

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Diseño e Implementación de un Sistema SCADA (Supervisory
Control and Data Acquisition) para el Proyecto USFQ-MOPS
(Measurement of Ozone Production Sensor).**

Santiago Belisario Vargas Solís

Luis Caiza, M.Sc, Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito
para la obtención del título de Ingeniero Electrónico

Quito, Mayo 2014

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Diseño e implementación de un sistema SCADA (Supervisory
Control and Data Acquisition) para el Proyecto USFQ-MOPS
(Measurement of Ozone Production Sensor).**

Santiago Belisario Vargas Solís

Luis Caiza, M.Sc.
Director de Tesis

.....

Omar Aguirre, M.Sc.
Miembro del Comité de Tesis

.....

Nelson Herrera, Ing.
Miembro del Comité de Tesis

.....

María del Carmen Cazorla, Ph.D.
Directora del Proyecto USFQ-MOPS
Miembro del Comité de Tesis

.....

Ximena Córdova, Ph.D.
Decana del Colegio de Ciencias e Ingenierías
El Politécnico

.....

Quito, Mayo del 2014

© Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: _____

Nombre: Santiago Belisario Vargas Solís

C. I.: 180323314-5

Fecha: Quito, Mayo 2013

DEDICATORIA

A mis padres, Benjamin y Carmita, y a mis hermanos, Gustavo y Diana por su cariño y apoyo incondicional en todos mis años de estudio.

Agradecimientos

A mis padres y mis hermanos, por su paciencia y apoyo que me supieron dar en todos los años de mi vida.

A mis todos mis profesores, especialmente a Omar Aguirre, Luis Caiza y Nelson Herrera, por transmitir sus conocimientos en los todos los años de carrera.

A Maria del Carmen Cazorla, por poner mucha confianza en mí para desarrollar todo el proyecto y demostrar todos los conocimientos adquiridos en los cinco años de estudio.

RESUMEN

El siguiente proyecto está enfocado en el diseño e implementación de un sistema SCADA para el proyecto USFQ-MOPS que está siendo desarrollado en el Instituto de Investigación Atmosférica de la USFQ (IIA-USFQ), este proyecto está encaminado para ser usado por estudiantes de Ingeniería Ambiental. El objetivo es medir la cantidad de Ozono presente en la atmósfera mediante el uso de un analizador de ozono.

El proyecto tiene tres etapas: por un lado se tiene el diseño del hardware y construcción de la planta con todos los componentes necesarios para recolectar las señales analógicas desde el analizador de ozono con su respectivo sistema de control. En segundo lugar, se tiene la etapa del diseño e implementación del sistema SCADA del proyecto programado en LabVIEW para monitorear los datos obtenidos por el sistema de control implementado. La última etapa consiste en el diseño y publicación de una página web para que los datos puedan ser observados desde cualquier computador conectado a la red LAN.

ABSTRACT

The project's aim is the design and implementation of a SCADA system for the project USFQ-MOPS developed at the Institute for Atmospheric Research USFQ (IIA-USFQ) to be used by Environmental Engineering students. The objective of the project is to measure the amount of ozone present in the atmosphere using an Ozone Analyzer.

The project has three stages: during the first part of the project, the implementation of hardware and the construction of the plant including all circuits to acquire signals of the Ozone Analyzer with control systems are done. Secondly, the design and implementation of the SCADA system is programmed in LabVIEW in order to check out the ozone readings. Finally, there is the design and publication of a web page for publishing all data on the LAN.

Tabla de Contenidos

Lista de Tablas.....	11
Lista de Figuras	12
CAPÍTULO 1: Introducción.....	17
1.1 Antecedentes	17
1.2 Justificación.....	20
1.3 Objetivo General	21
1.3.1 Objetivos Específicos.....	22
CAPÍTULO 2: Marco Teórico	23
2.1 Sensores	23
2.1.1 Analizador de Ozono	23
2.1.2 Sensor de Temperatura.....	25
2.2 Actuadores	25
2.2.1 Bombas.....	26
2.2.2 Válvulas	26
2.2.3 Controlador de Flujo Másico	27
2.3 Señales Eléctricas.....	27
2.3.1 Señales Analógicas	27
2.3.2 Señales Digitales	27
2.3.3 Modulación por Ancho de Pulso	28
2.4 Componentes Electrónicos.....	29
2.4.1 Amplificador Operacional (Opam).....	29
2.4.2 Transistor.....	31
2.4.3 Optoacopladores.....	32
2.5 LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench).....	33
2.6 Data Adquisition (DAQ)	33
2.7 Sistema SCADA (Supervisory Control And Data Adquisition)	34
2.8 Página Web.....	34
2.9 Red LAN.....	34
2.10 Sistema de Control.....	35
2.11 Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID).....	36
CAPÍTULO 3: Desarrollo.....	39
3.1 Desarrollo del Hardware.....	39
3.1.1 Circuito para el Control de las Válvulas	39

3.1.2 Adaptación de los sensores de temperatura a los NI USB-6009	42
3.1.3 Circuito para el Control de Temperatura	44
3.2 Desarrollo del Software	47
3.2.1 Adquisición de las señales del Analizador de Ozono.....	48
3.2.2 Software para el control de las válvulas.....	56
3.2.3 Programación de los Controladores de Flujo	59
3.2.4 Programación del Control de Temperatura	64
3.2.5 Sistema SCADA.....	77
3.2.6 Diseño de la Página Web	84
3.2.7 Configuración de una contraseña de seguridad	89
CAPÍTULO 4: Resultados	91
4.1 Visualización del Sistema SCADA.....	91
4.2 Control de las Válvulas.....	97
4.3 Control del Flujo de Aire	99
4.4 Control y medición de la temperatura de las cámaras.....	101
4.5 Archivo Texto	101
4.6 Visualización de la Página Web del Proyecto USFQ-MOPS.....	103
CAPÍTULO 5: Conclusiones y Recomendaciones	105
5.1 Conclusiones.....	105
5.2 Recomendaciones.....	106
Referencias.....	108
Anexos	111

Lista de Tablas

Tabla 1.- Distribución los pines del analizador de ozono al NI USB-6009.	50
Tabla 2.- Código Binario para el control de las válvulas	57

Lista de Figuras

Figura 1.- Esquema del sensor USFQ-MOPS.	17
Figura 2.- Principio de la Ley de Beer en el Analizador de Ozono.....	24
Figura 3.- Configuración de los pines del sensor de temperatura LM35 (Texas Instruments, 2013).....	25
Figura 4.- Esquema de la válvula 3/2.....	26
Figura 5.- Forma de una señal PWM.	28
Figura 6.- Esquema del Opam.....	30
Figura 7.- Seguidor de Voltaje.	30
Figura 8.- Tipos de Transistores, pnp y npn.....	31
Figura 9.- a) Circuito del transistor en sus estados de corte y saturación, b) transistor en su estado en corte, c) transistor en su estado saturación.	32
Figura 10.- Optoacoplador con la distribución de sus pines.	33
Figura 11.- Esquema básico de un sistema de control en lazo abierto.....	35
Figura 12.- Esquema básico de un sistema de control en lazo cerrado.....	35
Figura 13.- Esquema de un sistema de control en lazo cerrado.	37
Figura 14.- Curva de respuesta a escalón unitario con t_d , t_r , t_p , M_p y t_s (Ogata, 2010).....	38
Figura 15.- Diseño del circuito para el control de las válvulas	41
Figura 16.- Diseño del PCB en 3D del circuito para el control de las válvulas.....	41
Figura 17.- Diagrama de conexión del LM358	42
Figura 18.- Circuito diseñado para el seguidor de voltaje para los sensores de temperatura.....	43

Figura 19.- Circuito de los seguidores de voltaje para los sensores de temperatura.....	44
Figura 20.- Circuito diseñado para el control de temperatura de las cámaras de referencia y muestreo	46
Figura 21.- Diseño del PCB en 3D del circuito para el control de temperatura de las cámaras.....	47
Figura 22.- Verificación del driver del NI USB-6009.....	48
Figura 23.- <i>DAQ Assistant</i> para configuración de los datos de entrada del Analizador de Ozono 49i.....	49
Figura 24.- Configuración de las seis entradas del DAQ.	51
Figura 25.- <i>DAQ Assistant</i> configurado y con <i>Split Signal</i> para trabajar por separado las seis señales.....	52
Figura 26.- Ubicación del Write Measurement File.	53
Figura 27.- Configuración del archivo texto para los datos adquiridos.....	54
Figura 28.- Configuración de los archivos de texto.	55
Figura 29.- Configuración del archivo texto.....	56
Figura 30.- Configuración de las Salidas Digitales para el control de las válvulas del NI USB-6009.	58
Figura 31.- <i>DAQ Assistant</i> configurado y con <i>Merge Signal</i> para enviar las dos señales.....	59
Figura 32.- Configuración del <i>DAQ Assistant</i> para la adquisición de las señales de los controladores.....	61
Figura 33.- <i>DAQ Assistant</i> configurado y con <i>Split Signal</i> para trabajar por separado las dos señales.	62

Figura 34.- Configuración del DAQ Assistant para la generación de las señales analógicas de los controladores de flujo de aire.	63
Figura 35.- DAQ Assistant configurado y con Merge Signal para enviar por igual las dos señales.	63
Figura 36.- Secuencia para entrar a Simulink.	65
Figura 37.- Bloque Transfer Fcn.	66
Figura 38.- Parámetros de la ecuación 11 en el bloque Transfer Fcn.	67
Figura 39.- Constantes del controlador PI.....	68
Figura 40.- Configuración de la respuesta del sistema con el PID Tunning.....	69
Figura 41.- Ventana del bloque PID Controller con los parámetros encontrados.	70
Figura 42.- Bloque Step en la Ventana Simulink Library Browser.....	71
Figura 43.- Sistema de Control en lazo cerrado.....	71
Figura 44.- Respuesta del Sistema a una entrada paso unitario.	72
Figura 45.- Configuración del DAQ Assistant para la adquisición de las señales de los sensores de temperatura.....	73
Figura 46.- DAQ Assistant configurado y con Split Signal para trabajar por separado las cuatro señales.	74
Figura 47.- Bloque PID.vi en Functions Palette.....	75
Figura 48.- Bloque PID.vi en LabVIEW.....	76
Figura 49.- Programa para el Control de temperatura para las cámaras de referencia y muestreo.	77
Figura 50.- DSC Module en el Controls Palette.	78
Figura 51.- DSC Module en el Controls Palette para la selección de las bombas.	79
Figura 52.- Image Navigator en el DSC Module.	80

Figura 53.- a) Figura del Analizador de Ozono. b) Figura del Controlador de Flujo.	80
Figura 54.- Tanque animado utilizado en el sistema SCADA	81
Figura 55.- Creación de las Variables Locales.....	82
Figura 56.- Programación del SCADA.	83
Figura 57.- Configuración del Web Server.	85
Figura 58.- Configuración del VI Server.....	86
Figura 59.- Web Publishing Tool configuración del VI a publicarse.	87
Figura 60.- Configuración del Web Publishing Tool con un título y una breve descripción del proyecto.	88
Figura 61.- Dirección de la página configurada.....	89
Figura 62.- Configuración de una contraseña para el programa.....	90
Figura 63.- Pestaña de O ₃ con la gráfica del Ozono: 1. Son las 4 pestañas. 2. Es el nombre del archivo donde se está guardando. 3. Botón para grabar la información 4. Son los indicadores numéricos de los datos obtenidos.	92
Figura 64.- Pestaña de Beer Intensity con el Gráfico de Flow A y Flow B.	93
Figura 65.- Pestaña de House Keeping con el gráfico de Intensity A y B.	94
Figura 66.- Tab del sistema SCADA: 1. Indicadores numéricos de las temperaturas medidas en las cámaras. 2. Controles e indicadores numéricos del control de flujo. 3. Tiempo en segundos para la secuencia de las válvulas.	96
Figura 67.- Control de las Válvulas mediante el grafico del Ozono.....	98
Figura 68.- Control de flujo de aire.....	100
Figura 69.- Control y medición de la temperatura de las cámaras.....	Error!
Bookmark not defined.	
Figura 70.- Archivo texto con la información del sensor USFQ-MOPS.....	102

Figura 71.- Página web diseñada y publicada en la red LAN de la computadora.

..... 104

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Antecedentes

Este proyecto consiste en diseñar e implementar un sistema de control y adquisición de Datos para el proyecto USFQ-MOPS (Measurement of Ozono Production Sensor). Este se está desarrollando en el Instituto de Investigaciones Atmosféricas de la Universidad San Francisco de Quito (IIA-USFQ). EL sensor MOPS fue creado y probado en EEUU ((Cazorla, M. and Brune, W. H., 2010); (Cazorla, M., Brune, W. H., Ren, X., and Lefer, B., 2012)). Al momento se está desarrollando una versión ecuatoriana del sensor con fondos TWAS (The World Academy of Science) Program in Basic Science de la UNESCO (2013) y un USFQ Chancellor Grant (2013) asignados a Principal Investigator (PI) María Cazorla.

En la Figura 1, se muestra el esquema del sensor MOPS con todos sus componentes y con los controles que se implementaron en este trabajo.

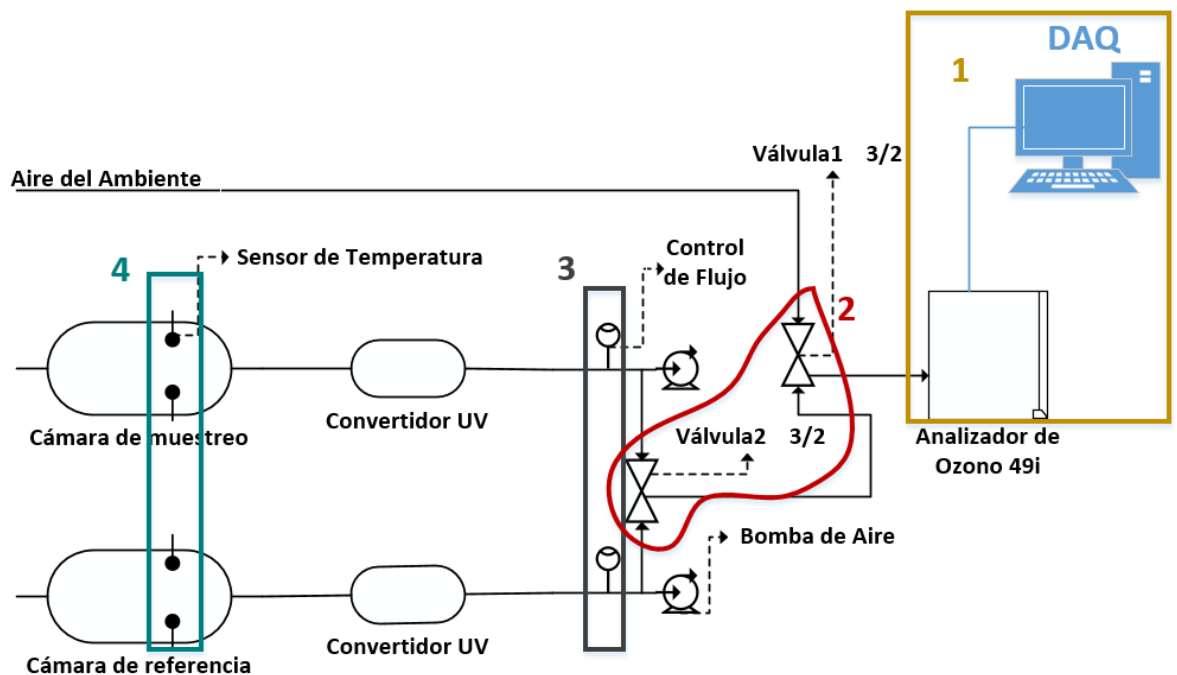


Figura 1.- Esquema del sensor USFQ-MOPS.

Los controles implementados en este proyecto, se encuentran marcados con los números del 1 al 4. La parte 1 es la adquisición de los datos desde el analizador de ozono hacia el computador. La parte 2 es el control de las válvulas para determinar la secuencia del flujo de aire de las entradas del sensor hacia el analizador de ozono. La parte 3 es el control de flujo de aire que atraviesa por las cámaras de referencia y muestreo. Por último, la parte 4 es la medición y control de la temperatura de las cámaras, mediante dos sensores en cada cámara.

El sensor MOPS es un monitor de aire que mide directamente la tasa de producción de ozono en la atmósfera. El sensor se compone de dos cámaras ambientales hechas de película de teflón transparente que están continuamente expuestas a la radiación solar, una unidad para convertir NO_2 a O_3 y un monitor de ozono modificado. La primera cámara es la de muestreo, en esta cámara producen procesos de fotólisis y química de radicales, los cuales también suceden en la atmósfera. La otra cámara, es la llamada la cámara de referencia, está se encuentra recubierta de una película protectora de rayos ultravioleta (UV), por lo que esta película ayuda a prevenir la formación de radicales (Cazorla, M. and Brune, W. H., 2010).

La producción de ozono es un proceso complejo. Requiere de luz solar y de dos tipos de precursores: los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos volátiles. Estas emisiones provienen de industrias y de la emisión de gases de los vehículos. La relación entre los precursores para formar ozono no es lineal, es decir, la reducción de los precursores en las chimeneas y tubos de escape, no implica menos producción de ozono y por lo tanto no mejora en la calidad del aire. La tasa de producción de ozono tiene el poder de revelar información sobre el tipo de

precursores que lideran la formación de ozono y, por lo tanto, puede ayudar a identificar el tipo de precursor que debe ser controlado para mejorar realmente la calidad del aire. Esta es la importancia de esta medición. Antes de la existencia del sensor MOPS, la tasa de producción de ozono se la obtenía de modelos computacionales. Pero los modelos necesitan validarse. El MOPS es una medida directa de la tasa de producción de ozono (Cazorla, M. and Brune, W. H., 2010).

Los detalles del sensor se encuentran en las citas antes mencionadas. Este sensor posee diferentes controles y adquisición de señales, sin los cuales su funcionamiento no es posible. A continuación una breve descripción del funcionamiento del sensor a fin de comprender, la implementación de los controles electrónicos.

El aire ambiente ingresa a las cámaras de muestreo y referencia, como se puede observar en la Figura 1. Este aire ingresa a una tasa conocida y tiene que calentarse a fin de obtener un flujo parecido al laminar, es decir que el aire se mueva en forma de láminas paralelas sin entremezclarse, siguiendo una trayectoria suave. Para esto, la entrada a las cámaras tiene una malla de níquel, a la se aplica un voltaje para que se caliente. Por esta razón, en este sistema se requiere un control y medición de temperatura. Para el ingreso de aire de las cámaras, se utilizan dos bombas de vacío las mismas que necesitan alimentación eléctrica, estas bombas se encuentran en la Figura 1.

Adicionalmente, el aire de las dos cámaras, sufre ciertas transformaciones cuyos detalles pueden verse en (Cazorla, M. and Brune, W. H., 2010). La cantidad de Ozono en cada cámara se detecta con un medidor comercial. La medida de la tasa de producción de ozono requiere conocer la diferencia entre las concentraciones de este químico en cada cámara. Por lo tanto, se requiere de

controladores de flujo y válvulas de aire de dos posiciones para lograr el cambio de las dos entradas de aire hacia el medidor comercial, para la detección. El medidor de ozono adquirido por IIA-USFQ para la EMA (Estación de Mediciones Atmosféricas de la USFQ), es el único medidor de este tipo que se posee al momento y con este medidor se efectúa el monitoreo del ozono en el aire ambiente. Es decir, adicionalmente a las válvulas de control de flujo para la medición de ozono en el aire de las cámaras, se necesita una válvula adicional para controlar el flujo de las tres entradas hacia el analizador de ozono. En la Figura 1, se puede observar las entradas de aire, las válvulas de control y el analizador de ozono.

El Analizador del Ozono genera señales analógicas que se requieren adquirir y almacenar en tiempo real en un archivo para su posterior análisis. Por esta razón se necesita de un programa que recupere los datos de las señales.

El sensor se encuentra en la EMA ubicada en la terraza del edificio Maxwell de la USFQ, Cumbayá, Quito, Ecuador, y se necesita de una página web que permita la visualización y control remoto del sensor desde diferentes puntos geográficos.

En este trabajo se diseñó e implementó un hardware y software para controlar todos los componentes eléctricos y electrónicos del sensor USFQ-MOPS que se ha descrito.

1.2 Justificación

Como se explicó anteriormente, el sensor USFQ-MOPS necesita diferentes controles y un programa para la adquisición de señales. Este sistema electrónico, diseñado a lo largo de este proyecto, complementa el funcionamiento del sensor

USFQ-MOPS y la ejecución de experimentos controlados con el mismo. La integración de los controles de temperatura de las cámaras, de las válvulas, de los flujos y de las bombas, la adquisición de datos y visualización remotos de los datos del sensor, en un solo sistema electrónico hacen posible tanto la operación del USFQ-MOPS como el monitoreo continuo del ozono en el aire ambiente. Esto se logra mediante un sistema SCADA.

El sistema SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition – permite el monitoreo y la teleoperación en tiempo real del sensor USFQ-MOPS. Este adquiere los datos de los sensores y los transfiere a un sitio central (computadora), los cuales son procesados y registrados en un archivo tipo texto. Además, mediante una interfaz gráfica se los puede visualizar en tiempo real.

Además, el sistema SCADA está diseñado para que el investigador instale nuevos instrumentos de manera rápida y efectiva, así se logra aportar con datos relevantes a la investigación. Por ejemplo, próximamente, se implementarán sensores adicionales que podrán medir otros gases contaminantes en el aire ambiente.

El SCADA es un sistema ideal para este proyecto pues permite integrar en un solo programa el control de temperatura, el muestreo del aire, la adquisición de señales y todos los controles anteriormente mencionados.

1.3 Objetivo General

Desarrollar un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) y la creación página web para monitorear en tiempo real la planta USFQ-MOPS.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema automático para la adquisición de datos de las seis salidas analógicas del analizador de ozono en LabVIEW.
- Desarrollar un sistema de control automático para las válvulas.
- Implementar un sistema de control a los dos controladores de flujo de aire que posee la planta.
- Diseñar un sistema para medir la temperatura en las cámaras de referencia y muestreo.
- Diseñar e implementar el sistema SCADA de la planta MOPS.
- Desarrollar una página web para que el sistema SCADA de la planta pueda ser operado remotamente.

CAPÍTULO 2: Marco Teórico

2.1 Sensores

Un sensor es un dispositivo que permite medir parámetros químicos, físicos, biológicos, entre otros. Éste envía un equivalente de una señal en voltaje o corriente del valor que está midiendo (Mukhopadhyay, 2013).

Dependiendo del principio físico que gobierna el funcionamiento del sensor, se disponen de diferentes tipos de sensores. A continuación se mencionan los sensores que fueron utilizados en este proyecto.

2.1.1 Analizador de Ozono

El principio de funcionamiento de este sensor es la Ley de Beer. Esta ley se expresa que la materia causa atenuación de la luz por absorción y esta atenuación es función de la cantidad de materia que absorbe esta longitud de onda. La ecuación 1 es la expresión matemática de esta ley (Fuentes, Castiñeiras, & Queraltó, 1998).

$$\frac{I}{I_0} = e^{-l N \zeta} \quad (1)$$

En la ecuación 1, I es la intensidad de luz atenuada por absorción, este caso el ozono, I_0 es la intensidad de luz medida sin absorción, l es el camino óptico en donde está la sustancia que absorbe, N es la concentración de esta sustancia, es decir O_3 , en moléculas por cm^3 y ζ es la sección transversal de absorción del ozono a 254 nm en cm^2 .

En la Figura 2, se representa la aplicación de la ley de Beer en el analizador de ozono.

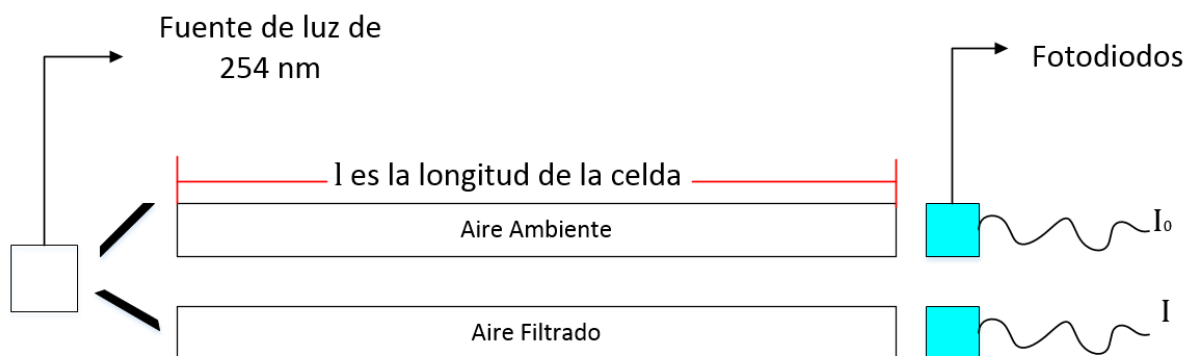


Figura 2.- Principio de la Ley de Beer en el Analizador de Ozono.

Para este proyecto se utiliza el analizador de Ozono modelo 49i de Thermo Fisher Scientific. En la Figura 2 se muestra el funcionamiento del sensor de acuerdo a la ley de Beer. La fuente de luz es una lámpara de 254 nm, que es la longitud de onda de la luz que absorbe el ozono. El aire que pasa continuamente por las celdas proviene del aire ambiente. Una corriente de este aire se filtra y, una vez libre de ozono, se detecta I_0 con un fotodiodo a la salida de la celda. I es la intensidad de la luz medida por el fotodiodo en la celda que contiene aire ambiente, es decir, con Ozono. En el analizador de Ozono, el camino óptico es de 38 cm (Thermo Fisher Scientific Inc., 2009) y la sección transversal de absorción del ozono es un valor de la literatura, es $1.136 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ por molécula (Barnes & Mauersberger, 1987).

2.1.2 Sensor de Temperatura

Los sensores más comunes para medir la temperatura son los RTDs (resistance temperature detectors), termistores, sensores de circuito integrado (IC) y termocuplas. Para este proyecto se utiliza un sensor de circuito integrado. Éste genera una relación lineal entre voltaje y temperatura. Los sensores de circuito integrado necesitan de una fuente de alimentación externa (Deshmukh, 2007). Para este proyecto se utiliza un sensor de circuito integrado, LM35. Este sensor posee un factor de $10\text{mV}/^\circ\text{C}$. En la Figura 3 se observa el sensor con la distribución de sus pines.

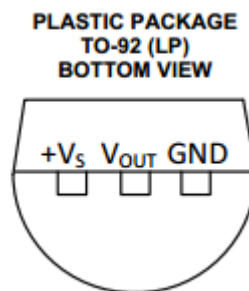


Figura 3.- Configuración de los pines del sensor de temperatura LM35 (Texas Instruments, 2013).

2.2 Actuadores

Los actuadores son dispositivos que generan movimiento y/o esfuerzo. Existen dos tipos de actuadores, actuadores lineales y rotativos. Un actuador lineal es un dispositivo de fuerza y desplazamiento lineal, en cambio los actuadores rotativos poseen torque y generan desplazamiento angular. Los actuadores utilizados en este proyecto son bombas y válvulas como se observan en la Figura

1. Las bombas y válvulas utilizadas en este proyecto se describen en las siguientes secciones.

2.2.1 Bombas

Una bomba es una máquina que transporta un fluido. Existen diferentes tipos de bombas como las de émbolo oscilante, émbolo oscilante con membrana y turbina axial. Estas bombas mueven el aire por una diferencia de presión que se logra mediante un mecanismo que comprime el aire dentro de la bomba. La presión al ser mayor a la que se encuentra a fuera de la bomba, se puede transportar el aire. Las bombas utilizadas en este proyecto son bombas de vacío de émbolo oscilante con membrana. Estas bombas succionan el aire que entra por las cámaras para ser llevadas hacia en el analizador de ozono.

2.2.2 Válvulas

Las válvulas poseen un mecanismo que regula el flujo de la comunicación entre dos partes de una máquina o sistema y son activadas mediante un voltaje. En la Figura 1, se muestra las válvulas solenoides 3/2 (3 entradas y 2 posiciones) que se utilizan en el proyecto. En la Figura 4, se muestra un esquema de la válvulas 3/2.

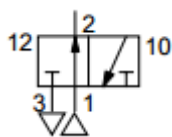


Figura 4.- Esquema de la válvula 3/2.

Los números 1 y 3 son las entradas de la válvula, 2 es la salida de la válvula, 12 y 10 son las posiciones, en este caso, 12 es la posición normalmente cerrada y 10 es la posición normalmente abierta.

2.2.3 Controlador de Flujo Másico

Estos controladores son diseñados para la medida y control de cualquier gas o líquido. Estos funcionan con un principio térmico, poseen un sensor de temperatura que se encuentra en un tubo y el sensor se calienta con una corriente aplicada. Se mide una diferencia de temperaturas entre el sensor y el gas que atraviesa el tubo ya que este gas enfría el tubo. Por ende, a un voltaje aplicado al sensor se calienta a una temperatura conocida, al momento que el gas atraviesa el tubo se enfría y ese diferencial de temperatura es el caudal medido.

2.3 Señales Eléctricas

2.3.1 Señales Analógicas

Una señal analógica posee una señal que varía continuamente, puede variar infinitamente en tiempo y magnitud (Barr, 2001).

2.3.2 Señales Digitales

Una señal digital es una señal discontinua y solo puede tomar dos valores de estado generalmente 1 y 0. Por lo general 1 es un voltaje fijo de 5 V y 0 es de 0 V (Barr, 2001). En este proyecto se usan los valores antes mencionados.

2.3.3 Modulación por Ancho de Pulso

Una señal de tipo PWM (de las siglas en ingles Pulse Width Modulation) tiene la forma que se observa en la Figura 5, donde T es el periodo de la señal, V_s es la amplitud de la señal, P_w es el ancho del pulso y V_a es el voltaje medio.

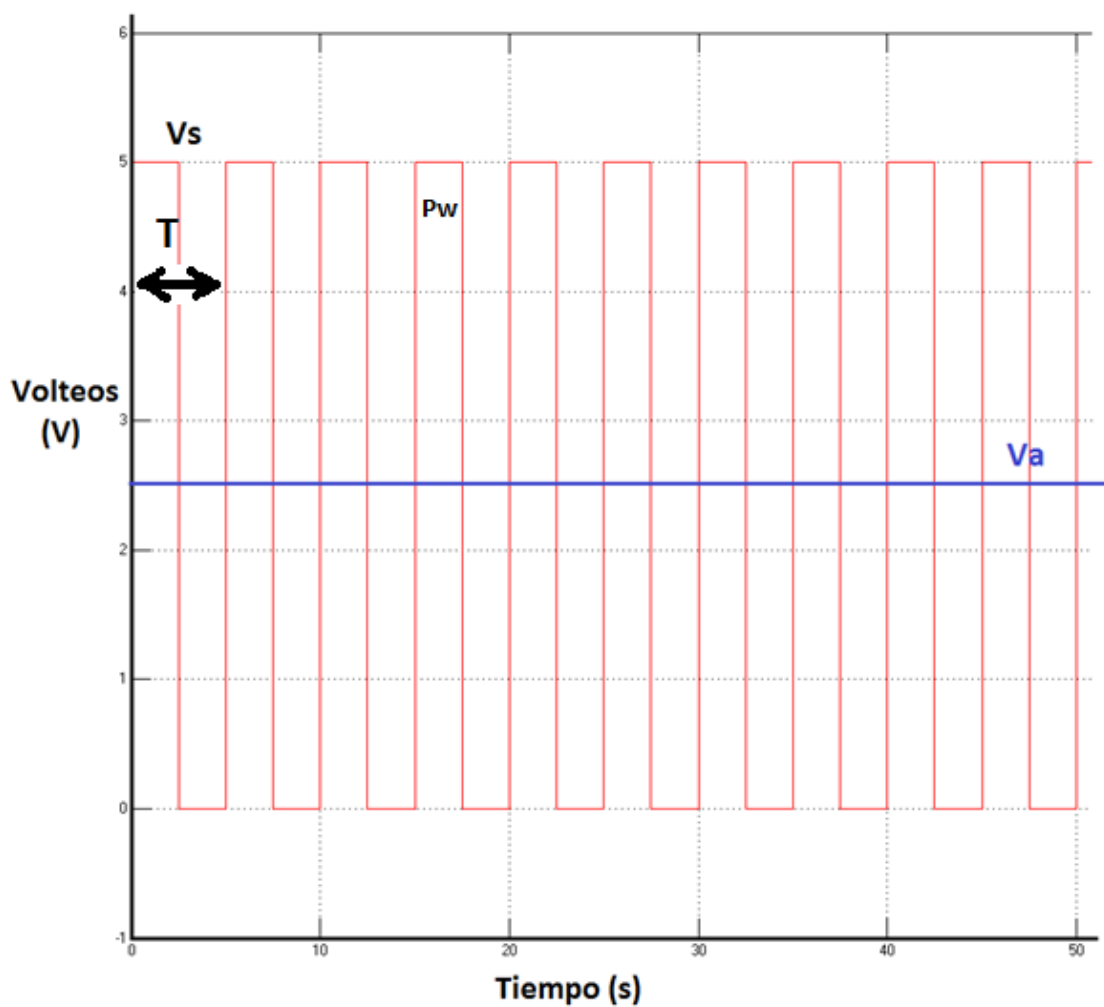


Figura 5.- Forma de una señal PWM.

El voltaje medio de la señal PWM está directamente relacionado con su ancho de pulso, mediante la ecuación 2,

$$V_a = \frac{P_w}{T} V_s \quad (2)$$

Donde P_w y T están en unidades de tiempo, y V_a y V_s en unidades de voltaje.

Las señales PWM son utilizadas para controlar la cantidad de energía que se transfiere a una carga cuando no se dispone de una fuente de voltaje continuo en el tiempo y variable en amplitud. Por ejemplo, una señal con un 50% de periodo en alto (V_s) aplicado a un motor de corriente continua, generará una velocidad de un 50% de su velocidad máxima. Así mismo, una señal al 20 % en alto (V_s) generará una velocidad del 20% de su velocidad máxima.

2.4 Componentes Electrónicos

2.4.1 Amplificador Operacional (Opam)

Es un circuito integrado que se utiliza para realizar una operación específica de procesamiento de señales (Dorf & Svoboda, 2010), como amplificar una señal, restar, sumar o comparar dos señales, etc; posee alta impedancia de entrada y baja impedancia en la salida. El opam 741 (ver Figura 6), es un ejemplar comúnmente utilizado que tiene 8 pines: los pines 1 y 5 para el ajuste del offset, el pin 2 es la entrada inversora, el pin3 la entrada no inversora, los pines 4 y 7 para la alimentación, el pin 6 es la salida y el pin 8 quedando sin conectar.

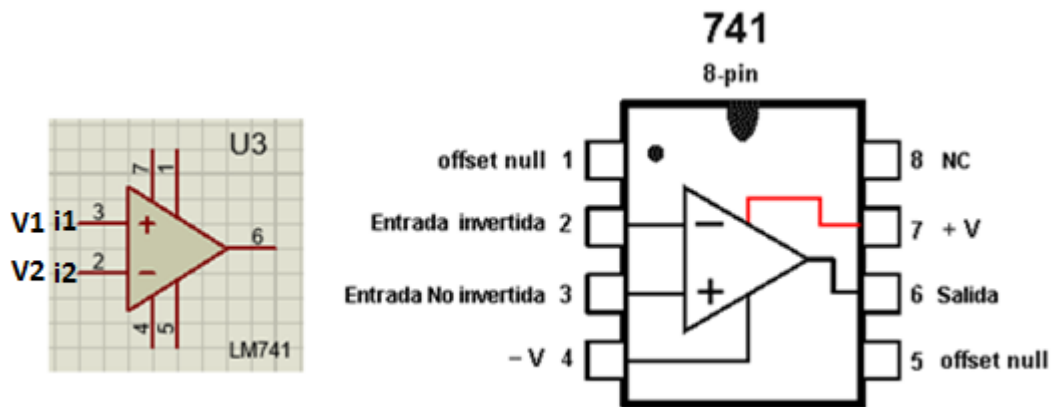


Figura 6.- Esquema del Opam

Un amplificador operacional ideal cumple con las condiciones de las ecuaciones 3 y 4: las corrientes en las entradas inversoras y no inversoras son iguales a 0 y la diferencia de voltajes en las dos terminales.

$$i_1 = i_2 \quad (3)$$

$$V_1 - V_2 = 0 \quad (4)$$

Una de las configuraciones del amplificador operacional es el seguidor de voltaje, como se muestra en la Figura 7.

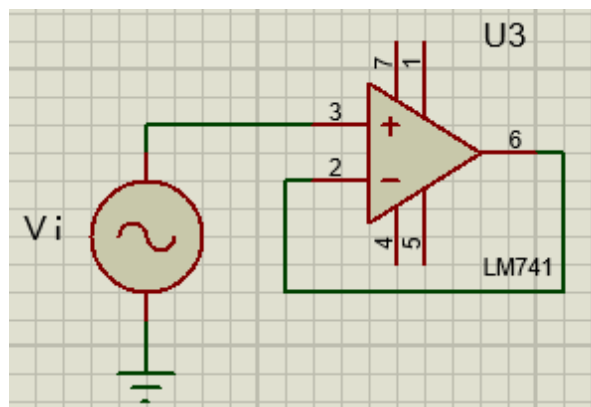


Figura 7.- Seguidor de Voltaje.

En el seguidor de voltaje la señal de entrada V_i se aplica directamente al terminal positivo (+) del opam, mientras que el terminal negativo (-) se conecta directamente con la salida. De esta manera el voltaje en la salida V_o es igual al voltaje de entrada V_i . Una carga conectada al pin de salida, consumirá la corriente dada por el opam, mas no de la fuente de la señal de entrada V_i .

2.4.2 Transistor

Es un dispositivo semiconductor con tres terminales: base, colector y emisor y se utiliza, generalmente, para amplificar corriente. Existen dos tipos de transistores, pnp y npn como se muestra en la Figura 8.



Figura 8.- Tipos de Transistores, pnp y npn.

El transistor puede operar en tres regiones: región lineal, corte o saturación. En la región lineal, las corrientes en el colector y en el emisor están dadas por las ecuaciones 5 y 6.

$$I_c = \beta I_b \quad (5)$$

$$I_e = I_b + I_c \quad (6)$$

Donde beta (β) es la ganancia del transistor.

En la ecuación 5, cuando $I_b = 0$, la corriente en el colector es $I_c = 0$, en este caso se dice que el transistor opera en corte.

En la región de saturación, la ecuación 5 deja de cumplirse y se tiene que $I_c < \beta I_b$, lo cual indica que a pesar que la corriente en la base incrementa, la corriente en el colector se mantiene en un valor máximo.

Los estados de corte y saturación son utilizados para que el transistor funcione como un switch electrónico, para el encendido y apagado de elementos de potencia como el de la Figura 9.

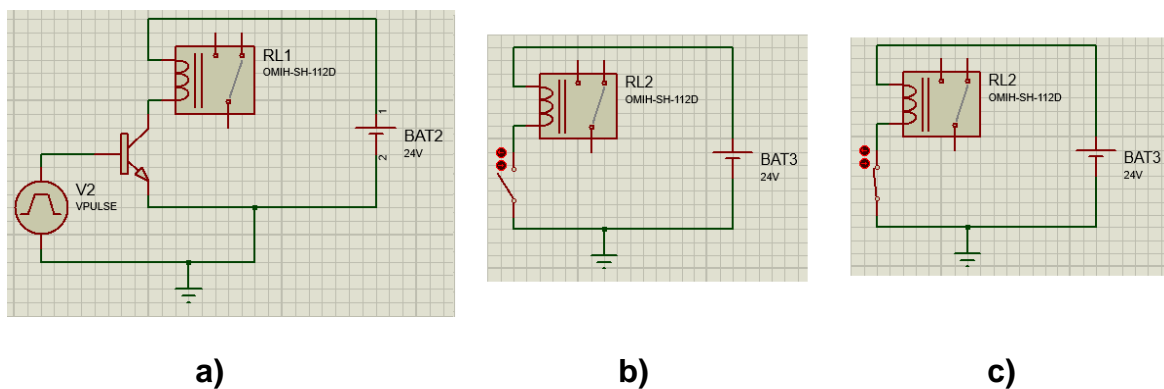


Figura 9.- a) Circuito del transistor en sus estados de corte y saturación, b) transistor en su estado en corte, c) transistor en su estado saturación.

En el estado de corte del transistor, el relé está apagado por lo tanto su contacto está abierto. En estado de saturación del transistor, el relé está activado y su contacto está cerrado.

2.4.3 Optoacopladores

Un optoacoplador es un dispositivo electrónico compuesto por dos partes, un LED y un fototransistor. La luz que emite el diodo LED incide en la superficie del fototransistor permitiendo que en la base del transistor y por ende en el colector atraviese una corriente generada por una fuente externa. En la Figura 10, se muestra un esquema básico de un optoacoplador.

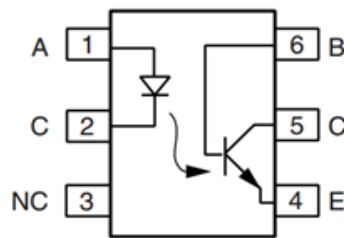


Figura 10.- Optoacoplador con la distribución de sus pines.

2.5 LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)

LabVIEW, es un programa que utiliza un lenguaje de programación gráfica que es de gran ayuda para aplicaciones de medición, control y automatización. También se pueden utilizar sistemas con adquisición de datos, comunicación serial y por ende sistemas tipo SCADA. Sus archivos son llamados *Virtual Instruments* (VIs), que poseen dos ventanas, el *Front Panel* y *Block Diagram*. En *Front Panel* se encuentran los instrumentos virtuales como indicadores gráficos, botones y luces. En cambio en la ventana de *Block Diagram*, se encuentran los bloques de programación para realizar las tareas antes mencionadas.

2.6 Data Acquisition (DAQ)

Una de las funciones de LabVIEW es la adquisición de datos, que es la toma de datos del mundo real hacia un computador y se logra mediante una tarjeta de adquisición de datos. Esta tarjeta adquiere señales en forma de voltaje o corriente

mediante sus entradas analógicas o digitales hacia el VI (Virtual Instrument). En este proyecto se utiliza dos DAQs, NI USB-6009.

2.7 Sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)

SCADA, es un Sistema utilizado para la supervisión y control de procesos industriales en forma remota. El sistema se compone de una interfaz gráfica, un Terminal Master de procesamiento y los dispositivos de campo (actuadores, sensores, microcontroladores). Este sistema comprende de hardware y de software para poder enviar y recibir las señales de los dispositivos de campo.

2.8 Página Web

Es un documento electrónico que contiene información textual o visual, que es provista por un servidor y puede ser accesible mediante un navegador. Los formatos utilizados por las páginas web son html, php, asp y jsp. En este proyecto la página web es creada bajo el formato html.

2.9 Red LAN

Por sus siglas en inglés, Local Area Network, es una red que provee de servicios o aplicaciones a personas con conectadas a una sola red. Además que esta red está administrada por una sola organización.

2.10 Sistema de Control

El objetivo de un sistema de control es obtener una respuesta deseada a un sistema aplicado. Esto puede darse con un sistema de control en lazo abierto o un sistema de control en lazo cerrado. Un sistema de control en lazo abierto determina la señal de entrada al proceso basado solo con la señal de referencia (r). La Figura 11, muestra un esquema básico del control en lazo abierto (Visioli, 2006).

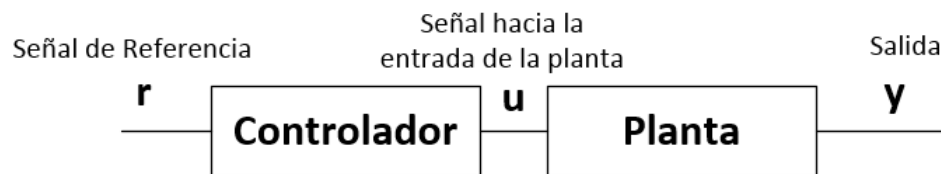


Figura 11.- Esquema básico de un sistema de control en lazo abierto.

Un sistema de control en lazo cerrado determina la señal de entrada al proceso usando la señal de referencia y la señal de salida, esto se logra restando las dos señales, la de referencia (r) y la salida de la planta (y), esto se llama error (e). La Figura 12, muestra el sistema de un control en lazo cerrado. Además, el valor de salida de la planta, se mantiene muy cerca al valor deseado por el usuario (r), sin importar, la variación del proceso dinámico de la planta (Visioli, 2006).



Figura 12.- Esquema básico de un sistema de control en lazo cerrado.

2.11 Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)

Este tipo de controlador consiste en aplicar la suma de tres controles: un control proporcional, un control integral y un control derivativo.

- El control proporcional es un control muy sencillo porque este solo incrementa en un factor constante, la variable de control cuando el error es grande (Visioli, 2006). Su ganancia es K_p y se encuentra en la ecuación (7), su función de transferencia se encuentra en la ecuación (8).

$$u(t) = K_p e(t) = K_p (r(t) - y(t)) \quad (7)$$

$$C(s) = K_p \quad (8)$$

- El control integral es proporcional a la integración del error, ecuación (9), donde K_i es la ganancia integral. Esta ganancia está relacionada con los valores pasados del control del error. La acción integral es capaz de corregir el error en estado estable (Visioli, 2006). Su función de transferencia es la ecuación (10).

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\zeta) d\zeta \quad (9)$$

$$C(s) = \frac{K_i}{s} \quad (10)$$

- El control derivativo está basado en el valor corriente del control del error, este control a diferencia del integral, predice el valor futuro del control del error, K_d es la ganancia derivativa (Visioli, 2006). Su expresión se encuentra en la ecuación 11, y su función de transferencia en la ecuación 12.

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

$$u(t) = K_d s \quad (12)$$

En la Figura 13, se muestra el esquema básico de un sistema de control PID, con el controlador y su sistema que es ser controlado.

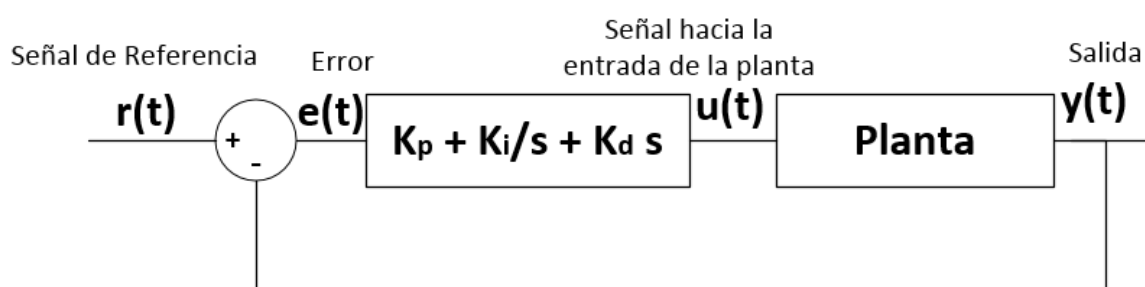


Figura 13.- Esquema de un sistema de control en lazo cerrado.

Para encontrar las constantes del controlador PID, antes mencionado, se debe tomar en cuenta la respuesta del sistema. La respuesta a una entrada paso unitario posee cinco parámetros:

- Tiempo de retardo, t_d , “es el tiempo requerido para que alcance la primera vez la mitad del valor final” (Ogata, 2010).
- Tiempo de subida, t_r , “es el tiempo requerido para que la respuesta pase del 10 al 90% de su valor final” (Ogata, 2010).

- Tiempo pico, t_p , “es el tiempo requerido para que la respuesta alcance el primer pico de sobreenlogación” (Ogata, 2010).
- Sobreelongación, M_p , “es el máximo valor del pico de la curva de respuesta” (Ogata, 2010).
- Tiempo de asentamiento, t_s , “es el tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final” (Ogata, 2010).

En la Figura 14, se muestra la entrada y la respuesta al sistema, especificando los cinco parámetros.

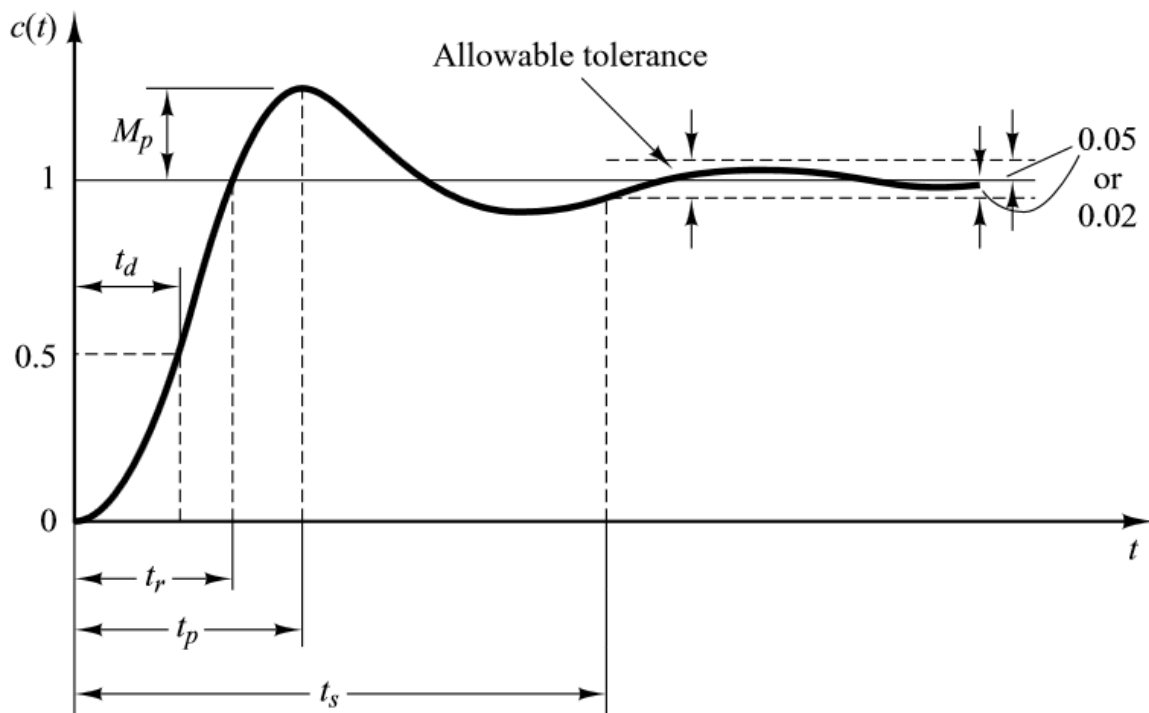


Figura 14.- Curva de respuesta a escalón unitario con t_d , t_r , t_p , M_p y t_s (Ogata, 2010).

CAPÍTULO 3: Desarrollo

3.1 Desarrollo del Hardware

En esta sección se explica el diseño de los circuitos de control para las válvulas de aire que posee el sensor USFQ-MOPS. Además de los circuitos para la medición de la temperatura en las cámaras. Aparte se realiza un diseño breve de para controlar la temperatura en las cámaras de referencia y muestreo.

3.1.1 Circuito para el Control de las Válvulas

En la Figura 1, se observan las dos válvulas que controlan el cambio del flujo de aire entre las cámaras y el aire ambiente, a fin de que el analizador de ozono mida el aire de las tres entradas en intervalos iguales de tiempo. Estas válvulas necesitan un control para poder realizar la secuencia del flujo de aire hacia el analizador de ozono; esto es, en la siguiente secuencia: primero mide el aire ambiente, luego el aire de la cámara de referencia y por último, el aire de la cámara de muestreo.

Las válvulas son electromecánicas y, según sus especificaciones, necesitan un voltaje de 24 V para ser activadas. Debido a que los voltajes máximos de las salidas digitales del NI USB-6009 son de 5 V, se necesitó diseñar dos tarjetas de control que enciendan las válvulas con 24 V. Estas tarjetas poseen un relé que es activado mediante una señal enviada desde el NI USB-6009. También, se necesitó aislar las conexiones a tierra del NI USB-6009 y de las válvulas, para proteger el NI USB-6009 de cualquier falla de sobrecorriente que ocurra durante la activación de las válvulas.

En la Figura 15, se encuentra el circuito empleado para el diseño de la tarjeta del control de las válvulas. Este circuito fue diseñado utilizando Proteus 8 (Labcenter Electronics, 2013). R1 es la resistencia de 220Ω para polarizar el led que posee el optoacoplador. También, la resistencia R3 se emplea en la polarización del transistor a la salida del optoacoplador. El transistor Q1, TIP122 se escogió por la ganancia en corriente que posee de $\beta = 100$, y funciona en corte y saturación (switch electrónico). Esta es la razón de haber utilizado una resistencia de $1K\Omega$, R2 en la figura, para disminuir la corriente de la base. El relé RL1 se activa con un voltaje de 5 V y posee un diodo para eliminar la corriente de fuga en la bobina; de esta manera al activar el relé, se encienden las válvulas de 24V. Por último, para facilitar la conexión de tarjeta de control con las válvulas y los pines del NI USB-6009 se colocan borneras de dos pines. La bornera J5, es para la entrada de señal proveniente del NI USB-6009. La bornera J2, es para los 5 V que necesita el relé para activarse. La bornera J1, es para colocar los 24 V para encender las válvulas. Por último, la bornera J4 está conectada a las válvulas. Por último y para proteger a las válvulas se coloca un fusible de 0.25 A.

Resumiendo, las dos placas contienen los siguientes componentes:

- 1 Optoacoplador 4n25, U1
- 1 resistencia de 220Ω , R1
- 1 resistencia de $1K\Omega$, R2
- 1 resistencia de $10K\Omega$, R3
- 1 transistor TIP122, Q1
- 1 Diodo 1n4007, D1
- 1 Relé de 5 V , RL1

- 5 Borneras de 2 pines, J1, J2, J3, J4
- Fusible de 0.25 A, FU1

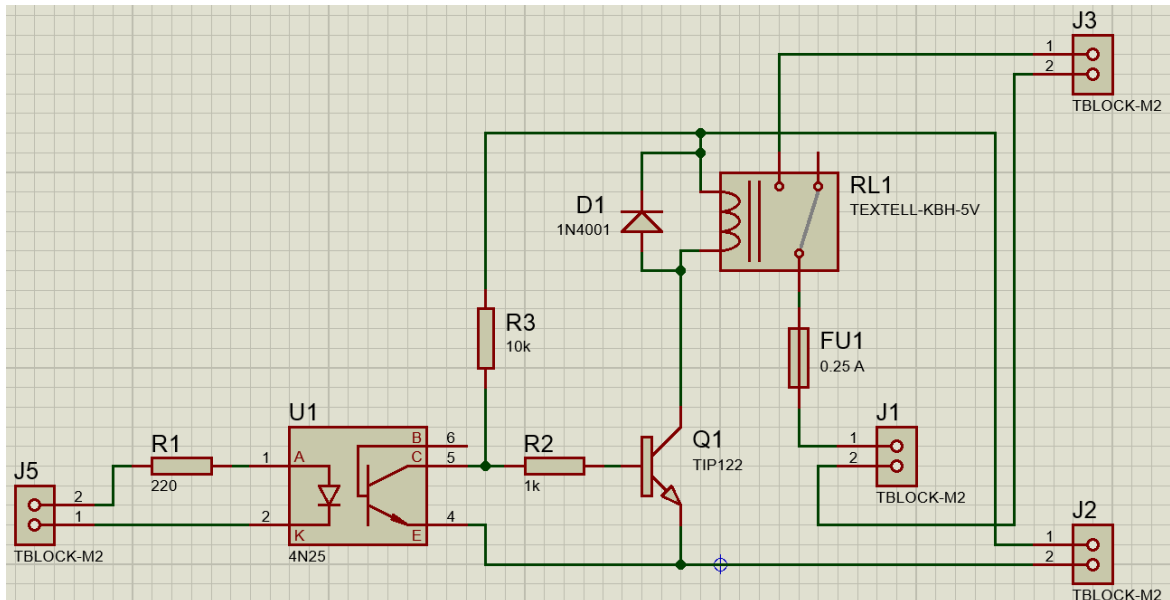


Figura 15.- Diseño del circuito para el control de las válvulas

En la Figura 16, se muestra el circuito de la tarjeta de control de las válvulas en 3D, también diseñado en Proteus.

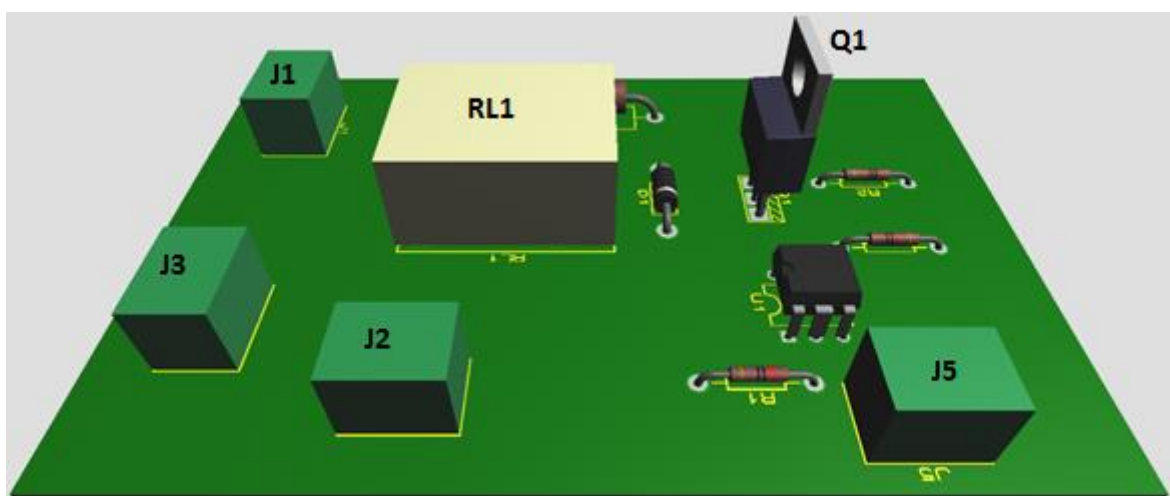


Figura 16.- Diseño del PCB en 3D del circuito para el control de las válvulas.

3.1.2 Adaptación de los sensores de temperatura a los NI USB-6009

En esta etapa se utilizaron cuatro sensores de temperatura, dos por cámara, como se muestra en la Figura 1 y se explica en la sección de Antecedentes del Capítulo 1. Debido a que los sensores de temperatura utilizados son dispositivos con una impedancia de salida muy pequeña y los NI USB-6009 poseen una impedancia de entrada considerablemente alta, de aproximadamente $127\text{K}\Omega$ (National Instruments, 2012), se colocó un seguidor de voltaje a la salida de los sensores para adaptar los sensores de temperatura a las entradas del NI USB-6009. Estos seguidores de voltajes se diseñaron con dos dispositivos electrónicos, LM358, que poseen dos amplificadores operacionales por dispositivo, por lo que se puede utilizar dos sensores por dispositivo. En la Figura 17, se muestra el diagrama de conexión de los pines del LM358 (Texas Instruments, 2013).

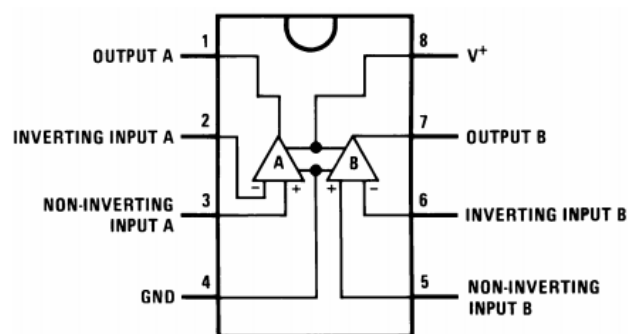


Figura 17.- Diagrama de conexión del LM358

En la Figura 18 se observa el circuito diseñado de los seguidores de voltaje para los sensores de temperatura. Los amplificadores operacionales U1:A y U1:B

corresponden al primer dispositivo y los otros dos, corresponden al segundo. Las borneras de cuatro pines, J1, J2, J3 y J4, se conectan de tal manera que el primer pin transporta 5V para alimentar el sensor, el segundo pin es la entrada hacia el seguidor, el tercero es la referencia tanto del sensor como de la alimentación del opam, y por último el cuarto pin es la salida del seguidor, que está conectado hacia una entrada analógica el NI USB-6009.

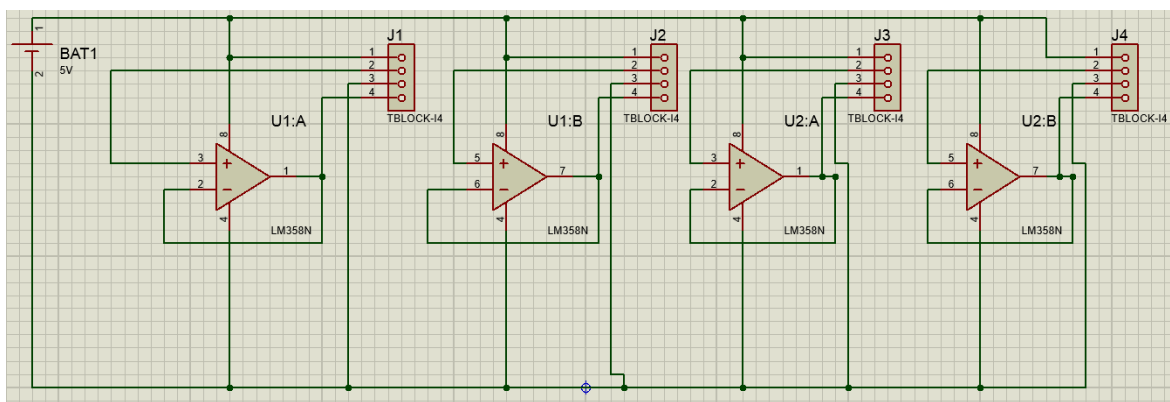


Figura 18.- Circuito diseñado para el seguidor de voltaje para los sensores de temperatura.

En la Figura 19, se muestra el circuito en 3D de los seguidores de voltaje para los sensores de temperatura.

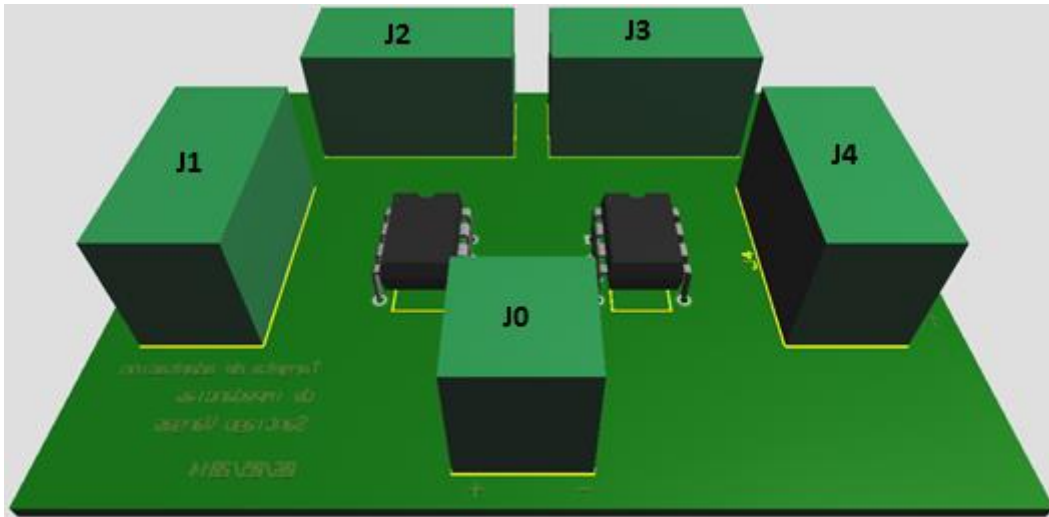


Figura 19.- Circuito de los seguidores de voltaje para los sensores de temperatura.

3.1.3 Circuito para el Control de Temperatura

El control de temperatura se realizó con un modelo de transferencia de calor simple, que no fue probado con el funcionamiento de las cámaras y no necesariamente se ajusta a su física. Esto se debe a que existe un desfase de tiempo entre el avance de los experimentos de campo con el USFQ-MOPS y el desarrollo de sus controles electrónicos. Sin embargo, se llevó a cabo el control de temperatura descrito a continuación, como una aproximación preliminar, mientras se completa el resto de componentes y diseño de experimentos con el sensor USFQ-MOPS.

El modelo es encontrado con la ecuación de la cantidad de calor (Petrucci, Harwood, & Herring, 2002) de la ecuación 13

$$q = cm\Delta T \quad (13)$$

Donde q es la cantidad de energía en forma de calor (J), c el calor específico del aire (J/(Kg·°C)), m es la masa del aire (Kg) y ΔT es la variación de temperatura (°C) del sistema.

Para encontrar la variación de potencia (ΔP), la ecuación 13 se divide por el tiempo (t) y a la masa se descompone en densidad (ρ) por volumen (V) de la siguiente forma:

$$\Delta P = \frac{mc\Delta T}{t} = \frac{\rho Vc\Delta T}{t} \quad (14)$$

Por último, el caudal (Q) es volumen sobre tiempo con lo reemplazando en la ecuación 14 se tiene

$$\Delta P = Q\rho c\Delta T \quad (15)$$

Donde ΔP es la variación de potencia (W), Q es el caudal (m³/s), ρ es la densidad (Kg/m³), c es el calor específico (J/(Kg °C)) y ΔT es el incremento de temperatura del sistema (°C).

Para la medición de la temperatura de las cámaras de referencia y muestreo se realiza mediante dos sensores de temperatura, como se observa en la Figura 1. El calentamiento del aire que entra por las cámaras, se logra gracias a las mallas de níquel se calientan con un voltaje de 24 V. La señal de control que entra hacia la tarjeta de control es una señal PWM. Para este diseño se toma en cuenta que el NI USB-6009 solo tiene un voltaje máximo de 5 V para sus salidas analógicas y digitales. De la misma forma que en la programación de las tarjetas de control de

las válvulas, se aíslan las conexiones a tierra, para proteger el NI USB-6009 de sobre corriente, al momento de aplicar un voltaje de 24 V a las mallas de níquel.

En la Figura 20 se puede observar el circuito diseñado para el control de temperatura, este circuito posee una resistencia, R1, de 220 Ω para la polarización de la luz led del optoacoplador, una resistencia R3 de 10K Ω que se emplea en la polarización del transistor a la salida del optoacoplador. El transistor Q1, TIP122 se escogió por la ganancia en corriente que posee de $\beta = 100$, y funciona en corte y saturación (switch electrónico). Esta es la razón de utilizar una resistencia R2 de 1K Ω para disminuir la corriente de la base. Por último, para facilitar la conexión de tarjeta de control y los pines del NI USB-6009 se colocan borneras de dos pines. La bornera J2, es para la entrada de señal PWM proveniente del NI USB-6009. La bornera J3, es para permitir el paso de los 24 V para que puedan calentarse. La bornera J1, es para colocar los 24 V para activar las válvulas.

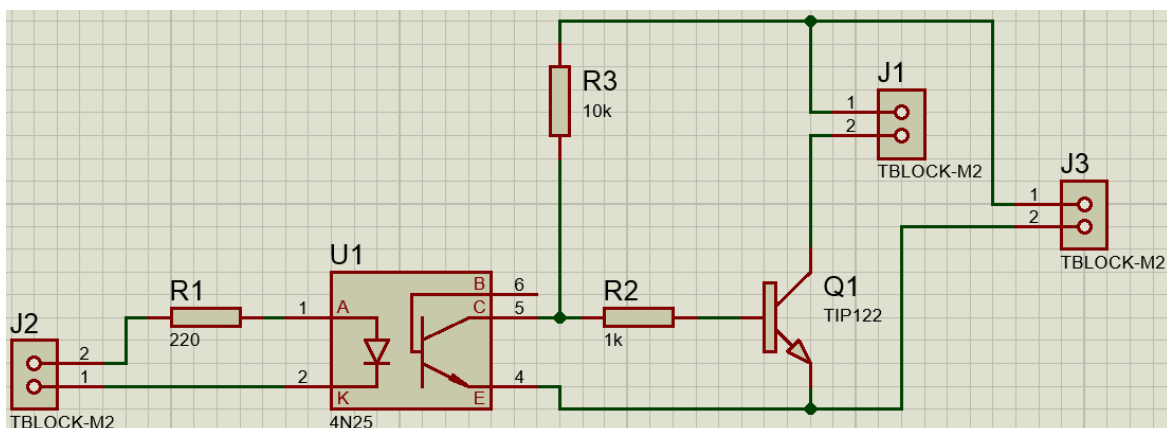


Figura 20.- Circuito diseñado para el control de temperatura de las cámaras de referencia y muestreo

Las cuatro placas contienen los siguientes componentes:

- 1 Optoacoplador 4n25, U1

- 1 resistencia de 220 Ω , R1
- 1 resistencia de 1K Ω , R2
- 1 resistencia de 10K Ω , R3
- 1 transistor TIP122, Q1
- 2 Borneras de 2 pines, J1, J2, J3

En la Figura 21, se muestra el circuito de la tarjeta de control de temperatura en 3D.

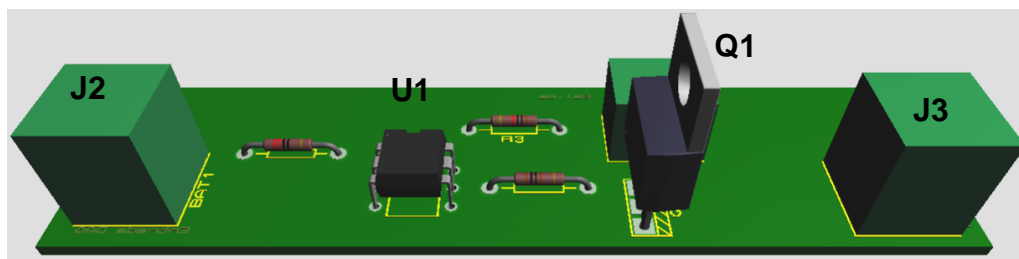


Figura 21.- Diseño del PCB en 3D del circuito para el control de temperatura de las cámaras.

3.2 Desarrollo del Software

En esta sección se detalla el desarrollo del software que corresponde a la programación de los componentes descritos en la sección de Antecedentes. Todo el software está programado en LabVIEW, al igual que el SCADA. Primero, se empieza con la programación de la adquisición de todos los datos del analizador de ozono 49i, para así seguir con el software que identifique las señales de control tanto de las válvulas como del control de temperatura para las cámaras. Posteriormente, el control y la adquisición de los datos de los controladores

másicos de flujo y finalmente la programación del SCADA y la publicación de la página web.

3.2.1 Adquisición de las señales del Analizador de Ozono

La adquisición de los datos se realiza mediante el uso de dos módulos NI USB-6009 hacia un computador. La programación empieza con la verificación de los drivers del NI USB-6009. Esto se verifica con la herramienta de LabVIEW, *National Instruments Measurement & Automation Explorer*. En la ventana principal se hace clic en el botón *Self-Test*, y si el driver del NI USB-6009 se encuentra funcionando de manera correcta, una ventana dirá que el driver está instalado correctamente, como se observa en la Figura 22.

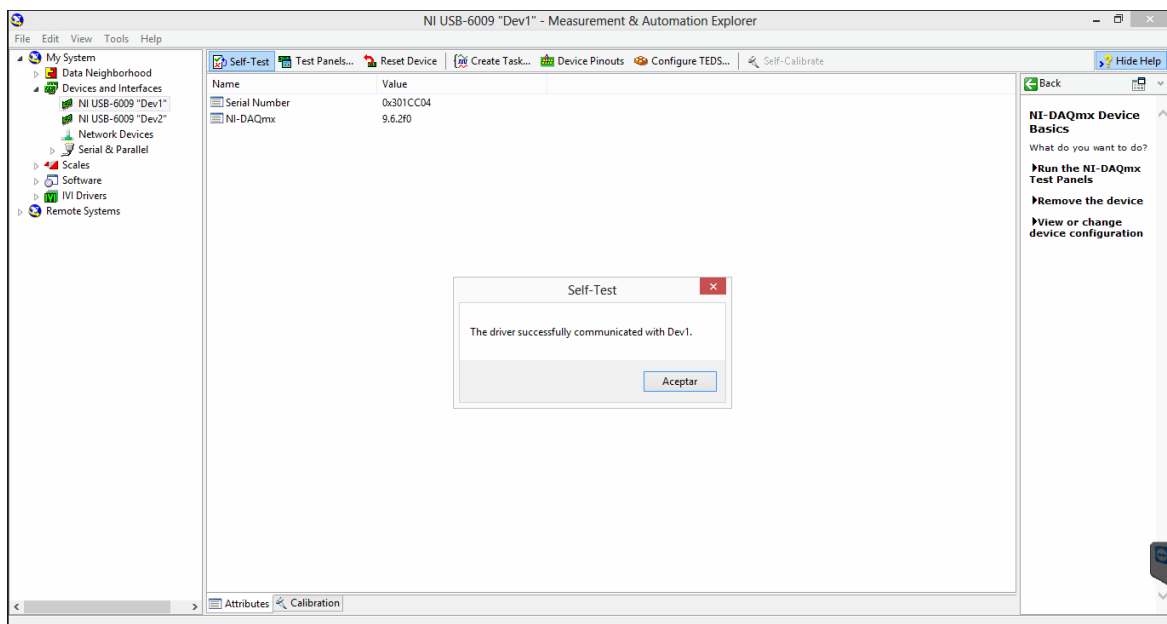


Figura 22.- Verificación del driver del NI USB-6009.

Para empezar la programación para la adquisición de las señales, en un archivo en blanco VI (Virtual Instrument) de LabVIEW, se despliega el *pallette* de funciones. En la opción *input*, se selecciona el *DAQ Assistant*, como se observa en la Figura 23. Posteriormente, se configura seis entradas analógicas del NI USB-6009, que son para las seis salidas del analizador de ozono.

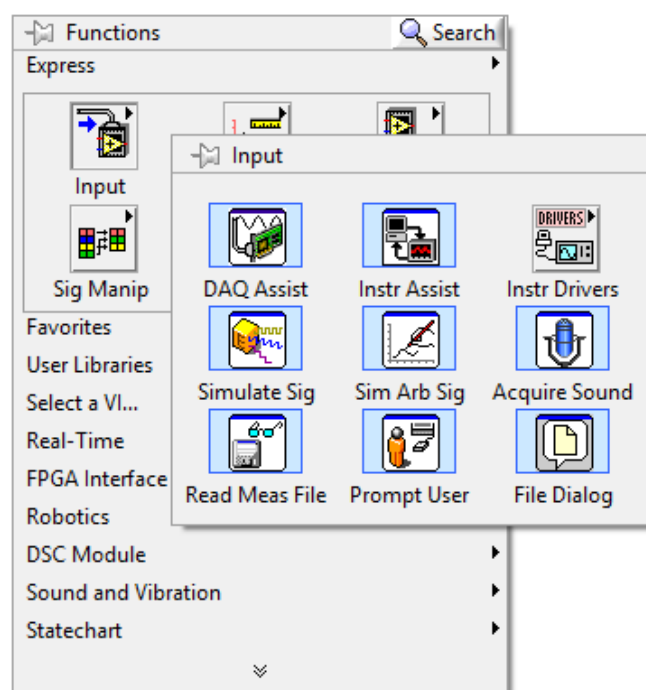


Figura 23.- *DAQ Assistant* para configuración de los datos de entrada del Analizador de Ozono 49i.

Las dos primeras salidas del analizador de ozono son Low O3 y High O3 que son medidas del ozono en partículas por mil millones (ppb). Las salidas tres y cuatro son Flow A y Flow B, como se observa en la Figura 2 estos son el flujo de aire que atraviesan las celdas de aire ambiente y aire filtrado. Las salidas cinco y seis son Intensisty A e Intensisty B son las intensidades medidas por los fotodiodos a las salidas de las celdas que posee el analizador de ozono (Figura 2).

Al momento de seleccionar el *DAQ Assistant*, se escoge la opción adquirir señal y señal analógica. Después, se eligen seis pines de las entradas analógicas del NI USB-6009 que son las AI0 hasta la AI5, y para la facilidad de manejo se puede cambiar de nombre a cada una de las entradas en la ventana de configuración. Todas las entradas tienen la misma referencia, con lo que en *Terminal Configuration* se coloca *RSE* (Reference Single-Ended) para poder aprovechar todas las entradas del NI USB-6009. RSE se refiere a que todas las entradas se miden a la misma referencia. El máximo voltaje configurado para las salidas del analizador de ozono es de 10 V, por lo que en el *DAQ Assistant* se coloca un rango de voltaje mínimo -1 y máximo 10 para todas las seis entradas. Finalmente, en la parte de *Acquisition Mode* cambiar a *1 Sample (On Demand)* que quiere decir que el NI USB-6009 adquiere repetitivamente las señales hasta que el usuario detenga el programa. La Tabla 1 muestra la distribución de los pines de salida del analizador con los pines de entrada del NI USB-6009

Tabla 1.- Distribución los pines del analizador de ozono al NI USB-6009.

		Pines Correspondientes al Analizador	Pines NI USB-6009
Señales de salida del Analizador de Ozono	High O3	1	AI 0
	Low O3	3	AI 1
	Flow A	5	AI 2
	Flow B	7	AI 3
	Intensity A	9	AI 4
	Intensity B	11	AI 5
	GND	2	GND

La Figura 24 muestra la configuración del *DAQ Assistant*.

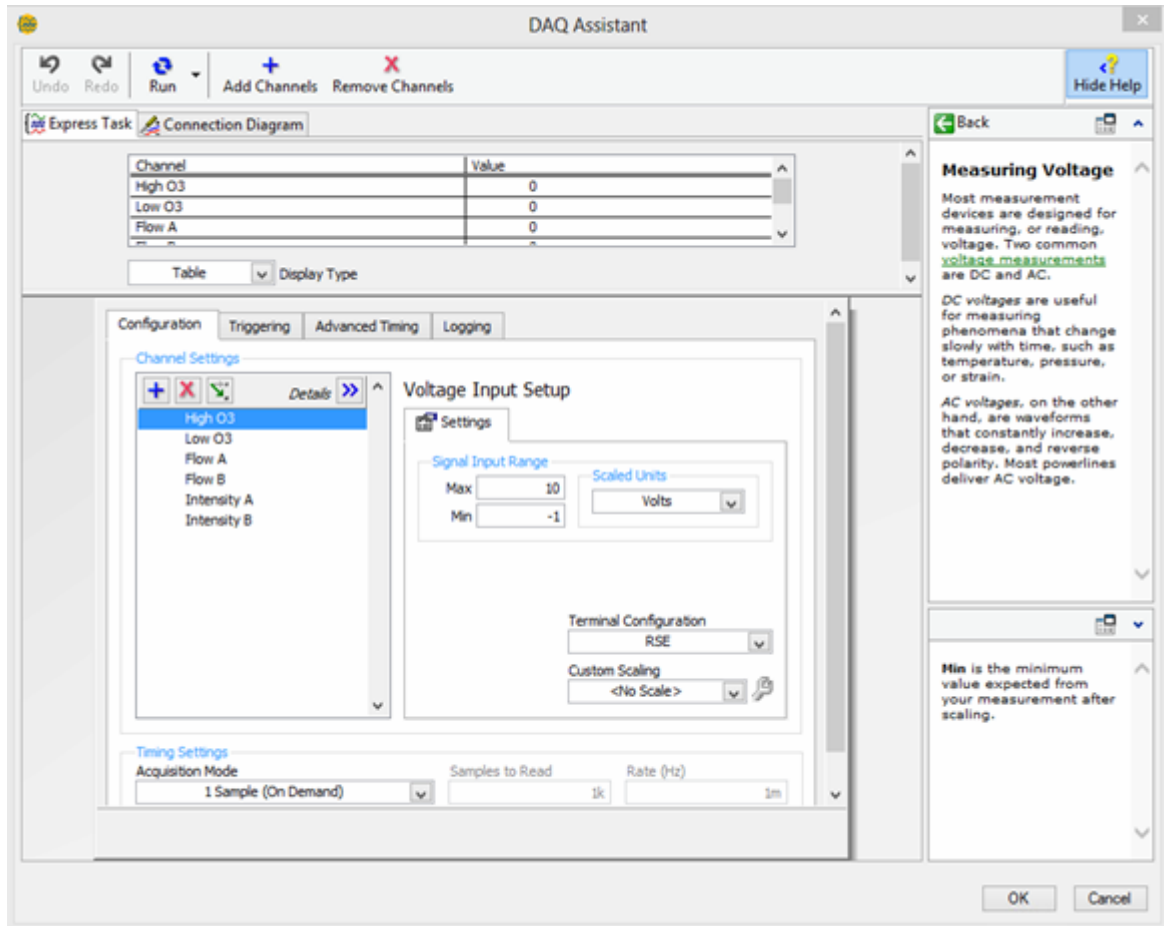


Figura 24.- Configuración de las seis entradas del DAQ.

La Figura 25 muestra el bloque del *DAQ Assistant* configurado, con un *Split Signal* para separar las señales y trabajar con las seis señales por separado, como se observa en la Figura 25, debido a que los seis datos llegan por un solo canal. Para poder adquirir las señales de manera continua, se coloca el *DAQ Assistant* dentro de un lazo *while*.

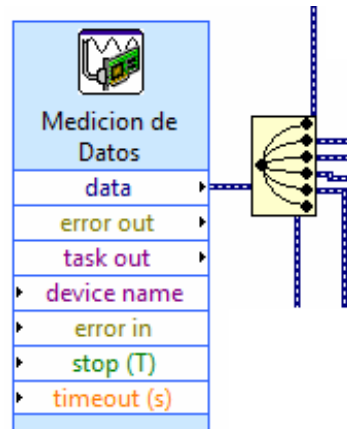


Figura 25.- DAQ Assistant configurado y con *Split Signal* para trabajar por separado las seis señales.

Debido a que las señales adquiridas del analizador de ozono son continuas en el tiempo, se configuran para que sean guardadas en un archivo tipo texto con un tiempo de muestreo de 1 segundo.

A fin de configurar el archivo de texto, en Block Diagram de LabVIEW, se escoge el bloque *Write to Measurement File* que se encuentra en *Function Palette, Programming, File I/O*, como se observa en la Figura 26.

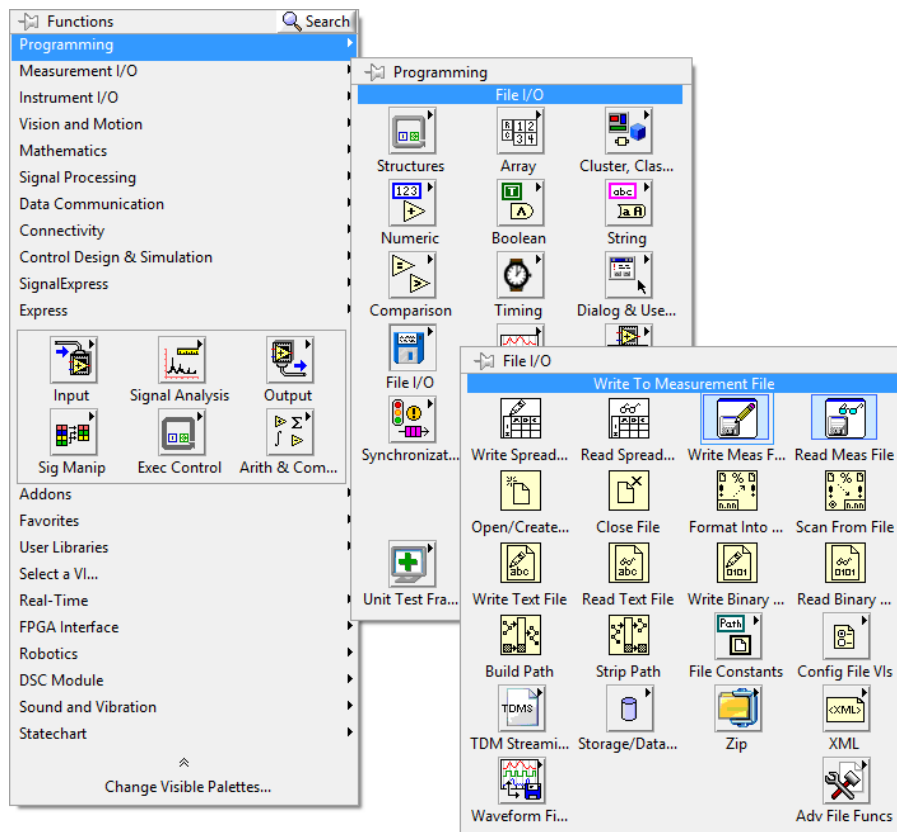


Figura 26.- Ubicación del *Write Measurement File*.

La Figura 27 muestra la configuración del archivo texto para los datos de las señales se graben en tiempo real y el archivo tenga un tamaño específico. Primero, se coloca el nombre del archivo en la sección *Filename*, después en la sección *Action*, se escoge *Save to series of files* para luego ser configurado. También en la sección *File Format*, se marca la opción *Text (LVM)*, para que estos datos sean grabados en archivos tipo texto. Posteriormente, en *Segments Headers*, se seleccionó *No headers*, esto para facilidad de procesamiento de los datos por parte de los usuarios. En la sección *X Value (Time) Columns*, se coloca *Empty time column*. Por último, en *Delimiter*, se selecciona *Tabulator*, para que los datos sean separados por un espacio. El tamaño de los archivos de texto es de 1000 Kbytes,

por lo que cada vez que se llena uno, se crea otro con un nombre secuencial que empieza desde el número uno.

Figura 27.- Configuración del archivo texto para los datos adquiridos.

Luego de configurar la creación del archivo de texto, debajo de la sección *Save to series of files (multiple files)*, se hace clic en *Settings*. La ventana siguiente se utiliza para la configuración de la creación secuencial de los archivos. En la sección *Filename Suffix*, se escoge la opción *Sequential numbers* para que el primer archivo empiece con el número uno. Posteriormente en la sección *Existing Files*, se selecciona la opción *Use next available filename*, para que los datos se guarden en diferentes archivos. Finalmente, en la sección de *File Termination*, se selecciona

When file size exceeds limit y se coloca el tamaño del archivo de texto, como se explicó anteriormente. En la Figura 28, se muestra la configuración para la creación de los archivos de texto.

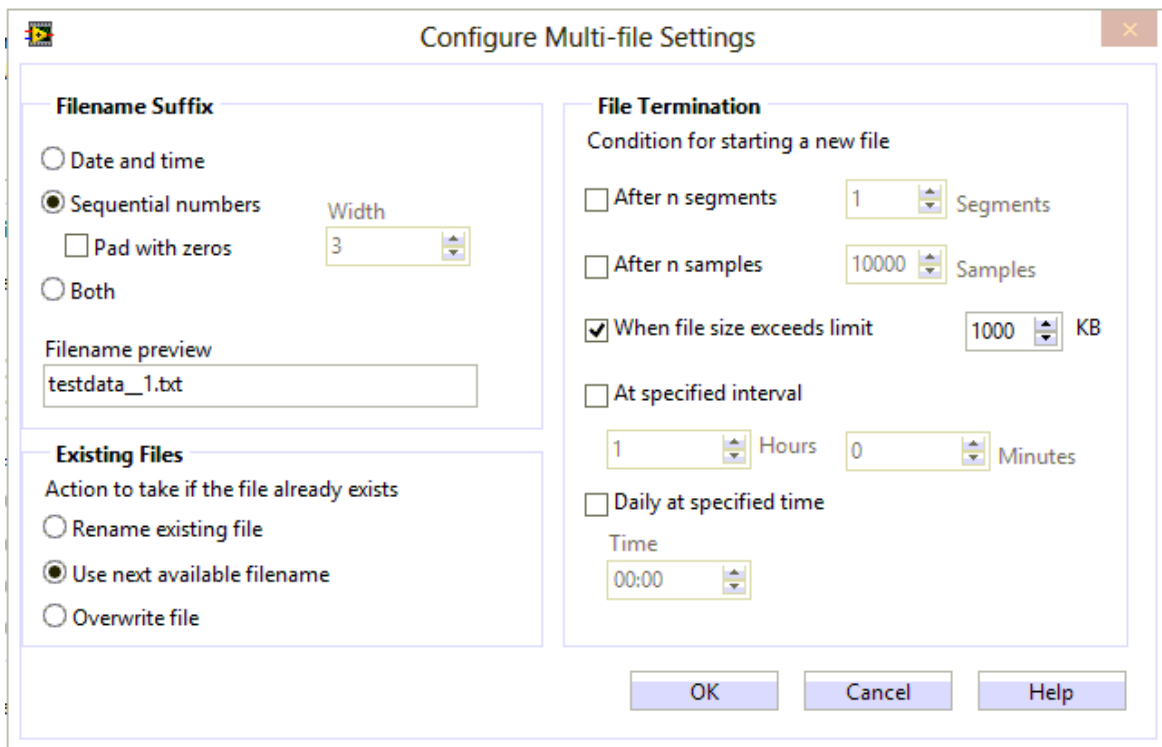


Figura 28.- Configuración de los archivos de texto.

En la Figura 29, se muestra el bloque configurado en la ventana *Block Diagram*, con los siguiente bloques: la hora y fecha se coloca mediante el bloque *Get Date/Time in seconds* seguido de un bloque para configurar el formato en día, mes, año, hora, minuto y segundos conectados a la sección *Comment*, en *Enable* se coloca un botón para que cuando este encendido empiece a grabar el archivo texto de los datos. Finalmente en *Filename Data*, se coloca un indicador para observar en el nombre y la ubicación del archivo que se está grabando.

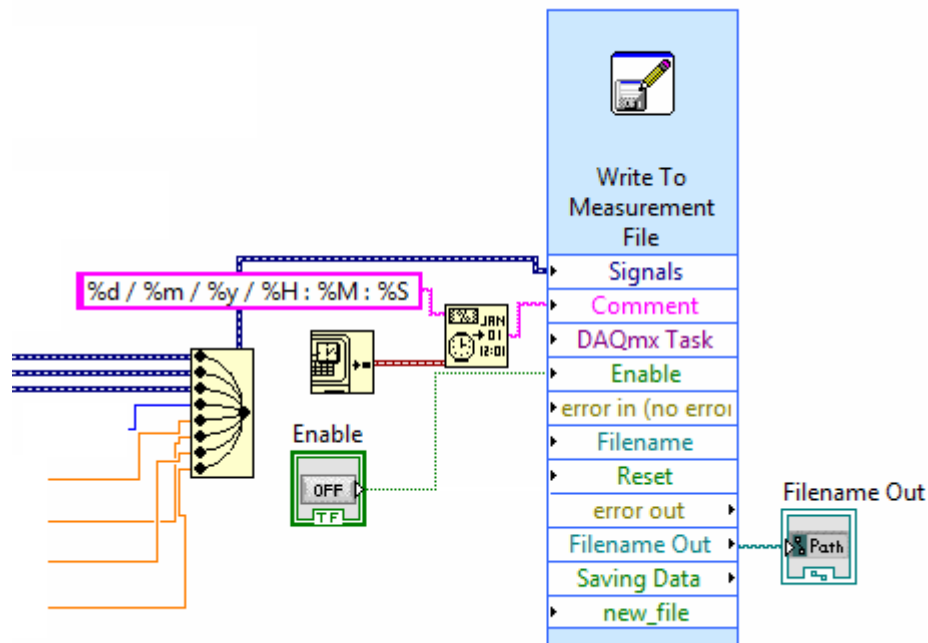


Figura 29.- Configuración del archivo texto.

3.2.2 Software para el control de las válvulas

A fin de controlar las válvulas, se programó una secuencia que configura el encendido y apagado de las mismas, durante un cierto tiempo seleccionado por el usuario, de tal manera que el analizador de ozono muestrea el aire de las tres entradas (aire ambiente, cámara de muestreo y cámara de referencia) por tiempos iguales. En la Figura 1, la secuencia del funcionamiento de las válvulas es la siguiente: primero, ingresa el aire del ambiente, posteriormente el aire de la cámara de muestreo y por último el aire de la cámara de referencia.

Para el control de las válvulas 3/2, se utiliza sus estados normalmente abierto y normalmente cerrado para manipular correctamente la secuencia de las tres entradas de aire hacia el analizador de ozono. De acuerdo a la secuencia de la Figura 1, la válvula 1 en su posición normalmente abierta deja pasar el flujo del aire

del ambiente hacia el analizador de ozono. Cuando se activa la válvula 1, la válvula 2 está en su posición normalmente cerrada, por lo que podrá dejar pasar el flujo del aire de la cámara de referencia hacia el analizador de ozono. Finalmente, cuando la válvula 1 y la válvula 2 están activadas, dejan pasar el flujo de aire al analizador de ozono de la cámara de muestreo.

En la Tabla 2, se muestran los valores secuenciales de las válvulas, donde 1 significa encendido y 0 es apagado.

Tabla 2.- Código Binario para el control de las válvulas

Válvula 1	Válvula 2	Entrada para ser analizada
0	0	Aire del Ambiente
1	0	Cámara de Referencia
1	1	Cámara de Muestreo

La programación del control en LabVIEW empieza igual que el utilizado en la sección 3.2.1; es decir, verificando que el NI USB-6009 funciona correctamente. Se selecciona un bloque *DAQ Assistant* y se lo arrastra hacia la ventana *Block Diagram*. Luego se selecciona la opción generar señal, y digital, por último, se seleccionan los puertos P0.0 y P0.1.

Posteriormente, en la ventana de DAQ Assistant. En *Generation Mode* se cambia a la opción *1 sample (On Demand)*, la cual nos permitirá enviar una muestra cada cierto intervalo de tiempo hasta que el usuario detenga el proceso. Para facilidad

de programación en *Channel Settings* se cambian los nombres de los puertos. En la Figura 30, se muestra la ventana del *DAQ Assistant* configurada.

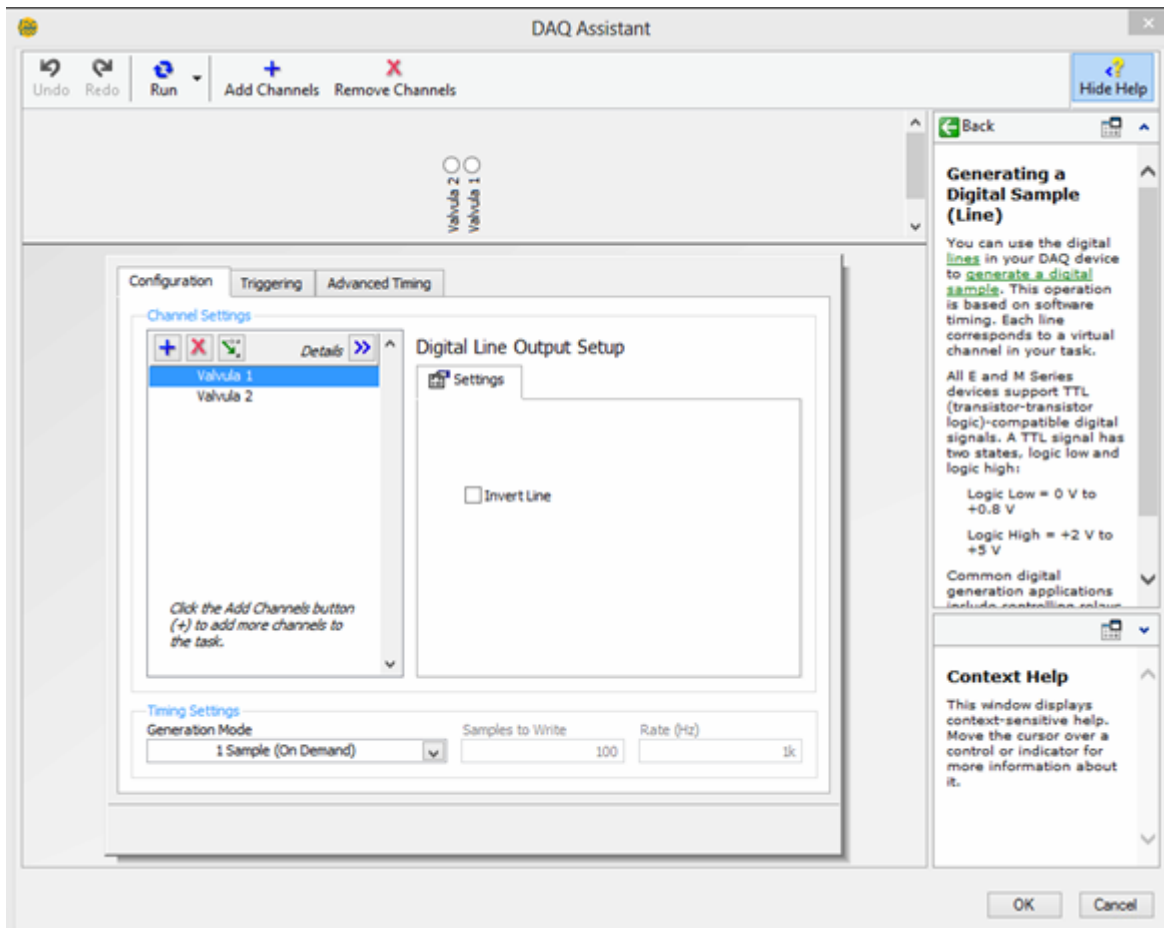


Figura 30.- Configuración de las Salidas Digitales para el control de las válvulas del NI USB-6009.

Una vez configurado el *DAQ Assistant* con las salidas digitales para el control de las válvulas, se debe programar la secuencia de Tabla 2. Para enviar los números binarios 0 y 1, se utilizaron variables booleanas, falso y verdadero respectivamente. De igual manera que en el método seguido para la adquisición de datos, para configurar el control de las válvulas se debe enviar una sola señal hacia el DAQ Assistant uniendo las dos señales de las dos válvulas. Esto se logra con un bloque *Merge Signal* con las dos señales de entrada. Consecuentemente,

la salida es conectada al *DAQ Assistant*. A fin de que las señales puedan combinarse, se debe convertir de *Array* a *Dynamic Data Type* (línea azul) y, posteriormente, para que las señales sean transmitidas al NI USB-6009 se debe convertir de *Dynamic Data* a un *Array* (línea verde). Este procedimiento se ilustra en la Figura 31.

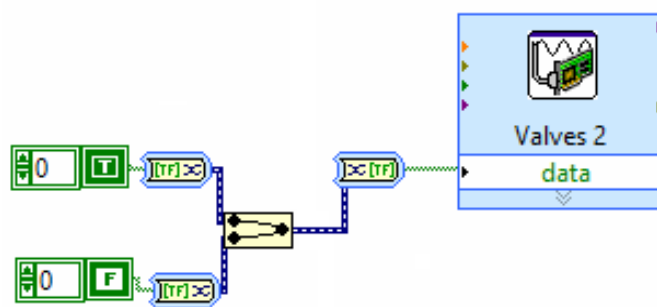


Figura 31.- DAQ Assistant configurado y con Merge Signal para enviar las dos señales.

3.2.3 Programación de los Controladores de Flujo

Los controladores de flujo másico utilizados en este proyecto, son de la marca Dakota Instruments. Como se observa en la Figura 1, se utilizan dos controladores al final de las cámaras. El primer controlador, se ubica al final del convertidor de NO_2 que está conectado a la cámara de muestreo. Este controlador posee un rango de control de flujo de 0 a 10 L/min. El segundo controlador, se encuentra conectado al final del convertidor de NO_2 que está conectado a la cámara de referencia. El controlador posee un rango de control de 0 a 5 L/min. Los dos controladores, además de controlar los flujos, pueden medir la cantidad de flujo de aire real que atraviesa por cada uno.

Los controladores necesitan de un voltaje analógico tanto para la medición como para el control. Para la medición, se programa de igual manera que en la sección 3.2.1 de la adquisición de datos, con la diferencia de que se debe utilizar el segundo NI USB-6009. Entonces, en la ventana *Block Diagram* con los bloques antes programados, se escoge un bloque de *DAQ Assistant* en el *Functions Palette*, *input* y se lo arrastra hacia la ventana. Se escoge la opción de *Dev 2*, para configurar el segundo NI USB-6009. Luego, se selecciona adquirir señal, señal analógica y los dos puertos AI 0 y AI1. En la ventana del *DAQ Assistant*, en la sección *Settings*, primero se coloca un voltaje máximo de 10 V y un mínimo de -1, después en *Terminal Configuration*, se escoge *Diferencial* para las dos entradas porque poseen diferentes referencias. Luego, se selecciona la opción 1 *Sample (On Demand)* en *Acquisition Mode*. Por último para facilidad de programación se cambian los nombres. En la Figura 32, se muestra la ventana del *DAQ Assistant* configurada para los controladores de flujo másico.

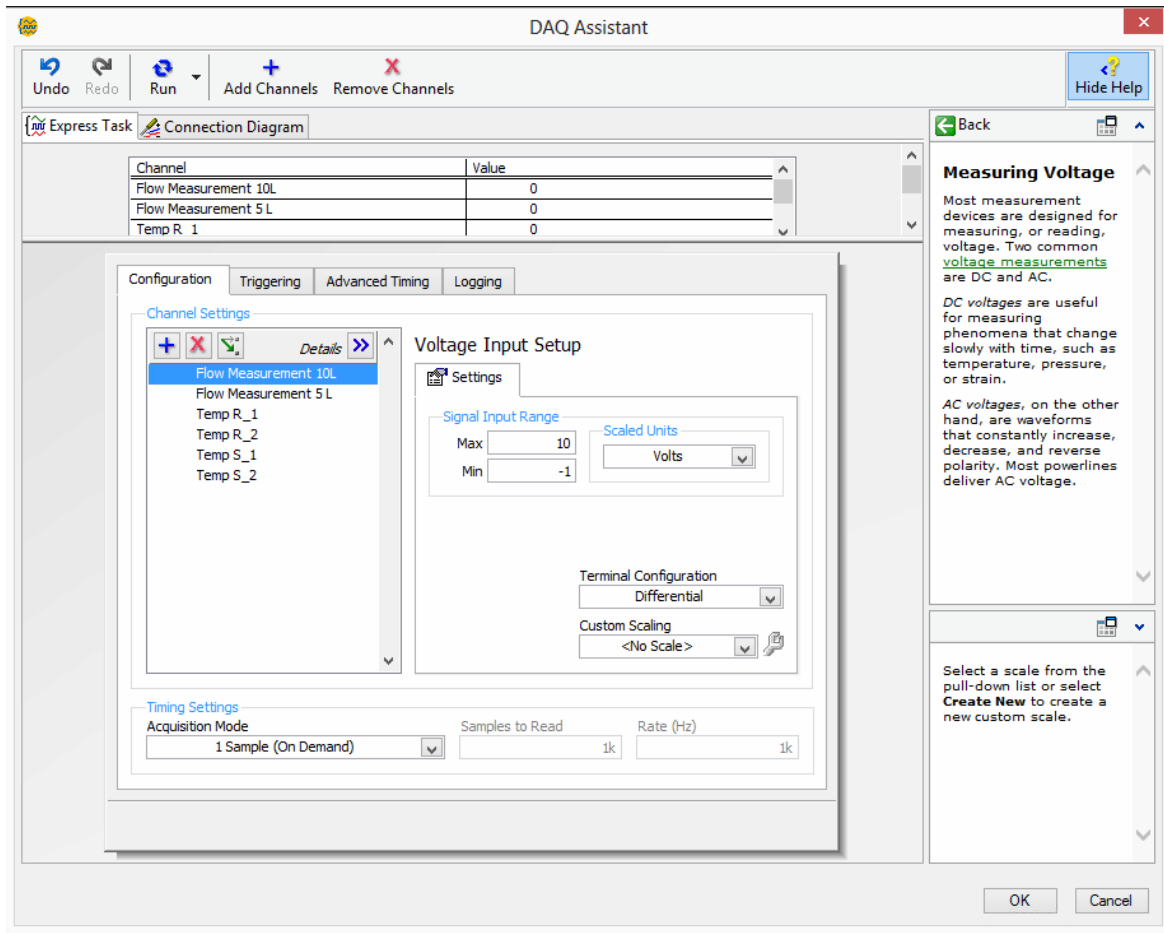


Figura 32.- Configuración del *DAQ Assistant* para la adquisición de las señales de los controladores.

El segundo controlador (rango de 0 a 5 L/min) posee una relación lineal entre el voltaje y el flujo adquirido, este factor es por 1 L/min se obtiene 1V. Debido a que el primer controlador posee un rango de 0 a 10 L/min, las señales de adquiridas desde el controlador tienen un voltaje máximo de 5 V, se debe multiplicar a esa señal por un factor de 2 para que se pueda observar el factor real de ese controlador. En la Figura 33, se observa el bloque del *DAQ Assistant*.

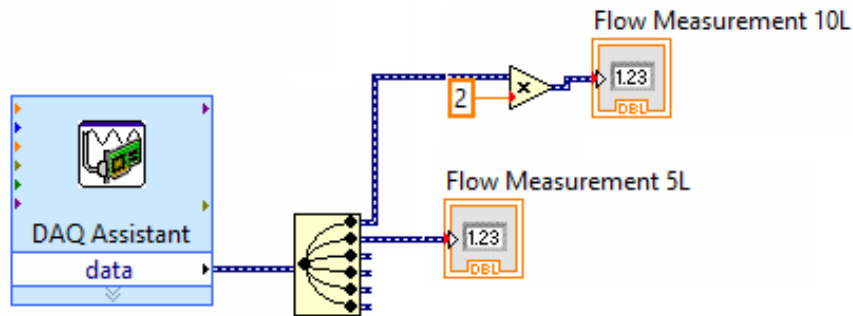


Figura 33.- DAQ Assistant configurado y con *Split Signal* para trabajar por separado las dos señales.

Como se explicó anteriormente, también se debe configurar las señales de control para el control de flujo de aire. Primero, se debe escoger el bloque *DAQ Assistant*, para configurar el primer NI USB-6009 y al igual que el control de las válvulas, se debe escoger generar señal pero en este caso, se escoge señal analógica del *Dev 1*. Después, se escogen los dos puertos AO0 y AO1. En la ventana del *DAQ Assistant*, en la sección de *Settings*, se coloca un voltaje máximo de 5V y un voltaje mínimo de 0V. En *Terminal Configuration*, se coloca RSE. En *Generation Mode*, se coloca la opción *1 Sample (On Demand)*. Y por último, se cambia los nombres para mayor facilidad de programación, en la sección *Channel Settings*. La Figura 34 muestra la configuración del *DAQ Assistant* para enviar las señales analógicas hasta los controladores de flujo.

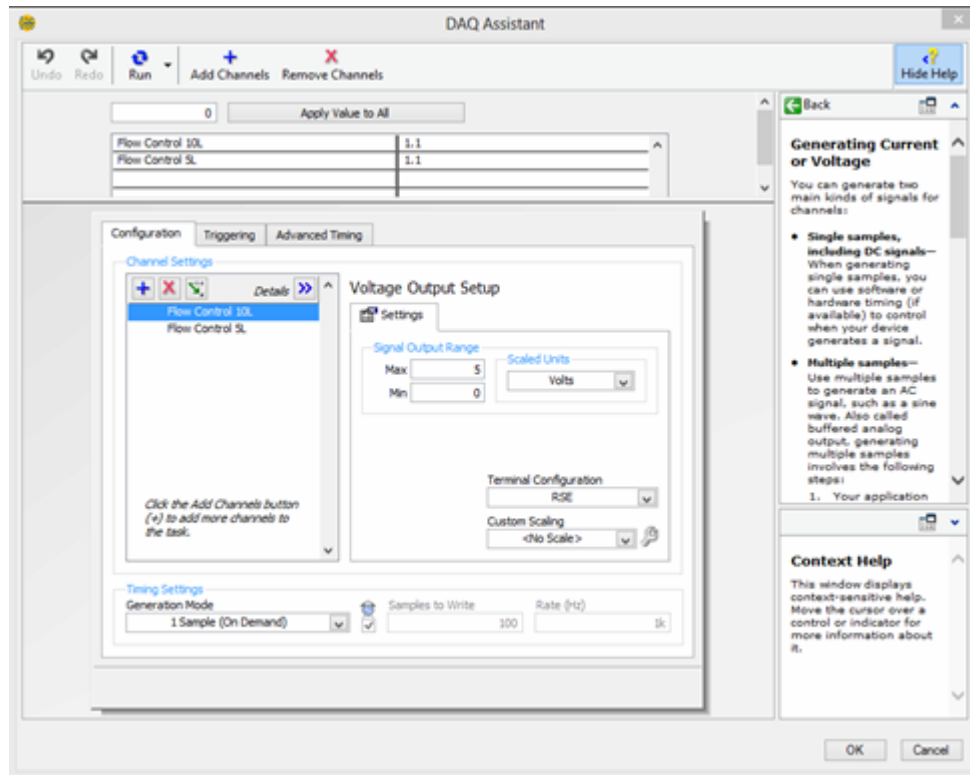


Figura 34.- Configuración del *DAQ Assistant* para la generación de las señales analógicas de los controladores de flujo de aire.

De igual manera que en la adquisición de los datos, al controlador del rango de 0 a 10 L/min, al valor enviado se debe dividir con un factor de 2 para general el flujo deseado por el usuario. En la Figura 35, muestra el bloque programado del *DAQ Assistant* en la ventana *Block Diagram*.

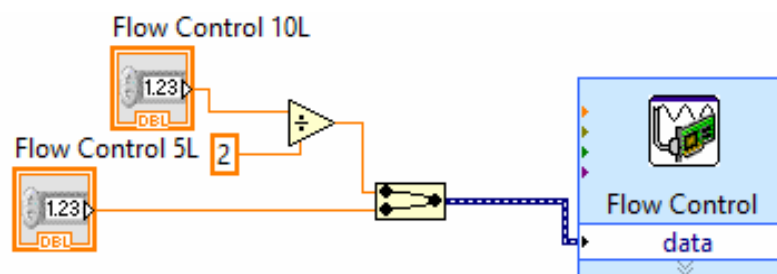


Figura 35.- *DAQ Assistant* configurado y con *Merge Signal* para enviar por igual las dos señales.

3.2.4 Programación del Control de Temperatura

Para aplicar la ecuación (9) a las cámaras de referencia y muestreo, se toma en cuenta los valores de calor específico y densidad del aire que entra por las cámaras. La densidad del aire a 26 °C es $\rho = 1.16 \text{ Kg/m}^3$ (Atkins & Jones, 2005) y el calor específico es $c = 1000 \text{ J/(Kg } ^\circ\text{C)}$ (Serway & Faughm, 2001). Se utilizan estos valores como constantes, despreciando las condiciones de altura, de humedad y de presión de la ciudad de Quito, Ecuador. Estas variaciones son mínimas y no afectarán los cálculos para encontrar las constantes del controlador.

El modelo matemático del sensor USFQ-MOPS toma en cuenta dos ecuaciones diferentes, esto se debe a los dos flujos máximos de 5 L/min y 10 L/min que pueden atravesar por las cámaras. Despejando en la ecuación 15 de la sección 3.1.3, la ecuación 16 muestra la función de transferencia utilizada

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{1}{Q\rho c} \quad (16)$$

Tomando en cuenta que para camara5 es el caudal (Q) de 5 L/min ($8.335 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$), para camara10 es un caudal (Q) de 10 L/min ($1.667 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$) y multiplicadas por las constantes encontradas anteriormente. Se calculó las funciones de transferencia en las ecuaciones 17 y 18

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{1}{\text{camara5}} = \frac{1}{1.16 \times 1000 \times 8.335 \times 10^{-5}} = \frac{1}{0.0967} \quad (17)$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{1}{\text{camara10}} = \frac{1}{1.16 \times 1000 \times 1.667 \times 10^{-4}} = \frac{1}{0.1933} \quad (18)$$

Como se observa en las ecuaciones 17 y 18, las funciones de transferencia son lineales. Poseen un factor aproximado de 10 y 5 respectivamente, es decir, si

se aplica a la ecuación 17, una diferencia de potencia de 1 W, la temperatura variará en 10 °C. Lo mismo con la ecuación 12, solo que variará en 5 °C.

Para encontrar las constantes del controlador PID se utiliza el programa *MATLAB R2013a* (MathWorks, 2013), y su herramienta *Simulink*, la cual utiliza diagrama de bloques para la simulación de modelos de sistemas. Para entrar a la herramienta *Simulink*, en la ventana principal de *MATLAB*, en la sección *Command Window* se escribe *Simulink* (Figura 36 a) y aparece la ventana de *Simulink Library Browser* (Figura 36 b). Es esta ventana se realiza clic en *File*, *New*, y finalmente en *Model*. De esta manera aparece la ventana en blanco de la Figura 36 c.

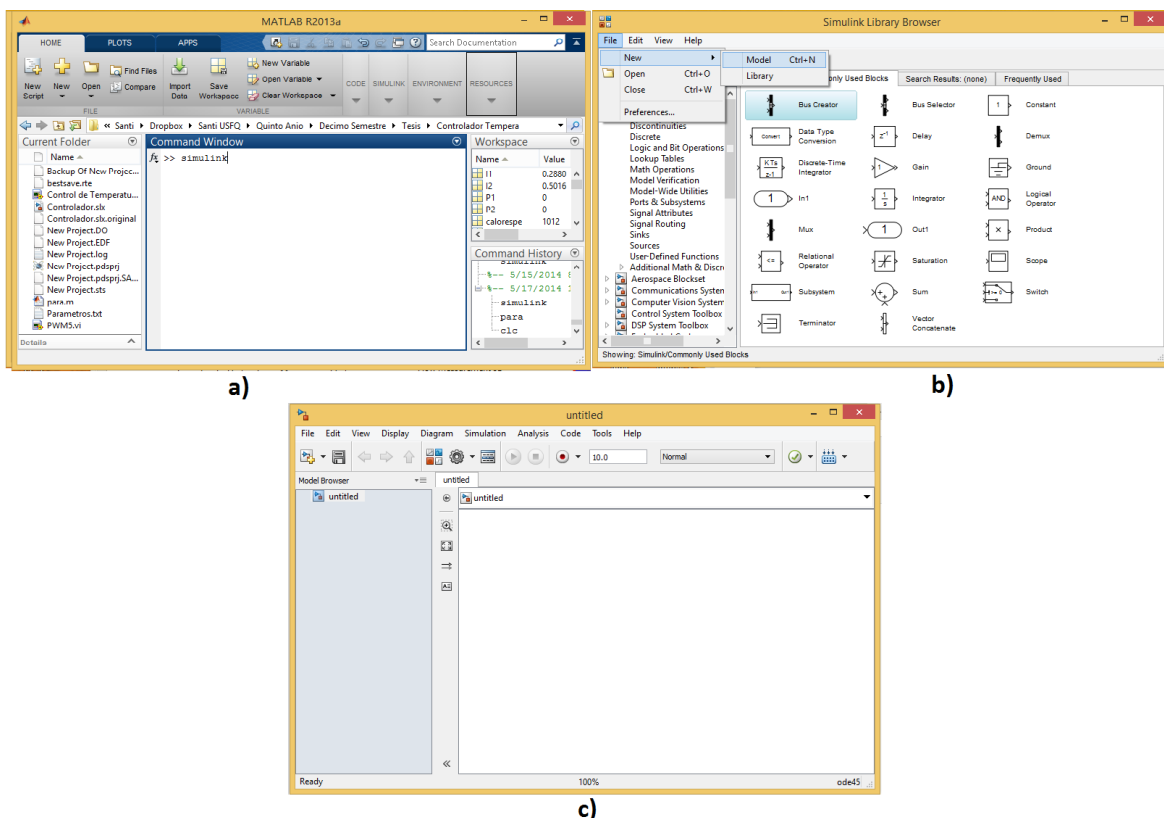


Figura 36.- Secuencia para entrar a *Simulink*.

Para simular el modelo, primero se debe colocar el bloque de *Transfer Function*. Este bloque se encuentra en la ventana *Simulink Library Browser*, en la sección de *Libraries*, se selecciona *Simulink*, posteriormente en *Continuous*, y finalmente a la derecha se escoge el bloque *Transfer Fcn*, como muestra la Figura 37.

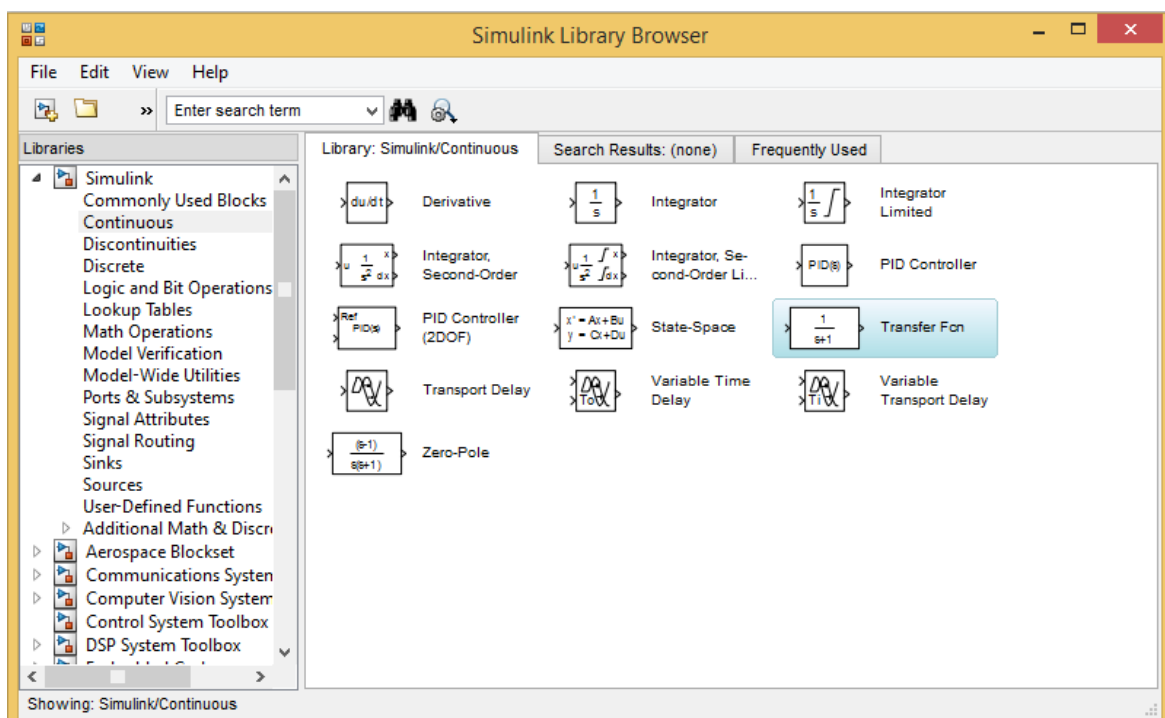


Figura 37.- Bloque *Transfer Fcn*.

Una vez en la ventana de *Simulink*, se hace doble clic al bloque de *Transfer Fcn*, en *Numerator coefficients* se coloca el numerador de la ecuación 17 entre corchetes. En la parte *Denominator coefficients*, se coloca la parte del denominador de la función de transferencia de la ecuación 17 entre corchetes. La Figura 38, muestra la ventana *Function Block Parameters: Transfer Fcn* con los coeficientes de la función de transferencia de la ecuación 17.

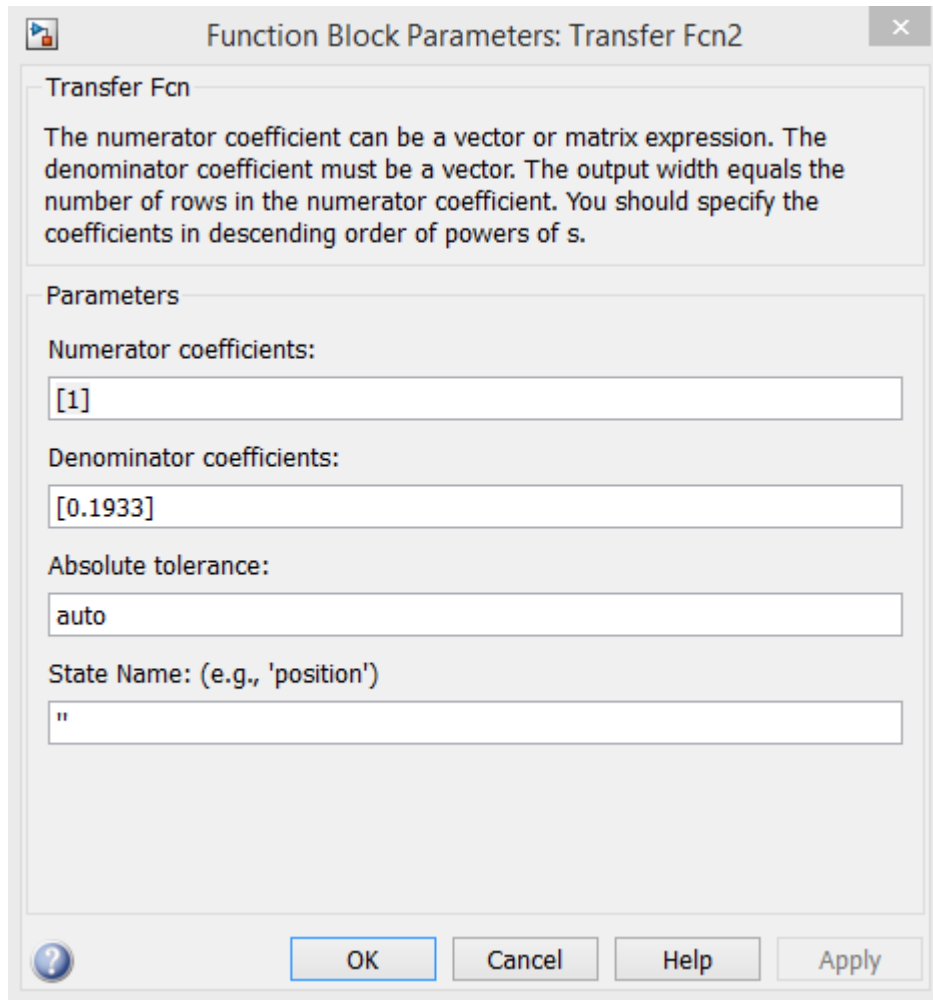


Figura 38.- Parámetros de la ecuación 11 en el bloque *Transfer Fcn*.

Luego de configurar el bloque *Transfer Fcn*, se coloca el bloque *PID Controller*, este bloque se encuentra en la ventana *Simulink Library Browser*, en *Libraries*, debajo se escoge *Simulink*, luego *Continuous* y en la parte derecha se encuentra el bloque *PID Controller* (Figura 37). El bloque *PID Controller* se coloca a lado izquierdo del bloque *Transfer Fcn*. Para configurar este bloque se debe hacer doble clic sobre el mismo y aparece la ventana *Function Block Parameters: PID Controller*. En esta ventana lo único que se cambia es la sección *Controller*, a *PI* (Proporcional-Integral). Se utiliza este tipo de controlador (PI) porque el proceso

es lento y corrige el error de estado estable a un valor bien pequeño. La Figura 39, muestra la ventana del *PID Controller*.

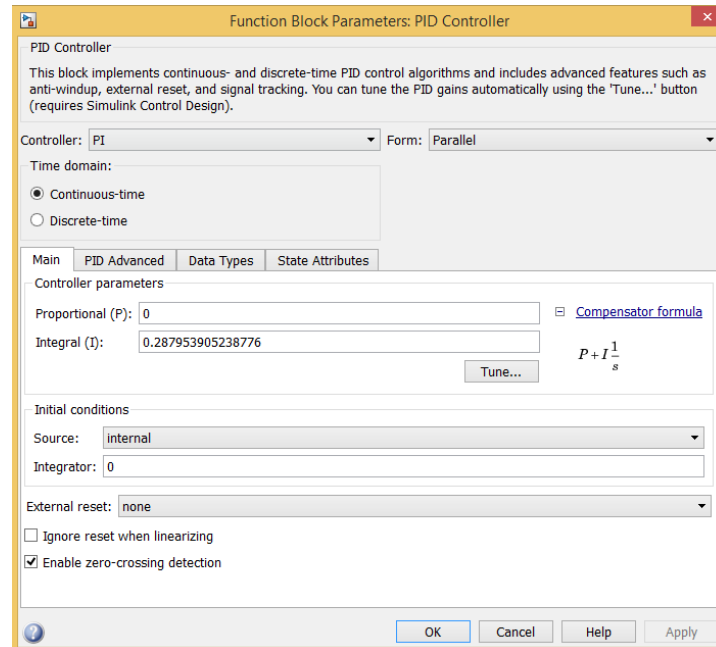


Figura 39.- Constantes del controlador PI.

Posteriormente, se hace clic en la opción *Tune*. Esta opción permite encontrar las constantes K_p y K_i del controlador de acuerdo con los parámetros del diseñador. El *Tuning* calcula automáticamente un modelo lineal a la planta. A parte, considera que la planta es la combinación de todos los bloques entre la salida y salida del controlador. Además, toma en cuenta todo el lazo cerrado incluido el bloque del controlador (MathWorks, 2014).

Los parámetros de diseño son encontrados con ayuda de la Figura 14, para la salida del sistema se necesita un tiempo de subida (t_r) de 1 segundo, una sobreelongación (M_p) menor a 5 % y un tiempo de asentamiento de 2 segundos. Con estos parámetros, en la ventana del *PID Tuner* (Figura 40), en la sección de *Response time*, se mueve la barra de desplazamiento y se observa en el gráfico la

línea azul para observar el cambio de la respuesta, éste gráfico cambia, principalmente, en el tiempo de subida y de asentamiento. La línea gris es la gráfica a la respuesta máxima que se puede llegar con este método, como se observa en la Figura 40.

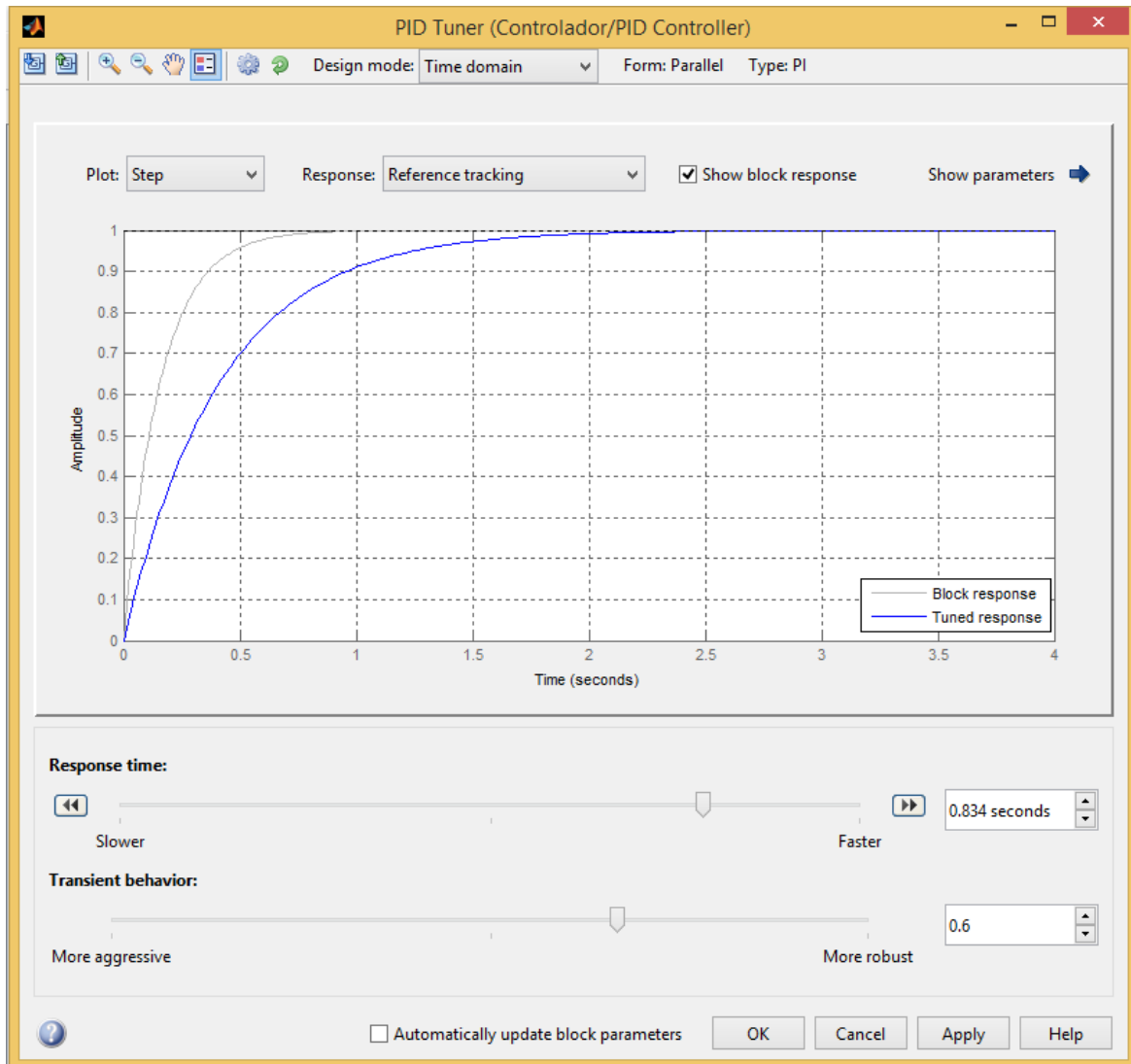


Figura 40.- Configuración de la respuesta del sistema con el *PID Tuning*.

Una vez configurada la gráfica, se presiona *OK* y se regresa a la ventana *Block Controller* con las constantes $K_p = 0$ y $K_i = 0.232$, como se observa en la Figura 41.

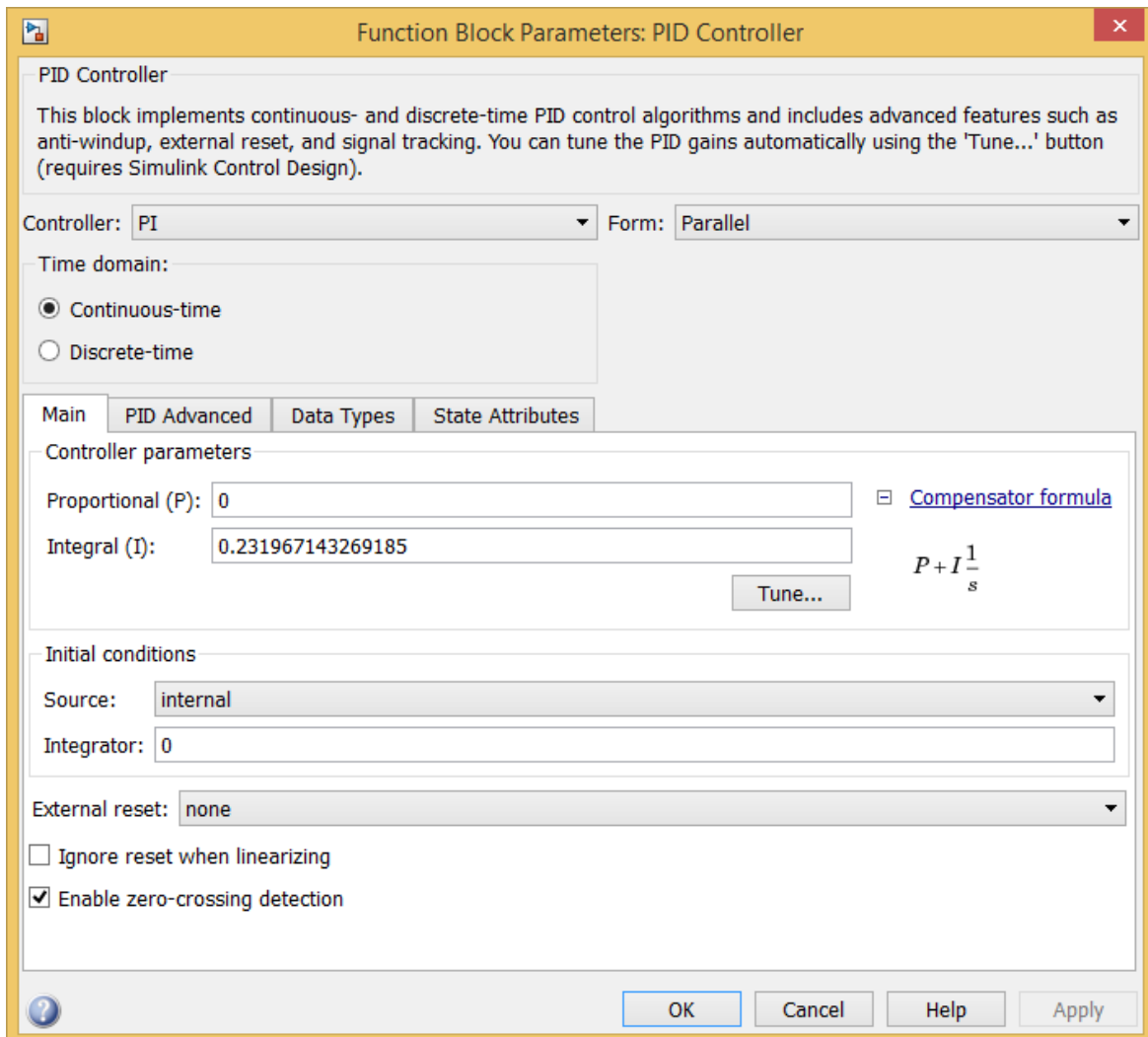


Figura 41.- Ventana del bloque *PID Controller* con los parámetros encontrados.

Después de configurar el bloque *PID Controller*, se procede a simular todo el sistema. Primero se coloca una señal de entrada *Step*, esta señal se encuentra en la ventana *Simulink Library Browser*, en la sección de *Libraries*, se selecciona *Simulink* y posteriormente *Sources*. En la parte derecha se encuentra el bloque *Step*, como se muestra en la Figura 42.

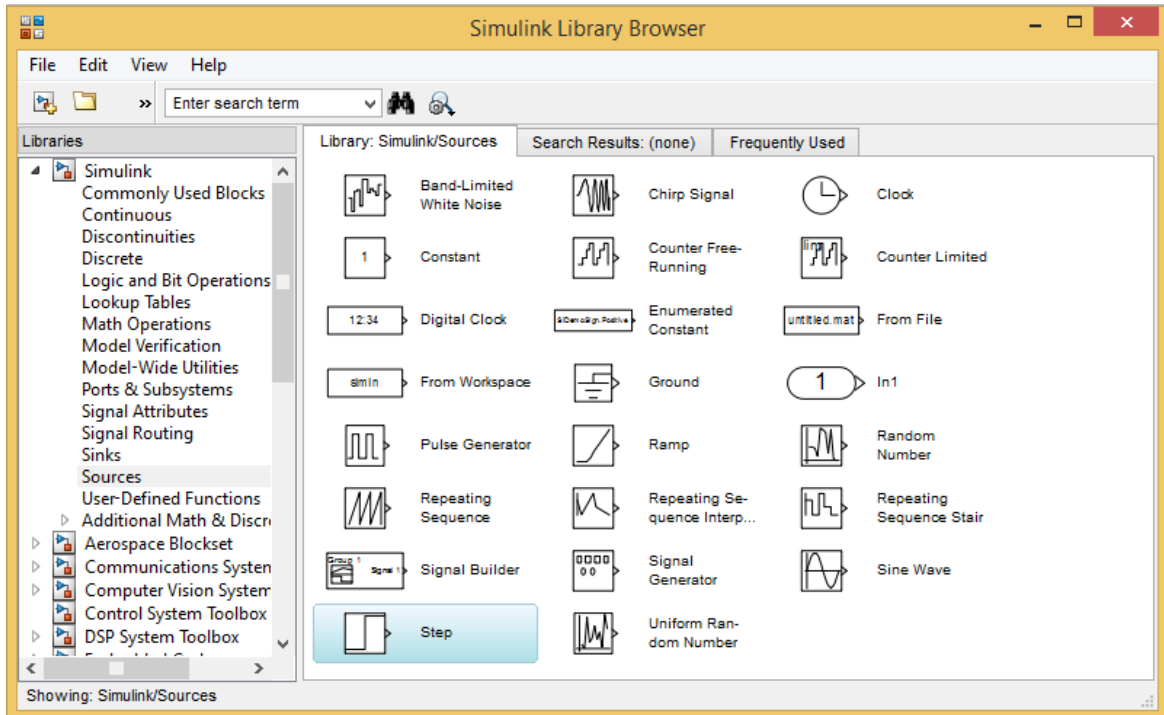


Figura 42.- Bloque *Step* en la Ventana *Simulink Library Browser*.

También, se debe colocar un bloque *Sum*, para poder restar la entrada con la salida y de esta manera encontrar el error, se configuran los bloques de la misma manera que la Figura 13. En la Figura 43, se muestra la configuración del sistema de control para posteriormente ser simulado, además para observar la señal de salida se coloca un *Scope*, que se encuentra en la ventana *Simulink Library Browser*, debajo de *Libraries*, se selecciona *Simulink* y por último en *Sinks*.

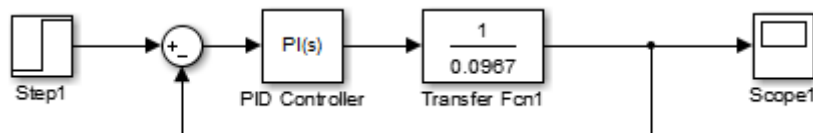


Figura 43.- Sistema de Control en lazo cerrado.

Al final se puede verificar el controlador, ejecutando el programa y haciendo doble clic en *Scope*. La Figura 44 muestra el resultado del sistema con su controlador a una entrada paso unitario.

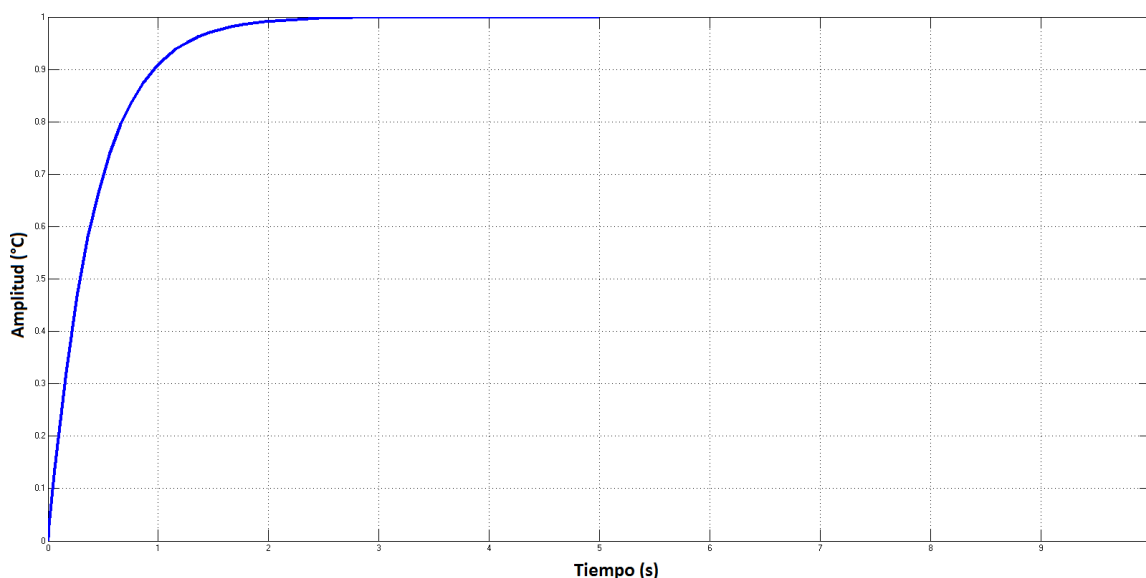


Figura 44.- Respuesta del Sistema a una entrada paso unitario.

De igual manera se realiza la configuración del controlador para la función de transferencia de la ecuación 12, tomando en cuenta los mismos parámetros anteriormente mencionados. Se encontraron las constantes $K_p = 0$ y $K_i = 0.443$.

Después de encontrar las constantes de los controladores, se programa el controlador en *LabVIEW*. Primero, se configura la adquisición de los datos de los 4 sensores de temperatura y se configura el bloque PID de *LabVIEW*. Finalmente, se programa las señales PWM de la salida del sistema.

La configuración de la adquisición de los datos de los sensores de temperatura se los realiza con el segundo dispositivo NI USB-6009 y de la misma manera que se realizó en la sección 3.2.1. Primero, se escoge el bloque *DAQ Assistant*, después se selecciona *Dev 2*, para adquirir señal analógica,

posteriormente, se seleccionan los puertos AI2 al AI5, porque los dos primeros se encuentran conectados a los controladores de flujo. Una vez en la ventana del *DAQ Assistant*, en la sección *Settings*, se colocan un voltaje máximo de 10V y un mínimo de -1V para todas las 4 entradas. Como se observa en la Figura 45, los sensores se encuentran conectados a una sola fuente de alimentación de 5 V, por lo tanto, en *Terminal Configuration* se escoge RSE para todas las entradas. Por último, al igual que la adquisición de los datos del analizador de ozono, en *Acquisition Mode*, se coloca *1 Sample (On Demand)*.

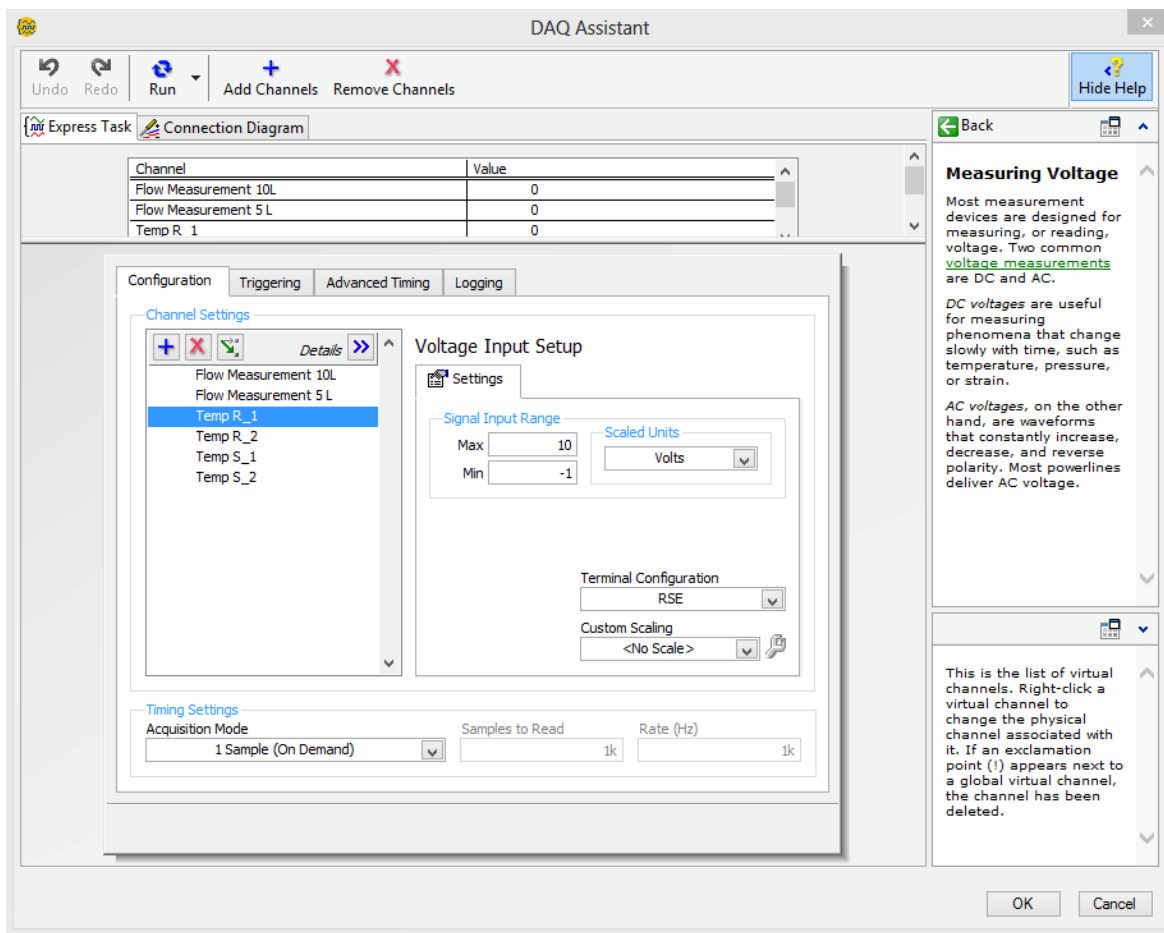


Figura 45.- Configuración del *DAQ Assistant* para la adquisición de las señales de los sensores de temperatura.

Una vez terminada la configuración, se toma en cuenta la relación entre la temperatura y el voltaje que poseen los sensores. Este factor es de 10 mV por cada 1 °C. Esta es la razón por la cual se debe multiplicar por un factor de 100 al valor adquirido por los sensores. En la Figura 46, se muestra el bloque DAQ Assistant con sus indicadores multiplicados por el factor de conversión. De igual manera se coloca un *Split Signal* para poder trabajar las cuatro señales por separado.

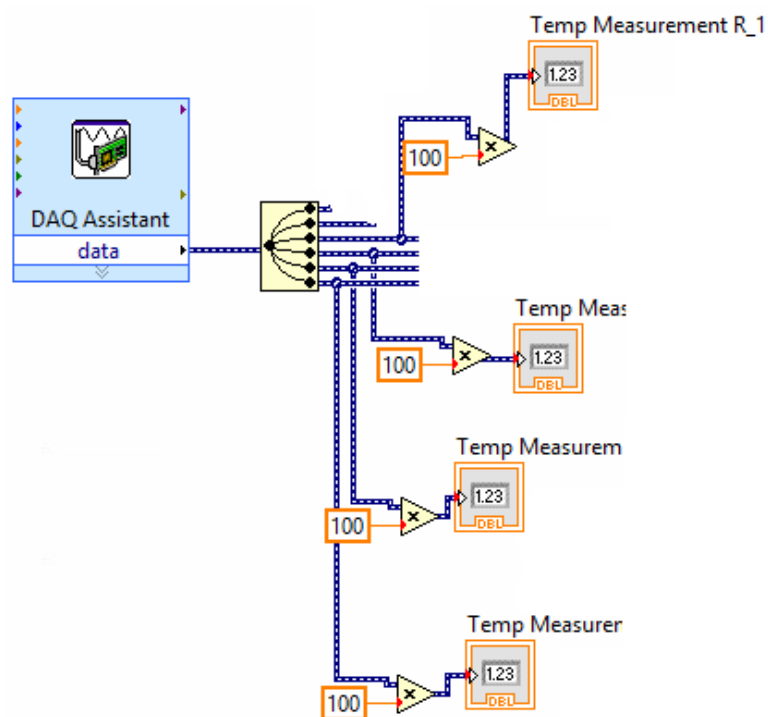


Figura 46.- DAQ Assistant configurado y con *Split Signal* para trabajar por separado las cuatro señales.

Una vez configurada adquisición de los datos de temperatura, se debe seguir con la configuración el bloque *PID.vi* de LabVIEW para configurar el controlador. Para encontrar el bloque *PID.vi*, en la ventana *Block Diagram*, en *Function Palette*, se escoge la opción *Control Design & Simulation*, *PID* y *PID.vi*, como se observa en la Figura 47. Finalmente, se arrastra el bloque hacia la ventana *Block Diagram*.

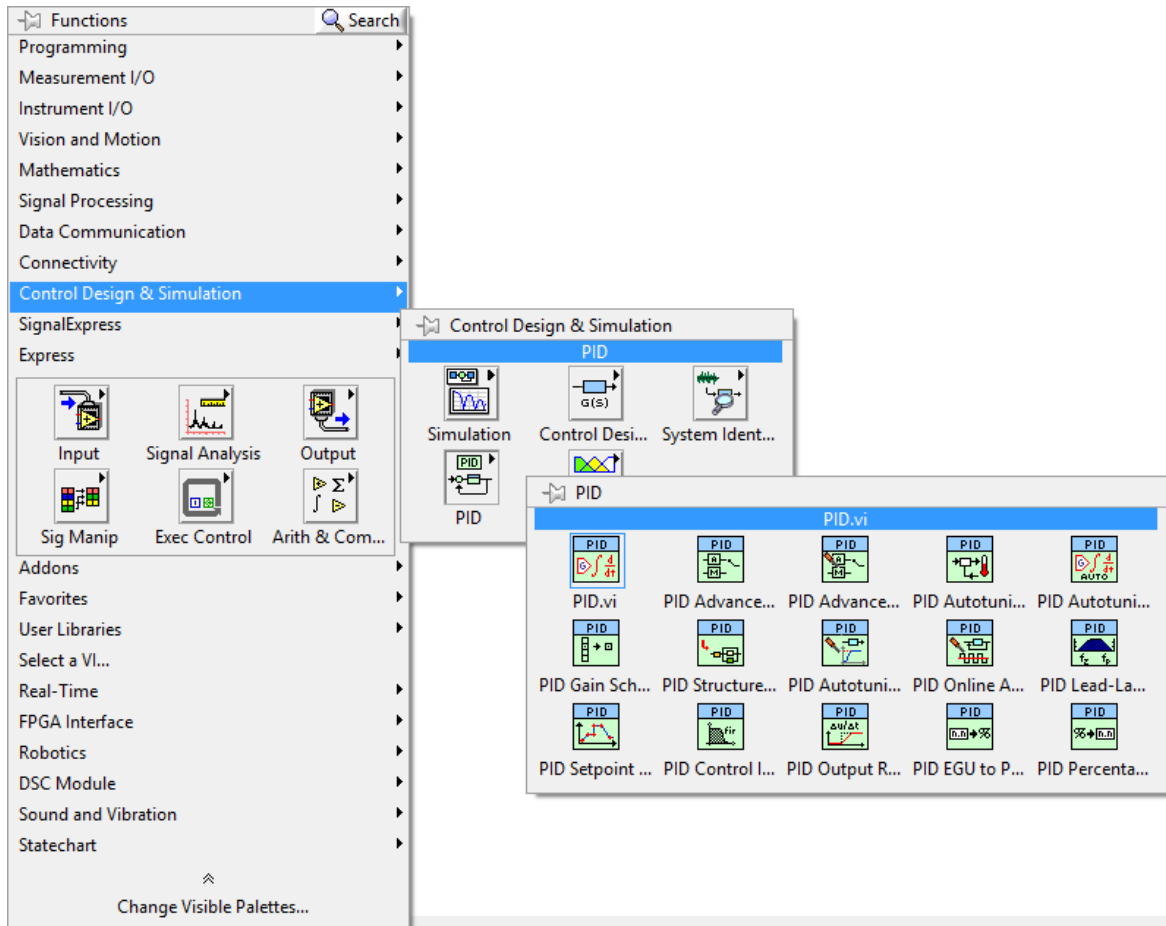


Figura 47.- Bloque *PID.vi* en *Functions Palette*.

El bloque *PID.vi* posee una distribución que se muestra en la Figura 48 para ser conectado. *Output range* es el rango que va a tener la señal de salida del controlador, para este caso es de 0 a 100, por el *Duty Cycle* de la señal PWM. *Setpoint* es el valor de la temperatura que el usuario desea que cambie en las cámaras. *Process Variables* es la temperatura que mide el sensor en ese momento, adquirido por el NI USB-6009. *PID gains* son las constantes del controlador calculadas anteriormente. Finalmente, *output* es la salida del controlador que ira conectado hacia la entrada de la señal PWM.

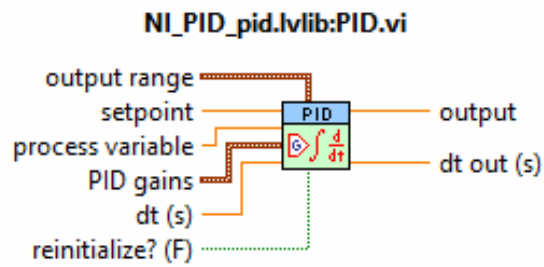


Figura 48.- Bloque *PID.vi* en *LabVIEW*.

Por último, la programación de la señal PWM, se realiza de la manera más sencilla para simplificar el programa. Dentro de un lazo *for*, donde N es el número de veces que se va ejecutar la operación que se encuentra dentro del lazo, i es el número de iteración que va desde 0 hasta $n - 1$ (National Instruments, 2012). La entrada de este bloque es el porcentaje del *Duty Cycle* del PWM (rango de 0% a 100%), para nuestro caso es la salida (*output*) del bloque del controlador *PID.vi*. Para generar la señal PWM, el valor ingresado es comparado con el valor de la iteración, posteriormente, el selector elige si es verdadero manda la señal verdadero al NI USB-6009, caso contrario manda falso. Por último, todo se encuentra dentro de un lazo *while* para repetir el proceso indefinidamente. Adicionalmente, se debe configurar el *DAQ Assistant* para salidas digitales de la misma forma que la sección 3.2.2 para el control de las válvulas. En la Figura 49 se puede observar el programa implementado. Este proceso se repite para el controlador para las tres señales siguientes.

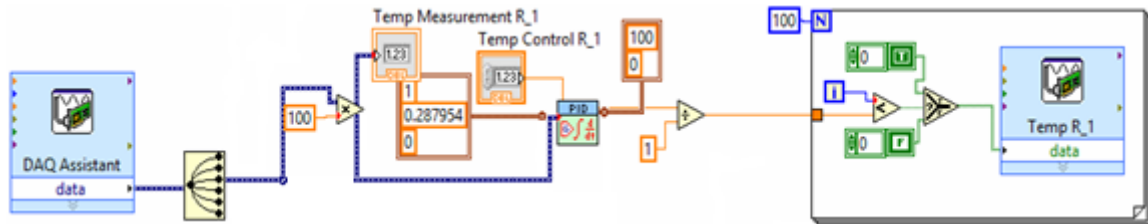


Figura 49.- Programa para el Control de temperatura para las cámaras de referencia y muestreo.

3.2.5 Sistema SCADA

El sistema SCADA del proyecto permitirá la visualización gráfica del proceso para analizar el aire de las tres entradas, mencionadas anteriormente, con sus respectivas gráficas en tiempo de los datos adquiridos del analizador de ozono y de los controles anteriormente programados.

Los componentes del sistema de control se seleccionan de manera que se facilite interpretación y uso de la interfaz hombre-máquina. Para la programación del sistema SCADA se utiliza las gráficas del *DSC Module* disponibles en la ventana *Front Panel*. En *Controls Palette*, se encuentra el *DSC Module*, en el cual se encuentran las gráficas como tuberías y válvulas con animación, en la Figura 50 se muestra el *DCS Module* en el *Controls Palette*.

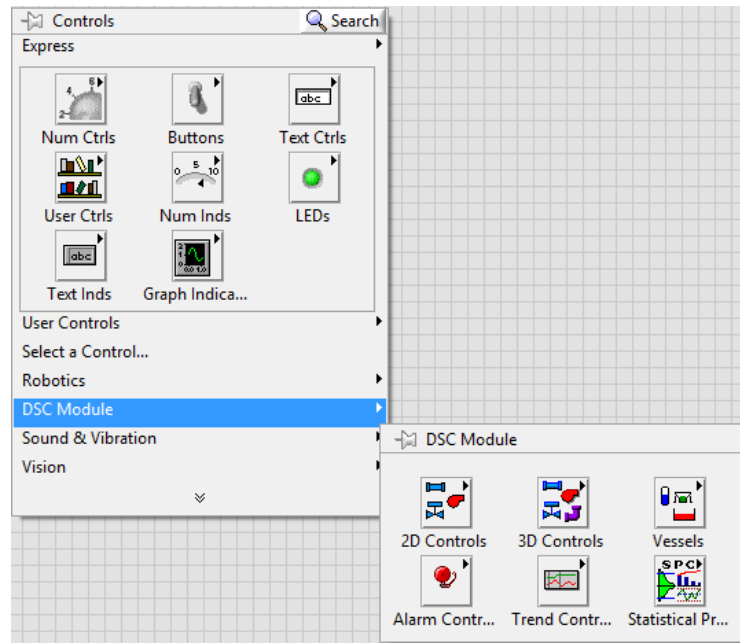


Figura 50.- DSC Module en el Controls Palette.

Para colocar las tuberías, se selecciona *3D Controls* y después en *3D Pipes*. Se escoge la tubería deseada y se lleva hacia el *Front Panel*. Donde se puede ajustar el tamaño y longitud deseada. Para las válvulas se procede de la misma manera con la diferencia de que se dirige a *3D Valves*. Al igual que las tuberías, el tamaño se puede ajustado. De igual manera se realiza los mismos pasos para las bombas de aire, en *3D Controls* y *3D Pumps* como se muestra en la *Figura 51*.

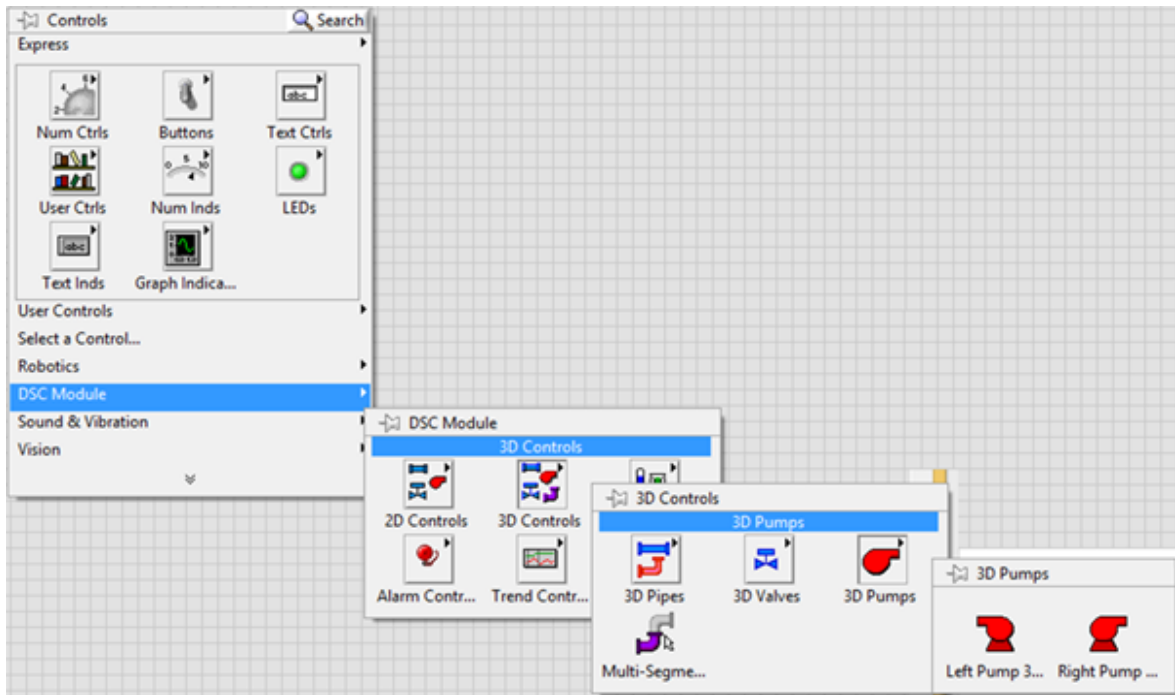


Figura 51.- *DSC Module* en el *Controls Palette* para la selección de las bombas.

Dado que la planta MOPS posee el analizador de ozono y los controladores de flujo, se coloca en el sistema SCADA, gráficos predefinidos del *DSC Module*. Para esto, se debe abrir el *Image Navigator* en *Tools*, *DSC Module* e *Image Navigator* como se muestra en la Figura 52.

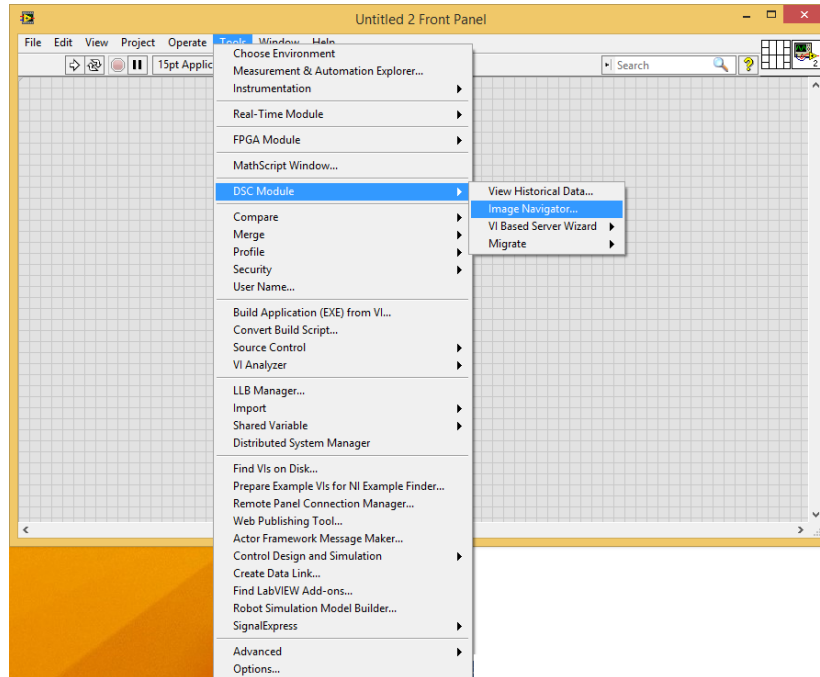


Figura 52.- Image Navigator en el DSC Module.

En *Categories*, se puede encontrar diferentes figuras para colocar los aparatos electrónicos en el sistema SCADA como se observa en la Figura 53. Los controladores de flujo se encuentran en *Controllers* y el analizador de Ozono se encuentra en *Electronics*.

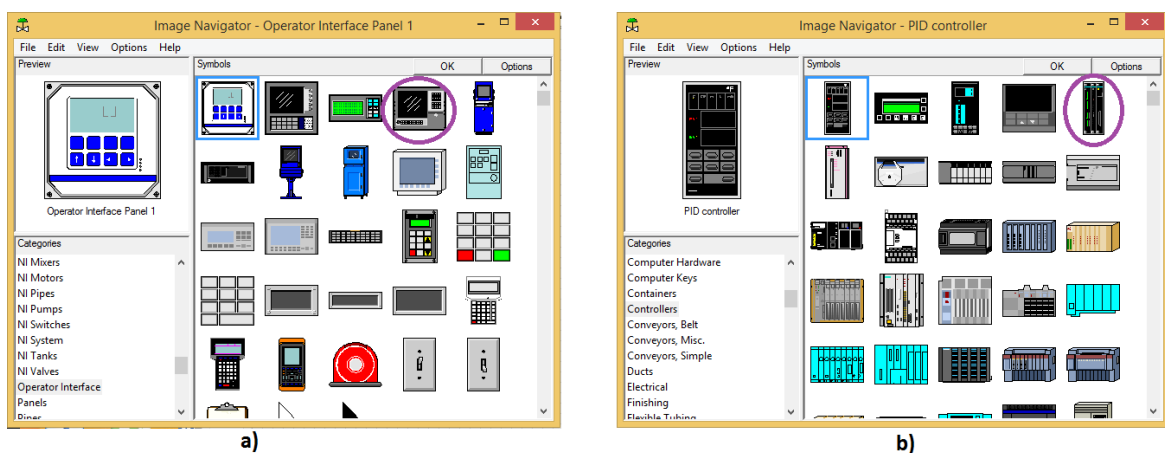


Figura 53.- a) Figura del Analizador de Ozono. b) Figura del Controlador de Flujo.

Para las cámaras de referencia y nuestro se crea una gráfica de control, ya que las figuras que se encuentran en el *Image Navigator* no son animadas, es decir, que no se pueden diferenciar cuando están encendidos o apagados.

En la ventana de *Project Explorer*, se hace clic derecho en *My computer*, *New* y finalmente en *Control* lo cual abre una ventana igual a *Front Panel*. En esta ventana, se agrega un led que es una variable booleana y de la ventana *Image Navigator*, se escogen dos figuras del mismo tipo con diferente color. Para que mediante la luz led combinar las dos gráficas para encendido y apagado. Estos tanques se encuentran en la sección *Tanks* del *Image Navigator*. La *Figura 54* se muestra los tanques normales y el tanque animado (boolean). El tanque animado es copiado hacia el *Front Panel* del programa para poder continuar con la programación del sistema SCADA.

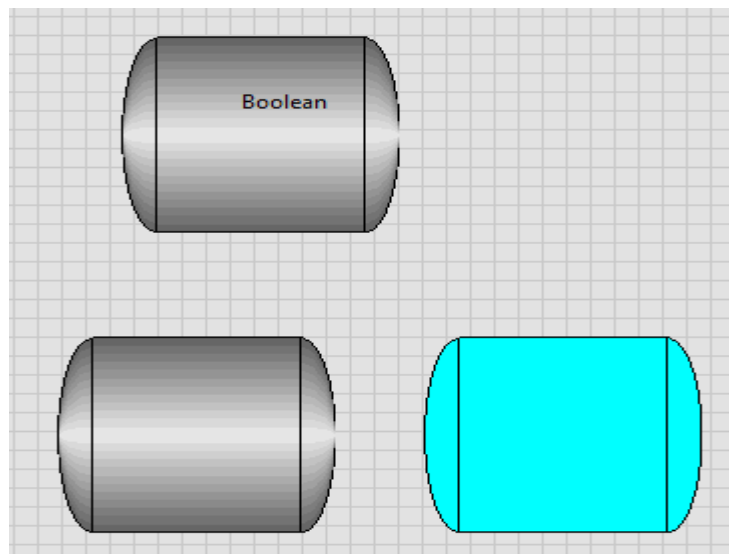


Figura 54.- Tanque animado utilizado en el sistema SCADA

Como se explicó anteriormente, todos los componentes del sistema SCADA (tuberías, válvulas y tanques) son variables booleanas, es decir, pueden estar encendidos o apagados, por lo cual para cambiar de estado de encendido/apagado o viceversa, se necesitan de constantes booleanas (verdadero o falso).

Una vez con todos los componentes armados como en la Figura 1, se procede a programar el sistema SCADA. La secuencia de las válvulas es indispensable para el correcto funcionamiento del programa por lo que se deben crear variables locales para que los componentes se prendan y apaguen correctamente. Para crear las variables locales, se hace clic derecho en el componente, posteriormente *Create y Local Variable*. Se debe asegurar de que la variable local se encuentre en *write*, caso contrario estaría en *read* y de este bloque solo lee el estado que se encuentra el componente. Este proceso se observa en la Figura 55.

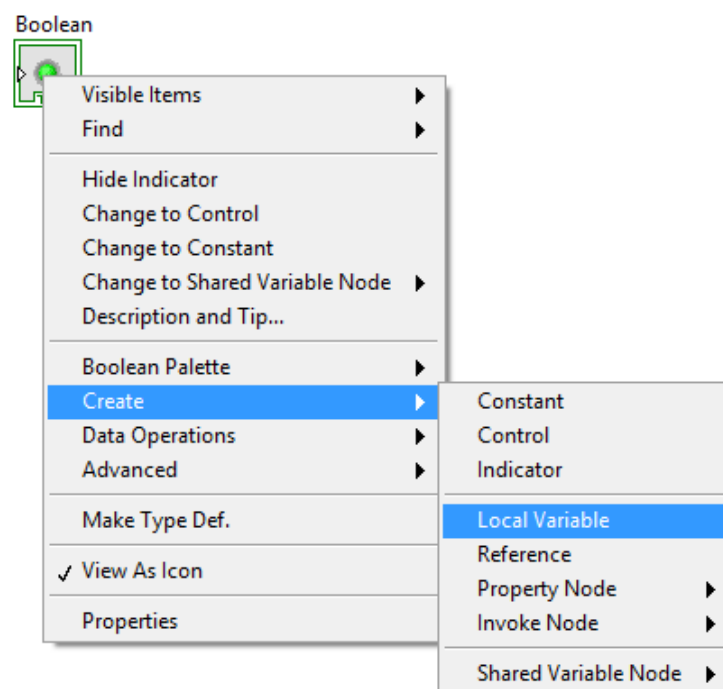


Figura 55.- Creación de las Variables Locales

Posteriormente, se colocan los componentes debajo de los bloques del control de las válvulas. Primero se colocan los componentes que se deben encender cuando se analiza el aire del ambiente. En la segunda secuencia se colocan los componentes que se deben encender cuando el aire de la cámara de referencia es analizado y finalmente, se colocan los demás componentes el aire de la cámara de muestreo es analizado. La variables locales son colocadas para apagar los componentes, por ejemplo los componentes de la primera secuencia deben apagarse cuando pasan a la segunda secuencia de la cámara de referencia, para esto se utilizan las variables locales en *write*. En la *Figura 56*, se muestra la programación del sistema SCADA.

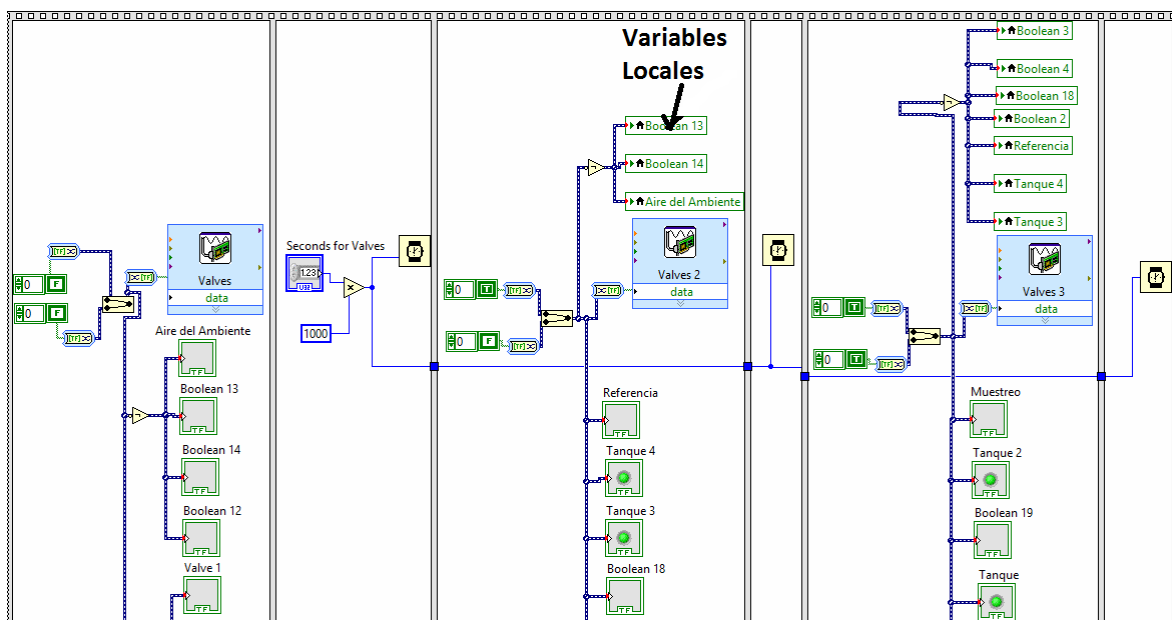


Figura 56.- Programación del SCADA.

3.2.6 Diseño de la Página Web

La planta MOPS está diseñada para ser usada de manera portátil, es decir siempre va a estar en movimiento. Esta es la razón para la cual creación de una página web, del sistema SCADA de la planta USFQ-MOPS, es de vital importancia para así facilitar su teleoperación desde cualquier lugar con acceso a la red LAN conectada a la computadora.

Para poder crear una página web en formato html en LabVIEW, primero se debe configurar el *Web Server*. Esto se logra haciendo clic en *Tools, Options* y en *category* buscar *Web Server*.

En *Web Server* se debe verificar únicamente que en el puerto este establecido en 80 y que el *Root Directory* se encuentre dentro de la carpeta que se llama *www*, como se observa en la Figura 57.

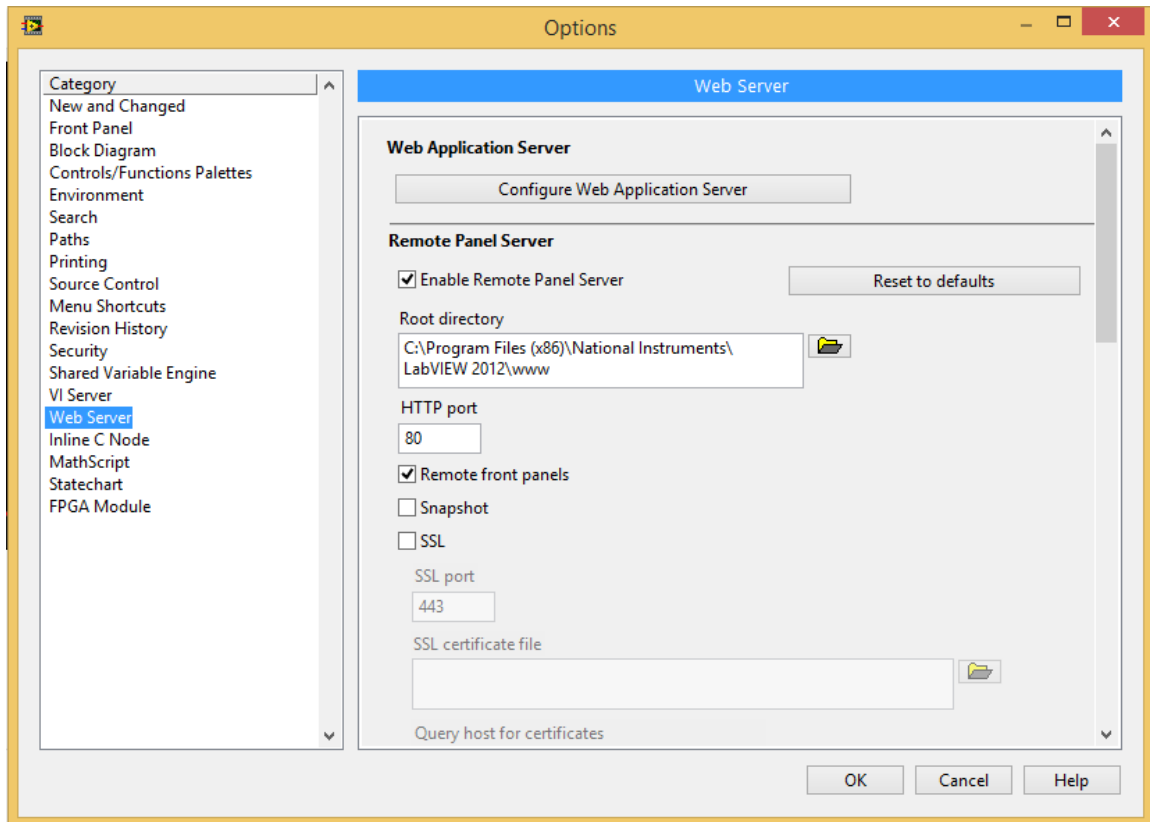


Figura 57.- Configuración del Web Server.

El valor del puerto debe ser 80 porque es el puerto designado de HTTP (Hypertext Transfer Protocol) para poder establecer una conexión del cliente (computadora) a un servidor (internet). Así mismo, el VI Server, dentro de Category, debe verificarse de igual manera que tenga el valor de 80, como se muestra en la Figura 58.

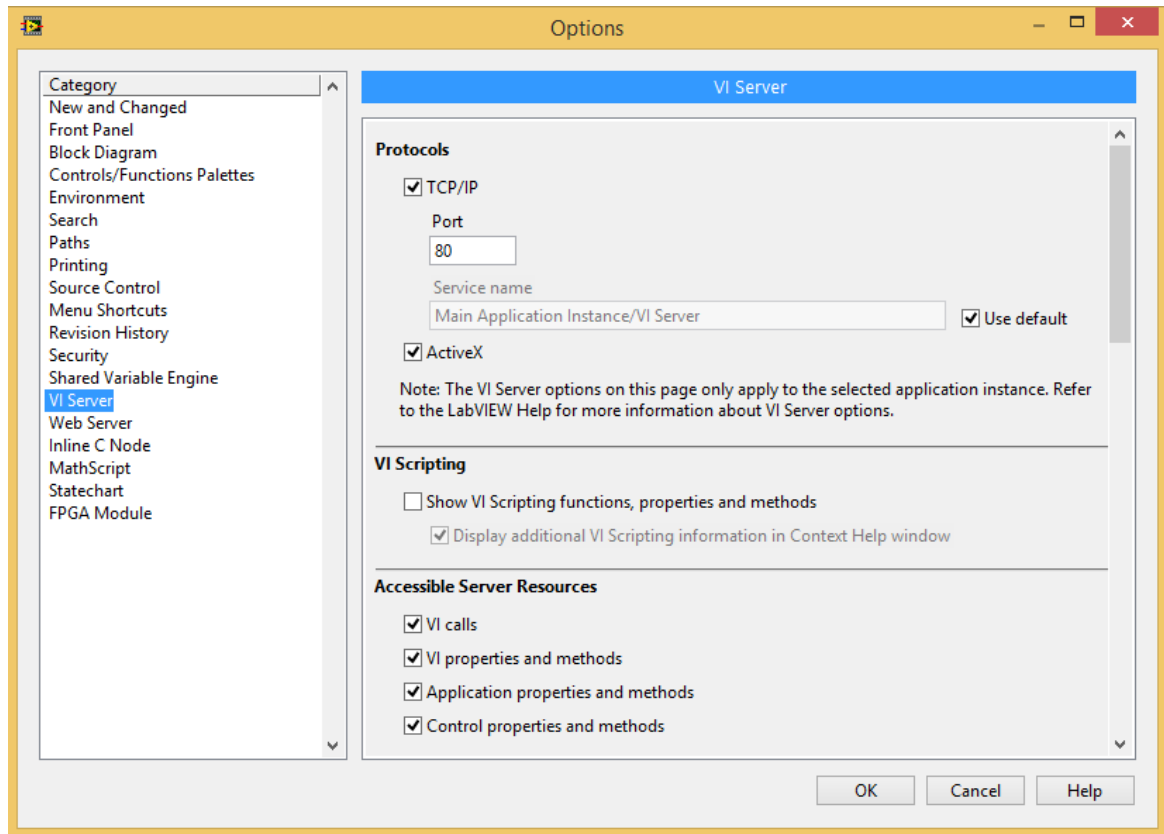


Figura 58.- Configuración del VI Server.

Una vez terminado lo anterior, se da clic en *Ok*. Posteriormente, dentro de *Tools* se encuentra la opción *Web Publishing Tool*, esta herramienta sirve para crear el archivo html y poder publicarlo en la red LAN. Se selecciona el *Virtual Instrument (VI)* a publicar y se hace clic en *next*. La Figura 59, muestra la ventana inicial para seleccionar el nombre del VI para ser publicado.

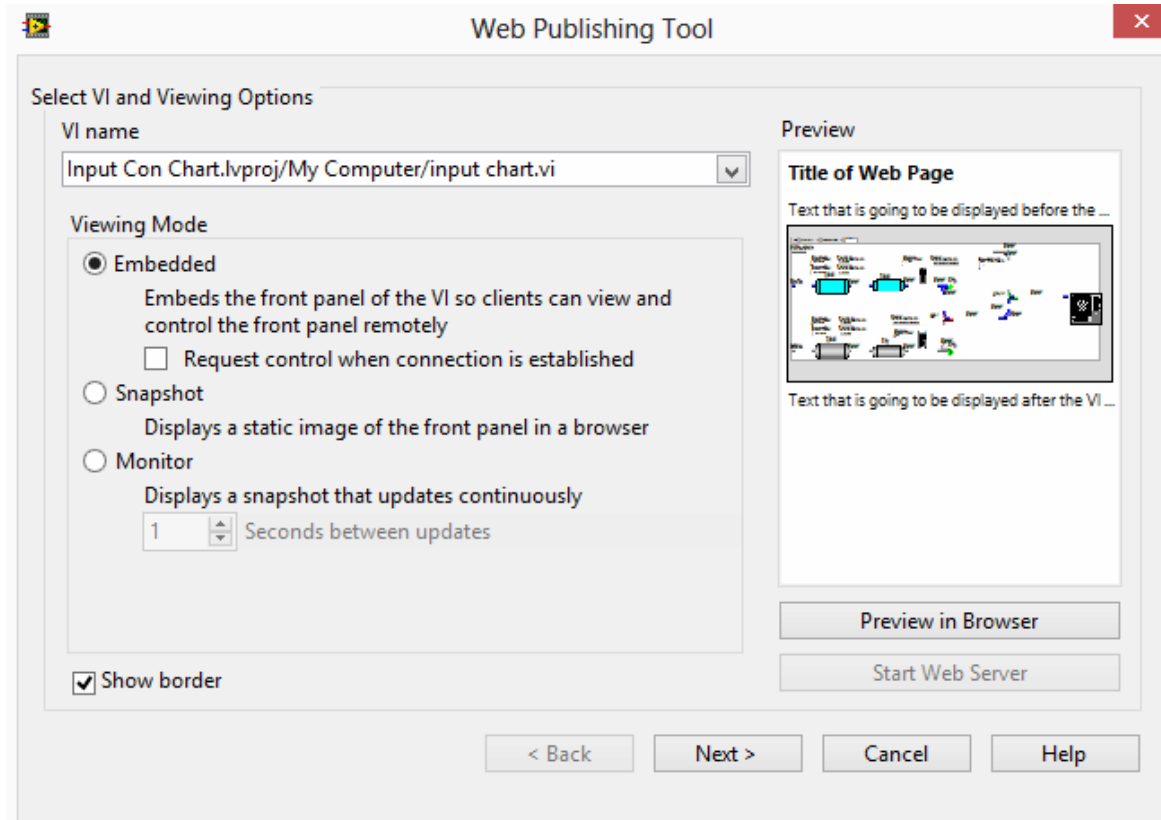


Figura 59.- Web Publishing Tool configuración del VI a publicarse.

Posteriormente, la herramienta nos permite colocar un título y una breve explicación del proyecto, como se observa en la Figura 60. Esto nos brindara información relevante de la planta MOPS de la USFQ para que cuando una persona ingrese a la página web, pueda observar lo que ocurre en tiempo real.

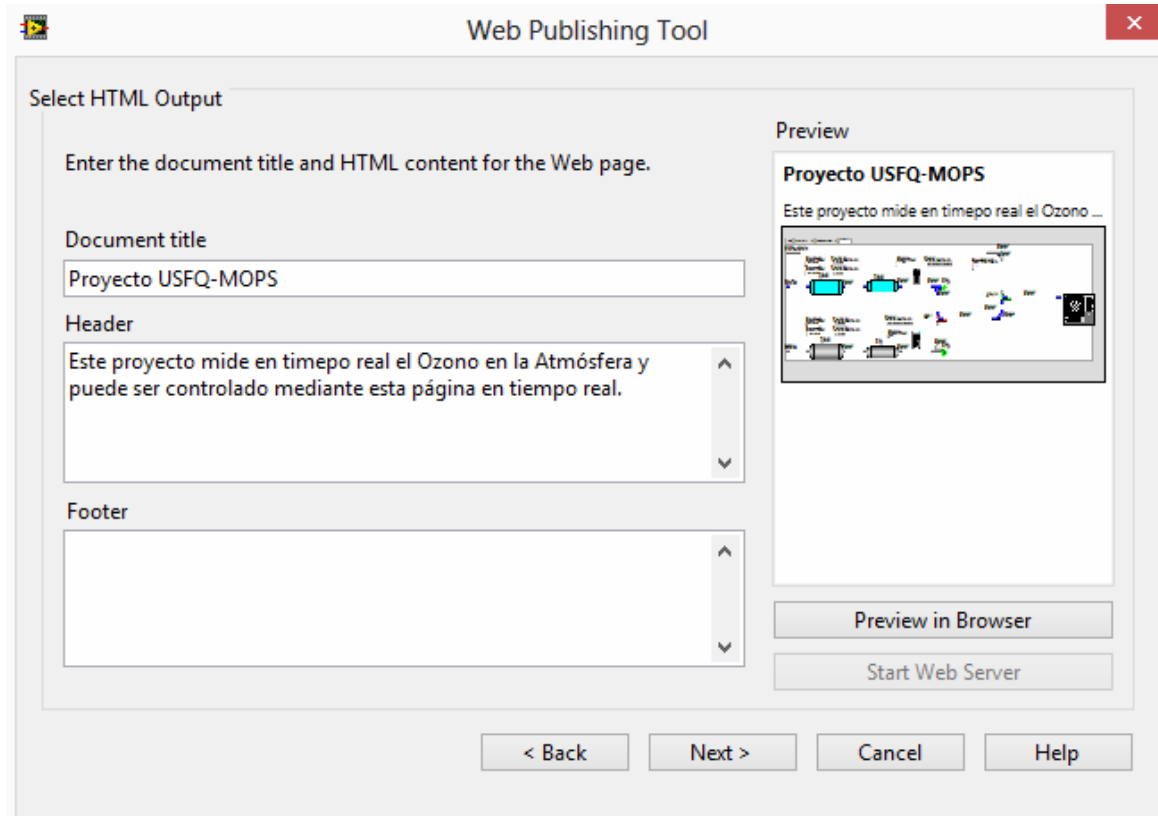


Figura 60.- Configuración del Web Publishing Tool con un título y una breve descripción del proyecto.

Para finalizar la publicación de la página web se escribe la dirección del archivo html con el que se publicará en la red LAN. Una vez nombrada la página web, se guarda la información haciendo clic en *Save to Disk* y así se publica en la red LAN en la cual se encuentra conectada la computadora. Este proceso se observa en la Figura 61.

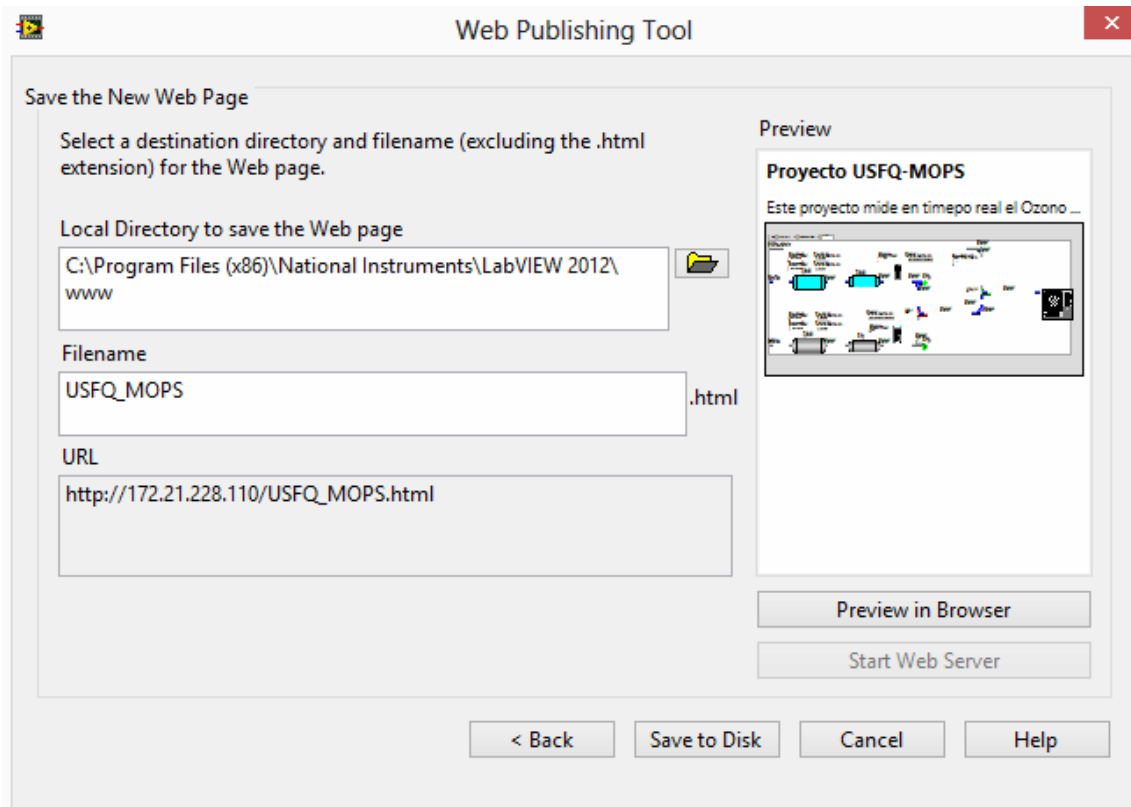


Figura 61.- Dirección de la página configurada.

3.2.7 Configuración de una contraseña de seguridad

Debido que el sistema SCADA está publicado en una red LAN, puede correr el riesgo de que personas no autorizadas interrumpen alguna secuencia o cambien algún parámetro de la planta. Esta es la razón por lo que se requiere de la creación de una contraseña de seguridad, para que solo personas autorizadas puedan cambiar o modificar el programa del sistema SCADA.

En la ventana de LabVIEW, *Block Diagram* o *Front Panel*, se hace clic en *File* y *VI Properties*. Posteriormente en *Category*, se selecciona *Protection* y se escoge la opción *Password-protected*. Esta opción coloca una contraseña y de esta manera el programa quedara protegido. Cualquier persona podrá observar lo que ocurre en el sensor USFQ-MOPS, pero si quiere cambiar un parámetro del sistema

SCADA debe escribir la contraseña correcta. La configuración de contraseña se muestra en la Figura 62.

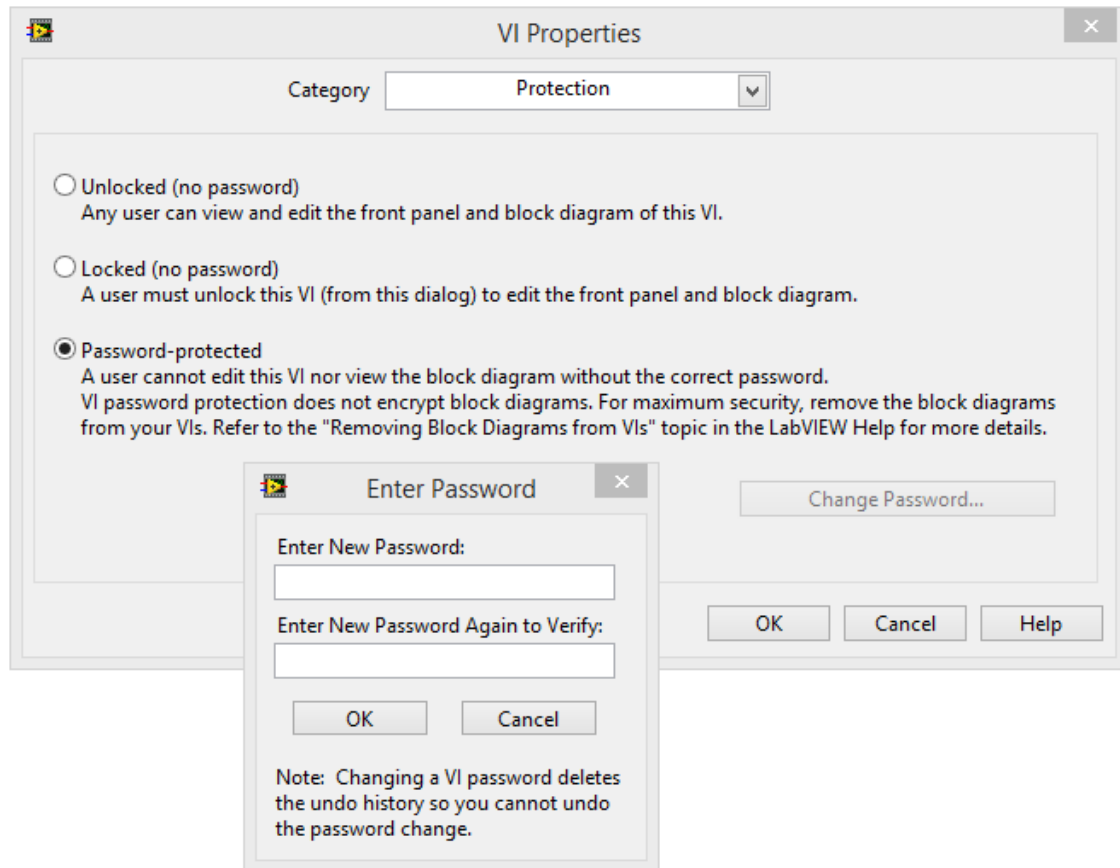


Figura 62.- Configuración de una contraseña para el programa.

CAPÍTULO 4: Resultados

4.1 Visualización del Sistema SCADA

Una vez terminada la configuración del sistema SCADA, para mejorar su presentación y observar los diferentes gráficos de los datos adquiridos del analizador de ozono, se crean cuatro pestañas diferentes, nombradas: O₃, Beer Intensity, House Keeping y SCADA. Esto se logra mediante una opción *Tab Control* en *Control Pallette*, *Modern*, *Containers* y *Tab Control*.

En la pestaña O₃, se encuentra el gráfico más importante del proyecto, contiene el porcentaje de ozono y los indicadores con los valores numéricos medidos del mismo. También, se encuentra el botón para guardar la información en un archivo texto, además posee el botón para empezar a grabar o parar la grabación de los datos y permite observar el nombre del archivo en el que se está guardando la información. La Figura 63 muestra la pestaña O₃.

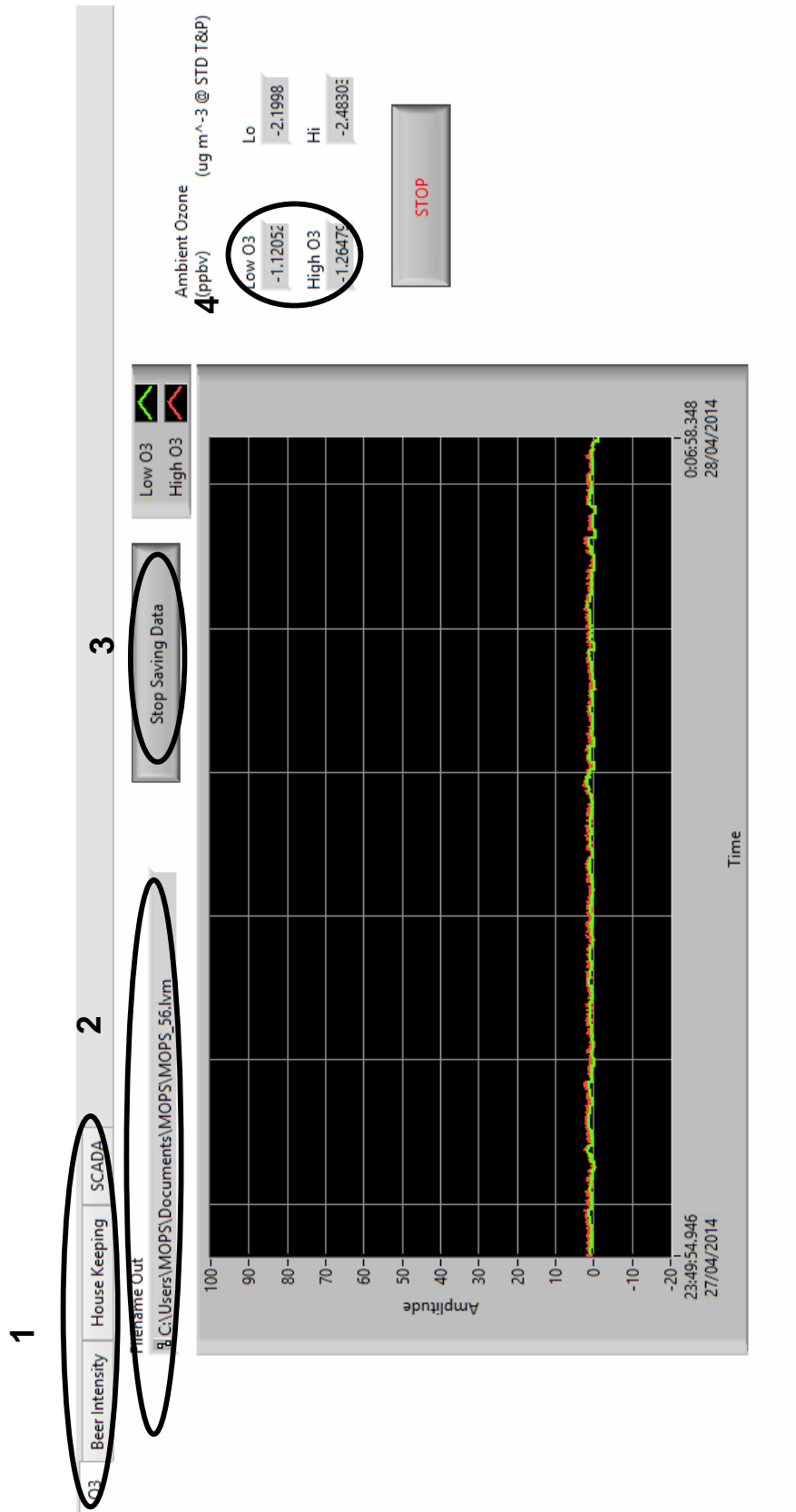


Figura 63.- Pestaña de O₃ con la gráfica del Ozono: 1. Son las 4 pestañas. 2. Es el nombre del archivo donde se está guardando. 3. Botón para guardar la información 4. Son los indicadores numéricos de los datos obtenidos.

En la pestaña Beer intensity, se encuentran las gráficas y los valores numéricos de Flow A y Flow B que son el flujo de aire que pasa por las dos celdas que posee el analizador de ozono. La Figura 64 muestra la pestaña de Beer Intensity con su gráfica y sus valores numéricos medidos.

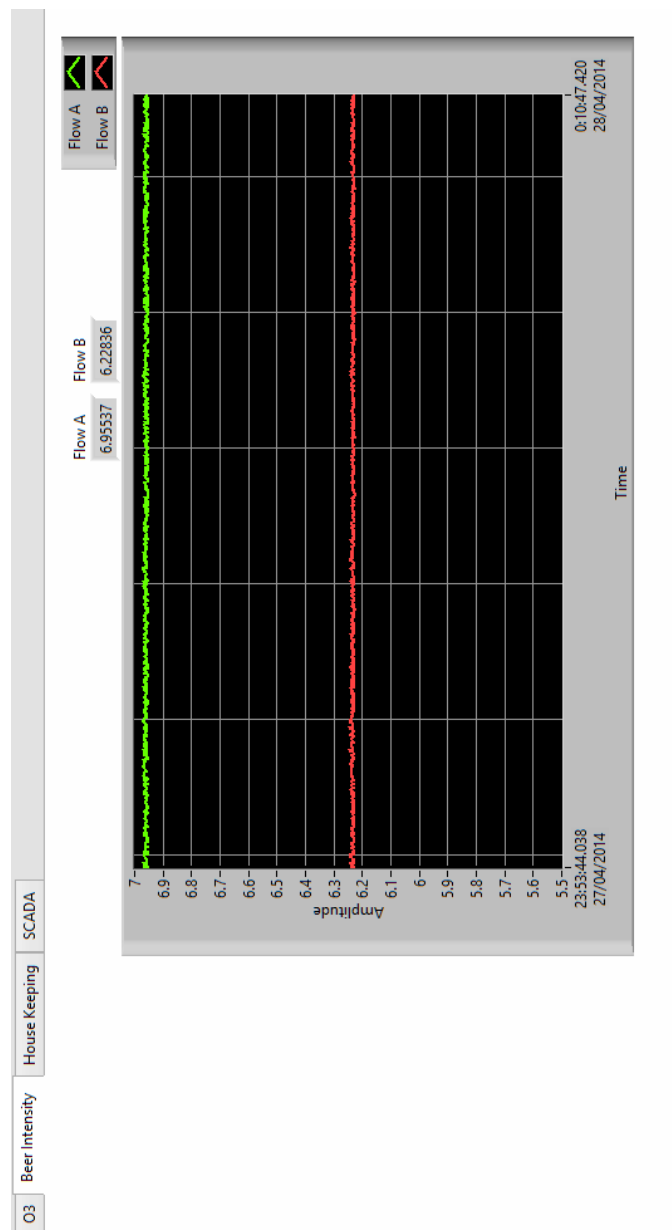


Figura 64.- Pestaña de Beer Intensity con el Gráfico de Flow A y Flow B.

En la pestaña de House Keeping, Figura 65, se encuentra el gráfico de Intensidad con sus valores numéricos de Intensity A e Intensity B de los dos tubos que posee el del analizador de ozono.

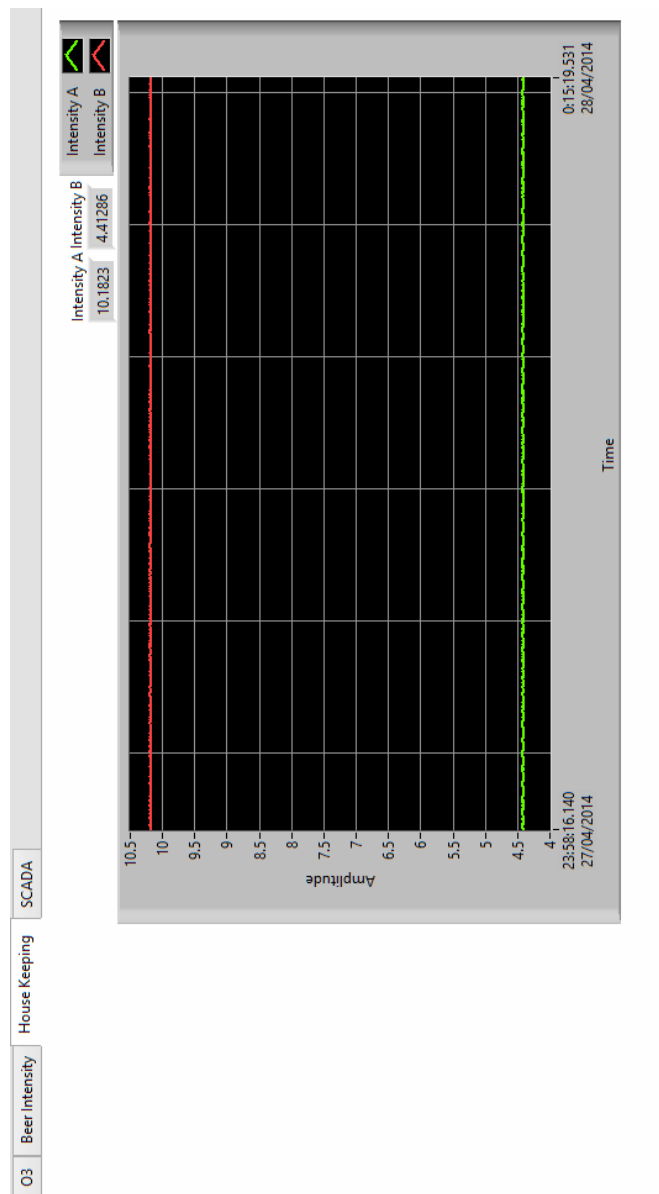


Figura 65.- Pestaña de House Keeping con el gráfico de Intensity A y B.

En la tercera pestaña del sistema SCADA, se encuentra el diagrama del proceso del sensor USFQ-MOPS. En el diagrama se observan las tuberías, los tanques y las válvulas. Adicionalmente, contiene el control de las válvulas, de temperatura y del flujo de aire de las cámaras de referencia y muestreo, como muestra la Figura 66.

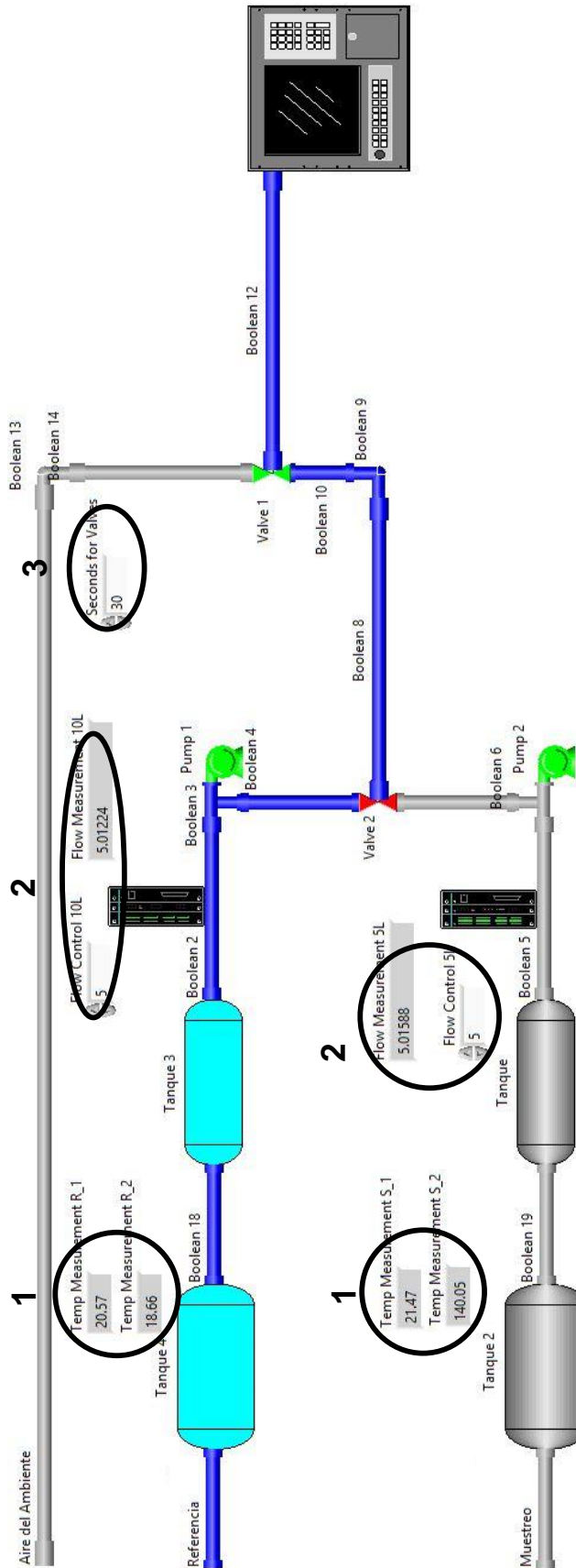


Figura 66.- Tab del sistema SCADA: 1. Indicadores numéricos de las temperaturas medidas en las cámaras. 2. Controles e indicadores numéricos del control de flujo. 3. Tiempo en segundos para la secuencia de las válvulas.

4.2 Control de las Válvulas

En la Figura 67, se puede observar la secuencia de las válvulas por el gráfico del Ozono en el Tab O3 y los pulsos que cambian con el tiempo debido a los cambios de las válvulas de entrada. Al medir todas las entradas, cada una en un tiempo de 180 segundos, se nota el cambio del nivel de ozono por esos pulsos.

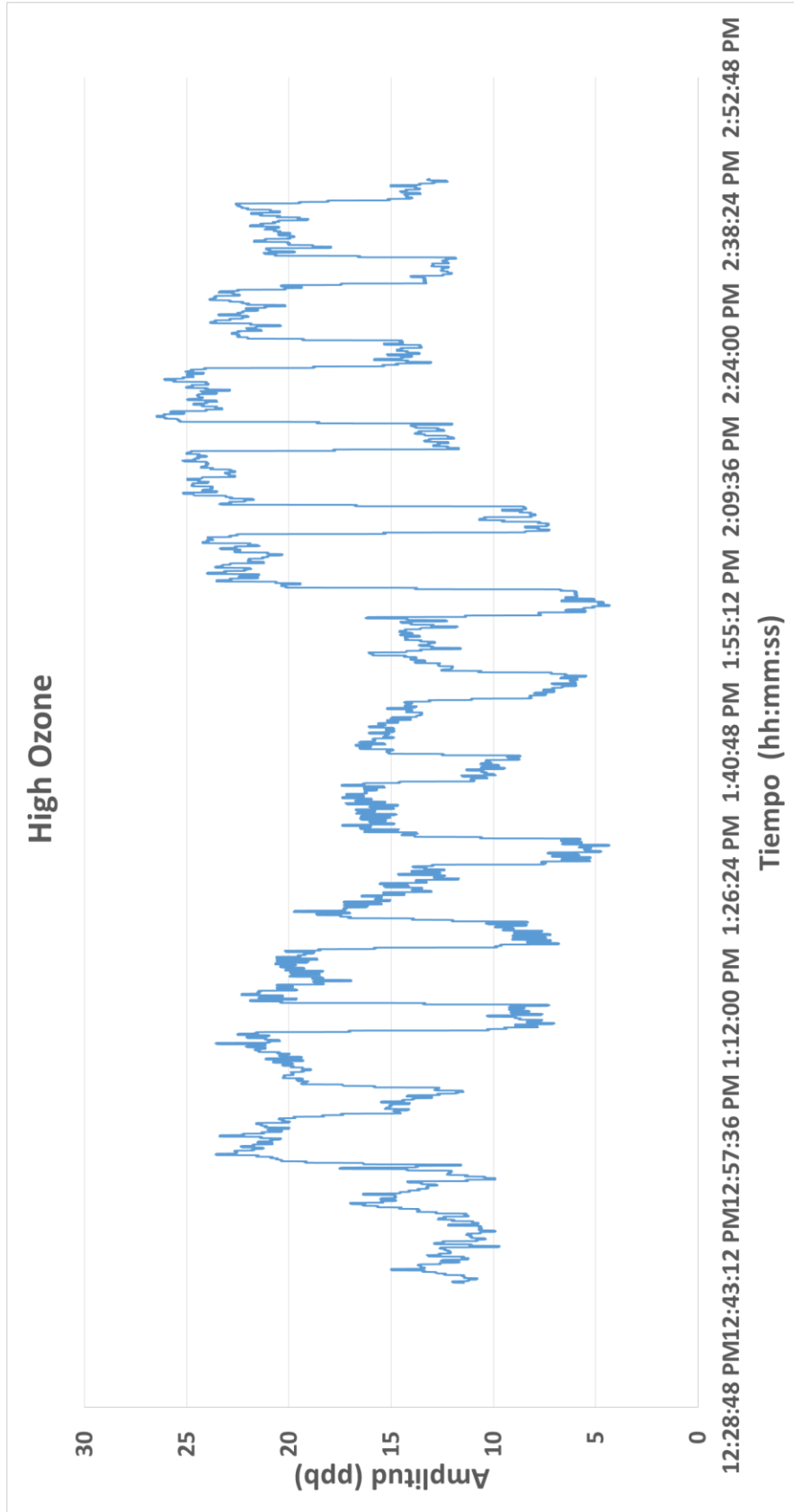


Figura 67.- Control de las Válvulas mediante el grafico del Ozono.

4.3 Control del Flujo de Aire

El control de flujo de aire se encuentra en el Tab del SCADA, se coloca un valor dependiendo de los rangos de 0 a 10 L/min o de 0 a 5 L/min de cada controlador. El controlador cambia de estado y mide el valor real del flujo que esta pasado por él mismo. En la *Figura 68 a)*, se muestra a los controladores colocados un valor de 5 L/min. En la *Figura 68 b)*, muestra el flujo control de aire de 3 L/min para el controlador de la cámara de referencia (rango de 0 a 10 L/min) y para el control de flujo de la cámara de maestro de 5 L/min.

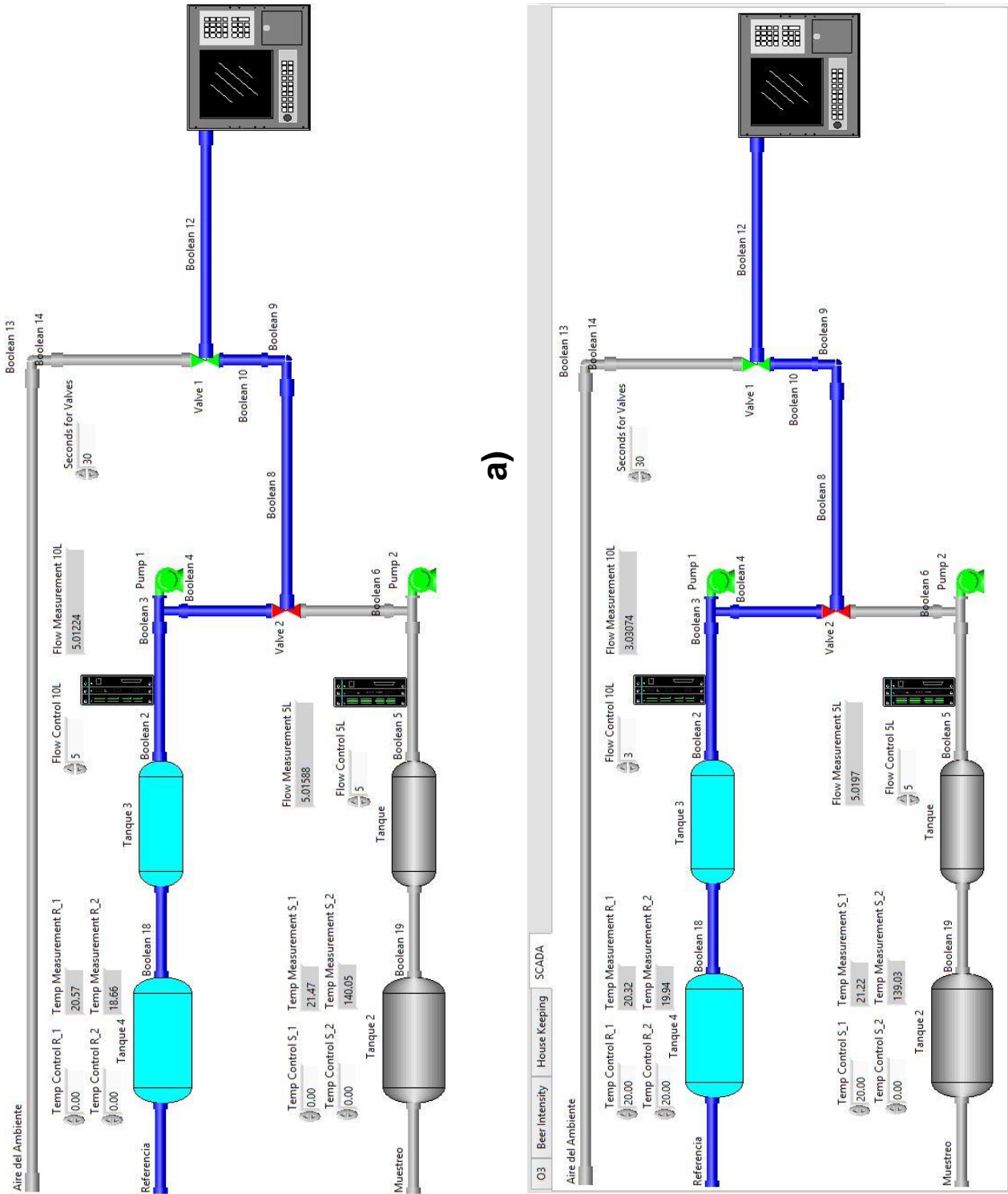


Figura 68.- Control de flujo de aire.

4.4 Control y medición de la temperatura de las cámaras

La medición de la temperatura de las cámaras está dada por los sensores de temperatura LM35, los cuales registran la temperatura de los dos niveles (la parte de arriba y abajo) de las cámaras. Posteriormente, en otro proyecto de investigación de tesis, se corregirá este prototipo para que ajuste a las condiciones reales de las cámaras.

4.5 Archivo Texto

Este documento es en el cual se almacenan todos los datos del sensor de la planta USFQ-MOPS. Este archivo contiene en su primera columna el High Ozone, en su segunda Low Ozone, en la tercera Flow A, en la cuarta Flow B, en la quinta Intensity A, en la sexta Intensity B, en la séptima los segundos de la secuencia de la válvulas, en la octava la temperatura de la cámara de referencia en la parte de arriba, en la novena la temperatura de la parte debajo de la cámara, la décima es la temperatura de la parte de arriba de la cámara de muestreo, la décima primera es la temperatura de la parte debajo de la cámara de muestreo y la última columna se encuentra la fecha y hora exacta que se grabaron los datos. En la Figura 69, se muestra el archivo texto.

4.6 Visualización de la Página Web del Proyecto

USFQ-MOPS

El acceso a la página web del proyecto es mediante la dirección <https://172.21.228.110/USFQ-MOPS.html>, siempre y cuando la computadora se encuentre conectada a la misma red LAN de la computadora del proyecto. La página web publicada se observa en la Figura 70.

La página web solo muestra el *Front Panel*, con las pestañas y el sistema SCADA diseñado para el proyecto. La página permite cambiar las variables del sistema de control haciendo un clic sobre las ilustraciones, pero antes se debe colocar la contraseña correcta. Además se pueden observar las demás graficas obtenidas de los datos en tiempo real.

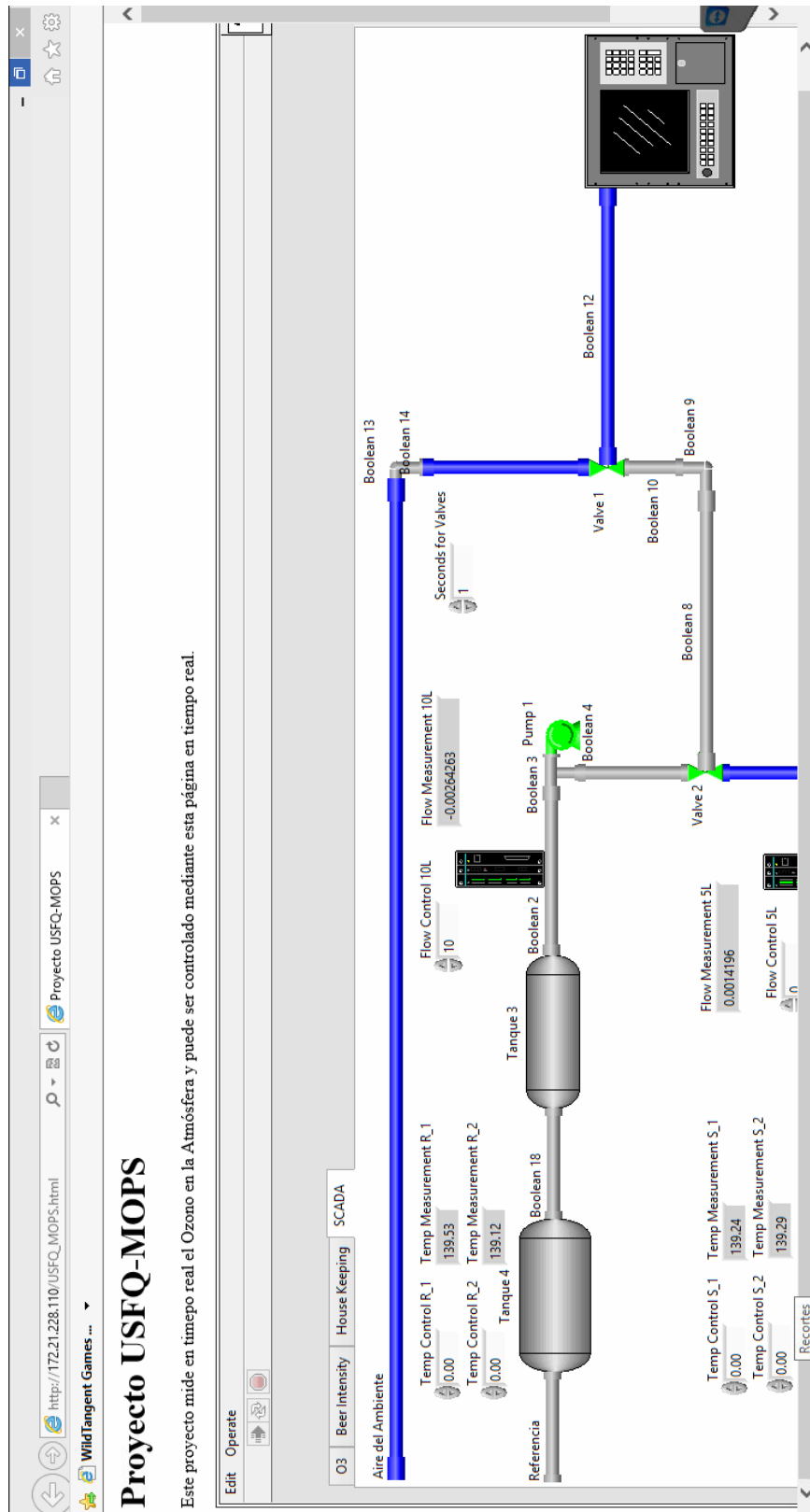


Figura 70.- Página web diseñada y publicada en la red LAN de la computadora.

CAPÍTULO 5:Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

El diseño e implementación del sistema SCADA para el proyecto USFQ-MOPS fue ejecutado de manera satisfactoria y es de gran ayuda para realizar investigaciones para los futuros ingenieros ambientales que requieran realizar lecturas del sensor USFQ-MOPS.

El sistema SCADA permite monitorear en tiempo real el sensor USFQ-MOPS, medir y controlar las variables del proceso como: regular los flujos de entrada hacia el analizador, observar la temperatura en las cámaras y observar los gráficos obtenidos con los datos del analizador de ozono.

Los elementos seleccionados para la construcción del sistema de control resultaron ser los óptimos para el proyecto. Además, de ser fáciles de programar se pueden encontrar ampliamente en el mercado local lo que permitirá reemplazar y dar mantenimiento al sistema rápidamente en un futuro.

La DAQ, NI USB-6009, fue el principal dispositivo para realizar el sistema SCADA, ya que no solo se utilizó para adquirir las señales del analizador de ozono, de los sensores de temperatura y de los controladores de flujo, sino también para generar las señales del control de la secuencia de las válvulas y el control de flujo de aire.

El control de la temperatura de las cámaras no está dentro del alcance del proyecto. Sin embargo, la programación del control esta realizado en el archivo

para que posteriormente, se encuentre el modelo que se ajuste a las cámaras, se calcule las constantes del controlador y finalmente, solo introducir las constantes del controlador en el programa.

El diseño de la página web es necesario para monitorear de manera remota lo que sucede con la planta MOPS. Sin embargo, solo se pudo lograr la publicación dentro de la red LAN a la que está conectada el computador, esto se debe a que los routers de la USFQ poseen protocolos que impiden la salida hacia la red mundial.

5.2 Recomendaciones

El cableado eléctrico de todos los componentes es de mucha importancia al momento de construir el proyecto, por lo que se recomienda colocar un etiquetado claro y consistente a todos los cables para prevenir cualquier confusión si por alguna razón se desconectaran, caso contrario afectaría al sistema SCADA.

Los sensores utilizados para la temperatura de las cámaras son muy sensibles a la radiación UV, en este proyecto no afectan a las mediciones realizadas por el sensor USFQ-MOPS sin embargo se debe tomar en cuenta para tomar las precauciones respectivas.

Para el control de temperatura, se debe encontrar un modelo matemático que se ajuste a las cámaras de referencia y muestreo. De esta manera, el control funcionará de la manera adecuada.

La DAQ, NI USB-6009, fue de gran ayuda en el proyecto, sin embargo, se necesitaron más entradas analógicas, por lo cual se necesitó utilizar un segundo dispositivo de las mismas características. En un futuro, se recomienda el uso de

una DAQ con más entradas y salidas análogas lo cual disminuirá el espacio ocupado por los dos dispositivos NI USB-6009.

En cuanto a la publicación en línea de la página web, se recomienda obtener una dirección IP con un puerto designado que permita la salida de información a la red mundial para poder observar y controlar la planta desde cualquier parte del mundo.

Referencias

- Atkins, P., & Jones, L. (2005). *Principios de Química: Los caminos del descubrimiento*. Madrid: Panamericana.
- Barnes, J., & Mauersberger, K. (1987). *Temperature dependence of the ozone absorption cross-section at the 253.7 nm mercury line*.
- Barr, M. (31 de Agosto de 2001). *Introduction to Pulse Width Modulation*. Obtenido de Embedded: <http://www.embedded.com/electronics-blogs/beginner-s-corner/4023833/Introduction-to-Pulse-Width-Modulation>
- Cazorla, M. and Brune, W. H. (2010). Measurement of Ozone Production Sensor, *Atmos. Meas.Tech.* 3,545-555. doi:10.5194/amt-3-545-2010
- Cazorla, M., Brune, W. H., Ren, X., and Lefer, B. (2012). Direct measurement of ozone production rates in Houston in 2009 and comparison with two estimation methods, *Atmos. Chem. Phys.* 12,1203-1212. doi:10.5194/acp-12-1203-2012
- Dakota Instruments. (2012). *Mass Flow Controller GC*.
- Deshmukh, A. (2007). *Microcontrollers [Theory and Applications]*. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- Díaz, C. (n.f.). *Eléctronica*. Obtenido de LM35 -- Sensor de temperatura de precisión: <http://electronica.webcindario.com/componentes/lm35.htm#>
- Dorf, R., & Svoboda, J. (2010). *Introducción a los Circuitos Eléctricos*. Jefferson City: Alafaomega.
- Festo. (n.f.). *Válvulas y terminales de válvulas*. Mexico D.F.
- Fuentes, X., Castiñeiras, M., & Queraltó, J. (1998). *Bioquímica clínica y Patología molecular*. Barcelona: Reverté S.A.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. (Autor, Ed.) Obtenido de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf
- Knapp, E. (2011). *Industrial Network Security. Securing Critical Infrastructure Networks for Smart Grid, SCADA, and Other Industrial Control Systems*. (J. Broad, Ed.) Waltham, MA: Elsevier.
- Macaulay, T., & Singer, B. (2011). *Cybersecurity for Industrial Control Systems SCADA, DCS, PLC, HMI, and SIS*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- MathWorks. (2014). *Introduction to Automatic PID Tuning*. Obtenido de <http://www.mathworks.com/help/slcontrol/ug/pid-tuning-algorithm.html>

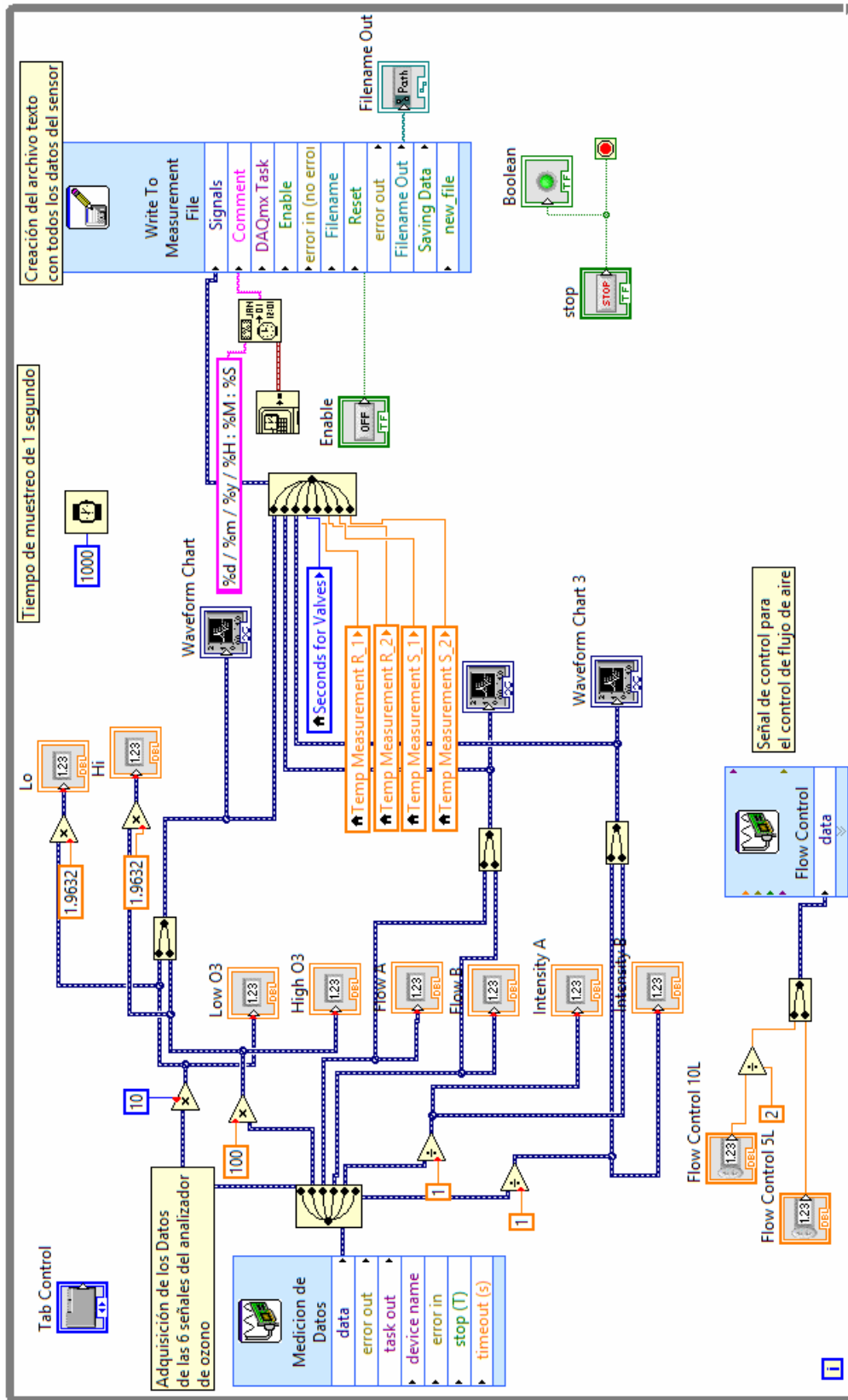
- Mazzone, V. (2002). *Controladores PID*. Obtenido de Universidad Nacional de Quilmes:
<http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>
- Medir Temperatura*. (n.f.). Obtenido de Sensor de Temperatura:
<http://medirtemperatura.com/sensor-temperatura.php>
- Morris, A. S., & Langara, R. (2012). *Measurement and Instrumentation. Theory and Application*. San Diego, CA: Elsevier.
- Mukhopadhyay, S. (2013). *Intelligent Sensing, Instrumentation and Measurements*. New York: Springer Heidelberg.
- National Instruments. (29 de Febrero de 2008). *Getting Started with LabVIEW Virtual Instruments*. Obtenido de National Instruments:
<http://www.ni.com/white-paper/7001/en/>
- National Instruments. (2012). *¿Qué es Adquisición de Datos?*
- National Instruments. (2012). *Flat Sequence Structure*.
- National Instruments. (2012). *For Loop*.
- National Instruments. (2012). *Sensores de Temperatura*.
- National Instruments. (2014). *Módulo NI LabVIEW Datalogging and Supervisory Control (DSC)*.
- National Instruments. (n.f.). *¿Por qué usar LabVIEW?* Obtenido de National Instruments: http://www.ni.com/academic/why_labview/esa/
- National Instruments. (2012). *User Guide and Specifications NI USB-6008/6009 Bus-Powered Multifunction DAQ USB Device*.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid: Pearson Education.
- PCB. (2 de Agosto de 2013). Obtenido de Tech Terms:
<http://www.techterms.com/definition/pcb>
- Petrucci, R., Harwood, W., & Herring, F. (2002). *Química General* (8va ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- Serway, R., & Faughn, J. (2001). *Física*. México D.F.: Pearson Education.
- Texas Instruments. (2013). *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*.
- Thermo Fisher Scientific Inc. (2009). *Ozone Analyzer, Model 49i UV Photometric gas analyzer*. Franklin, MA, USA.
- Thermo Fisher Scientific, Inc. (2009). *Ozone Analyzer, Model 49i*. Franklin, MA, USA: Thermo Fisher Scientific, Inc.
- Vishay. (2012). *Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection*.
- Visioli, A. (2006). *Practical PID Control*. London: Springer.

Walton, H. F., & Reyes, J. (2005). *Análisis químico e instrumental moderno*. Barcelona: Editorial Reverté.

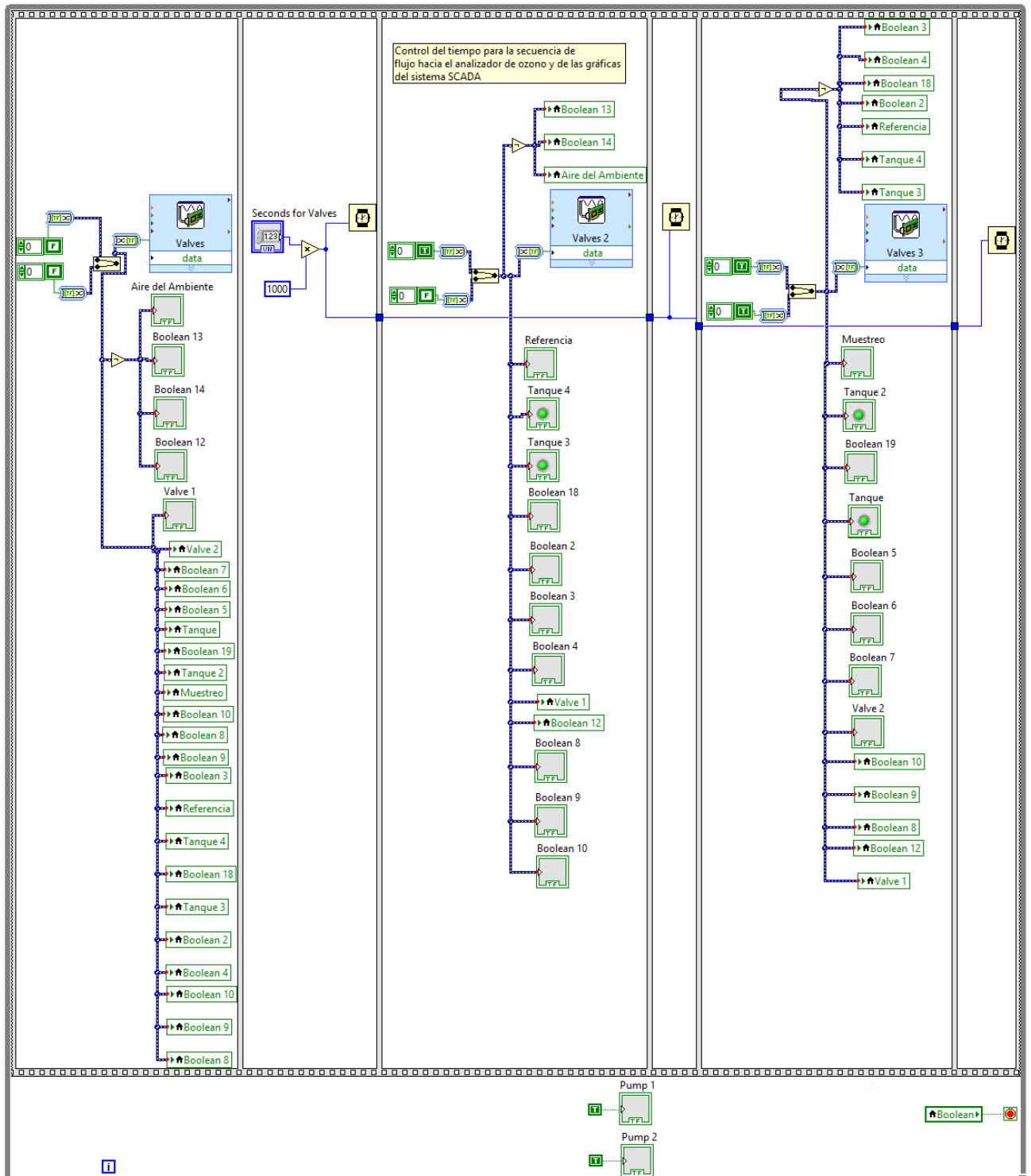
Welcome to Proteus Design Suite Version 8.1. (s.f.). Obtenido de Labcenter Electronics: <http://www.labcenter.com/index.cfm>

Anexos

Anexo 1. Programa para la adquisición de los datos del analizador de ozono y de la creación del archivo texto.



Anexo 2. Programa para el control de flujo de aire hacia el analizador de ozono.



Anexo 3. Programa para medir controlar la temperatura de las cámaras

