simulado DAQmx

Para crear un dispositivo simulado NI-DAQmx, lo primero que se debe hacer es abrir Measurement & Automation Explorer (MAX). Como se mencionó antes los dispositivos simulados NI-DAQmx se crean en MAX. Después se debe hacer clic en My System>>Devices and Interfaces y seleccionar Create New. En el diálogo siguiente, se selecciona Simulated NI-DAQmx Device or Modular Instrument. Ver figura 6.17.

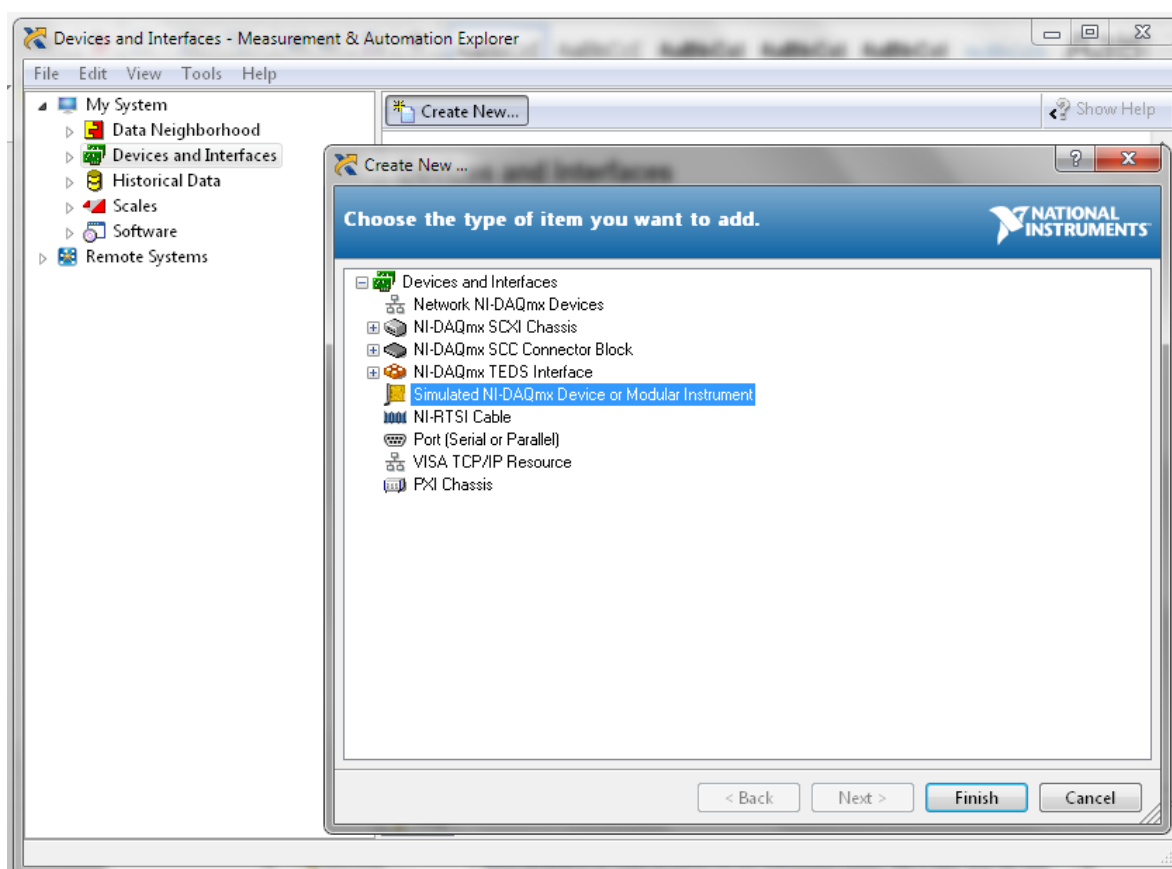


Figura 6.17 Crear un dispositivo simulado NI-DAQmx en MAX

La ventana Create Simulated NI-DAQmx Device pedirá que se seleccione un dispositivo. Enseguida se debe escoger el dispositivo que desea crear como un dispositivo simulado NI-DAQmx. Con esta lista, se puede navegar por los cientos de dispositivos soportados por NI-DAQmx. Ver figura 6.18

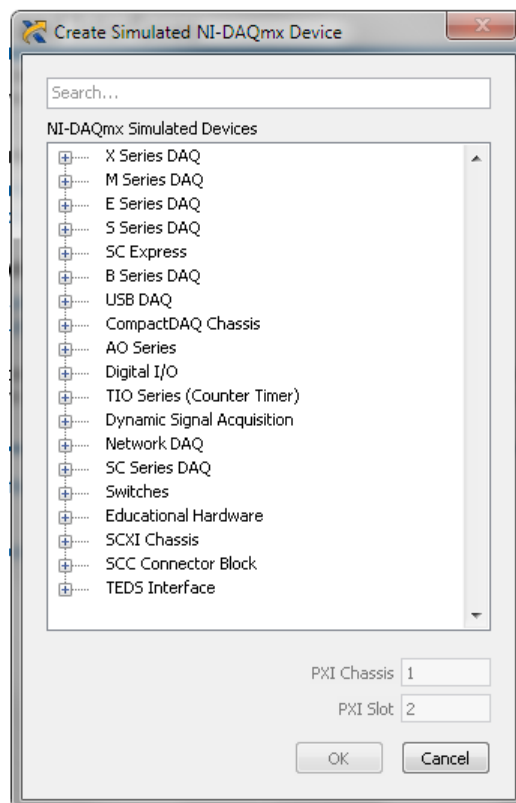


Figura 6.18 Dispositivos compatibles de NI-DAQmx.

A continuación se debe hacer clic en OK en la ventana Create Simulated NI-DAQmx Device. El dispositivo simulado NI-DAQmx aparece en MAX. El color del icono de los dispositivos simulados NI-DAQmx es diferente al de los dispositivos reales. Los dispositivos reales son de color verde y los chasis son de color gris, mientras que los dispositivos y chasis simulados son de color amarillo. Ver figura 6.19.

6.5.1.1. Consideraciones para el uso de Dispositivos Simulados NI-DAQmx

Cabe señalar que todos los dispositivos simulados NI-DAQmx crean una onda sinusoidal a escala completa con 3% de ruido para todos los canales de entrada analógica. Cuando hay múltiples canales en la tarea, los datos para cada canal están ligeramente compensados en el tiempo. Los dispositivos simulados no simulan el tiempo, los datos están siempre disponibles de inmediato para la lectura.

Las tareas NI-DAQmx para los dispositivos simulados NI-DAQmx se verifican tal y como se encuentran en los dispositivos reales. Si una propiedad es establecida en un valor no válido, el error devuelto por un dispositivo simulado NI-DAQmx va a ser idéntico al error devuelto por un dispositivo real.

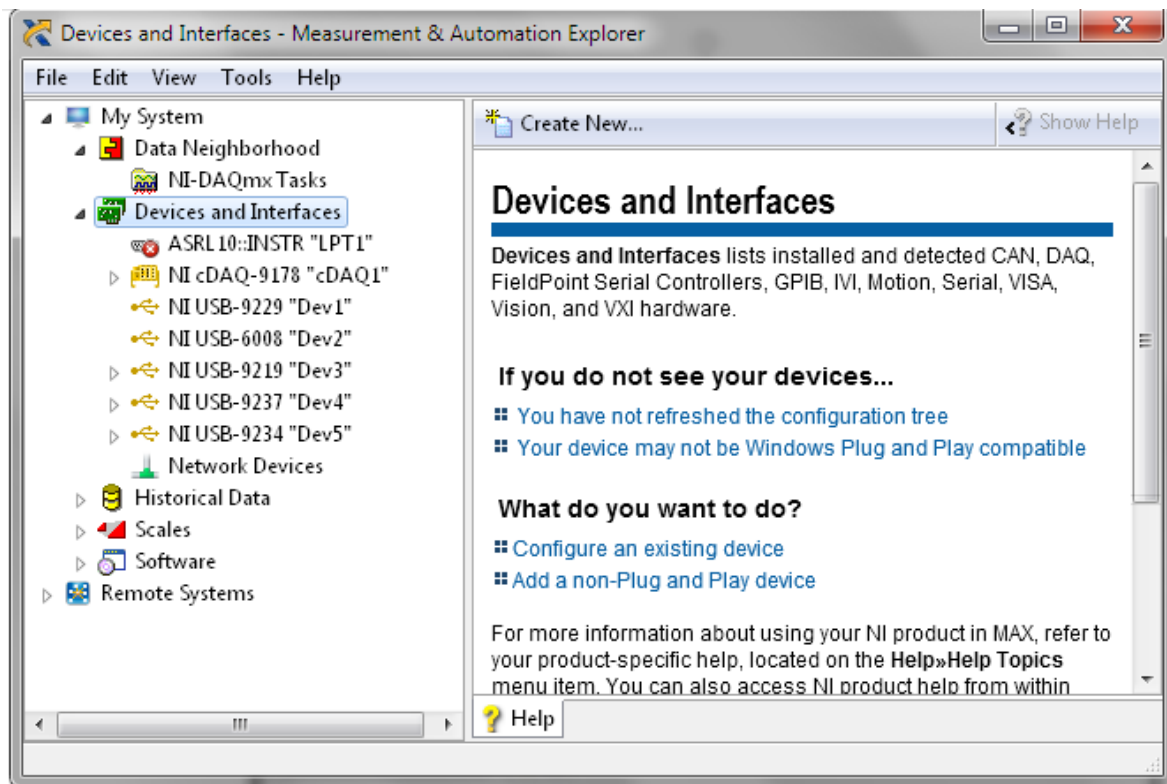


Figura 6.19 Listado de dispositivos simulados en el menú MAX

6.5.2. Entorno de configuración del DAQ Assistant

El asistente de adquisición de datos permite al usuario trabajar con mayor facilidad y rapidez de tal manera de brindar un mejor desempeño en lo que respecta a productividad y rendimiento.

El asistente DAQ es una herramienta muy práctica de utilizar ya que concede crear canales virtuales y tareas de medición sin tener que programar.

Existen múltiples tipos de medición en los canales virtuales, los cuales incluyen presión, fuerza y velocidad, entre otros (ver figura 6.20), por ende al utilizar un canal virtual se puede convertir rápidamente, por ejemplo, voltajes en unidades de ingeniería tales como Newton o libras por pulgada cuadrada.

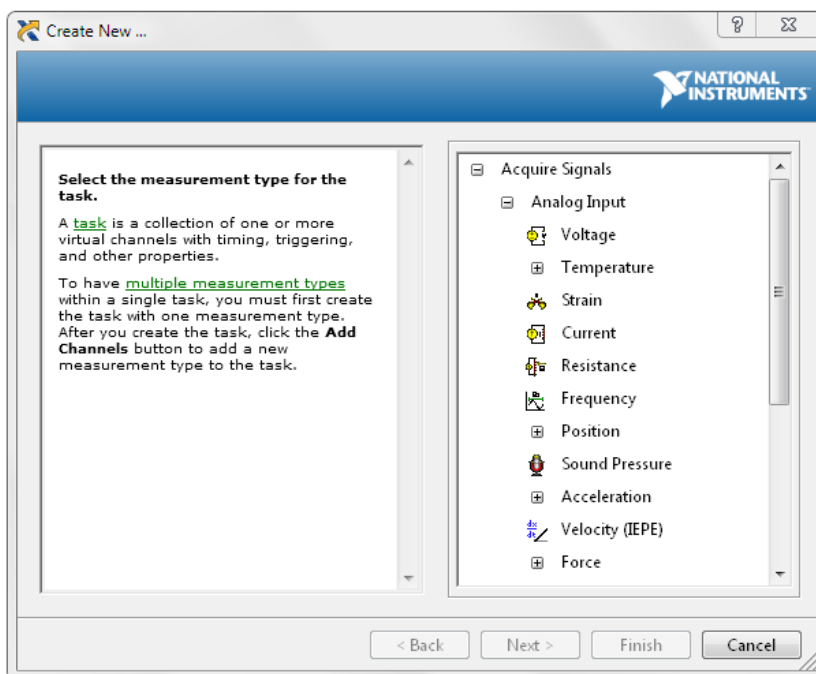


Figura 6.20 Tipos de medición

La ventana de DAQ Assistant que se muestra en la figura 6.21 permite configurar el tipo de muestreo y cuantas muestras desea el usuario, así como la frecuencia del mismo. Además se permite la visualización de los datos como prueba.

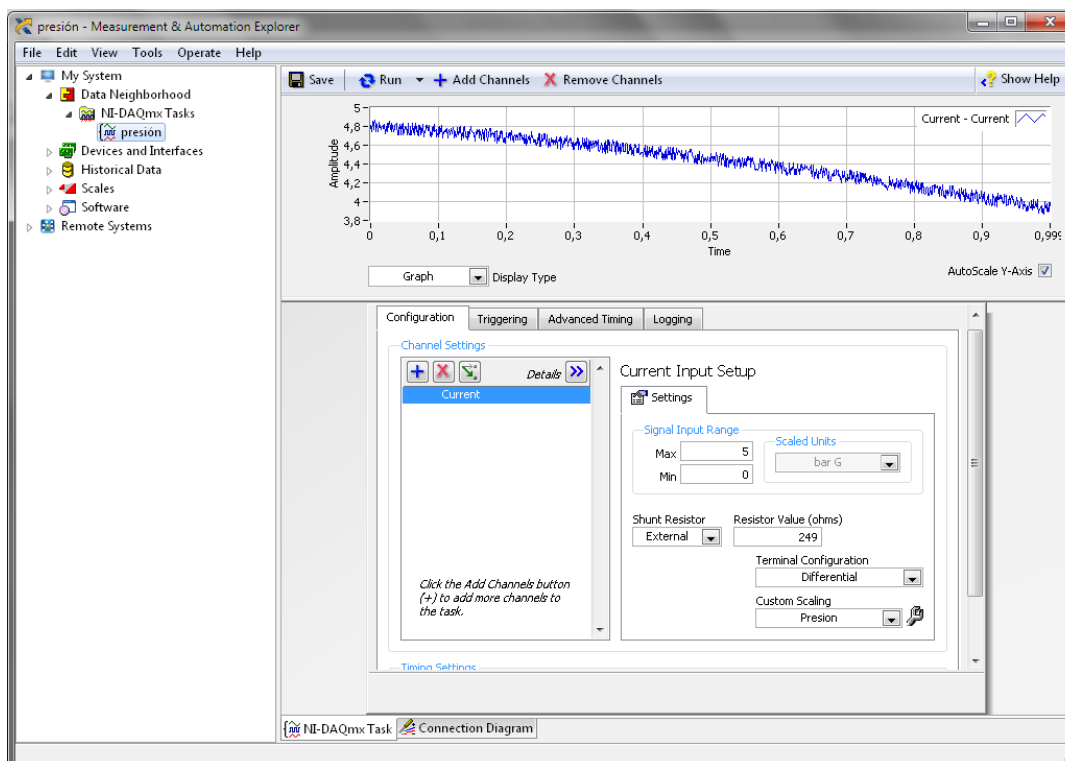


Figura 6.21. Ventana de diálogo DAQ Assistant

Cuando se coloca este instrumento virtual (VI) en el diagrama de bloques (ver figura 6.22), el DAQ Assistant crea una nueva tarea la cual se va editando conforme a los requerimientos del usuario. Se puede editar las veces que se requiera dando doble clic sobre el módulo. Para una medición de los datos continua en este VI, se puede colocar alrededor de un bucle tal cual como muestra la figura 6.22.

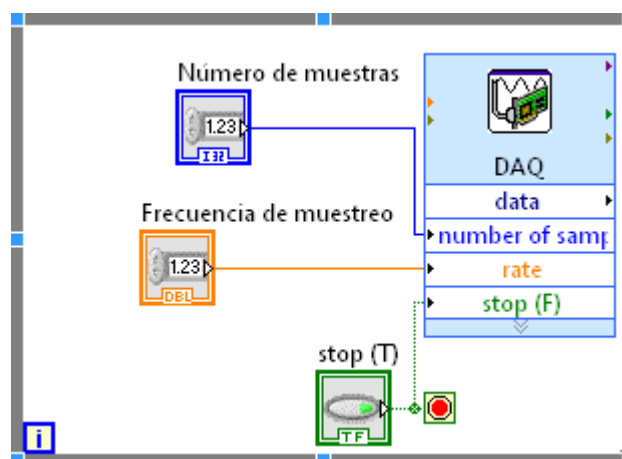


Figura 6.22 VI DAQ Assistant

Para fines de este estudio el muestreo de señales analógicas debe ser configurado como continuo, de esta forma se registrarán los datos, segundo a segundo durante el funcionamiento, sin embargo, no se debe exagerar en el número de muestras registradas por segundo ya que únicamente se crearían archivos sumamente extensos y ocuparían demasiado espacio en el ordenador.

Cada uno de los canales de entradas analógicas (canales virtuales) se encontrarán nombrados de acuerdo a la variable que se va a medir y con su respectiva escala personalizada, y que el propio software permite configurar en la función Custom Scaling. Custom Scaling (escala personalizada) permite crear escalas de medición de cualquier tipo sean lineales, exponenciales, por tablas entre otros, que generalmente relacionan una salida lineal entre el parámetro de entrada y la de salida de cada uno de los transductores. Por ejemplo, la presión de un gas ideal en un recipiente cerrado está relacionada con su temperatura. Puede crear un canal virtual para medir la temperatura y usar una escala personalizada que convierta esa temperatura a una lectura de presión.

Cabe señalar que la tarjeta o módulo NI-9229 maneja valores de voltaje de entrada comprendidos ± 60 Vcc, en tal caso será necesario colocar 3 módulos conversores analógicos de corriente a voltaje (ver anexo G) para transformar la señal de salida tipo corriente (4-20 mA) provenientes del sensor de presión, termómetro y caudalímetro para líquidos a un señal de salida tipo voltaje (0-5 Vcc).

Con estos valores de voltaje se confeccionan las escalas personalizadas de tipo lineales para obtener las lecturas de presión de vapor, temperatura de los gases y flujo volumétrico de agua. Dichas escalas se elaboran, a partir, de la teoría de la ecuación de la curva, en la cual se determina la pendiente de la recta y luego el término independiente. Entonces, si el parámetro de salida del transductor es un valor de voltaje, la escala asocia a ese valor a una lectura de presión, temperatura o caudal respectivamente. En las figuras 6.23, 6.24 y 6.25 se observan las escalas personalizadas confeccionadas.

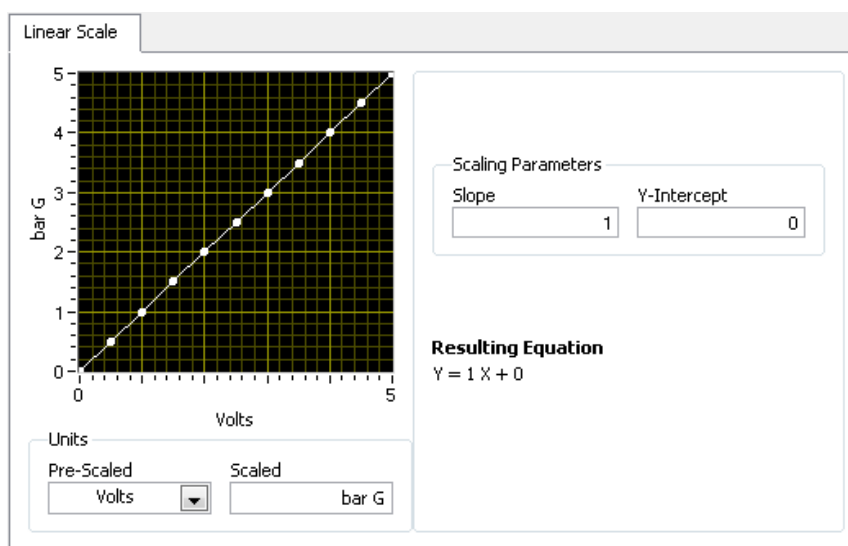


Figura 6.23 Curva personalizada de presión de vapor

Donde:

x = Voltaje corriente continua (Vcc)

y = Presión (bar G)

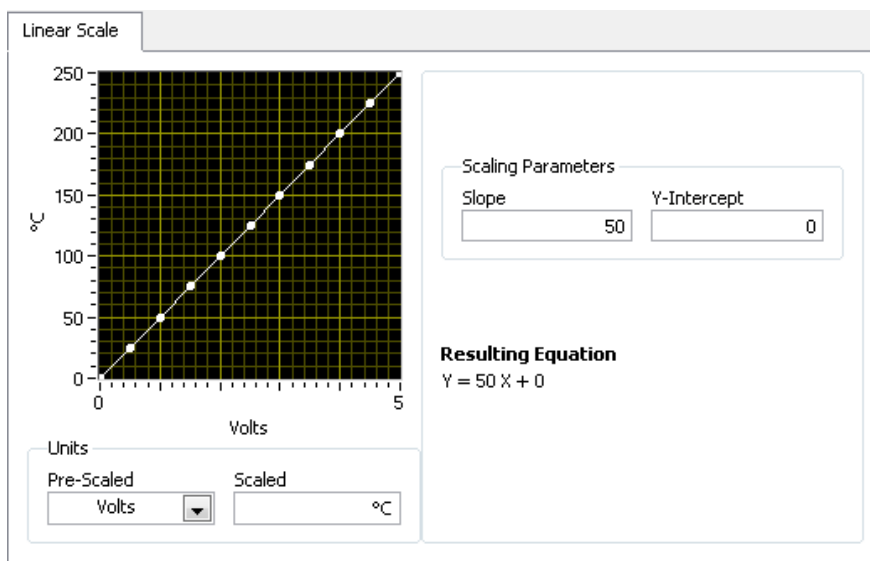
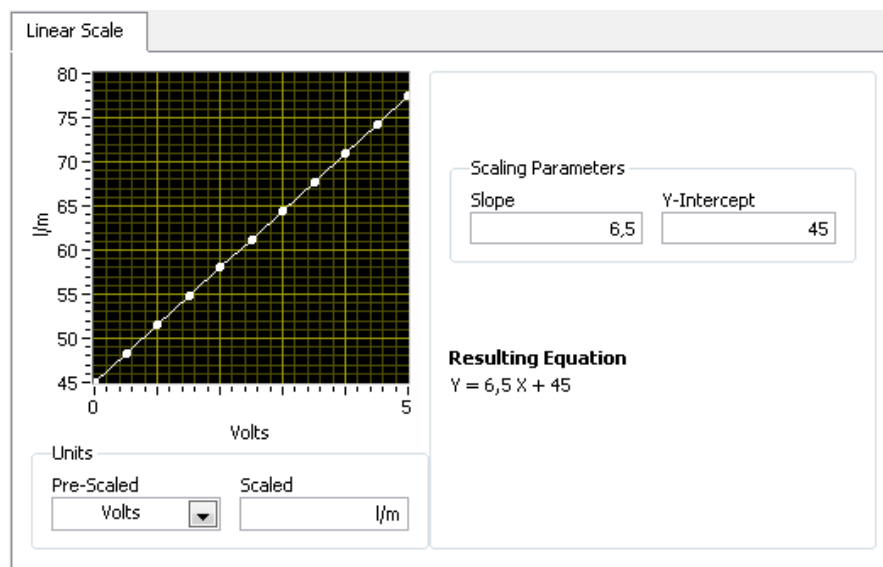


Figura 6.24 Curva personalizada de temperatura de gases

Donde:

x = Voltaje corriente continua (Vcc)

y = Temperatura gases (°C)



6.25 Curva personalizada caudal de agua

Donde:

x = Voltaje corriente continua (Vcc)

y = Caudal de agua (l/min)

En cambio para la lectura del flujo volumétrico de combustible no es necesario utilizar un módulo conversor, ya que el caudalímetro seleccionado para monitorear entrega una señal de salida tipo voltaje de 0 a 5 Vcc. Por ende solo se utiliza la personalización expresada en la figura 6.26.

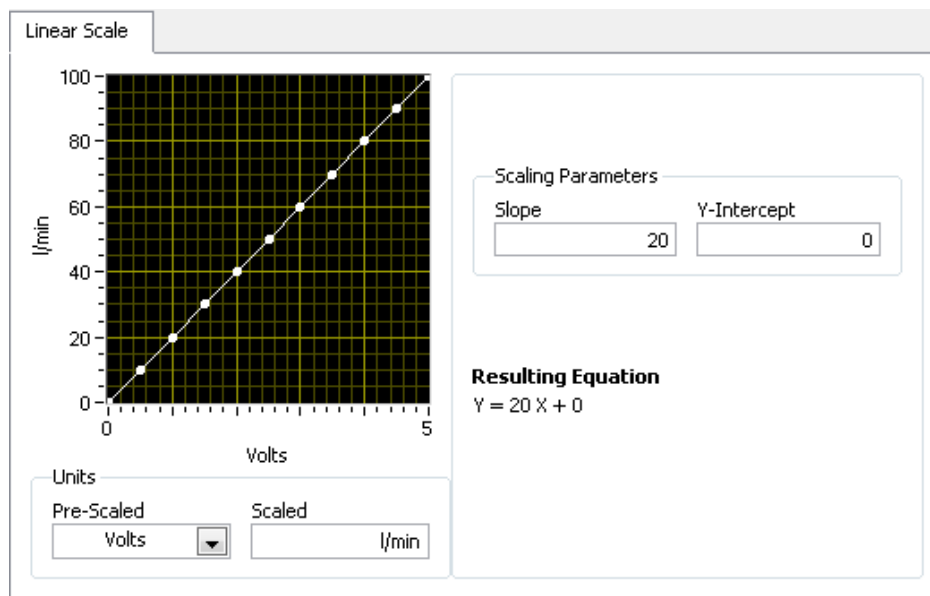


Figura 6.26 Curva personalizada caudal de combustible

Donde:

x = Voltaje corriente continua (Vcc)

y = Caudal de combustible (l/min)

Por otro lado, en el módulo NI-9219 se configura un solo canal para medir la temperatura del agua en el estanque de alimentación por medio de una termocupla o termopar. La ventaja de este módulo es que en cada uno de sus canales tiene un termistor incorporado para cálculos de compensación de unión en frío (CJC), es decir, remueve el efecto del voltaje generado al conectar un termopar a una tarjeta de adquisición de datos y con ello se obtiene una medición o lectura más precisa.

6.5.2.1. Configuración DAQ Assistant para una entrada analógica

A continuación se precisa a modo de ejemplo el procedimiento para configurar una entrada analógica a partir de la ventana de diálogo DAQ Assistant.

En primer lugar se debe abrir un nuevo VI en el software LabVIEW, luego se visualizará dos ventanas y se seleccionará la ventana diagrama de bloques. Al hacer clic derecho se debe abrir la paleta de funciones, en la cual se debe encontrar el DAQ Assistant. Se podrá localizar en dos lugares diferentes, dependiendo de la paleta de funciones que esté utilizando. En la paleta Express Functions, el DAQ Assistant se encuentra en la subpaleta "Input" (entrada) y en la paleta Measurements I/O, se localiza al hacer clic en la subpaleta NI DAQmx. Ver figuras 6.27 y 6.28 respectivamente.

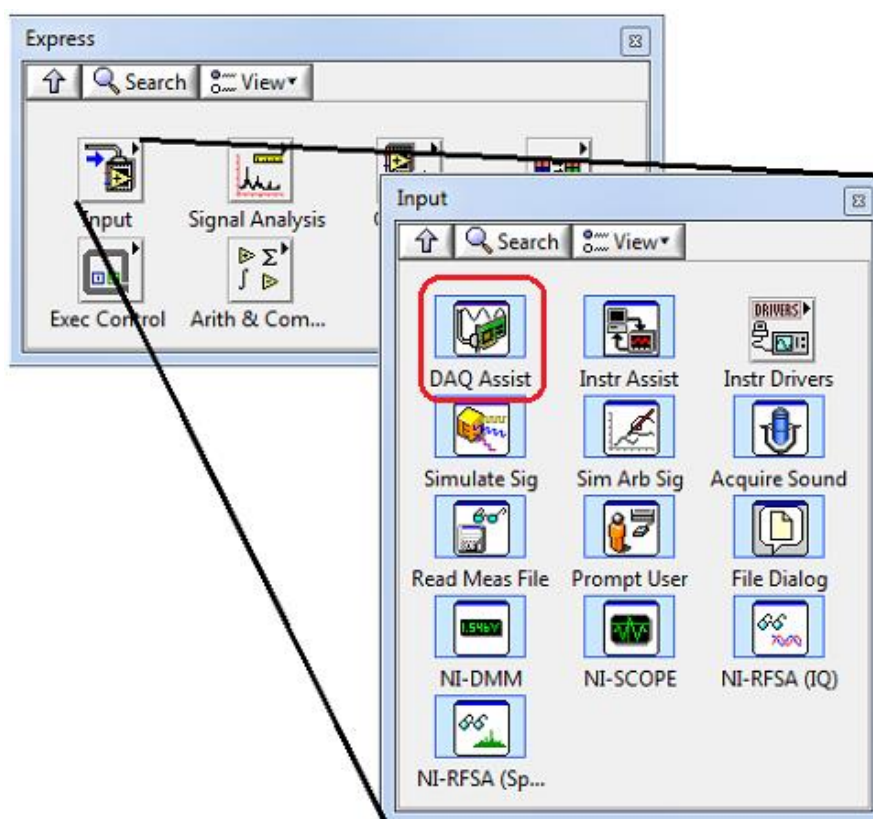


Figura 6.27. Paleta Express de Funciones

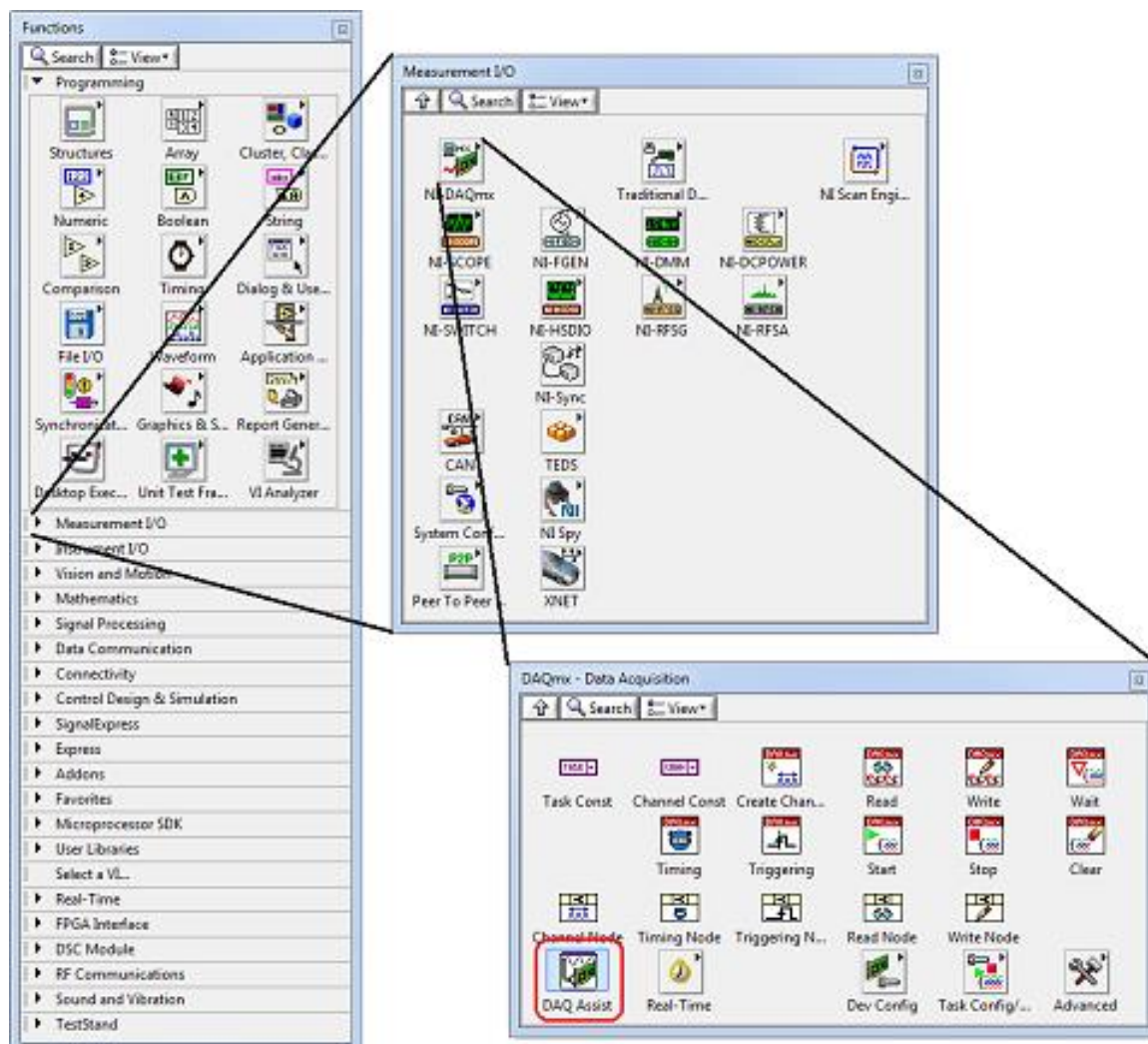


Figura 6.28. Paleta Measurements I/O

Una vez que se localiza el DAQ Assistant en cualquiera de los lugares mencionados, se debe seleccionar de la paleta y soltar en el diagrama de bloques. De forma predeterminada, la página de propiedades debería aparecer, lo que le permite configurar la tarea. El primer paso es seleccionar el tipo de medida. Ver figura 6.29.

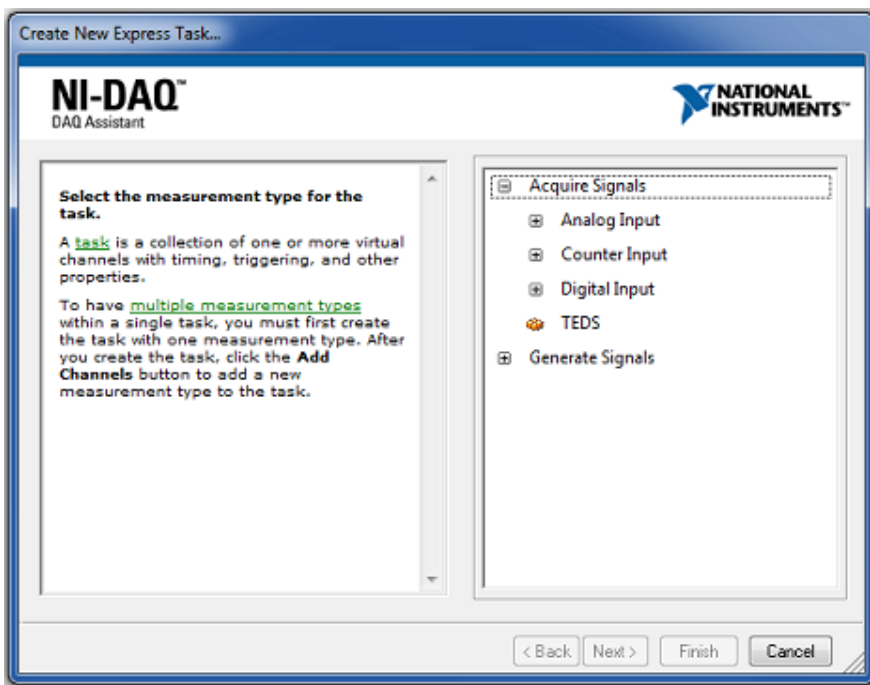


Figura 6.29 Asistente de creación de tareas

Hay varias opciones para una adquisición de entrada analógica. A modo de ejemplo se configura una simple entrada analógica (Analog Input), medición de voltaje (Voltage). Ver figura 6.30

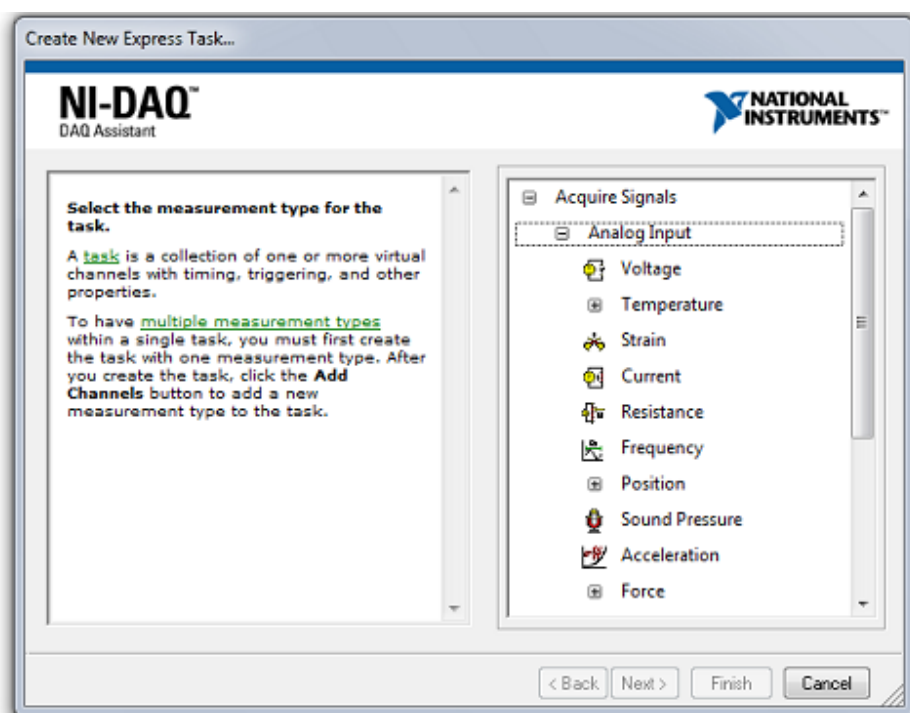


Figura 6.30 Configuración entrada analógica

Al seleccionar voltaje como el tipo de adquisición de entrada analógica, se tendrá la opción de seleccionar los canales que se desean adquirir. La primera pantalla que se verá permitirá seleccionar los canales físicos de los que pretende adquirir, al crear canales locales. Ver figura 6.31.

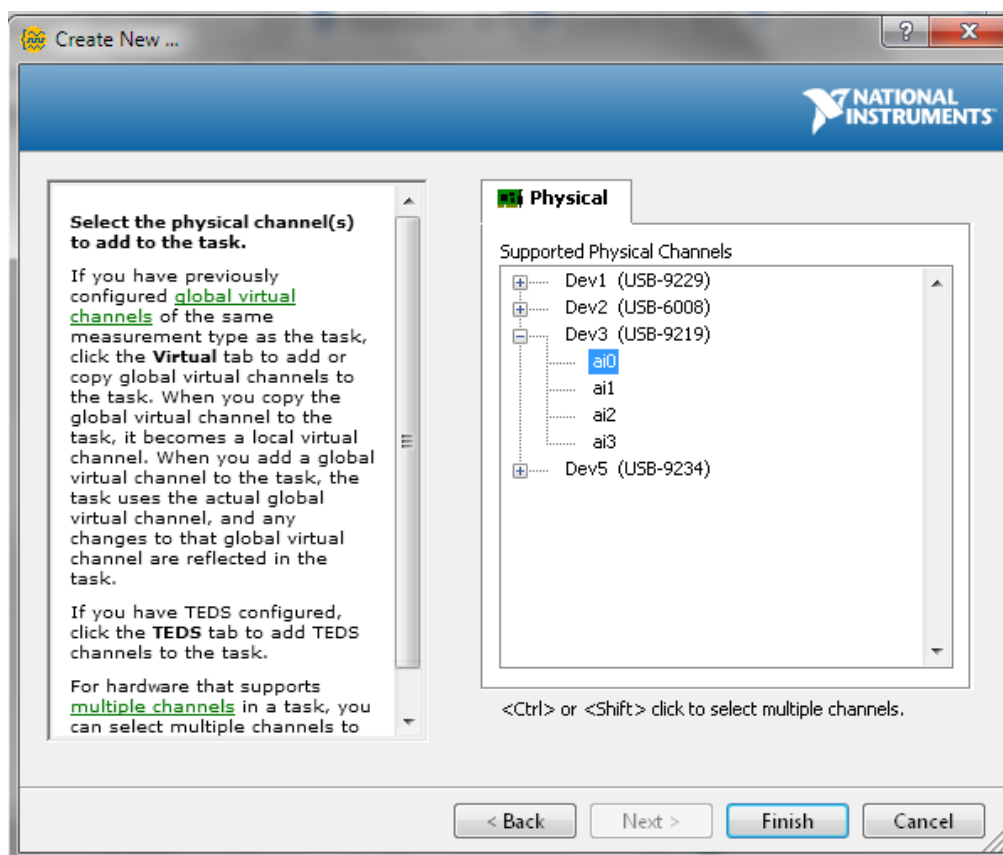


Figura 6.31 Soporte de canales físicos

Una vez que se selecciona el (los) canal (es), se debe hacer clic en el botón finalizar (Finish). Esto abrirá la página de configuración de la tarea de entrada analógica. Ver figura 6.32.

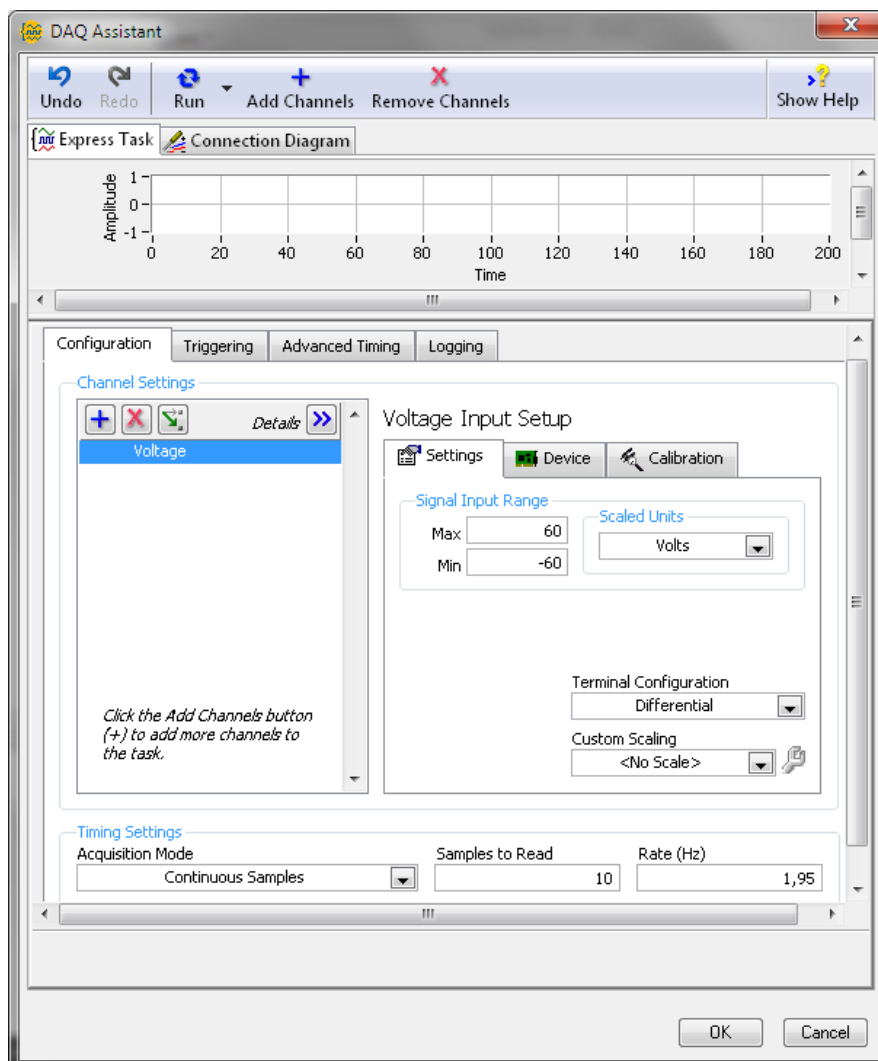


Figura 6.32 Configuración de la tarea de entrada analógica

Aquí se puede configurar la tarea para adquirir datos exactamente de la manera que se desee. Puede establecer su rango de entrada de señal en un rango adecuado para la señal(es) que está adquiriendo. Puede establecer la configuración de terminal en el modo de su adquisición Diferencial (Differential), Referencia única (RSF), No referencia individual. La opción escala personalizada (Custom Scaling) permite crear una nueva escala o aplicar escalas ya existentes. En la pestaña ajustes de sincronización (Timing Settings), se puede establecer cómo va a adquirir los datos. Puede adquirir 1 muestra a la vez (programado por software), adquirir N muestras, que adquiere un conjunto finito de muestras (temporizadas por hardware) o adquirir continuamente (tiempo de hardware).

Si selecciona adquirir N muestras para un escaneo finito o adquirir continuamente para adquisición continua, se tendrá la opción de especificar cuántas muestras leer y la velocidad de su adquisición.

En la sección configuración avanzada del reloj (Advanced Timinig), se puede especificar si se va a utilizar un reloj interno o externo. Si se selecciona externo para su reloj, se tendrá la opción de escoger el borde activo y el pin al que se conectará el reloj externo.

Para finalizar la configuración de la tarea, se debe hacer clic en el botón Aceptar (OK). Esto guarda la configuración y lo regresa al diagrama de bloques donde verá el DAQ Assistant configurado. Los datos estarán disponibles en la salida de datos. Se puede cablear esta salida a un VI análisis, E/S de archivo VI, directamente a un indicador, etc. Ver figura 6.33.

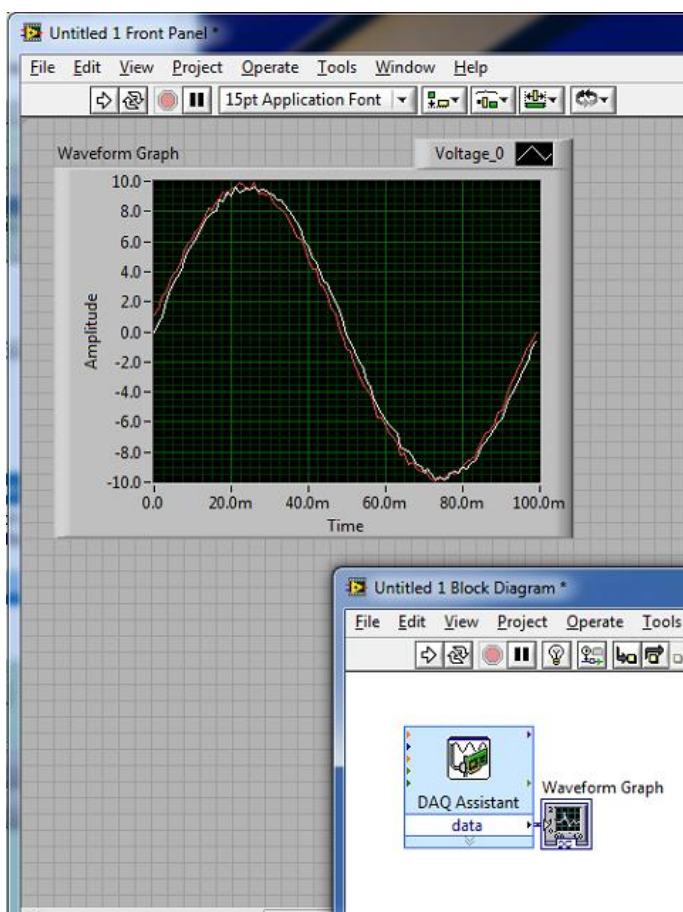


Figura 6.33 DAQ Assistant configurado y cableado a un indicador gráfico

Para cambiar algunas configuraciones se debe hacer clic derecho en el DAQ Assistant configurado y seleccionar propiedades (Properties) o hacer doble clic en el DAQmx Express VI configurado. Ver figura 6.34.

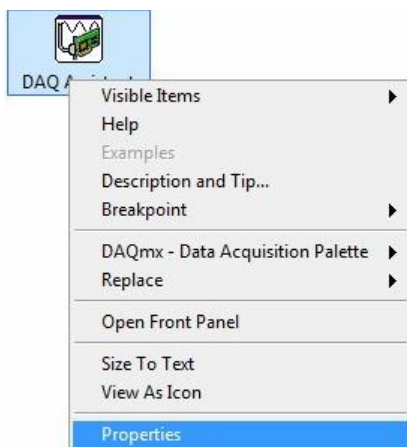


Figura 6.34 Como cambiar parámetros en DAQ Assistant

Dicha acción permitirá la aparición de la página de configuración de la tarea, donde se puede cambiar algunos de los parámetros dependiendo del tipo de tarea previamente configurada.

6.5.3. Diseño de la interfaz en el panel frontal

La interfaz que facilita la interacción entre el PC y el usuario se realiza en el panel frontal de LabVIEW, la misma es utilizada para visualizar y almacenar datos de medida de parte de los equipos de instrumentación instalados. Esta comunicación se ejecuta mediante los periféricos de entrada de un computador personal.

Para el diseño se utiliza la función tab control de modo que se crean dos pestañas, la primera designada como presentación, representa el conjunto de elementos de medición y control del proceso de generación de vapor, cuya exhibición gráfica se efectúa utilizando el módulo DSC de National Instruments, el cual está provisto de una biblioteca de imágenes que permiten la representación de procesos industriales.

Además se exhiben controles de registro de las variables que intervienen en la determinación del rendimiento térmico directo e indirecto y las pérdidas de calor por parte del generador de vapor, con su valor y respectiva unidad de medida. Dentro de las cuales están la lectura inicial y final del consumo de combustible, presión manométrica de vapor, caudal y temperatura del agua que ingresa a la caldera, tiempo de ciclo, temperatura ambiente de la sala de caldera, temperatura de los gases que escapan por la chimenea y porcentaje volumétrico de oxígeno de los productos secos de la combustión.

También indicadores numéricos y gráficos del rendimiento térmico directo e indirecto, flujo de combustible y flujo de vapor. Esto puede ser observado en la figura 6.35.

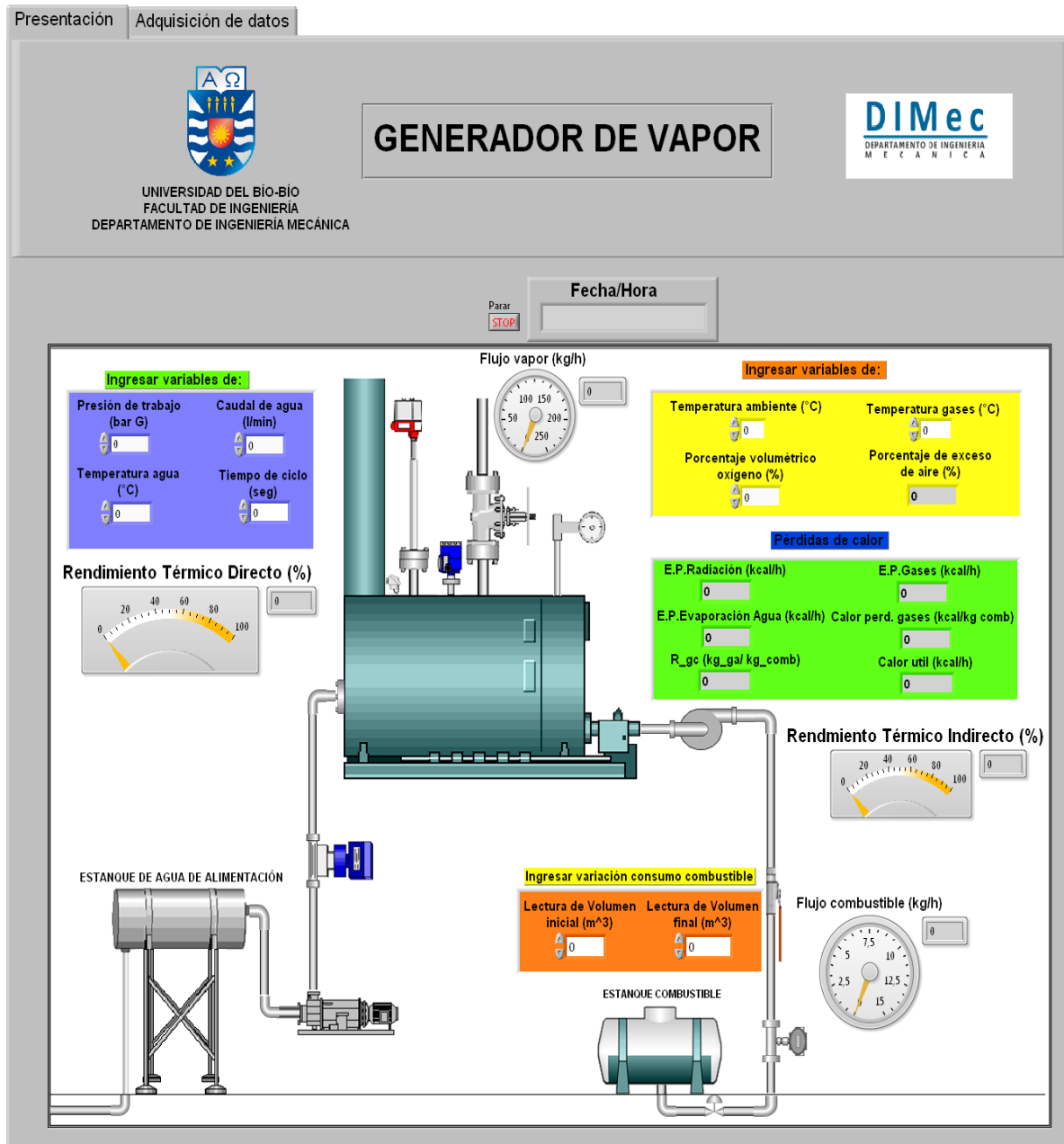


Figura 6.35 Elementos de medición y control

La segunda pestaña del panel frontal denominada adquisición de datos dispone de gráficas en función del tiempo de variables físicas monitoreadas como presión manométrica de vapor, temperatura y caudal del agua que ingresa a la caldera, temperatura de los gases calientes que escapan por la chimenea y flujo volumétrico de combustible.

Junto a dichos gráficos se encuentran sus respectivas tablas que registran los valores adquiridos con la hora y fecha pertinente de medición. Esto se verifica en la figura 6.36. Para situaciones donde se requiera un análisis más riguroso de los datos adquiridos, se le añade un control tipo botón para activar o desactivar la opción de autoguardado de datos, tanto para el modulo NI-9229, como para el NI-9219. Esta opción permite crear dos archivos Excel, el primero contendrá el registro de datos de presión manométrica de vapor, temperatura de los gases que escapan por la chimenea, caudal del agua que ingresa a la caldera y el flujo volumétrico de combustible. En cambio el segundo archivo incluirá el registro de la temperatura del agua contenida en el estaque de alimentación.

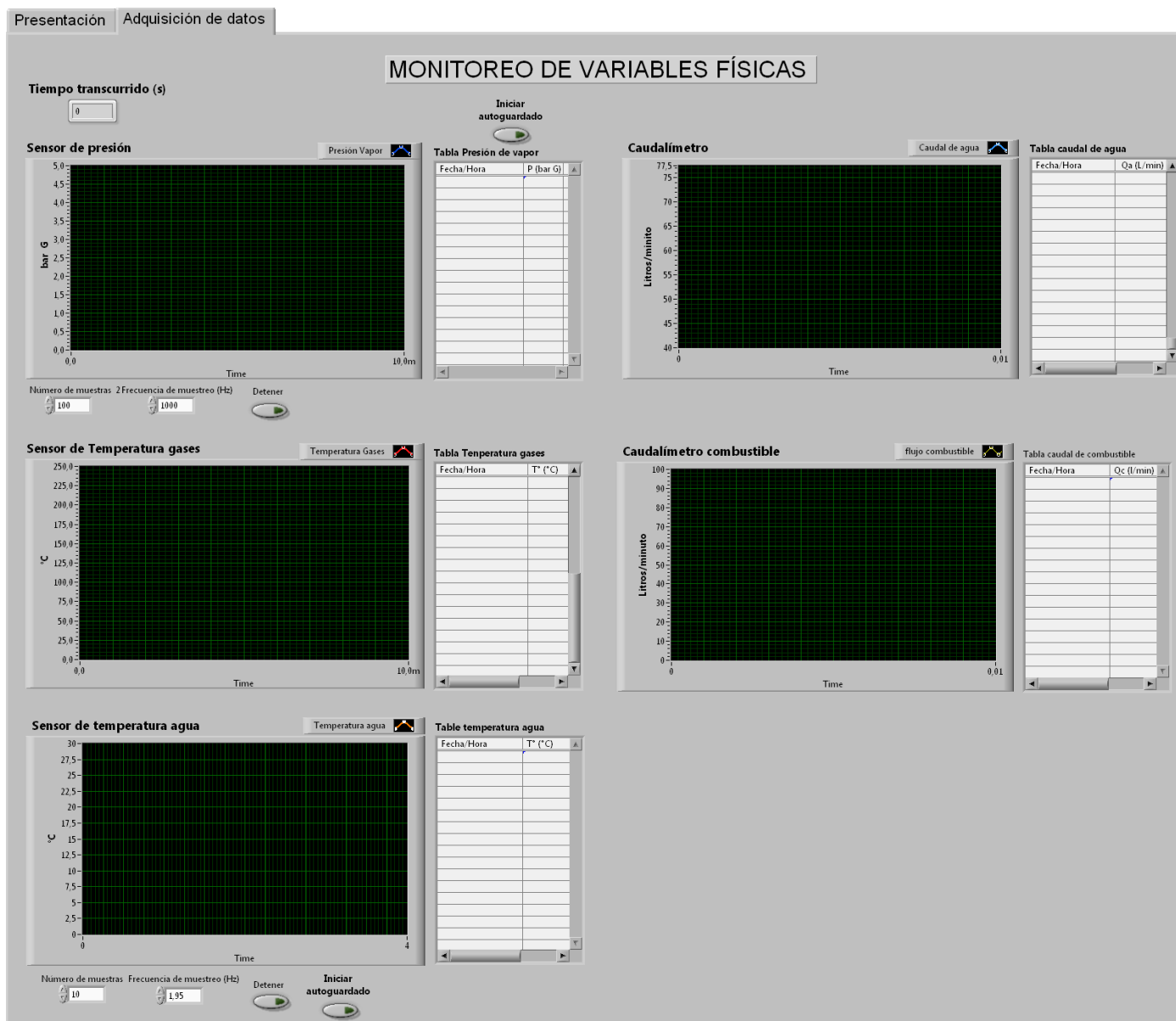


Figura 6.36 Gráficos de variables físicas

6.5.4. Programación gráfica en el diagrama de bloques de LabVIEW

La programación en el diagrama de bloques de LabVIEW para la pestaña denominada presentación, está compuesta por bloques gráficos y recuadros que representan tanto los controles como los indicadores al igual que la llamada fórmula Node. Para diferenciar un control de un indicador basta con visualizar la línea de borde que rodea el bloque, si posee un aspecto naranja claro significa que es un indicador, mientras que para visualizar la opción fórmula Node es necesario identificar recuadros con variables de entrada en el extremo izquierdo y variables de salida en el extremo derecho. Además la programación posee una estructura While Loop, de tal manera que permite la ejecución del programa durante un ciclo continuo hasta la intervención del botón de paro. Mediante la función tab control se crean pestañas en el panel frontal, las mismas se encontraran enlazadas a la función case structure en el diagrama de bloques donde se podrá acceder a cada una de las pestañas creada en el panel frontal.

A continuación se explica el método de programación gráfica para determinar el rendimiento térmico directo e indirecto y las pérdidas de calor del generador de vapor.

6.5.4.1. Programación gráfica rendimiento térmico directo

El cálculo del rendimiento térmico directo del generador de vapor se realiza a partir de la teoría expresada en el punto 4, puesto que el software LabView posee una opción denominada fórmula Node, la cual permite plantear expresiones matemáticas y de esta forma determinar el valor de diferentes incógnitas, al ingresar variables de entrada mediante el uso de comandos llamados controles. En la figura 6.37 se observan 6 expresiones escritas dentro de un recuadro y en el extremo izquierdo de éste, se visualizan 6 variables de entrada y por el extremo derecho 6 variables de salida.

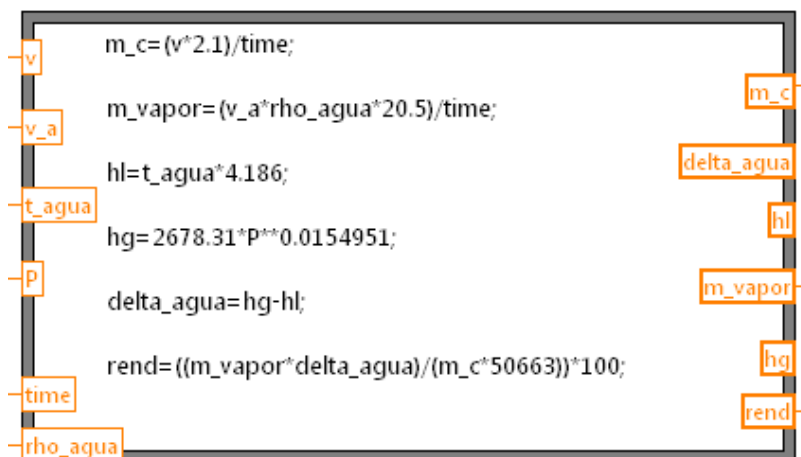


Figura 6.37 Estructura de programación gráfica en fórmula Node

La primera expresión que es $m_c = \frac{(V \cdot 2,1)}{time}$, corresponde al flujo de combustible, cuyas variables de entrada son:

- V: Diferencia aritmética entre el volumen inicial y volumen final registrado en el medidor de combustible, en m^3 . Dichos valores se registran al inicio y al término del ciclo de trabajo a régimen estable del generador de vapor.
- El valor 2,1 representa el factor de conversión de m^3 de combustible gaseoso a kg de gas licuado registrados a través de medidores, en fase gaseosa (ver decreto 215 en anexo H) y a través de propiedades aportadas por el software EES (ver tabla paramétrica en anexo I).
- time: Representa el tiempo de ciclo o tiempo de trabajo a régimen estable del generador de vapor, ingresados en segundos.

La expresión $m_{vapor} = \frac{v_a \cdot \rho_{agua} \cdot 20,5}{time}$, representa el flujo de vapor generado en el tiempo de trabajo a régimen estable, el cual se determina ingresando las variables de:

- v_a : Caudal de impulsión de la bomba de turbina, cuyo valor se ingresa en litros por minuto (l/m).
- ρ_{agua} : Densidad del agua, en kilogramos por litro (kg/l)
- El valor 20,5 representa el tiempo promedio en segundos que tarda la bomba en reestablecer un nivel de agua preestablecido al interior de la caldera.

En la tercera fila, se aprecia $h_l = T_{agua} \cdot 4,186$, que es la forma más aproximada de determinar la entalpía del líquido sub-enfriado o energía del agua justo antes de entrar a la caldera. Se determina ingresando:

- t_{agua} : Temperatura del agua que ingresa a la caldera, en °C
- 4,186 es el Cp_{agua} , es decir calor específico del agua a p=cte en (kJ/kg·°C)

De forma aproximada se determina la energía del agua a la salida del generador de vapor usando la siguiente expresión $h_g = 2678,31 \cdot P^{0,0154951}$ (ecuación obtenida de tabla paramétrica de software EES, ver gráfico correspondiente y ecuación de aproximación de la curva en anexo J), que en simples palabras representa la entalpía del vapor saturado seco en (kJ/kg), que se asume que se está generando. Dicho valor se obtiene al reemplazar el valor de la medición de presión de vapor, en bar absoluto.

Asimismo la expresión $\Delta h_{\text{agua}} = h_g - h_l$, significa la diferencia de propiedades entre el vapor saturado seco y el líquido sub-enfriado, en (kJ/kg).

Por último el rendimiento térmico directo queda definido por:

$$rend = \frac{m_{\text{vapor}} \cdot \Delta h_{\text{agua}}}{m_c \cdot PCS} \cdot 100$$

Donde el PCS del propano corresponde a 50.663 (kJ/kg).

Además de recalcar que las variables de entrada mencionadas anteriormente están posicionadas en la parte izquierda del recuadro de fórmula Node y las de salida en la parte derecha. En la figura 6.38 se visualiza la programación gráfica de todas las variables necesarias para determinar el cálculo del rendimiento directo del generador de vapor.

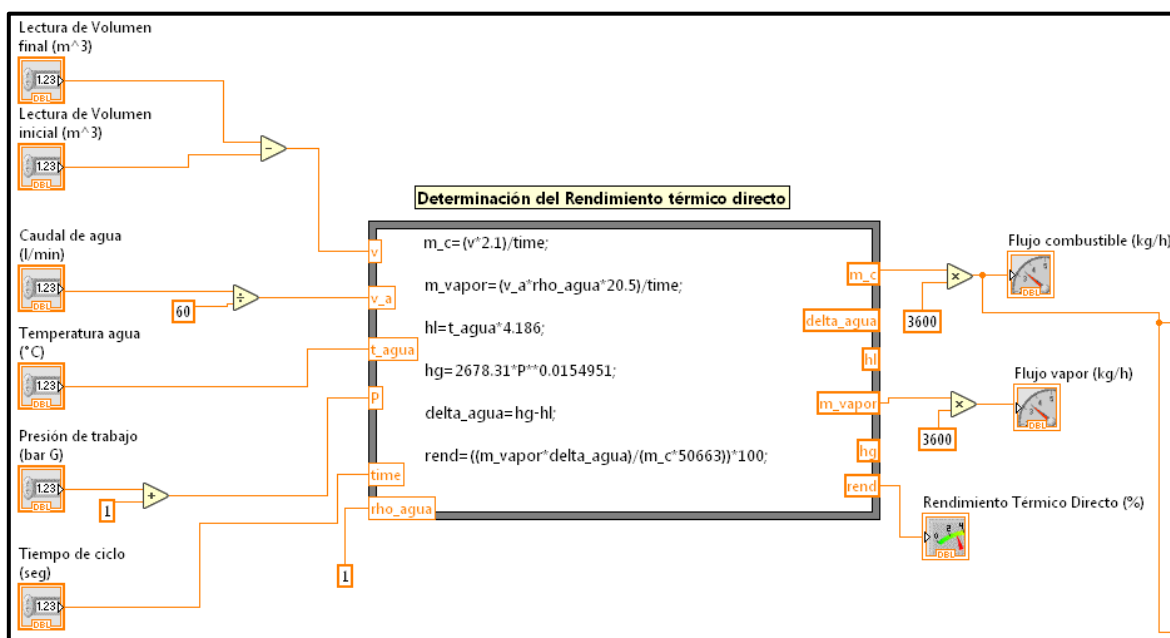
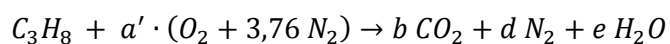


Figura 6.38 Programación gráfica para cálculo del rendimiento térmico directo

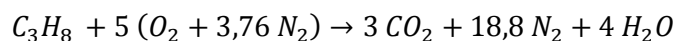
6.5.4.2. Programación pérdidas de calor por gases de combustión, por radiación y por evaporación agua formada y humedad del combustible

Para determinar las pérdidas de calor se debe realizar en primer lugar un análisis de los productos de combustión (análisis Orsat), en una combustión completa y después en una real o incompleta del combustible propano. Lo anterior con la finalidad de especificar la relación gases combustible y así determinar la energía perdida por los productos de combustión ($E_{P.C.}$). A continuación se describe la metodología de análisis.

Como se indicó en el párrafo anterior se comienza con el estudio del proceso de combustión ideal de dicho combustible, el cual no se considera la generación de CO y O₂ libre, por lo tanto la expresión se detalla de la siguiente manera:



Al balancear la ecuación se obtiene:



Como es sabido en la práctica no es posible realizar una combustión ideal por diversos factores tales como, la dificultad para producir premezcla homogénea, insuficiente tiempo de residencia en la zona de combustión, enfriamiento de los productos o volumen de aire insuficiente, o una combinación de las causas anteriores. Por ende se considera para el análisis de ecuación real que la generación de CO en porcentaje, es insignificante en relación a los otros elementos.

Entonces para un análisis de combustión real, se debe conocer el porcentaje de aire en exceso, por lo cual, se llevó a cabo la utilización de la siguiente expresión $ex_{aire} = -0,0139793 + 4,44921 \cdot po + 0,147858 \cdot po^2 + 0,021467 \cdot po^3$ (ecuación obtenida de tabla paramétrica de software EES, ver gráfico correspondiente y ecuación de aproximación de la curva en anexo K), que representa el porcentaje de aire en exceso o cantidad de aire adicional al ideal que se suministra para asegurar la combustión completa en función del porcentaje volumétrico de oxígeno en los productos de la combustión. Dicho porcentaje de oxígeno libre se puede obtener mediante un analizador de gases portable modelo 375T NOVA (ver anexo L), en el instante que se realiza la experiencia, o bien instalar un analizador de oxígeno para gases, por ejemplo el BT300 analizador de oxígeno basado en una celda de óxido de zirconio (ver anexo M). En la figura 6.39 se observa la expresión antes descrita.

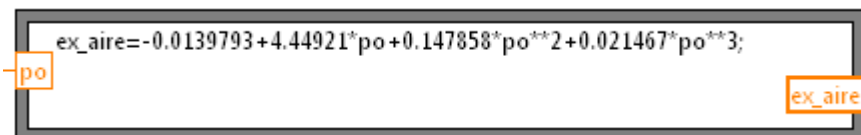


Figura 6.39 Ecuación porcentaje de aire en exceso

El usuario ingresa un valor de porcentaje volumétrico de oxígeno (po) e inmediatamente se determina el porcentaje de aire en exceso (ex_{aire}) que le corresponde a la combustión.

Una vez calculado el porcentaje de aire en exceso se procede a determinar la relación gases combustible, a partir del análisis de ecuación real o completa.

La ecuación $C_3H_8 + a(O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow f CO_2 + g O_2 + j N_2 + k H_2O$ representa la combustión real y donde las letras a, f, j, d, e, significan los kilo mol (kmol) que poseen los diferentes elementos (CO_2, O_2, N_2, H_2O), una vez que la ecuación es balanceada. La figura 6.40 indica el procedimiento para obtener los kilo mol por elementos y la relación gases combustible.

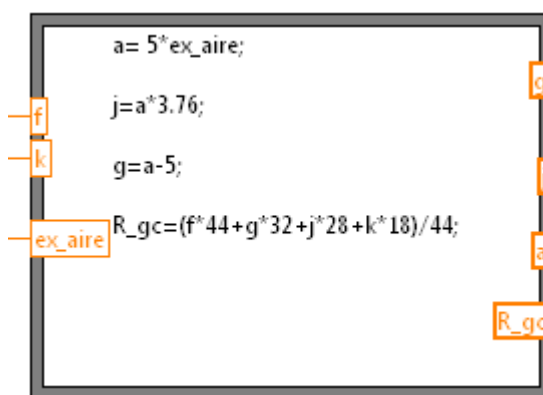


Figura 6.40 Programación gráfica relación gases combustible

En el extremo izquierdo del recuadro se observa las variables de entrada que son:

- ex_{aire} : Porcentaje de aire en exceso, el cual permite determinar la cantidad de kmoles de a (aire con exceso).
- Mientras que los kmoles de CO_2 (f) y H_2O (k) permanecen iguales a los obtenidos en el balance de la ecuación de combustión ideal, esto es 3 y 4 kmol respectivamente.

En cambio la relación gases combustible está definida de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Relación_{gases/combustible} = \frac{\sum n_{productos} \cdot PM_{productos}}{n_{combustible} \cdot PM_{combustible}}$$

Donde:

n: Cantidad de kilo mol (kmol) de los productos y/o del combustible.

PM: Peso molecular en (kg/ kmol) de los productos y/o del combustible.

Entonces la cuarta expresión observada en el recuadro de la figura 6.36 se define de la siguiente manera:

Relación gases/combustible

$$= \frac{f \text{ [kmol]} \cdot 44 \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right] + g \text{ [kmol]} \cdot 32 \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right] + j \text{ [kmol]} \cdot 28 \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right] + k \text{ [kmol]} \cdot 18 \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]}{3 \text{ [mol]} \cdot 12 \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right] + 8 \text{ [mol]} \cdot 1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]}$$

Por consiguiente, una vez que se ha determinado el porcentaje de exceso de aire, dicho valor se ingresa automáticamente en la primera expresión del recuadro de fórmula Node de la figura 6.40, dando paso a resolver las demás incógnitas tales como g, j y R_{gc} .

Obtenida la relación gases combustible (R_{gc}), se procede a determinar la energía perdida por los productos de combustión ($E_{p.c.}$) que escapan a alta temperatura y la energía perdida por radiación a través de las paredes de la caldera ($E_{p.r.}$) utilizando el procedimiento de la estructura fórmula Node en el diagrama de bloques del software LabVIEW como se muestra en la figura 6.41.

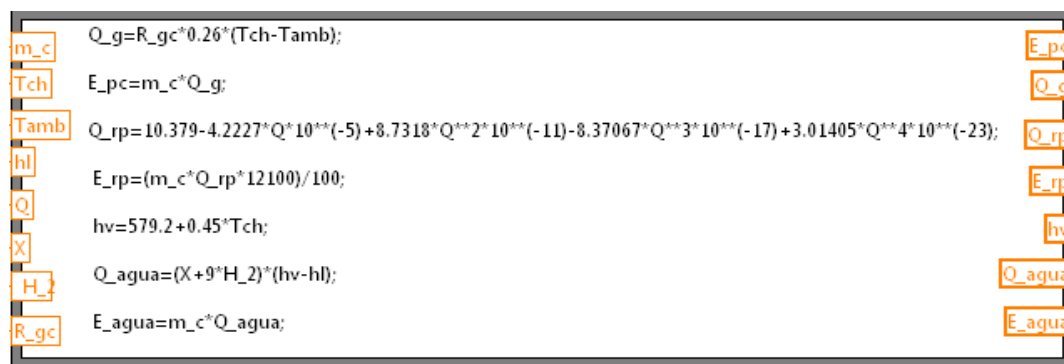


Figura 6.41 Programación gráfica para cálculo de pérdidas de calor

En el recuadro se observan siete fórmulas, la primera representa el calor perdido por gases calientes $Q_g = R_{g/c} \cdot 0,26 \cdot (T_{ch} - T_{amb})$ expresada, en $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}_{\text{combustible}}} \right]$ y donde se aprecia que se determina en función de las siguientes variables:

- El valor 0,26 corresponde al $C_{p \text{ gases}}$ o calor específico de gases a p=cte, en $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$.
- T_{ch} : Temperatura gases que se mide en la base de la chimenea, en $^\circ\text{C}$.
- T_{amb} : Temperatura ambiente que se mide en la sala de caldera, en $^\circ\text{C}$.

- $R_{g/c}$: Describe la relación gases combustible, en $\left[\frac{kg_{gases}}{kg_{combustible}}\right]$.

La segunda fórmula representa la energía perdida por los productos de combustión $E_{p.c.} = m_c \cdot Q_g$ expresadas en $\left[\frac{kcal}{h}\right]$. Cuyas variables de entrada son:

- m_c : Flujo de combustible, en (kg/h)
- Q_g : Calor perdido por gases calientes, en $\left[\frac{kcal}{kg_{combustible}}\right]$.

La expresión $Q_{r.p.} = 10,3794 - 4,2227 \cdot 10^{-5} \cdot Q + 8,7318 \cdot 10^{-11} \cdot Q^2 - 8,37067 \cdot 10^{-17} \cdot Q^3 + 3,01405 \cdot 10^{-23} \cdot Q^4$ representa el porcentaje de pérdidas de calor por radiación a través de las paredes de la caldera, cuya fórmula es una representación aproximada del porcentaje de pérdidas con respecto al poder calorífico superior del combustible. Se obtiene al ingresar en la ecuación de aproximación el valor de la capacidad calórica (Q) o cantidad de calor por hora que recibe el agua en la caldera (ver tabla paramétrica, gráfico y ecuación de aproximación en anexo N) y es válido para un rango de 100.000 a 1.000.000 $\left[\frac{kcal}{h}\right]$.

La capacidad calórica (Q) se determina mediante la expresión $Q = m_n \cdot 539$, donde m_n representa la masa nominal de vapor y que por las características del generador de vapor corresponde a 250 $\left[\frac{kg}{h}\right]$. Por lo tanto la capacidad calórica es 134.750 $\left[\frac{kcal}{h}\right]$, lo que resulta en un $Q_{r.p.} = 6,07\%$ del PCS y que corresponde a 734,47 $\left[\frac{kcal}{kg_{combustible}}\right]$.

La expresión $E_{r.p.} = \frac{m_c \cdot Q_{r.p.} \cdot 12100}{100}$ corresponde a la energía perdida por radiación a través de las paredes del hogar expresada en $\left[\frac{kcal}{h}\right]$. Donde las variables que intervienen están dadas por el flujo de combustible (m_c), porcentaje de pérdidas de calor por radiación a través de las paredes del hogar ($Q_{r.p.}$) y el PCS del combustible expresado en $\left[\frac{kcal}{kg}\right]$.

La quinta fórmula $hv = 579,2 + 0,45 \cdot Tch$, determina la entalpía del vapor de agua a la temperatura de los gases de combustión, expresada en $\left[\frac{kcal}{kg_{H_2O}}\right]$.

La ecuación $Q_{agua} = (X + 9 \cdot H_2) \cdot (hv - hl)$, especifica el calor perdido por evaporación agua formada y humedad del combustible, en $(kcal/kg_{combustible})$. Cuyas variables son:

- X : Humedad del combustible, en $(kg_{agua}/kg_{combustible})$. Como el combustible es gaseoso, la humedad es igual a cero ($X = 0$).

- H_2 : Composición gravimétrica del H_2 en el combustible, ($kg_{H_2}/kg_{combustible}$). La composición gravimétrica para el hidrogeno es, $H_2 = \left[\frac{8}{44} \right] = 0,182$.
- El número 9, indica que por cada kilogramo de hidrogeno que posee el combustible se forman 9 kilogramos de agua o H_2O .
- h_v : Entalpía del vapor de agua a la temperatura de los gases de combustión (T_{ch}), en ($kcal/kg_{H_2O}$).
- h_l : Entalpía de líquido sub-enfriado a la temperatura del aire atmosférico (T_{amb}), en ($kcal/kg$).

La expresión final $E_{agua} = m_c \cdot Q_{agua}$, corresponde a la energía perdida por evaporación agua formada y humedad del combustible, en $\left[\frac{kcal}{h} \right]$.

6.5.4.3. Programación gráfica para determinar rendimiento térmico indirecto

La ecuación para el rendimiento térmico indirecto se define en base a las ganancias de calor menos las pérdidas de calor dividido por las ganancias, esto es $\eta_I = \frac{E_{comb(PCS)} - E_{p.c.} - E_{r.p.} - E_{agua}}{E_{comb(PCS)}} \cdot 100$. Como se puede ver en la figura 6.42, la expresión de rendimiento indirecto está escrita en la tercera fila y definida por:

- $E_{comb(PCS)}$: Energía entregada por el poder calorífico superior del combustible, en $\left[\frac{kcal}{h} \right]$.
- $E_{p.c.}$: Energía perdida por productos de la combustión, en $\left[\frac{kcal}{h} \right]$.
- $E_{r.p.}$: Energía perdida por radiación a través de las paredes del hogar, en $\left[\frac{kcal}{h} \right]$.
- E_{agua} : Energía perdida por evaporación agua formada y humedad del combustible, en $\left[\frac{kcal}{h} \right]$

Donde el calor útil está expresado por $Q_{util} = E_{comb(PCI)} - E_{p.c.} - E_{r.p.} - E_{agua}$

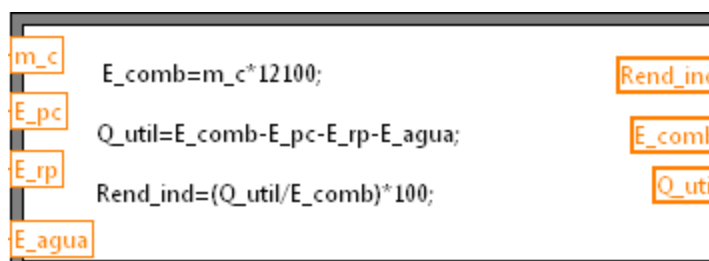


Figura 6.42 Programación gráfica cálculo rendimiento térmico indirecto

6.5.4.4. Programación gráfica DAQ Assistant en el diagrama de bloques de LabVIEW

La programación en el diagrama de bloques de LabVIEW para la pestaña denominada adquisición de datos, se compone del DAQ Assistant y sus respectivos controles de velocidad de muestreo y número de muestras para cada tarjeta de adquisición. Además de funciones tales como Build table (construcción de tablas), Waveform Graphs (gráficos de forma de onda), Splits Signal (divide señales) y Write to Measurement file (escribir en el archivo de medición). Dichos controles, indicadores y funciones se encuentran en el interior del ciclo While Loop que se observan en las figuras 6.43 y 6.44.

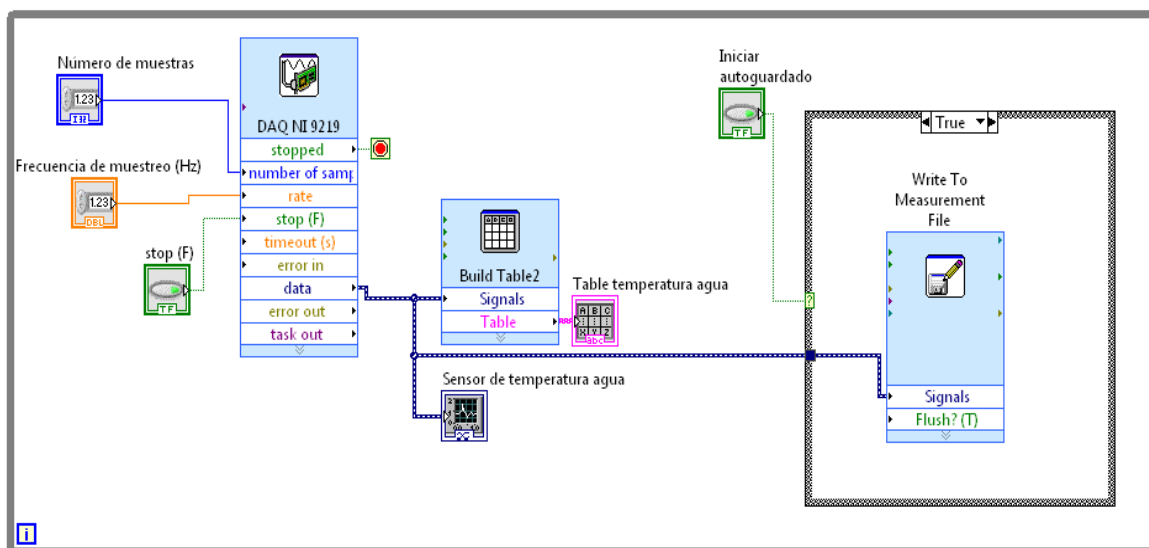


Figura 6.43 DAQ Assistant del módulo NI 9219

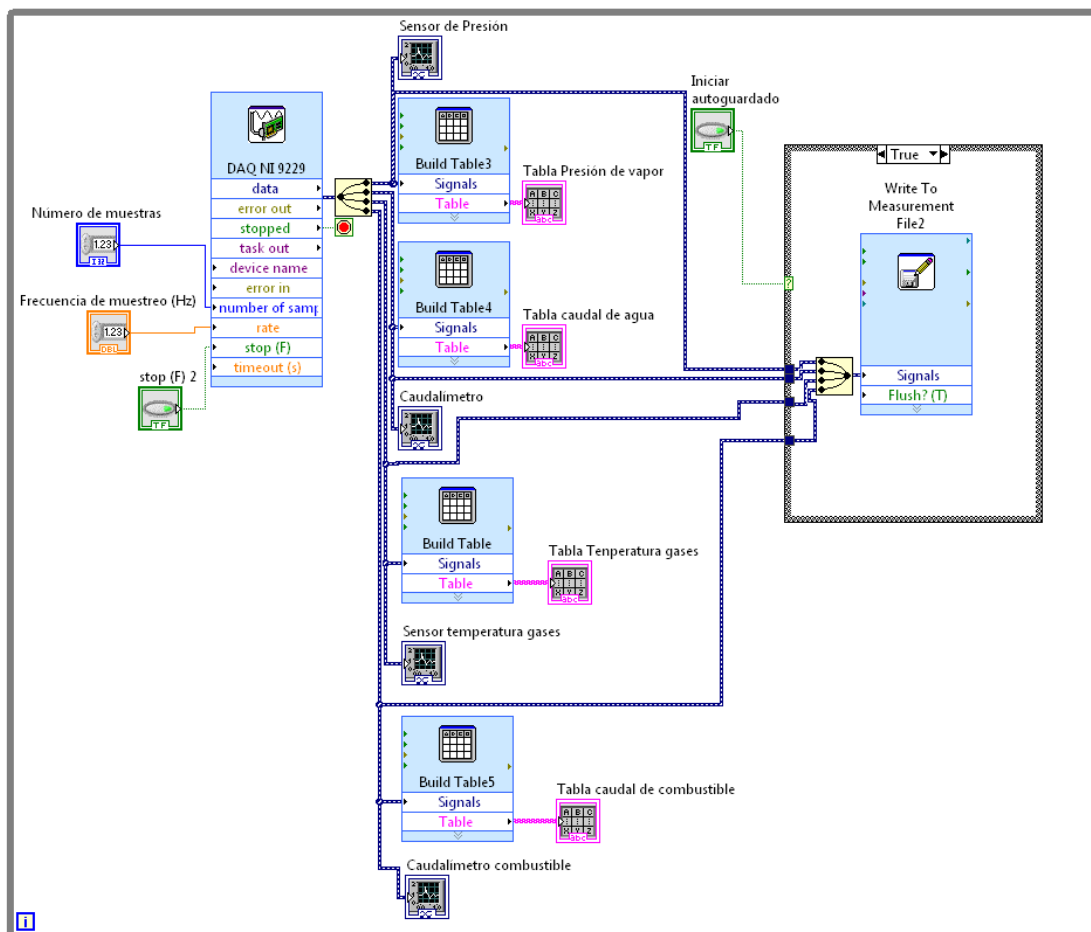


Figura 6.44 DAQ Assistant del módulo NI 9219

Para la lectura de datos de forma individual es necesario utilizar la herramienta Split signals, la misma que separa cada uno de los canales, y la salida de cada uno de estos se enlaza hacia un indicador ya sea numérico y/o gráfico.

La función Split signals (dividir señales) se observa en la figura 6.45 y corresponde al símbolo del lado izquierdo, el cual posee 4 separaciones las mismas cuentan los canales desde el canal 0 al canal 3 desde la parte superior a la inferior, dicho elemento se encuentra en la paleta de funciones de LabVIEW. Por el lado derecho se observa un símbolo denominado Merge signals (fusión de señales), el cual también posee 4 separaciones y cuyo propósito es combinar 4 señales escalares numéricas o formas de onda, en una sola salida.

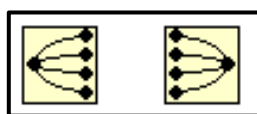


Figura 6.45 Función Split y Merge signals

La función Build table que se visualiza en la figura 6.46 convierte una forma de onda en una tabla de datos que enumera la amplitud y los datos de tiempo de cada punto de la respectiva señal.

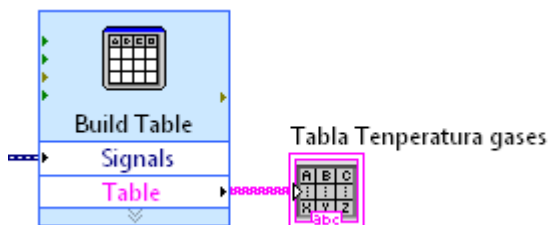


Figura 6.46 Construcción de tablas (Build Table)

Como se indicó en el punto 6.5.3, en casos donde se requiera almacenar los datos adquiridos, se le añade un control tipo botón para activar o desactivar la opción de autoguardado de datos, el cual creara un archivo Excel con el registro de todas las variables monitoreadas. La función de almacenamiento de datos se realiza con el uso de una función llamada Write to Measurement File (ver figura 6.47), en el mismo se puede configurar el tipo de archivo en el que se desea guardar, para eso se debe tener en cuenta la ventana de ayuda de dicho instrumento virtual y personalizar la configuración de la misma (ver figura 6.48).

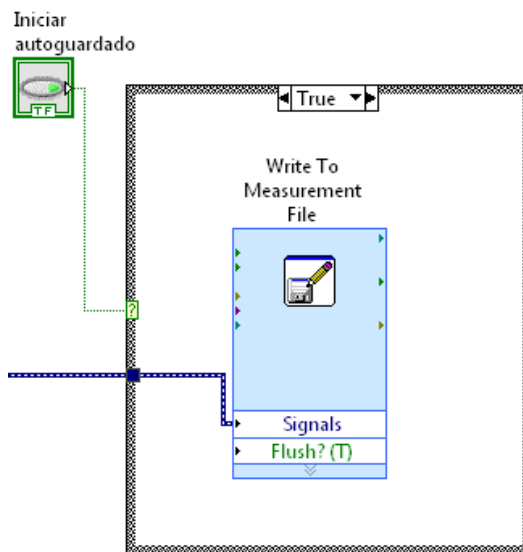


Figura 6.47 Símbolo de Write to Measurement File

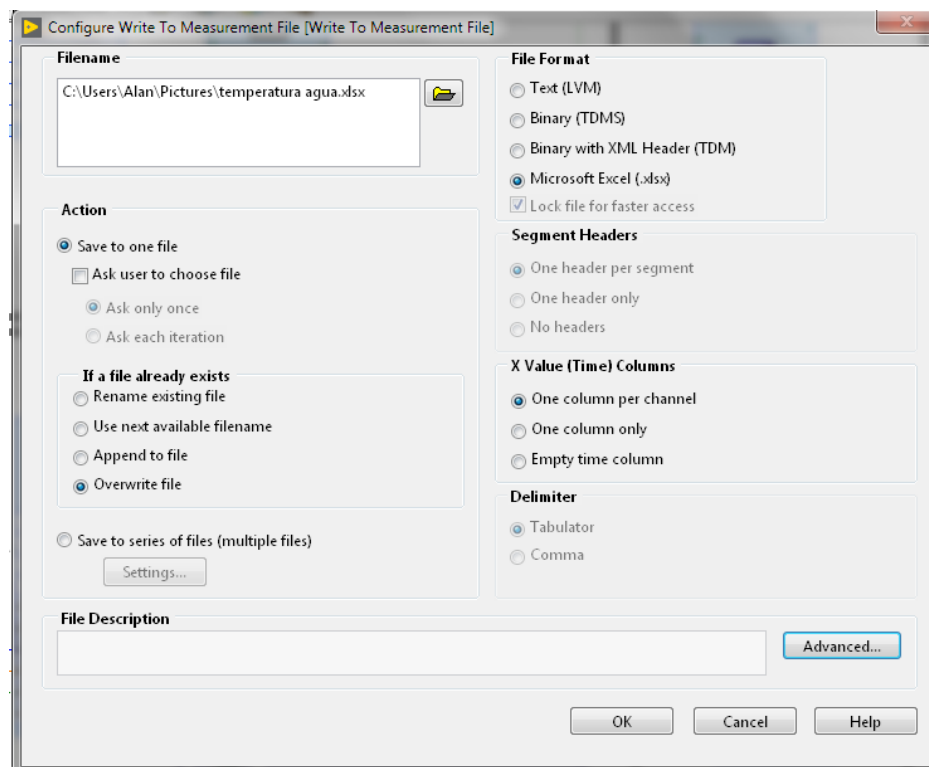


Figura 6.48 Ventana de configuración para la herramienta de escritura de archivos de mediciones

6.6. Verificación de operación del sistema de adquisición de datos y estudio teórico experimental

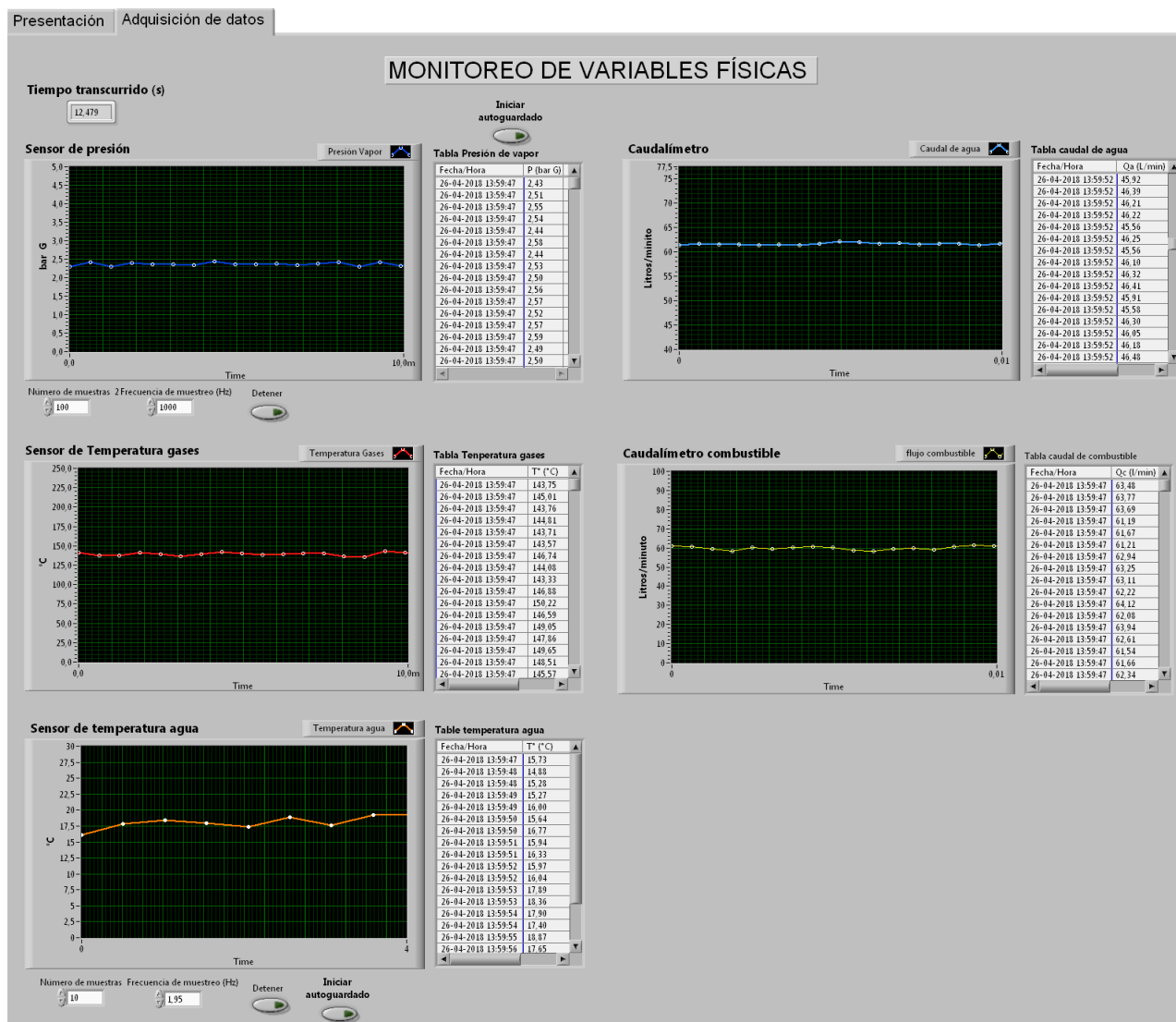
La verificación de operación del sistema de adquisición de datos es simple, una vez encendido el ordenador y abierta la aplicación, se procede a realizar el monitoreo de variables en la pestaña denominada adquisición de datos. En ésta se podrá visualizar 5 gráficos que están nombrados según la lectura que se desea obtener, ya sea de presión manométrica de vapor, caudal de agua, caudal de combustible, temperatura de los gases y del agua en el estanque.

Como se indicó anteriormente el módulo NI-9229 y el NI-9219 generan una onda sinusoidal para representar el comportamiento de una señal analógica, por lo que cada grafico está simulando una señal del transductor correspondiente, lo cual puede ser verificado en la figura 6.49.

El módulo NI-9229 está configurado para realizar la lectura de variables tales como presión manométrica de vapor, caudal de agua que ingresa a la caldera, temperatura de los gases que escapan por la chimenea y flujo volumétrico de combustible consumido por el quemador.

Es importante señalar que este módulo se seleccionó por su velocidad y precisión de procesamiento de datos, la cual concede una lectura más fiable del comportamiento de dichas variables medidas por parte de los sensores seleccionados.

El módulo NI-9219 se encarga de recibir las lecturas de la variación de temperatura del agua en el estanque. Dicho módulo se seleccionó en virtud de que proporciona una lectura de temperatura más confiable debido a su característica de compensación de unión en frío (CJC) incorporada.



6.49 Monitoreo de variables físicas

El estudio teórico experimental del funcionamiento del generador de vapor se verifica con la comparación de los resultados obtenidos de rendimiento térmico directo e indirecto de acuerdo a las dos metodologías de cálculo.

El procedimiento para obtener dichos resultados comienza con el ingreso de datos registrados de las variables tales como lectura inicial y final del consumo de combustible, presión manométrica de vapor, caudal y temperatura del agua que ingresa a la caldera, tiempo de ciclo, temperatura ambiente de la sala de caldera, temperatura de los gases que escapan por la chimenea y porcentaje volumétrico de oxígeno en los productos de la combustión, en la pestaña denominada presentación.

Los resultados del rendimiento térmico directo e indirecto se comprueban en la misma pestaña en los indicadores gráficos y numéricos respectivos. (Ver figura 6.50)

Ambos rendimientos se visualizan en la tabla 6.7 y se obtuvieron a partir de mediciones realizadas en una experiencia de laboratorio denominada generador de vapor, cuyos valores se muestran en la tabla 6.6.

6.6 Tabla de mediciones

| | |
|---------------------------------------|---------------|
| Lectura inicial combustible (m^3) | 53,101 |
| Lectura final combustible (m^3) | 53,781 |
| Presión manométrica de vapor (bar G) | 4 |
| Caudal de agua (l/m) | 61,2 |
| Temperatura del agua ($^{\circ}C$) | 16 |
| Temperatura de gases ($^{\circ}C$) | 215 |
| Temperatura ambiente ($^{\circ}C$) | 20 |
| Tiempo de ciclo (segundos) | 515 |
| Porcentaje volumétrico de oxígeno (%) | 3,8 |

Los valores mostrados en la tabla 6.6 se ingresan en los controles designados para introducir datos referidos a cada una de las mediciones, como se visualiza en la figura 6.50. Es importante mencionar que el valor 61,2 (l/m) corresponde al caudal promedio de operación de la bomba turbina, cuyo valor promedio se determinó de acuerdo a lo explicado en el punto 6.4.3. Además, el valor de porcentaje volumétrico de oxígeno (3,8%) se definió en conformidad a lo expresado en el punto 6.5.4.2. e incluso según lo exhibido en el anexo K y que en base a este valor se obtiene un porcentaje de exceso de aire de un 20%.

6.7 Tabla de resultados

| | |
|--|---------------|
| Rendimiento térmico directo (%) | 77,43 |
| Rendimiento térmico indirecto (%) | 76,71 |
| Flujo de combustible (kg/h) | 9,98 |
| Flujo de vapor (kg/h) | 146,2 |
| Pérdida por gases que escapan por la chimenea (kcal/h) | 9.996 |
| Pérdida por radiación a través de las paredes de la caldera (kcal/h) | 7.343 |
| Pérdida por evaporación agua formada y humedad del combustible | 10.790 |
| Calor útil (kcal/h) | 92.654 |
| Porcentaje exceso aire (%) | 20,2 |

Los resultados de rendimiento térmico directo e indirecto obtenidos en una primera simulación sin considerar la energía perdida por evaporación agua formada y humedad del combustible en el cálculo del rendimiento térmico indirecto reveló una diferencia de un 8,22%. La causa principal de dicha diferencia se creía que estaba relacionada principalmente con una incorrecta medición del consumo de combustible utilizado, puesto que el mecanismo actual de medición resulta ser muy impreciso e inadecuado.

Al realizar una nueva simulación considerando dicha pérdida, el rendimiento térmico indirecto alcanzó un valor de 76,71%, muy por debajo del 85,95% que se había obtenido en una primera instancia. Por tanto, la diferencia que existe entre el rendimiento térmico directo e indirecto es de tan solo un 0,72%.

Entonces se concluye que la eficiencia del generador de vapor obtenida por ambas metodologías tiene concordancia entre sus resultados, ya que existe una diferencia de menos de un 1%.

Presentación Adquisición de datos

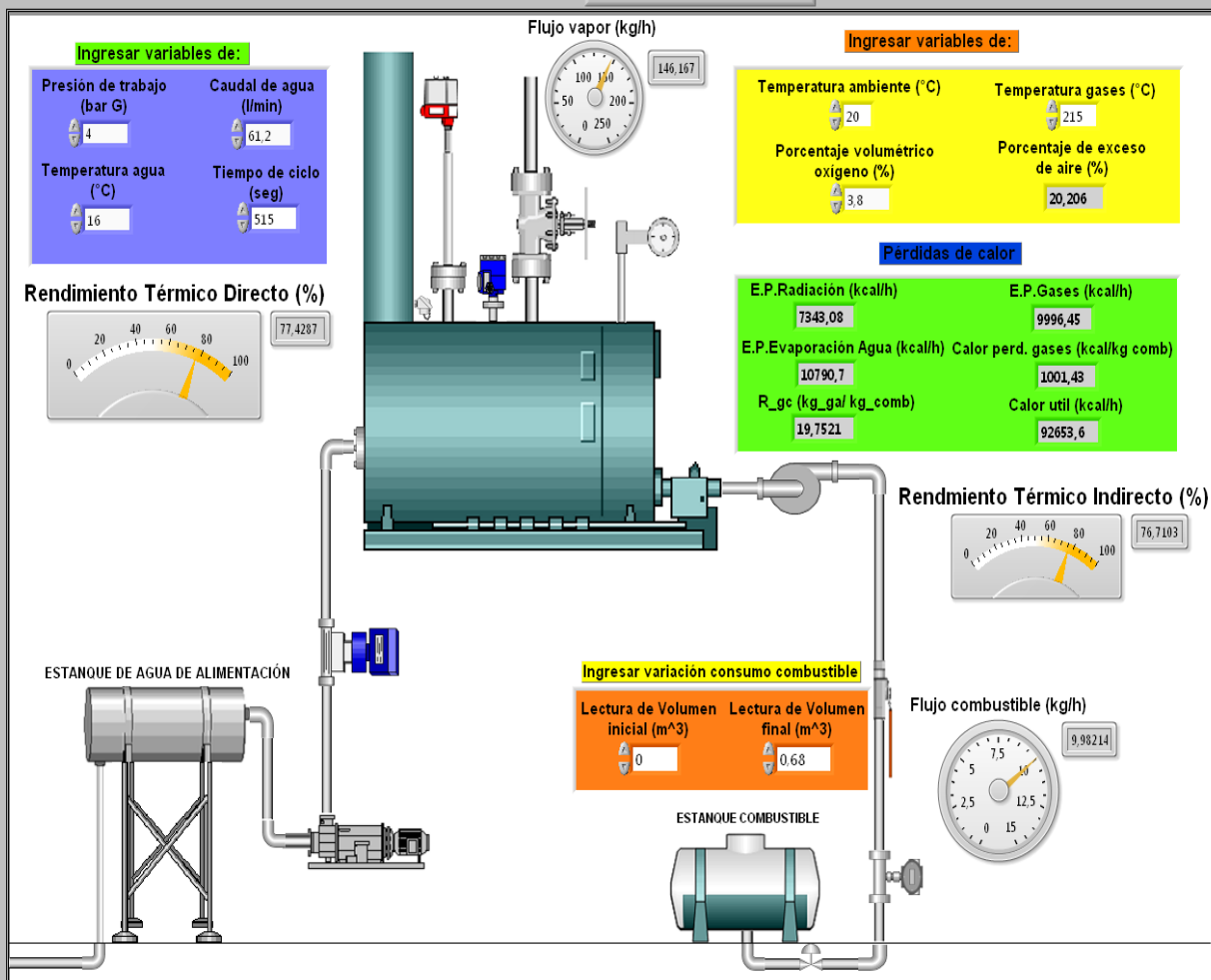


UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

GENERADOR DE VAPOR



Fecha/Hora
13-05-2018 15:59:12



6.50 Interfaz de resultados

6.7. Estudio de costos de inversión

A continuación en la tabla 6.8 se expone el detalle de los diversos instrumentos y material necesarios para implementar el sistema de adquisición de datos para el generador de vapor.

Tabla 6.8 Costos de inversión

| ITEM | CANT | DESCRIPCIÓN | VALOR (USD) | TOTAL |
|------|------|--|-------------|--------|
| 1 | 1 | Transmisor de presión, modelo S-20 Wika | 170,3 | 170,3 |
| 2 | 1 | Caudalímetro volumétrico G2 GPI más módulo obtención de señales 4...20 mA | 1833,5 | 1833,5 |
| 3 | 1 | Termómetro a tensión con señal de salida eléctrica, modelo TGT70.063 Wika | 276,7 | 276,7 |
| 4 | 1 | Termocupla Tipo J | 22,9 | 22,9 |
| 5 | 1 | Caudalímetro másico para gases, modelo FMA-1610A OMEGA | 1535 | 1535 |
| 6 | 1 | NI-9219 de la serie C | 1665,2 | 1665,2 |
| 7 | 1 | NI-9229 de la serie C | 2165,2 | 2165,2 |
| 8 | 3 | Módulo conversor análogo corriente a voltaje de 4-20mA a 0-5V | 11 | 33 |
| 9 | 6 | Metros cable instrumentación y control 1 par x16 AWG 300 V marca Ekoline Apantallado poliéster aluminizado | 2 | 12 |
| | | | Valor bruto | 7713,8 |
| | | | IVA | 1465,6 |
| | | | Total | 9179,4 |

Notas:

- Cotización de los instrumentos y material en pesos Chilenos (CLP) y expresados en tabla 6.8 en dólares (USD).
- Valor observado del dólar SII (22.01.2018): \$ 607.

7. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

7.1. Recomendaciones

- Se propone instalar un manómetro en el medidor de combustible para determinar en que fase se encuentra el gas propano, y así de forma más precisa obtener el valor de la densidad a la que está ingresando al quemador dicho combustible. El anexo Ñ muestra un manómetro adecuado para una posterior implementación.
- Además, se propone instalar un analizador de gases de combustión en la base de la chimenea de la caldera con el objetivo de obtener una lectura precisa y rápida del oxígeno libre en los productos de la combustión, lo que permitiría afinar las relaciones de aire/combustible y monitoreo de emisiones para obtener la máxima eficiencia del generador. En los anexos L y M se aprecian dos modelos posibles a implementar.
- Por último se propone instalar un medidor de flujo de vapor o caudalímetro para determinar de forma real y precisa la cantidad de vapor generado en diferentes condiciones de funcionamiento del generador de vapor. En el anexo O se visualiza un instrumento de medición oportuno.

7.2. Conclusiones

- El diseño del sistema de adquisición involucró el estudio del funcionamiento de la caldera pirotubular, partes que la constituyen e identificación de sus principales elementos de control y medición. Por ende, esto permitió definir las variables físicas más relevantes de operación del generador de vapor que intervienen en el cálculo del rendimiento térmico. Estas variables son presión de vapor, caudal y temperatura del agua que ingresa a la caldera, caudal de combustible y temperatura de los gases que escapan por la chimenea.
- La etapa siguiente consistió en seleccionar los sensores o transductores específicos para cada una de las variables mencionadas. Para ello se eligieron dos caudalímetros, uno para medir el caudal de agua que ingresa a la caldera y el otro para medir el consumo de gas propano en el quemador, además un sensor de presión de vapor, una termocupla tipo J para el agua contenida en el estanque de alimentación y un termómetro a tensión con señal de salida eléctrica para los gases de combustión. Con la implementación de dichos instrumentos se modernizará el proceso de adquisición de datos o lecturas de las variables principales de funcionamiento del equipo generador de vapor.

- Conocido el tipo de señal de salida de cada sensor, se dio paso a seleccionar dos tarjetas o módulos de adquisición de datos de la National Instruments, la 9229 y la 9219, cuyos módulos se encontraban disponibles en el Departamento de Ingeniería Mecánica y que debido a sus características propias de diseño y aplicación las convierte en una alternativa oportuna para el presente trabajo.
- La programación y configuración de las tarjetas DAQ se realizó mediante los controladores MAX y DAQ Assistant instalados en el ordenador. En MAX se efectuó el proceso de simulación de las tarjetas DAQ y por medio del DAQ Assistant se procedió a configurar las 5 variables con el canal físico de la respectiva tarjeta creada virtualmente. Además destacar que los dispositivos simulados NI-DAQmx crean una onda sinusoidal a escala completa con 3% de ruido para todos los canales de entrada analógica, es decir, que los datos o lecturas de las variables físicas visualizadas en los gráficos correspondientes no son más que una simulación de su comportamiento dentro de un rango predefinido por el usuario. Lo anterior se desarrolló con objeto de aprender el procedimiento de obtención de una señal analógica y posteriormente aplicarla a un proceso de adquisición de datos en tiempo real por medio de una tarjeta DAQ no simulada.
- La programación del lenguaje gráfico que permitió visualizar las señales simuladas y el cálculo del rendimiento térmico directo e indirecto se realizó, tanto en el panel frontal como, en el diagrama de bloques del software LabVIEW. Con ello se consiguió obtener una forma más simple de interacción entre el usuario y el software al momento de llevar a cabo un análisis del comportamiento de las principales variables de operación del generador de vapor.
- Para comprobar el funcionamiento del diseño se realizó un ensayo de eficiencia del generador de vapor. Para ello se escogieron mediciones realizadas en una experiencia de laboratorio efectuada con anterioridad, cuyos valores se aprecian en la tabla 6.6. Los resultados de rendimiento térmico directo e indirecto fueron 77,43% y 76,71% respectivamente. En consecuencia, se evidenció por una parte una diferencia de tan solo 0,72% y por otra un 23,29% en pérdidas de energía. Las cuales se distribuyen en un 8,28% por gases secos, un 8,93% por evaporación agua formada, y un 6,08% por radiación conducción y convección a través de las paredes de la caldera. Entonces, se concluyó que ambas metodologías de cálculo del rendimiento térmico son adecuadas, dado que se presentó una diferencia de menos de 1% entre ambos resultados.

- De acuerdo a lo anterior, se puede afirmar que la programación gráfica referida al cálculo del rendimiento térmico funciona correctamente, sobre todo cuando se requiere verificar la variación del rendimiento térmico directo e indirecto al modificar los valores de las variables involucradas tales como caudal de agua y combustible, presión manométrica de vapor, temperatura de los gases, porcentaje volumétrico de oxígeno libre y temperatura del agua que ingresa a la caldera.
- La programación de adquisición de datos de las 5 variables implicó un estudio de la metodología de adquisición de una señal analógica y posterior demostración de ensayo y error. A pesar de que esta primera etapa de diseño es simulada, contribuye la base de conocimientos básicos y específicos, tanto en la adquisición de señales analógicas, como en el código de programación gráfica en el software LabVIEW. Materias muy relevantes para una siguiente etapa de implementación y comprobación de operación.
- El presupuesto para implementar el sistema de monitoreo asciende a la suma de US\$ 9179. Esta inversión pudiese ser mayor, debido a que durante la puesta en marcha del trabajo existirán imprevistos y que por lo habitual implicarán modificaciones y compra de otros elementos adicionales. El presupuesto anterior se puede reducir a US\$ 4621, en el caso que se usarán los dos módulos o tarjetas de adquisición que posee el Departamento de Ingeniería Mecánica.

8. BIBLIOGRAFÍA Y LINKOGRAFÍA

8.1. Bibliografía

- Trabajo de titulación: “Diseño e implementación de un sistema SCADA en LabVIEW para el control y monitoreo del caldero del laboratorio de generación de vapor de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH”
- Guía de descripción de calderas y generadores de vapor “ACHS”
- Curso “Herramientas técnicas para la operación de calderas”
- Guía de laboratorios máquinas de Termofluidos 440038
- Apuntes de combustión profesor Luis Cerda Miskulini
- Guía de operación caldera pirotubular

8.2. Linkografía

- ¿Qué es la adquisición de datos?: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>
- ¿Cómo realizar una medición de voltaje?: <http://www.ni.com/tutorial/7113/es/>
- Conectar Señales de Corriente a un Dispositivo DAQ: <http://www.ni.com/getting-started/set-up-hardware/data-acquisition/esa/current>
- Fundamentos de programación de NI-DAQmx: <http://www.ni.com/tutorial/2744/en/>
- Como crear y utilizar un dispositivo simulado NI-DAQmx: <http://www.ni.com/tutorial/3698/es/>
- Introducción a LabVIEW: <http://www.ni.com/getting-started/labview-basics/esa/>