

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Diseño e Implementación del Sistema de Control y Adquisición de Señales
para un Sensor de Ozono (O₃) de Doble Canal y un Detector para
experimentos en la EMA-USFQ**

Mijail Esteban Bolaños Cano

Luis Caiza, M.Sc, Director de Tesis

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

Quito, Mayo 2015

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**Colegio de Ciencias e Ingeniería****HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS**

**Diseño e Implementación del Sistema de Control y Adquisición de Señales
para un Sensor de Ozono (O₃) de Doble Canal y un Detector para
experimentos en la EMA-USFQ**

Mijail Esteban Bolaños Cano

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, PhD.
Directora del Proyecto en la EMA-USFQ
Miembro del Comité de Tesis

Ximena Córdova, PhD.
Decana de la Escuela de Ingeniería

Quito, mayo 2015

© 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: Mijail Esteban Bolaños Cano

C. I.: 1714278791

Lugar: Cumbayá

Fecha: Mayo, 2015.

DEDICATORIA

A mis amados Padres, Edgar y María, quienes han dedicado toda su vida, amor y esfuerzo para concederme la herencia más valiosa que existe en el mundo, la educación. Mi gratitud infinita hacia ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A María del Carmen Cazorla, Luis Caiza y Miguel Bravo por el apoyo constante, asesoría y confianza entregada para el desarrollo de este proyecto en la Estación de Mediciones Atmosféricas de la Universidad San Francisco de Quito (EMA-USFQ).

A mis profesores Nelson Herrera, Omar Aguirre y Diego Benítez por todo el conocimiento transmitido durante los años de estudio y su disponibilidad constante de ayuda en mi aprendizaje.

A la Universidad San Francisco de Quito por haberme brindado una educación de alto nivel académico y oportunidades únicas para mi desarrollo personal como profesional.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad principal desarrollar los componentes de control y adquisición de señales de un equipo experimental de detección de ozono (O_3) de sensibilidad mejorada utilizando el principio de la ley de Lambert-Beer. El desarrollo del equipo implementa técnicas de manejo de información digital, control automático, y desarrollo de aplicaciones SCADA para ser utilizado en diferentes experimentos de la Estación de Mediciones Atmosféricas de la Universidad San Francisco de Quito (EMA-USFQ). Por ejemplo: en estudios de cámaras ambientales y en ejercicios de calibración e intercomparación de los datos de otros sensores de ozono.

El proyecto tiene tres partes fundamentales: el diseño e implementación del hardware, el software y finalmente la adquisición y procesamiento de la señal en una interfaz gráfica. El hardware es la construcción de la planta con la banca óptica de doble canal y un detector de sensibilidad mejorada donadas por Penn State Meteorology, con los componentes necesarios que ayudan a adquirir las señales digitales desde este sensor de ozono que cuenta con un sistema de control correspondiente. El software son las herramientas virtuales de instrumentación para el control y monitoreo del sensor de ozono, es decir la programación del sistema SCADA en LabVIEW más un control digital programado en Arduino como sistema embebido. Finalmente, la presentación de la señal cruda y su promedio expresada en la interfaz de LabVIEW.

ABSTRACT

This study primarily aims to develop control and signal acquisition components for an experimental ozone (O_3) detector with improved sensitivity using the Lambert–Beer law. This instrument consists of digital information techniques, control engineering, and development of SCADA applications to be used in different experiments of the Atmospheric Measurements Station at San Francisco de Quito University (EMA- USFQ). Applications include environmental chamber studies and calibration and inter-comparison of data with other ozone sensors.

The project has three main parts: the design and implementation of hardware, software and finally the signal acquisition and processing in a graphical interface. Hardware development includes the construction of the plant with the dual channel optical bench and its improved detector sensitivity (donated by Penn State Meteorology) with the necessary components to help acquire the digital signals from the ozone sensor with its corresponding control system. The software component includes the virtual instrumentation tools to monitor and control the ozone sensor, i.e. the SCADA system programmed in LabVIEW and its digital control programmed in Arduino as an embedded system. Finally, the display of the raw signal and its average in the LabVIEW interface have been implemented.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	5
Agradecimientos	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
Tabla de contenidos	9
TABLAS y FIGURAS	11
Capítulo 1: Introducción	13
1.1. Antecedentes y Justificación	13
1.2. Objetivo General	16
1.3. Objetivos Específicos	16
Capítulo 2: Marco Teórico	17
2.1. Sensores	17
2.1.1. Principio Físico del Sensor de Ozono (O ₃).	17
2.1.2 Principio de la Ley de Lambert-Beer aplicado en la Banca Óptica.....	18
2.1.3 Sensor de Temperatura: Termistor Omega 44032	18
2.2 Actuadores	20
2.2.1. Válvulas Solenoides.....	20
2.2.2. Controlador de Flujo Másico.....	21
2.2.3. Motor de Pasos	22
2.3 Componentes Electrónicos	24
2.3.1 Arduino.....	24
2.3.2 Relés.....	26
2.3.3 Driver Motor de Pasos	28
2.3.4 Transistor MOSFET (Metal –Oxide –Semiconductor Field Effect Transistor)	29
2.3.5 Reguladores de Voltaje	30
2.3.6 Convertidores DC-DC	31
2.4 LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)	32
2.5 Tarjeta de Adquisición de Datos NI (DAQ)	32
2.6 Criterio de Selección de DAQ (Data Acquisition)	33
2.7 Sistema SCADA (Supervisory Control And Data Adquisition)	34
2.8 Sistema de Control y Monitoreo	35
2.8.1 Controlador Proporcional On-Off por Histéresis	35
2.9 Métodos de Sintonía de los Controladores	¡Error! Marcador no definido.
Capítulo 3: Desarrollo e Implementación	37

3.1 Desarrollo del hardware	37
3.1.1 Información General del Sistema.....	37
3.1.2 Circuito para Control de Temperatura.....	38
3.2. Acondicionamiento del Sensor de Temperatura (Termistor)	42
3.2.1 Circuito para el control de válvulas solenoides.....	46
3.2.2 Circuito Driver del Motor de Pasos.....	47
3.2.3 Montaje Mecánico y Eléctrico del Sistema	48
3.3 Desarrollo de Software	52
3.3.1 Información General del Sistema.....	52
3.3.2 Bloques del Sistema SCADA	53
3.3.3 Adquisición de Señales de la Banca Óptica.....	56
3.3.4 Software para Control ON/OFF de Válvulas Solenoides.	58
3.3.5 Programación de Control de Temperatura	60
3.3.6 Programación del Control de Flujo Másico.....	63
3.3.7 Programación del Control del Motor de Pasos.....	64
3.3.8 Programación para Lectura de Temperatura.....	66
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	68
4.1 Visualización del Sistema SCADA.....	68
4.2 Control de la Temperatura de la lámpara de mercurio.....	71
4.3 Control de Válvulas Solenoides	74
4.4 Control del Flujo Másico.....	76
4.5 Control de Motor de Pasos	78
4.6 Lectura del Sensor de Ozono O ₃	79
CAPÍTULO 5: Conclusiones y Recomendaciones	82
5.1 Conclusiones.....	82
5.2 Recomendaciones.....	84
Referencias	85
ANEXO A.- CÓDIGO DESARROLLADO EN ARDUINO PARA EL SISTEMA DE CONTROL DEL sensor de ozono (O₃) y TEMPERATURA.	87
Anexo B.- PARÁMETROS DE ACONDICIONAMIENTO DEL SENSOR	91
ANEXO C.- Secuencia del tipo de medio paso del motor NEMA17 (WordPress, 2015)	93
ANEXO D.- Planos Mecánicos	94
ANEXO E.- Planos Eléctricos-Electrónicos	97
ANEXO F.- Manual del Usuario entregado en la EMA-USFQ	97

TABLAS Y FIGURAS

Figura 1.- Diagrama del nuevo sensor de ozono de la EMA-USFQ.	14
Figura 2.-Banca óptica para el desarrollo del sensor de Ozono.....	18
Figura 3.-Diagrama y dimensiones del termistor 44032. (Omega, 2014)	19
Figura 4.-Curva característica de un termistor NTC, Ohmios vs °C (Omega, 2014).....	19
Figura 5.-Esquema Válvula 3 vías 2 posiciones normalmente abierta (GmbH, 2015).....	21
Figura 6.-Esquema Posiciones Válvula 3/2	21
Figura 7.-Esquema Controlador de Flujo Másico GC1 de Dakota Instruments	22
Figura 8.-Motor de Pasos Nema 17	23
Figura 9.-Etapas de alimentación (Domínguez, 2015)	23
Figura 10.- Microcontrolador Arduino UNO (Arduino, 2014).....	25
Figura 11.-Diagrama de un relé des energizado. (Corporation G., 2014)	27
Figura 12.-Módulo de dos relés 12V, 10A. (Extreme, 2014)	27
Figura 13.-Módulo Driver Motor de Pasos –Puente H L298N (Store, 2014).....	28
Figura 14.-Datasheet Transistor MOSFET IRF 540.....	29
Figura 15.- Fuente de 24Vdc de 10A.....	30
Figura 16.-Fuente de Voltaje 1800Vac para lámpara de mercurio	31
Figura 17.- Convertidor DC-DC de 5V a 40V de 3A.....	31
Figura 18.- Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ) NI USB-6009	34
Figura 19.-Banca Óptica de doble canal y un detector de sensibilidad mejorada donada por Penn State Meteorology.....	37
Figura 20.-Diseño del Circuito de control de temperatura	39
Figura 21.- Diseño PCB en 3D del circuito de control de temperatura.	40
Figura 22.-Banca Óptica (compartimento lámpara de mercurio y niquelina)	40
Figura 23.-Circuito MOSFET y niquelina (Smith, 2010).....	41
Figura 24.-Operación del MOSFET de la Figura 23 como conmutador (Smith, 2010)	41
Figura 25.-Circuito Acondicionador del Termistor Omega 44031	45
Figura 26.-Gráfico de la Temperatura vs Voltaje de Salida del Termistor 44032 linealizado.	45
Figura 27.-Diseño PCB en 3D del Circuito de Acondicionamiento del termistor 44032.....	46
Figura 28.- Módulo Relé 12VDC desde otro ángulo	46
Figura 29.- Diagrama de conexión circuito driver motor de pasos (PEITSCH.HNOS, 2014).....	48
Figura 30.- Diseño de la caja metálica para el sistema de control del sensor de ozono (O ₃) ..	50
Figura 31.- Caja de aluminio para evitar flujos de aire externos y facilitar el control de temperatura de la lámpara de mercurio.....	50
Figura 32.-Ubicación del sistema Óptico, Control y Potencia.....	51
Figura 33.- Interfaz gráfica - Panel Frontal desarrollado en LabVIEW para adquisición de señales del sensor de ozono.	54
Figura 34.- Diagrama de Bloques de Programación en LabView para adquisición y procesamiento de señales del sensor de Ozono O ₃ , control del flujómetro Dakota y envío de valor setpoint.....	55
Figura 35.- Diagrama de bloques de programación en LabView para monitoreo de temperatura de la lámpara de mercurio.....	55
Figura 36.- Programación del Sub VI para transformar el valor de Setpoint a un valor analógico (voltaje).	58
Figura 37.-Código en Arduino para control de válvulas solenoides a través del módulo relé.....	59

Figura 38.- Código que controla la señal de PWM que va al circuito de control de temperatura de la Figura 20.	60
Figura 39.-Código del Controlador proporcional por histéresis	62
Figura 40.-Pines de programación del controlador de flujo másico	63
Figura 41.-Bloques de programación para el control de motor de pasos bipolar. Resto de código se muestra en Anexos.....	65
Figura 42.-Programación en LabView para crear la interfaz gráfica del termistor y adquisición de valores de temperatura.....	66
Figura 43.-Interfaz Gráfica (Front Panel) del Termistor.	68
Figura 44.-SCADA del sensor de ozono de doble canal y un detector.....	70
Figura 45.-Ventana serial de Arduino.....	71
Figura 46.-Gráfico Temperatura (C) vs Tiempo (horas)	72
Figura 47.-Prueba controlador de temperatura con capacitor 10uF conectado a la entrada como filtro.....	73
Figura 48.-Formato de los valores de Temperatura obtenidos	74
Figura 49.-Curva resultante del sensor de ozono O3	75
Figura 50.-LEDs indicadores del usuario	76
Figura 51.- Presentación y Control de Flujo de aire	77
Figura 52.-Flujómetro 4100 de la marca TSI.....	78
Figura 53.-Máquina Generadora de Ozono	79
Figura 54.- Gráfico de las cuentas detectadas por el sensor de ozono cuando existe aire y ozono.....	80
Figura 55.-Plano Mecánico Banca Óptica del sensor de Ozono (O3)	94
Figura 56.-Plano mecánico completo del ensamblaje del sensor de Ozono (O3)	95
Figura 57.-Estructura Metálica del Sensor de Ozono (O3).....	96
Figura 58.-Plano Eléctrico del Sensor de Ozono (O3)	97
Tabla 1.-Especificaciones Técnicas de Arduino UNO	25
Tabla 2.-Resumen de parámetros y variables para la linealización del termistor Omega 44032	91

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes y Justificación

En la Estación de Mediciones Atmosféricas (EMA) de la USFQ P.I. (Principal Investigator, por sus siglas en inglés) M.Cazorla en colaboración con Penn State University, se requiere diseñar un sensor de ozono de sensibilidad mejorada para ser utilizado en diferentes experimentos de la EMA. Por ejemplo, en estudios de cámaras ambientales y en ejercicios de calibración y comparación con los datos de otros sensores de ozono.

Es preciso indicar que en la EMA de la Universidad San Francisco de Quito existe un equipo comercial, el Analizador de Ozono modelo 49i de Thermo Electron Corporation. Este equipo utiliza tecnología fotométrica UV y mide la cantidad de ozono en el aire ambiente en unidades de fracciones (*ppbv, pbmv*) o concentraciones (μgm^{-3}). (Corporation T. E., 2014).

El modelo 49i es un fotómetro de dos celdas aceptado por la U.S EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) para monitoreo de ozono en el aire ambiente. El sensor Thermo 49i disponible en la EMA fue adquirido con fondos TWAS UNESCO 2013 asignados a P.I. M.Cazorla.

Por el alto costo y tecnología del equipo 49i, así como también para cuidar la infraestructura y desempeño del mismo, éste no puede ser utilizado para realizar nuevos experimentos en los que se requiera modificar sus componentes internos, sino que está dedicado exclusivamente al monitoreo ambiental en forma continua. Por lo tanto, se requiere construir un equipo experimental de similares prestaciones con el uso de una banca óptica de doble canal, un detector de sensibilidad mejorada (donadas por Penn State Meteorology)

utilizando el principio de la ley de Lambert-Beer, y además la implementación de herramientas virtuales de instrumentación para el monitoreo y control del mismo.

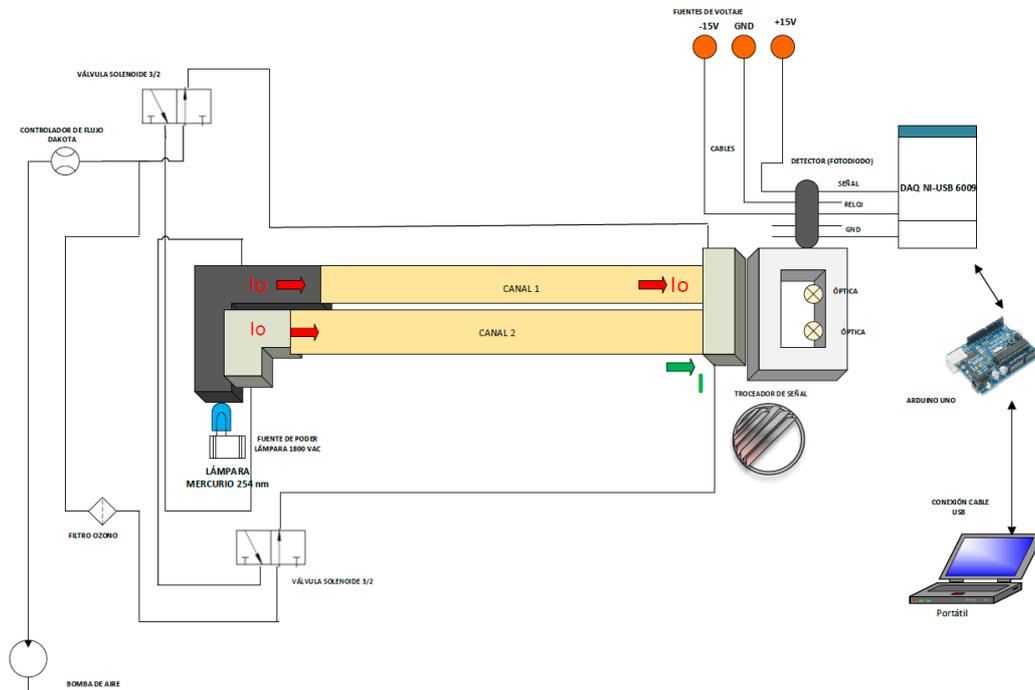


Figura 1.- Diagrama del nuevo sensor de ozono (O_3) de la EMA-USFQ.

En la Figura 1, se representa el diagrama del sensor de ozono que se compone de una bomba de aire que hace circular cierta cantidad de flujo que debe ser regulado en un rango de 1 a 5 litros/min con un controlador de flujo antes de ingresar a los dos canales ópticos del sensor. Para que exista un flujo alternado de aire ambiente y aire sin ozono, se implementan dos válvulas solenoides para que en un determinado tiempo permitan el paso de uno de los dos gases en los canales ópticos del sensor. Al extremo izquierdo de la banca óptica existe un compartimento en el cual ingresa una lámpara de mercurio de 254nm alimentada por una fuente de voltaje de 1800V_{AC}. Ésta lámpara genera una intensidad de luz (I_o) que va a pasar por los dos caminos ópticos y va a ser atenuada por la presencia del aire ambiente con ozono por lo que al ser detectada por el fotodiodo del sensor de ozono va a tener una intensidad de

luz distinta denominada (I). Existe un detector que es un fotodiodo al extremo derecho de la banca óptica del sensor y se requiere que solo detecte una señal de intensidad de luz provenientes de los dos canales, por lo que se implementa un troceador de señal accionado por un motor de pasos para que cubra a una señal y el detector de sensibilidad mejorada solo adquiera un dato de uno de los dos canales.

La sensibilidad mejorada es por la existencia de un solo detector (fotodiodo) que tiene una electrónica mejorada.

Las dos distintas intensidades de luz “I” e “Io” nos permiten tener el valor de la transmitancia que es la división de estos dos valores y así proceder a aplicar la ley de Lambert-Beer.

Para el óptimo funcionamiento del sistema de control y adquisición de la señales del sensor de ozono se debe mantener la temperatura del compartimento de la lámpara de mercurio en un rango mínimo de 50 a 60 grados centígrados por lo que es necesario el uso de un termistor como sensor de temperatura y programar un control de temperatura en un microcontrolador como la tarjeta Arduino Uno. Por otro lado, con la tarjeta DAQ NI-USB 6009 se realiza la adquisición y procesamiento de las señales del detector de la banca óptica parte del sensor de ozono. Éstas variables se conectan a la DAQ para ser monitoreadas por la interfaz gráfica de LabVIEW y en el caso del control de temperatura, se envía un valor de *setpoint* (valor de temperatura deseada) al microcontrolador Arduino para que éste haga el respectivo control.

1.2. Objetivo General

Desarrollar tanto el Hardware como Software que permitan controlar el funcionamiento y adquirir señales de un nuevo sensor de ozono (O_3) para experimentos en la EMA-USFQ.

1.3. Objetivos Específicos

- Diseñar el diagrama mecánico y eléctrico para el nuevo sensor de ozono.
- Definir un método de control de temperatura para el compartimento de la lámpara de mercurio.
- Especificar el funcionamiento y control de las válvulas solenoides conjuntamente con el controlador de flujo másico.
- Establecer los parámetros de funcionamiento y control del motor de pasos para la adquisición de la señal deseada a través de un troceador de señal.
- Mostrar las señales crudas de voltaje e intensidad de luz en unidades de cuentas en una interfaz gráfica.
- Ensamblar todas las piezas mecánicas y eléctricas del sistema de control y adquisición de señales del sensor de ozono.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describe la parte teórica de los componentes electrónicos que forman parte del sensor de ozono para el uso de los mismos en la adquisición y control del equipo.

2.1. Sensores

Un sensor es un dispositivo que a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida eléctrica que es función de la variable medida. Un sensor condiciona la sensibilidad, exactitud y estabilidad de un instrumento de medida (Areny, 2005). A continuación se presenta los sensores utilizados.

2.1.1. Principio Físico del Sensor de Ozono (O₃).

El principio de la Ley de Lambert-Beer establece que la intensidad de un haz de luz colimado que pasa a través de un medio se atenúa debido a la absorción causada por el medio (Iftak Husain, 2013). La intensidad de la luz recibida varía según la ecuación (1).

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

Donde I es la intensidad de luz atenuada por absorción, I_0 es la intensidad de luz medida sin absorción, L [cm] es el camino óptico por donde se propaga la luz, N es la concentración de O₃ [moléculas/cm³] que existe en el canal y ζ es la sección transversal del camino [cm²/molécula].

2.1.2 Principio de la Ley de Lambert-Beer aplicado en la Banca Óptica.

En la banca óptica, la intensidad de un haz de luz generada por la lámpara emisora de mercurio de longitud de onda de 254nm pasa por los dos canales del sensor de ozono. Estos canales son caminos ópticos de longitud L por los que circula alternadamente cada diez segundos aire ambiente con ozono y aire sin ozono a ciertas concentraciones N . El haz de luz que atraviesa por los caminos ópticos se ve atenuado por el aire ambiente con ozono y se obtiene una intensidad de luz “ I ”; y, se obtiene “ I_0 ” del canal de aire sin ozono. También, existe una constante denominada ζ que es la sección transversal de absorción del ozono a 254nm con un valor de $1.136 * e^{-17} \text{ cm}^2$ por molécula (Max-Planck-Gesellschaft, 2015).

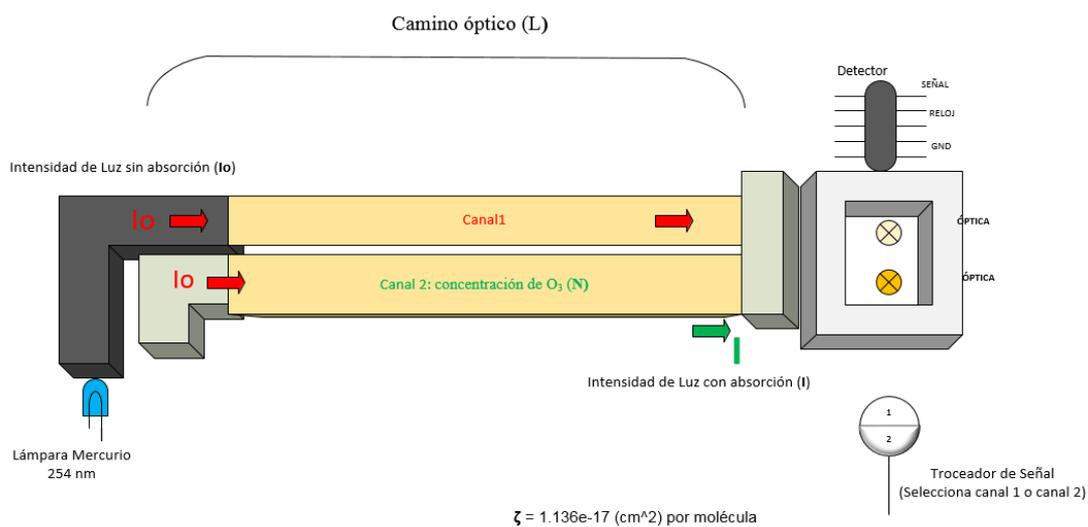


Figura 2.-Banca óptica para el desarrollo del sensor de Ozono (O_3).

2.1.3 Sensor de Temperatura: Termistor Omega 44032

Para determinar la temperatura de la lámpara y luego realizar el control de la misma, se puede utilizar sensores de temperatura tales como: termocuplas, RTDs (Resistance Temperature Detectors), circuitos integrados (IC) y termistores. En este proyecto se usan

termistores de la marca Omega modelo 44032 que son resistencias térmicamente sensibles al cambio de temperatura. Estos termistores son de tipo NTC (Negative Temperature Coefficient) y deben ser linealizados debido a que este tipo de sensor tiene un cambio no lineal en su resistencia. Las razones para la selección de este sensor son: la gran resolución por grado de temperatura, su alto nivel de repetitividad y estabilidad (± 0.1 °C), pequeño tamaño, y elevada velocidad de respuesta a cambios de temperatura. (Omega, 2014).

En la Figura 3, se presenta el diagrama y dimensiones del termistor 44032 de la marca Omega y en la Figura 4, su curva característica que relaciona la resistencia con la temperatura.

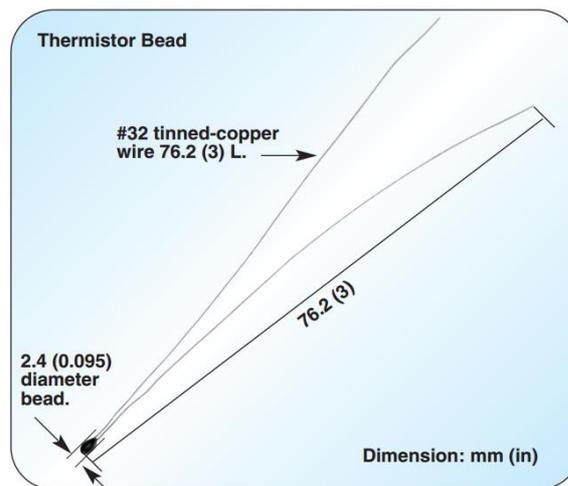


Figura 3.-Diagrama y dimensiones del termistor 44032. (Omega, 2014)

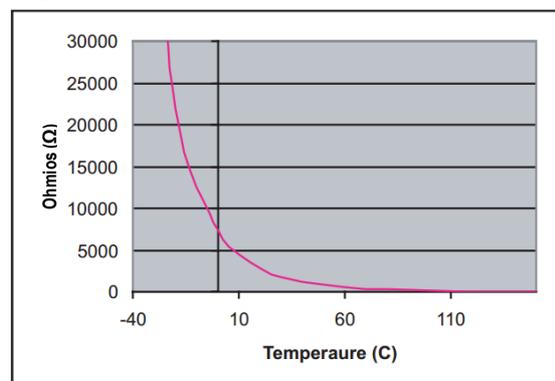


Figura 4.-Curva característica de un termistor NTC, Ohmios vs °C (Omega, 2014)

Por otro lado, el termistor está hecho de una mezcla de metales y óxido y su revestimiento es epoxica y este tipo de sensor 44032 Omega tiene una temperatura máxima de trabajo de 75°C (165°F). Su resistencia a 25°C es de 30000(Ω). (Omega, 2014)

2.2 Actuadores

Un actuador es un elemento de accionamiento capaz de transformar la energía, neumática, eléctrica, hidráulica entre otras, en energía mecánica. Éste recibe la orden de un controlador y genera la orden para activar un elemento final. (Posada, 2014). En el presente proyecto se tiene como actuadores electrónicos las válvulas solenoides, controlador de flujo másico y el motor de paso; y, como actuador neumático la bomba de aire, todos éstos presentados en la Figura 1.

2.2.1. Válvulas Solenoides

Las válvulas de solenoide permiten un control on-off del paso del flujo de aire u ozono por el canal 1 y 2 del sensor de ozono, mediante variaciones de corriente eléctrica en su bobina. (Carvallo Juan Pablo, 2003). En el proyecto se las utiliza para el control del flujo del aire que genera la bomba como se muestra en la Figura 1.

Las válvulas son de la marca VALCOR, modelo SV75P60T-1. Son válvulas de 3 vías, sus puertos son de 1/4 – 28, el tamaño de sus orificios son de 0.095", su presión máxima de funcionamiento es de 30 PSI, su alimentación es de 12 V_{DC}, su potencia es de 4.2 Watts y su volumen interno es de 121ul. (Corporation V. E., 2014).

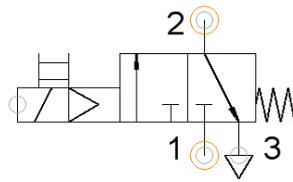


Figura 5.-Esquema Válvula 3 vías 2 posiciones normalmente abierta (GmbH, 2015).

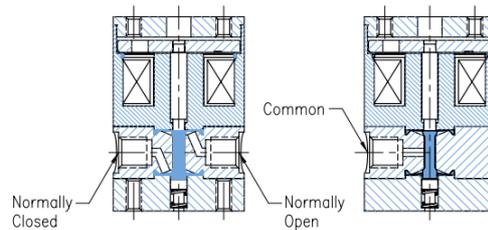


Figura 6.-Esquema Posiciones Válvula 3/2

De acuerdo a la Figura 5 y Figura 6, cuando la válvula está normalmente cerrada (sin accionamiento), 2 está comunicada con 3 y 1 está cerrada. Pero si se acciona la válvula, ésta se desplaza hacia la derecha permitiendo el paso de aire de 1 hacia 2.

La válvula tiene dos cables para su conexión eléctrica, uno de alimentación y otro de tierra. El cable de alimentación se conecta al puerto normalmente abierto de la tarjeta de relé de la Figura 12 y el otro a tierra en una bornera.

2.2.2. Controlador de Flujo Másico

El controlador de flujo másico permite regular el flujo de aire que ingresa a los canales 1 y 2 del detector proveniente de la bomba en un rango de 1 a 5 litros por minuto. En el proyecto se usa un controlador de flujo de la empresa Dakota Instruments, su modelo es el GFC con número serial 357255-1. Este funciona a 12 V_{DC} y consume 800 mA de corriente. Contiene un fusible reajutable de 50Vdc y 1.6A que funciona como protección ante una posible sobrecarga.

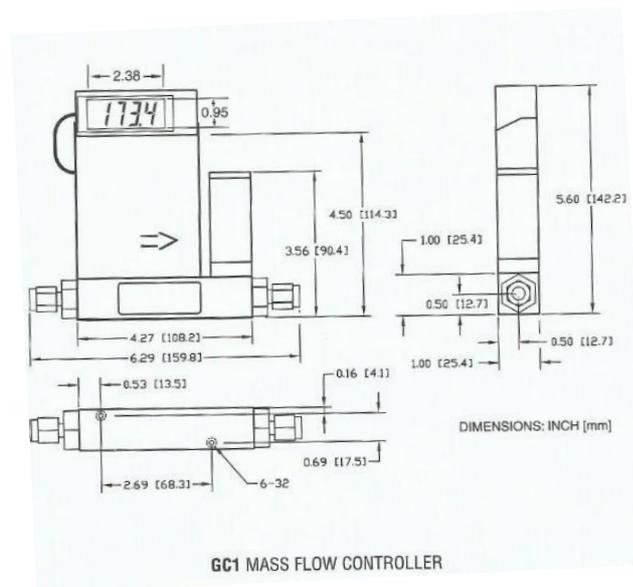


Figura 7.-Esquema Controlador de Flujo Másico GC1 de Dakota Instruments

El principio de funcionamiento del controlador de flujo de la Figura 7 es de presión diferencial provocada por elementos primarios como placa orificio, toberas, tubos Venturi. Esta presión diferencial se deriva hacia un paso reducido, donde la presión se mide y a partir de ella se puede determinar la velocidad del caudal para un fluido de densidad constante. (al., 2005) Según la ecuación de Bernoulli, la velocidad del fluido aumenta de v_1 en la tubería general a v_2 en el paso estrecho. En consecuencia, la presión dinámica (p_{din}) aumenta y presión estática (p_{estat}) disminuye en la relación correspondiente a las diferentes velocidades del fluido.

2.2.3. Motor de Pasos

Un motor de pasos es un motor que funciona a corriente continua, no tiene escobillas, es síncrono y divide una rotación completa en un número discreto de pasos a través de un control digital. Estos pasos rotan un número específico de grados, generalmente 1.8° . El ángulo de rotación es proporcional a la entrada de pulso que se le proporcione. Si se

incrementa la frecuencia de los pulsos digitales, el movimiento de los pasos aumenta y se hace una rotación continua. Asimismo, son motores de bajo costo, alto de torque a velocidades bajas, precisos en el posicionamiento, buena respuesta al arranque, parada y reversa del mismo, el control es sencillo al responder a los pulsos. (Omega, 2014). Hay una variedad de circuitos integrados para controlar la velocidad del mismo.

En la Figura 8, se presenta el modelo mecánico del motor de pasos que se usa en este proyecto para el control de posiciones del troceador de señal



Figura 8.-Motor de Pasos Nema 17

Este motor es bipolar por lo que tiene dos bobinas internas (A-B & C-D) que son activadas, ya sea una o dos bobinas a la vez para que el rotor se alinee entre las posiciones de los cuatro polos existentes tal como se muestra en la Figura 9.

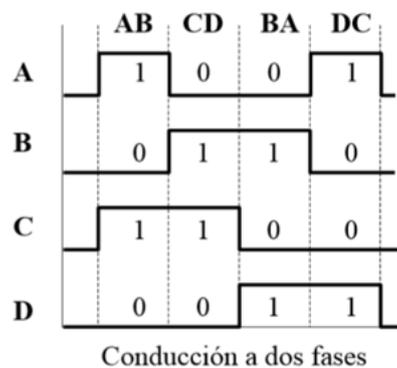


Figura 9.-Etapas de alimentación (Domínguez, 2015)

Para tener un movimiento del rotor en cierta dirección se debe dar un valor de tensión positivo en un extremo de la bobina y tensión negativa en el otro, y para que el rotor se posicione entre dos polos se activa dos bobinas a la vez (Domínguez, 2015).

Este motor NEMA 17 pesa 0.4Kg, y en cada paso gira $1.8 \pm 5\%$ grados. Se energiza a 12 V_{DC} y consume una corriente de 1.2 A/fase. Tiene una resistencia de $10.0 \pm 10\% \Omega$ /fase, inductancia de $20 \pm 20\%$ mH/fase, viene con 4 cables (negro, verde, rojo, azul), y el torque del rotor es de 68 g.cm^2 .

2.3 Componentes Electrónicos

Los dispositivos que forman parte de los principales circuitos electrónicos son: un microprocesador Arduino UNO que permite disponer de un sistema embebido junto con la tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6009, relés electromecánicos que permiten la activación de las válvulas solenoides, un puente H I298N para controlar el motor de pasos y un MOSFET que realiza el control de temperatura de la niquelina.

2.3.1 Arduino

Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware libres y fáciles de usar. El microcontrolador está programado con el lenguaje Arduino (basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing). Los proyectos en Arduino pueden ser autónomos o pueden comunicarse con el software que se ejecuta en un ordenador, por ejemplo: Flash, Processing, MaxMSP. (Arduino, 2014).

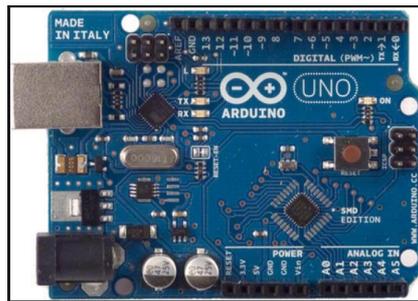


Figura 10.- Microcontrolador Arduino UNO (Arduino, 2014)

Las características técnicas del microcontrolador tales como su voltaje de funcionamiento, cantidad de entradas y salidas analógicas y digitales entre otras características se resumen en la Tabla 1.

Microcontrolador	ATmega328
Voltaje de funcionamiento	5V
Alimentación (recomendada)	7-12V
Voltaje máximo de entrada(no recomendado)	20V
Pines digitales I/O	14 (de los cuales 6 dan salida PWM)
Pines de entrada analógica	6
Corriente DC por I/O Pin	40 mA
Corriente DC para el pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	32 KB (ATmega328) 0.5 KB usados por el bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Velocidad de reloj	16 MHz

Tabla 1.-Especificaciones Técnicas de Arduino UNO

Para la conversión de entradas de señales analógicas a salidas digitales, la tarjeta Arduino utiliza un conversor A/D de 10 bits, es decir que la resolución es la división del voltaje de referencia (5V) para el valor de 1024 ($2^{10} = 1024$). De este modo, la tarjeta mapea los valores de voltaje de entrada entre 0V a 5V a valores enteros entre 0 a 1023 para

caracterizar a los sensores analógicos del sistema de control del sensor de ozono. (Arduino, 2014)

El microcontrolador Arduino también genera señales PWM (Pulse Width Modulation-Modulación por Ancho de Pulso) para usar en procesos de control digital. Esta es una técnica para obtener resultados analógicos con medios digitales. Con un control digital se crea una señal cuadrada que cambia de encendido a apagado para simular voltajes de 5V en encendido y 0V en apagado con el cambio de proporción del tiempo de la señal pasa encendida versus el tiempo que pasa apagada. La duración del tiempo de encendido se lo denomina ancho de pulso. De esta forma para variar valores analógicos, se debe cambiar o modular el ancho de pulso. (Arduino, 2014)

2.3.2 Relés

Un relé es un conmutador electromecánico que permite el flujo de corriente en un circuito. Un relé consta de un electroimán y una barra de hierro, llamado armadura. Un contacto móvil está conectado a la armadura de tal manera que el contacto se mantiene en su posición normal mediante un resorte. Cuando se energiza el electroimán, se ejerce una fuerza electromagnética sobre la armadura que supera la fuerza del resorte y se mueve el contacto de modo que se rompe un circuito y cierra otro. Cuando el electroimán es des energizado, el contacto vuelve a su posición original (Encyclopedia, 2014) como se muestra en la Figura 11.

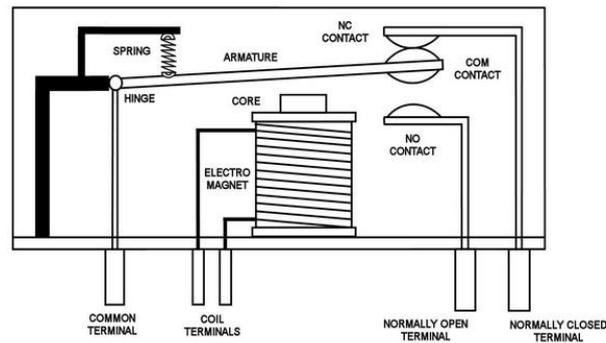


Figura 11.-Diagrama de un relé des energizado. (Corporation G., 2014)

La activación de las electroválvulas es fundamental para el sensor de ozono debido a que al ser éste de doble canal, se debe activar el paso de aire ambiente con ozono y aire sin ozono por cada canal por un determinado tiempo y de forma alternada. Para esto, se usa un módulo de dos relés electromecánicos como se presenta en la Figura 12.



Figura 12.-Módulo de dos relés 12V, 10A. (Extreme, 2014)

Este módulo funciona con un voltaje de activación de 12V_{DC} y como acciona una de las dos válvulas solenoides a la vez, el consumo de activación por bobina es alrededor de 0,35A debido a que cada válvula tiene una potencia de 4.2 Watts.

Una vez que la tarjeta de relé se active a través de un pulso binario desde la tarjeta Arduino, el estado pasa a normalmente cerrado y se energiza la válvula con 12VDC y deja pasar el flujo de aire.

2.3.3 Driver Motor de Pasos

Para el control del motor de pasos NEMA 17 presentado en la Figura 8, se usa un módulo driver de motor de la Figura 13. Se necesita un módulo driver debido a que éste es un convertidor de potencia que ayuda al Arduino a manejar valores de corrientes altas para activar o desactivar las dos bobinas del motor bipolar de pasos y evitar daños por cargas inductivas.



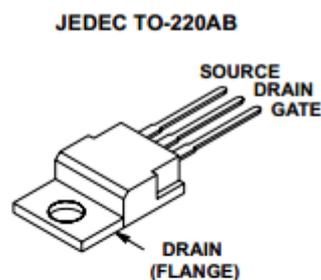
Figura 13.-Módulo Driver Motor de Pasos –Puentes H L298N (Store, 2014)

Este módulo se energiza a 12V y soporta hasta 4A, tiene un puente H L298N que permite aplicar tensión positiva en el motor haciéndolo girar en un sentido y también, puede invertir el voltaje y cambiar la dirección de giro del motor. Contiene diodos de protección para proteger al controlador del motor de las cargas inductivas por la existencia de las bobinas del motor, y un regulador de voltaje LM7805 que suministra 5V_{DC} a la parte lógica del puente H L298N. El módulo tiene borneras para las salidas A y B. La salida A con los puertos OUT₁ y OUT₂ y la salida B por OUT₃ y OUT₄. Para el control del módulo, que lo realiza el Arduino, se usa los pines IN1, IN2, IN3 y IN4 que son los terminales de control. (Cruz, 2015)

2.3.4 Transistor MOSFET (Metal –Oxide –Semiconductor Field Effect Transistor)

EL MOSFET es un dispositivo semiconductor de tres terminales, dominante en la industria de semiconductores. Físicamente, éste es un capacitor-MOS con dos uniones *pn* ubicadas adyacentemente a la región del semiconductor controlada por la compuerta MOS. (Pierret, 1996). En la Figura 14 se presenta el diagrama del transistor MOSFET IRF 540:

Packaging



Symbol

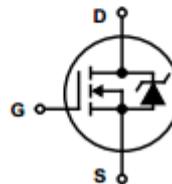


Figura 14.-Datasheet Transistor MOSFET IRF 540

El MOSFET se lo usa desde amplificación de señales, lógica digital y memoria. El principio es el uso del voltaje entre dos terminales (Gate-Source) para controlar la corriente que fluye en el tercer terminal (Drain). La corriente en este tercer terminal puede variar de cero a un valor grande, por lo que permite al dispositivo actuar como un switch o conmutador. (Smith, 2010). El terminal de compuerta (Gate) se conecta al microcontrolador Arduino a través de una impedancia de entrada de 220k Ω como acondicionamiento, el terminal de fuente (source) se conecta a tierra y el terminal de control de corriente que es la

compuerta drenaje (Drain) va conectado a la niquelina de $4,2 \Omega$, y está según la señal PWM envía el respectivo voltaje para calentar la niquelina según el valor deseado que se ingrese en la interfaz de LabVIEW y que lee la tarjeta DAQ 6009.

2.3.5 Reguladores de Voltaje

Un regulador de voltaje es un dispositivo electrónico que mantiene el voltaje de una fuente de alimentación dentro de un límite que el equipo a ser conectado a éste pueda tolerar (Británica, 2015). Para la alimentación del sistema de control y adquisición de señales del sensor de ozono se usan dos fuentes de $24V_{DC}$ regulables de 10A que se conectan a la red doméstica de $120 V_{AC}$. En la Figura 15 , se presenta las dos fuentes regulables de $24 V_{DC}$ que posteriormente proporcionarán $15 V_{DC}$ y $-15V_{DC}$ debido a que ese es el valor de voltaje de funcionamiento de la banca óptica.



Figura 15.- Fuente de 24Vdc de 10A.

A estas fuentes de voltaje se va a conectar un enchufe hembra para la conexión del enchufe macho del regulador de voltaje de la lámpara de mercurio que proporciona $1800V_{AC}$ de salida y se alimenta de una toma doméstica de $120V_{AC}$. El voltaje de salida es alto para poder excitar lo suficiente a los electrones que se encuentran dentro de la lámpara de mercurio. En la Figura 16, se muestra la estructura interna de la fuente de voltaje para la lámpara de mercurio de 254nm.

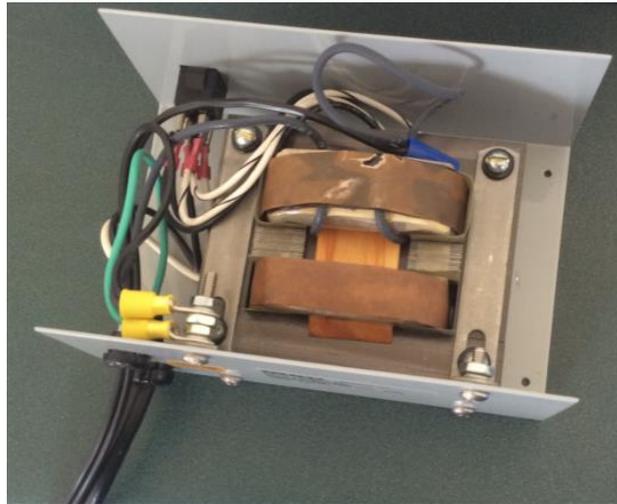


Figura 16.-Fuente de Voltaje 1800Vac para lámpara de mercurio

2.3.6 Convertidores DC-DC

Los convertidores DC-DC son circuitos electrónicos de potencia que convierten una tensión continua a un diferente nivel de tensión de corriente continua para proporcionar una salida regulada. Estos convertidores también se los denomina fuentes de alimentación conmutadas. (Hart, 2010) . Estos dispositivos se los puede fabricar a partir de elementos electrónicos, pero también existen en el mercado a precios relativamente bajos, por lo que se decide adquirir tres convertidores DC-DC en un rango de 5 V_{DC} a 40 V_{DC} de 3A como en la Figura 17.



Figura 17.- Convertidor DC-DC de 5V a 40V de 3A.

2.4 LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)

El software LabVIEW es ideal para cualquier sistema de medidas y control y es la plataforma de diseño principal de National Instruments. Este software permite integrar herramientas para construir una amplia variedad de aplicaciones en menor tiempo. NI LabVIEW es un entorno de desarrollo para resolver problemas, productividad acelerada y constante innovación. (Corporation N. I., National Instruments , 2014). Para el presente trabajo, este software permite la adquisición de datos y señales, la creación de la interfaz del sistema control del sensor de ozono (O₃) (SCADA), y la comunicación serial con el Arduino. Los programas generados se llaman Instrumentos Virtuales (VI's) y tienen dos paneles: el Panel Frontal (*Front Panel*) que contienen la interfaz gráfica (botones de control, visualizador del proceso) y el Diagrama de Bloque (Block Diagram) donde se encuentra la programación visual en bloques.

2.5 Tarjeta de Adquisición de Datos NI (DAQ)

Una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) permite medir con una computadora un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura. Con esta tarjeta más sensores y una PC con software programable como LabVIEW se puede desarrollar un sistema DAQ y tener un monitoreo tanto como control de un sistema, que en este proyecto es la implementación del sistema de control y adquisición de datos del sensor. (Instruments, 2015)

Los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs para brindar

soluciones de medidas más potentes, flexibles y rentables. (Corporation N. I., National Instruments, 2015)

2.6 Criterio de Selección de DAQ (Data Acquisition)

Las señales analógicas o digitales pueden ser adquiridas y procesadas por una computadora (PC) con el uso de un sistema de adquisición de datos (DAQ). (Umar Hamid, 2014). En el presente proceso se selecciona la tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6009 debido a que la intensidad de la luz de la lámpara de mercurio (al pasar por el canal 1 ó 2 del sensor de ozono) está representada por un número de pulsos. Éstos, pueden ser contabilizados con el contador de 32bits que tiene la tarjeta en el puerto PFIO.

La tarjeta tiene 8 entradas analógicas (14 bits) de las cuales se pretende usar tres, una para el circuito de acondicionamiento del termistor en el puerto AI3, otra para la señal reloj del sensor de ozono en el puerto AI0 y la última del controlador de flujo GFC-Dakota en el puerto AI1.

La tarjeta también tiene 2 salidas analógicas (12 bits) que se usan para generar el valor *setpoint* (valor deseado de temperatura para lámpara de mercurio) en el puerto AO1 y la señal de control desde el LabVIEW hacia el controlador de flujo GFC-Dakota en el puerto AO0. Además, existen 12 entradas/salidas digitales habilitadas en la tarjeta como se muestra en la Figura 18. La alimentación de la tarjeta se la realiza a través de la conexión USB con la PC.



Figura 18.- Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ) NI USB-6009

2.7 Sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)

El control de sistemas físicos se realiza a través de un SCADA que es un sistema que permite la supervisión, control y adquisición de datos remotos de un proceso a través de una interfaz gráfica (Panel Frontal) y una unidad de adquisición de datos (DAQ) que recibe información de transductores, sensores, y microprocesadores.

El software de adquisición y supervisión de datos se desarrolla con el software LabVIEW que muestra un panel frontal de presentación y acceso de datos llamado *Front End*, y un panel de control y monitoreo llamado *Back End*. El panel frontal es la interfaz virtual de todo el sistema del sensor de ozono, por lo que se lo diseña de manera amigable y fácil para que el usuario pueda manipular y actuar intuitivamente en el sistema.

En cambio, el software de control y monitoreo *Back End* tiene los bloques de programación (estructuras, constantes, variables) que adquieren y procesan la información en tiempo real de la planta a través de la tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6009. Este procesamiento y adquisición de datos, se lo realiza por períodos de tiempo establecidos por el usuario y se envía los resultados a los actuadores y controladores. (Corporation N. I., National Instruments, 2015)

2.8 Sistema de Control y Monitoreo

2.8.1 Controlador Proporcional On-Off por Histéresis

Control significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar una señal de control al sistema para corregir o limitar la desviación del valor medido a partir de un valor deseado. (Ogata, 2010).

El controlador proporcional On-Off por Histéresis da una salida 100% activada (On) o 100% desactivada (Off). Cuando la temperatura es mayor a la deseada (Setpoint), la salida se apaga en casos de sistemas de calefacción o se enciende en sistemas de enfriamiento. Cuando es menor, toma el valor opuesto. La sensibilidad de este tipo de control se la denomina histéresis y se la diseña de tal forma que la salida de control no cambie de *On* a *Off* demasiado rápido y la salida no sea inestable cuando se acerque al valor deseado. (C.V., 2015)

Si el rango de histéresis es pequeño, habrá una conmutación demasiado rápida y haría que elementos como un calefactor tengan una vida útil más corta. Por lo tanto, la histéresis debe ajustarse de modo que haya un retardo suficiente entre los modos "On" y "Off". (TIMESWITCH, 2015)

Es también un controlador proporcional porque hace que el control On-Off sea más preciso ya que al existir una diferencia grande entre la temperatura actual y la deseada, la salida se encontrará encendida o apagada como en el On-Off, pero cuando la diferencia sea pequeña, la salida será directamente proporcional a esta diferencia. (TIMESWITCH, 2015).

En aplicaciones industriales, los controladores proporcionales On-Off por histéresis se ajustan empíricamente. Generalmente, los parámetros del controlador se seleccionan en base

a un modelo de proceso simple utilizando una regla de afinación adecuada para rechazar perturbaciones de carga o retardos de tiempo en el proceso.

CAPÍTULO 3: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN

3.1 Desarrollo del hardware

El hardware comprende la parte física del sistema del sensor de ozono O_3 de doble canal. En esta sección se explica el diseño mecánico que se implementa para la fijación de la banca óptica, la fijación del motor de pasos, la caja de aluminio que se usa para mejorar el control de temperatura y la instalación de una placa separadora de aluminio (para el distinguir la parte de control de la de potencia). Así mismo, se explica el diseño de los circuitos de control y acondicionamiento de la temperatura, de las válvulas solenoides, del motor de pasos y del controlador de flujo.

3.1.1 Información General del Sistema

La parte física más importante del sensor de Ozono O_3 es la construcción de la planta con la banca óptica de doble canal que se muestra en la Figura 19.

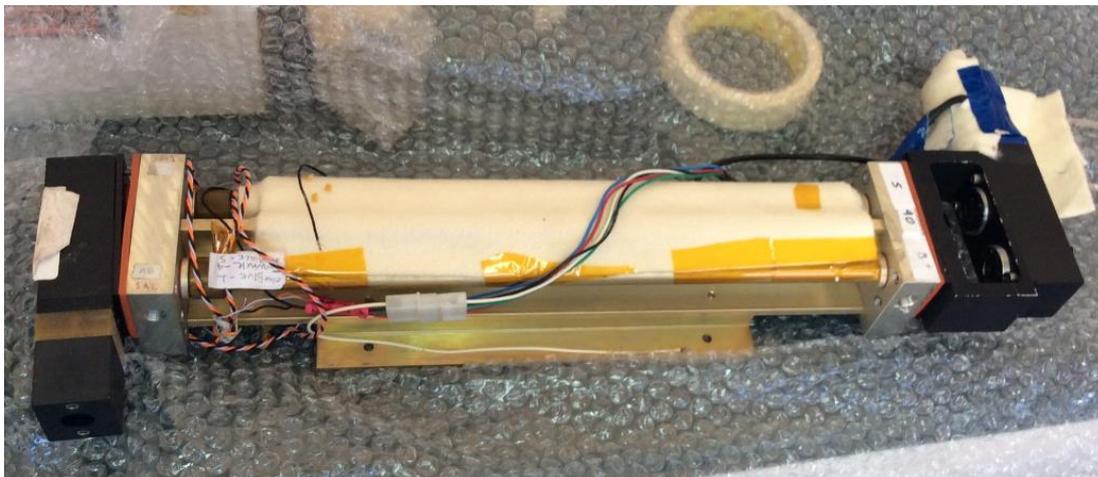


Figura 19.-Banca Óptica de doble canal y un detector de sensibilidad mejorada donada por Penn State Meteorology.

Para la construcción de la planta, funcionamiento, adquisición y control del sensor de ozono se realiza la construcción de una caja metálica para posteriormente ensamblar todos los bloques del sistema.

3.1.1.1 Bloques del Sistema

Los bloques del sistema son importantes para el funcionamiento óptimo del sensor. Uno de ellos es el circuito de control de temperatura para que la lámpara de mercurio funcione en su compartimento en un rango de temperatura de 20°C a 70°C; otro, son las válvulas solenoides para el paso de aire ambiente con ozono y aire sin ozono por cada uno de los dos canales de la banca óptica con el fin de que exista la circulación de los medios gaseosos absorbentes y atenúen la intensidad de luz de la lámpara. Otro bloque, es el circuito driver del motor de pasos que permite controlar la posición del troceador de señal con giros de 180 grados, para que el detector de la banca óptica lea una señal que proviene de uno de los dos canales. Igualmente, el caudalímetro debe controlar la cantidad de flujo de aire que entra a los canales del detector a partir de la bomba y mantener el caudal en un rango de 1 a 5 litros por minuto.

3.1.2 Circuito para Control de Temperatura

Para el circuito de control de temperatura se implementa un control de corriente en la níquelina a través de un transistor MOSFET (IRF540), mismo que se acciona y se controla por señales PWM enviadas por el microprocesador Arduino según el valor de Setpoint que se proporciona en la DAQ.

Se selecciona el uso del transistor MOSFET IRF540 debido a que la resistencia drenaje-fuente activa (R_{DS}) es de 0.050Ω , por lo que la caída de voltaje en este transistor es depreciable y todo el voltaje cae en la niquelina para elevar la temperatura. También, el tener una alta capacidad de corriente (22 A) evita el sobrecalentamiento del mismo y gracias a su alta velocidad de conmutación (tiempo de activación es 20ns) permite que el control a través de la señal PWM sea la más óptima. (SGS-Thomson, 2014).

La niquelina es una resistencia de valor de $4,2\Omega$ y al tener en el MOSFET una baja resistencia, se evita que se produzca pérdidas de calor en el circuito, y así casi todo el voltaje se aplique en la niquelina. En la Figura 20, se presenta el circuito alimentado $9V_{DC}$ y diseñado en software Proteus 7.6; este diseño se presenta previo a la impresión del circuito en una baquela gracias al diseño PCB en 3D como se muestra en la Figura 21:

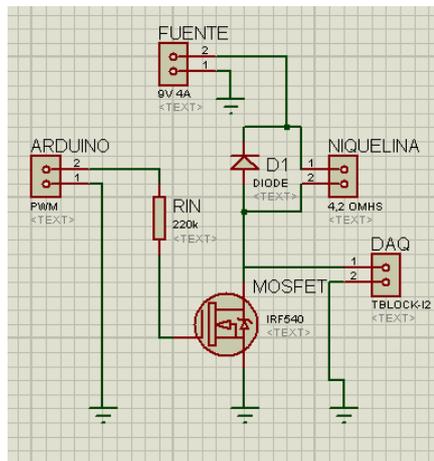


Figura 20.-Diseño del Circuito de control de temperatura

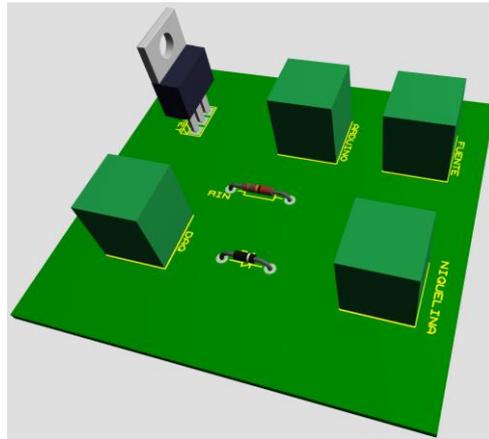


Figura 21.- Diseño PCB en 3D del circuito de control de temperatura.

El transistor MOSFET se utiliza como conmutador para poder controlar el paso de corriente en la niquelina. Entre más voltaje exista en la niquelina, más temperatura va a generar la niquelina por la transferencia de energía en forma de calor que se genera. La niquelina va a transferir este calor generado al compartimento en el cual se inserta la lámpara, y por conducción va a transferir ese calor al recubrimiento de la lámpara de mercurio, tal como se muestra en la Figura 22.

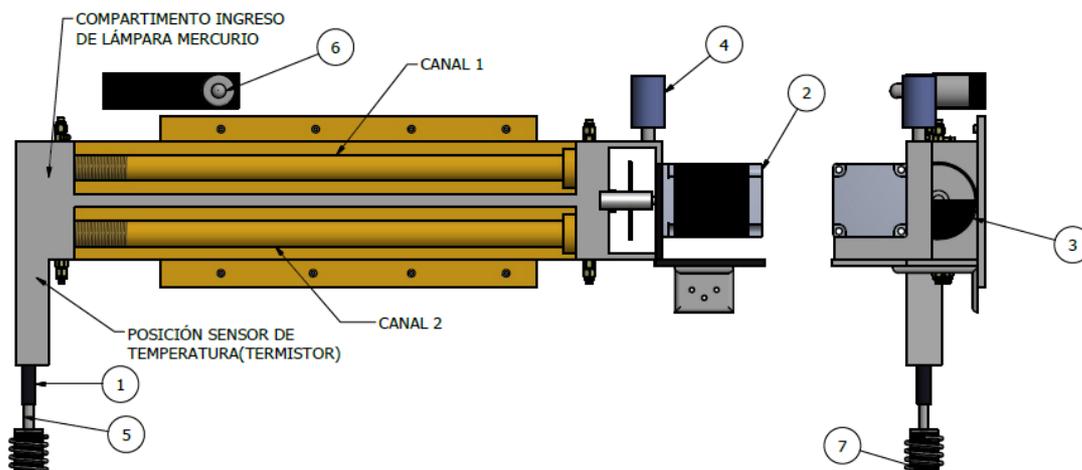


Figura 22.-Banca Óptica (compartimento lámpara de mercurio y niquelina)

Según la Figura 22, la niquelina está representada por el objeto numerado (7), la lámpara de mercurio de 254nm es el objeto (5), y el compartimento donde ingresa la lámpara es el (1).

Para determinar el comportamiento del MOSFET se presenta a continuación en la Figura 23, el circuito MOSFET con la niquelina que es representada como la resistencia R_D .

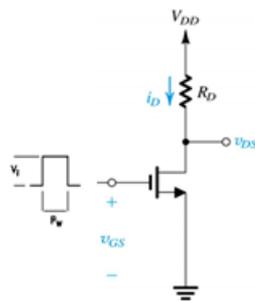


Figura 23.-Circuito MOSFET y niquelina (Smith, 2010)

El valor de V_{DD} es de $9V_{DC}$, la niquelina es R_D y tiene un valor de $4,2 \Omega$ y el valor de V_{GS} depende de las señales PWM controladas desde el microcontrolador Arduino. Ahora, el circuito de la Figura 23 operado como un conmutador (Figura 24), sucede lo siguiente:

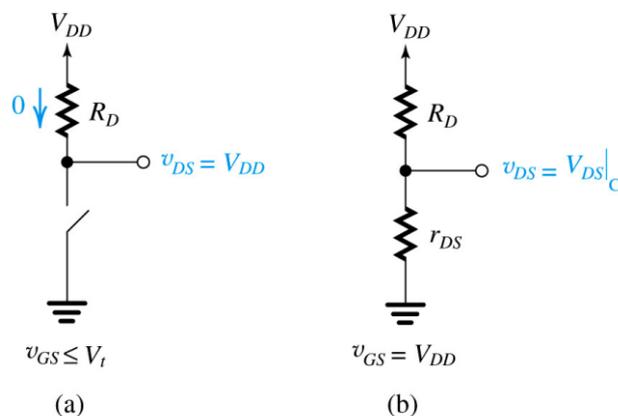


Figura 24.-Operación del MOSFET de la Figura 23 como conmutador (Smith, 2010)

En la parte (a) se observa que el transistor está apagado y funciona como un circuito abierto, es decir no existe paso de corriente por el transistor y el voltaje $V_{\text{Drain-Source}}$ es igual al voltaje V_{DD} .

En el caso de (b) el transistor está activado y funciona con una resistencia muy baja r_{DS} , tiene una pequeña caída de voltaje y el transistor funciona en la zona triodo en la cual $V_{\text{Gate-Source}}$ es V_{DD} .

De igual manera, cuando el voltaje $V_{\text{Drain-Source}}$ se mantiene pequeño, el MOSFET actúa como una resistencia lineal cuyo valor es controlado por el voltaje de compuerta $V_{\text{Gate-Source}}$.

La corriente que pasa en la niquelina que en este caso es i_D , y se la determina en la ecuación (3), realizando un análisis del circuito de la Figura 24 que se describe en la ecuación (2).

$$V_{DS} = V_{DD} - i_D R_D \quad (2)$$

$$i_D = \frac{V_{DD}}{R_D} - \frac{1}{R_D} V_{DS} \quad (3)$$

Si se trabajaría con una señal PWM con un ciclo de trabajo de 230 que es un 90% de funcionamiento en HIGH y 10% en LOW desde el Arduino; y, con un V_{DD} de $9V_{\text{DC}}$, se esperaría que el voltaje que entra al MOSFET en la compuerta Gate (V_{GS}) de la Figura 24, sea alrededor de $8.1V_{\text{DC}}$. Luego, como el transistor está activado como en la parte (b) de la Figura 24, funcionaría en la zona de triodo y existiría una pequeña caída de voltaje en r_{DS} y el V_{GS} tendría un valor igual al V_{DD} .

3.2. Acondicionamiento del Sensor de Temperatura (Termistor)

El rango de temperatura del compartimento de la lámpara de mercurio debe estar entre 20°C a 70°C , por lo que se linealiza el termistor para este rango con un divisor de tensión.

Para el diseño de este circuito acondicionador, se calcula una resistencia R con la ecuación (4).

$$R = \frac{\beta - 2Tc}{\beta + 2Tc} * R_{TC} \quad 4)$$

Donde, R es la resistencia que se debe conectar en serie al termistor, β es un valor que se obtiene de la ecuación (8), Tc es la temperatura media del rango de trabajo correspondiente a 45°C; y, la variable R_{TC} , es la resistencia del termistor a la temperatura media de 45°C.

Las características de Resistencia vs Temperatura para los termistores se los realiza a través del método de la ecuación (5) de Steinhart-Hart en la cual la temperatura está en función de la resistencia del termistor.

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c(\ln(R))^3 \quad 5)$$

Donde a, b, c son constantes derivadas de 3 puntos de prueba de temperatura y sus valores para el modelo 44032 Omega son: $9.376 \cdot 10^{-4}$, $2.208 \cdot 10^{-4}$, $1.276 \cdot 10^{-7}$ respectivamente. T es la temperatura en grados Kelvin, y R es la resistencia del termistor en Ω . (Omega, 2014)

Para encontrar la resistencia del termistor en un punto específico de temperatura, se usa la ecuación (6).

$$R_{TC} = e^{\left[\beta - \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\frac{1}{3}}\right] - \left[\left(\beta + \left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^{\frac{1}{3}}\right]} \quad 6)$$

Donde el valor de alpha (α) y beta (β) se expresan mediante la ecuación (7) y (8).

$$\alpha = \frac{\left(a - \left(\frac{1}{T}\right)\right)}{c} \quad 7)$$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{b}{3c}\right)^3 + \frac{\alpha^2}{4}} \quad 8)$$

Donde T es en grados Kelvin $T = (^\circ\text{C} + 273,15)$.

Con la aplicación de las fórmulas (4) a la (8), se obtiene los valores de los parámetros de las constantes alpha (α), beta (β), el valor de la resistencia del termistor (R_{TC}) y de la resistencia del circuito acondicionador (R) a la temperatura de media de funcionamiento que es 45°C ($318,15^\circ\text{K}$ temperatura absoluta). Estos resultados se presentan de manera más detallada en el Anexo B.

En el mercado comercial no se encuentra específicamente el valor de la resistencia del circuito acondicionador calculado de 12888Ω , por lo que se usa una resistencia de 12500Ω en serie con una de 300Ω alcanzando un valor de 12880Ω .

En la Tabla 2 también se detallan los valores de alpha, beta, R_{TC} , R , y V_{out} para cada grado de temperatura en el rango de linealización de 20°C a 70°C .

V_{out} es el voltaje resultante del divisor de tensión de la ecuación (9) y del diseño del circuito acondicionador de la Figura 25.

$$V_{out} = \frac{5 * R}{R + R_{TC}} \quad 9)$$

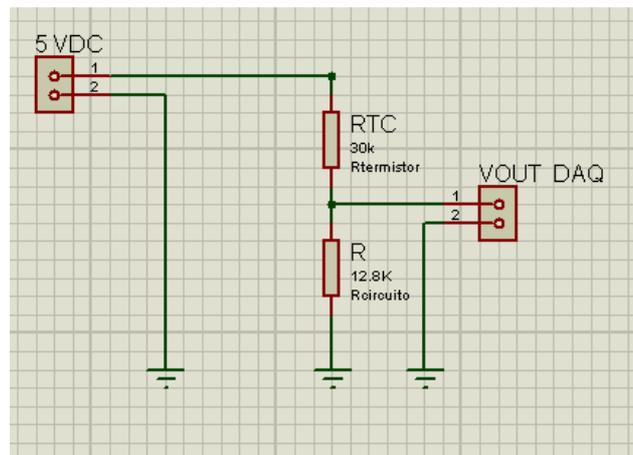


Figura 25.-Circuito Acondicionador del Termistor Omega 44031

Para comprobar la linealidad de los resultados obtenidos, se realiza el gráfico de Voltaje de Salida (V_{out}) versus la Temperatura de Funcionamiento ($^{\circ}\text{C}$) en la Figura 26.

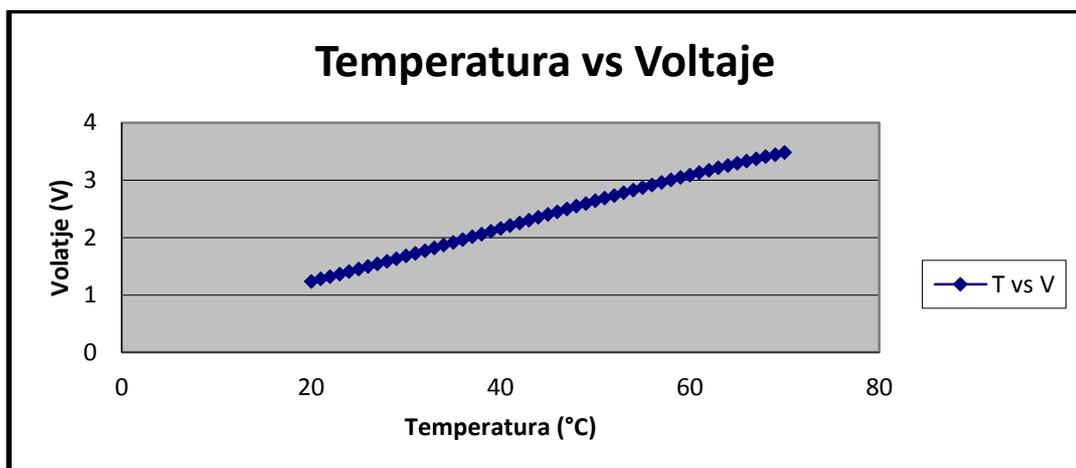


Figura 26.-Gráfico de la Temperatura vs Voltaje de Salida del Termistor 44032 linealizado.

Se puede observar que la relación temperatura-voltaje del termistor en el rango de temperatura de 20 a 70 $^{\circ}\text{C}$ es bastante lineal, por lo que se garantiza la calibración y óptimo funcionamiento del termistor.

Una vez realizado el diseño del circuito acondicionador, se hace la tarjeta electrónica que es el diseño del PCB en 3D en el programa Proteus. Esta impresión se muestra en la Figura 27 donde R_{TC} , que es el termistor, se lo modela como una resistencia para la facilidad de impresión; para luego, colocar una bornera de dos puertos donde ahora se conecta el termistor. En la Figura 27, el puerto V_{out} es para ser conectado a la tarjeta DAQ para la adquisición de la señal del circuito y el registro de temperatura.

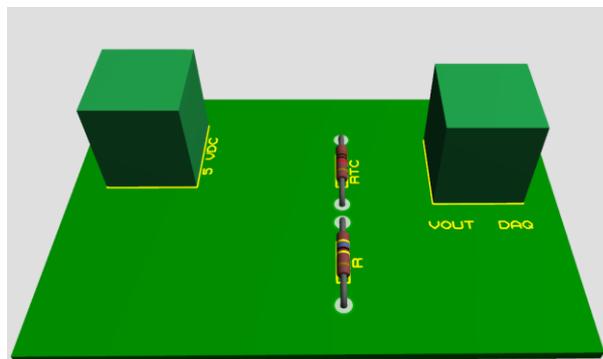


Figura 27.-Diseño PCB en 3D del Circuito de Acondicionamiento del termistor 44032.

3.2.1 Circuito para el control de válvulas solenoides

El módulo de relés presentado en la Figura 12, es el circuito de control para la activación de válvulas. En la Figura 28, se tiene el mismo módulo pero visto desde otro ángulo:

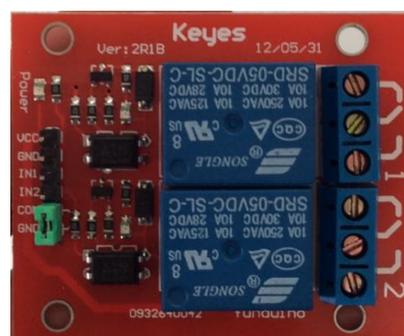


Figura 28.- Módulo Relé 12VDC desde otro ángulo

Como se desea activar el paso de aire ambiente con ozono y aire sin ozono alternadamente por los dos canales de la banca óptica, uno de los cables de la primera válvula solenoide se conecta al primer relé (1) en el puerto normalmente abierto y el otro cable a tierra común. Luego, uno de los cables de la segunda válvula se conecta al puerto normalmente abierto del relé (2) y el otro cable a tierra común. Debido a que las válvulas solenoides y los relés contienen una bobina interna, se producen corrientes transitorias por lo que alteran el funcionamiento de los demás circuitos. Los transitorios ocurren al poseer el relé un inductor que guarda energía en forma de campo magnético. Esa energía con el tiempo se extingue en el tiempo pero puede causar alteraciones dañinas en los circuitos. Para suprimir cualquier corriente que se genere al cambiar el estado de la bobina del relé, se ha colocado en paralelo a la conexión de las válvulas un diodo de protección contra transitorios. (García, 2015)

Para la alimentación, se energizan las válvulas solenoides con $12V_{DC}$ a través de los puertos comunes en los dos relés (1 y 2).

También se energiza el módulo relé con $5V_{DC}$ en el pin V_{CC} , se conecta el pin GND a tierra común de todo el sistema y para el control de la activación de un relé a otro, se conectan los pines $IN1$ y $IN2$ en puertos digitales 12 y 13 del microprocesador Arduino.

Las señales de control y la programación para la activación de las dos válvulas solenoides se describen en el capítulo 3.2.4.

3.2.2 Circuito Driver del Motor de Pasos

El circuito driver para el control de pasos del motor se presentó en la Figura 13; pero, a continuación en la Figura 29, se presenta el diagrama de conexión del mismo:

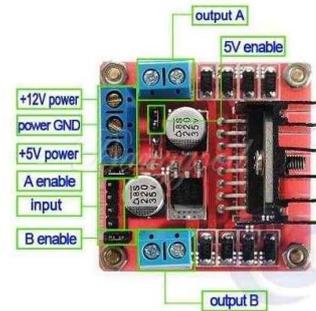


Figura 29.- Diagrama de conexión circuito driver motor de pasos (PEITSCH.HNOS, 2014)

El motor de pasos NEMA 17 es un motor de pasos bipolar (dos bobinas) por lo que en su conexión tiene 4 cables de color: negro, verde, rojo, azul que se conectan a las salidas *output A* y *B*. En el *output A* se encuentra el cable negro y verde que son los cables correspondientes a la bobina 1 y en el *output B* el cable rojo, azul que son los cables que pertenecen a la bobina 2. Para que el motor realice los respectivos movimientos se necesita cambiar la dirección del flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada. (Stargazer, 2015)

Se energiza el módulo driver con 12V en el puerto de *power* y el control del cambio de la dirección del flujo de corriente a través de las bobinas, se lo realiza con los pines de *input* mostrados en la Figura 29 a partir de los pines 8, 9,10 y 11 del microprocesador Arduino cuya programación se muestra en el capítulo 3.2.7 correspondientes a los *inputs* IN1, IN2 IN4 y IN3 respectivamente.

3.2.3 Montaje Mecánico y Eléctrico del Sistema

Todos los bloques del sistema mencionados en el capítulo 3.1 conforman el sistema de control del sensor de O_3 . Éstos se los ubican en una caja de aluminio con dimensiones de

706 mm de largo, 500 mm de ancho y 200 mm de alto (Figura 30). El material es aluminio debido a las características de dureza, capacidad de dispersión del calor y peso.

Al interior de la caja, se separa claramente la parte óptica, la de control y de potencia con un separador de aluminio, para que exista mayor orden y se evite cualquier interferencia electromagnética. En la Figura 32, la parte óptica se considera la banca óptica de doble canal y el detector, la lámpara de mercurio con su caja de aluminio de control de temperatura, el controlador de flujo, las válvulas solenoides, mangueras, acoples y tubos plásticos para el paso de aire. La parte de control son todos los circuitos descritos en el capítulo 3.1, y están colocados verticalmente en la placa separadora. La parte de potencia la conforman las dos fuentes de poder regulables de $24V_{DC}$, la fuente de voltaje $1800 V_{AC}$ para la lámpara de mercurio, y las borneras de todo el sistema de control y potencia. La tarjeta DAQ 6009 y la bomba de aire quedan afuera de la caja de aluminio para tener la facilidad de ser conectados a una computadora y también por su peso.

Para la ventilación de la caja y de los bloques antes mencionados, se coloca un ventilador que funciona a $12V_{DC}$.

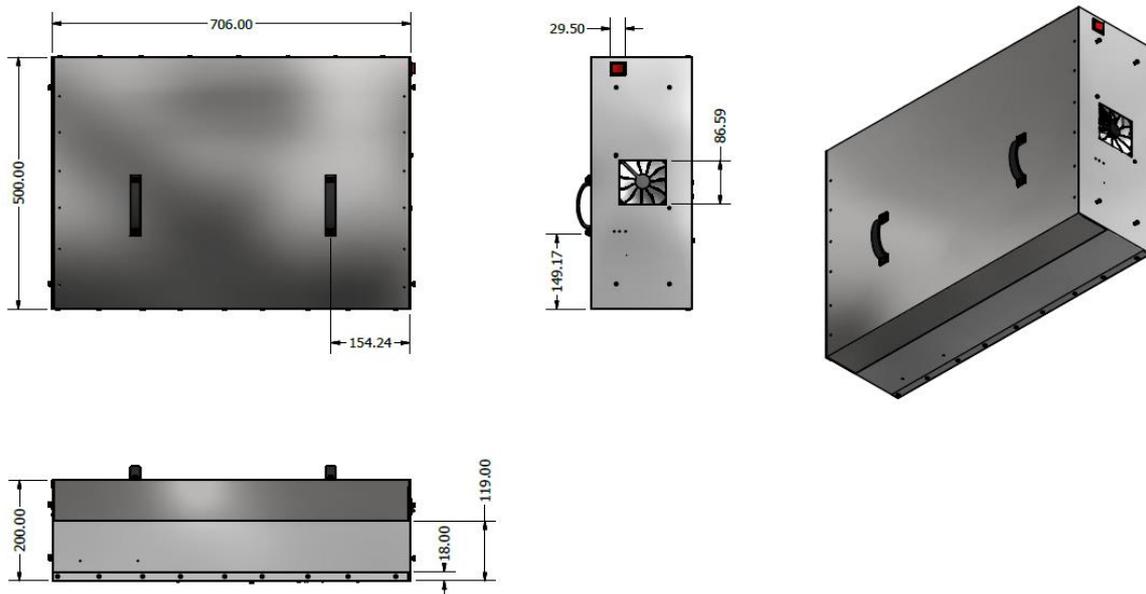


Figura 30.- Diseño de la caja metálica para el sistema de control del sensor de ozono (O_3)

Para el control de la temperatura de la lámpara de mercurio se construye una caja de aluminio de 100mm por lado para encapsular la temperatura generada por la niquelina y la lámpara de mercurio y evitar el paso de flujos externos de aire. El diseño de la caja se presenta en la Figura 31.



Figura 31.- Caja de aluminio para evitar flujos de aire externos y facilitar el control de temperatura de la lámpara de mercurio.

Con respecto al montaje eléctrico, la banca óptica necesita energizarse con un voltaje de $+15\text{ V}_{\text{DC}}$ y -15 V_{DC} , por lo que se regula el voltaje de las dos fuentes de 24 V_{DC} (Figura 15) a 15 V_{DC} a través del potenciómetro de instrumentación que éstas incorporan. Luego, se va a conectar el polo positivo de la primera fuente con el polo negativo de la segunda para que éstas estén en serie y en un extremo alimente con 15 V_{DC} y el otro extremo con -15 V_{DC} (Figura 32).



Figura 32.-Ubicación del sistema Óptico, Control y Potencia.

Los tres conmutadores DC-DC se conectan a la fuente de 15 V_{DC} y se los regula a través de su potenciómetro a 12V_{DC} , 9 V_{DC} y 5 V_{DC} respectivamente. El voltaje de 12 V_{DC} es para alimentación del módulo driver del motor a pasos, de las válvulas solenoides y del ventilador. El voltaje de 9 V_{DC} es para alimentación del microprocesador Arduino y el circuito de control de temperatura con el MOSFET; y, el voltaje de 5 V_{DC} es para la alimentación del circuito de acondicionamiento del termistor y el módulo de dos relés.

La bomba de aire se energiza directamente de una toma de corriente alterna 110V_{AC} y la tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6009 se energiza a través del cable USB de la computadora.

3.3 Desarrollo de Software

El desarrollo de software se enfoca en la programación del código abierto Arduino y LabVIEW para la adquisición de señales, procesamiento, comunicación, y el control del sensor de ozono. El lenguaje Arduino es fácil de usar, se puede ejecutar en Windows y su entorno está escrito en Java. (Arduino, 2014). LabVIEW es un software de diseño para construir aplicaciones de medida y control, se puede crear interfaces personalizadas de usuario y la programación es muy fácil al ser gráfica. (Instruments, 2015)

3.3.1 Información General del Sistema

Toda la programación de control para los circuitos del sensor de ozono O₃, tales como el circuito de control de temperatura que calienta la niquelina, la activación de válvulas solenoides, movimiento del motor de pasos para posicionar el troceador de señal adecuadamente, lectura del *setpoint* (valor de temperatura a la cual se desea mantener el funcionamiento de la lámpara de mercurio en °C) enviado desde la DAQ y del procesamiento del controlador proporcional por histéresis, se lo realiza en el entorno Arduino. La programación se la guarda en la tarjeta Arduino y se convierte en nuestro sistema embebido de procesamiento.

LabVIEW se encarga de la construcción de la interfaz gráfica personalizada para ver los resultados de la adquisición de datos y señales enviadas por el detector de doble canal de ozono. Además, almacena los datos de temperatura detectados por el termistor, genera el valor de *setpoint* en forma de señales PWM a través del puerto analógico de salida de la DAQ

para que el circuito de control de la Figura 21 funcione y controle el flujómetro Dakota con una salida análoga.

3.3.2 Bloques del Sistema SCADA

Para tener un control y monitoreo eficiente la planta (sensor de ozono), se necesita la versatilidad del software LabVIEW y los toolkits de National Instruments para diseñar el sistema SCADA. Este sistema está compuesto por los diseños de Panel Frontal (Front-End) y Bloques de Programación (Back End) que se detallan a continuación.

3.3.2.1 Diseño Front-End

Este es el bloque en el cual el usuario observa la adquisición y procesamiento de datos en tiempo real del sensor de ozono que es nuestra planta. Todo se representa gráficamente, como el flujo que detecta y controla el caudalímetro Dakota, el valor de *setpoint* o temperatura deseada, el número de cuentas que detecta el sensor de ozono en presencia de aire y ozono, los gráficos de las cuentas, la señal cruda, y la temperatura de la lámpara, tal como se presenta en la Figura 33.

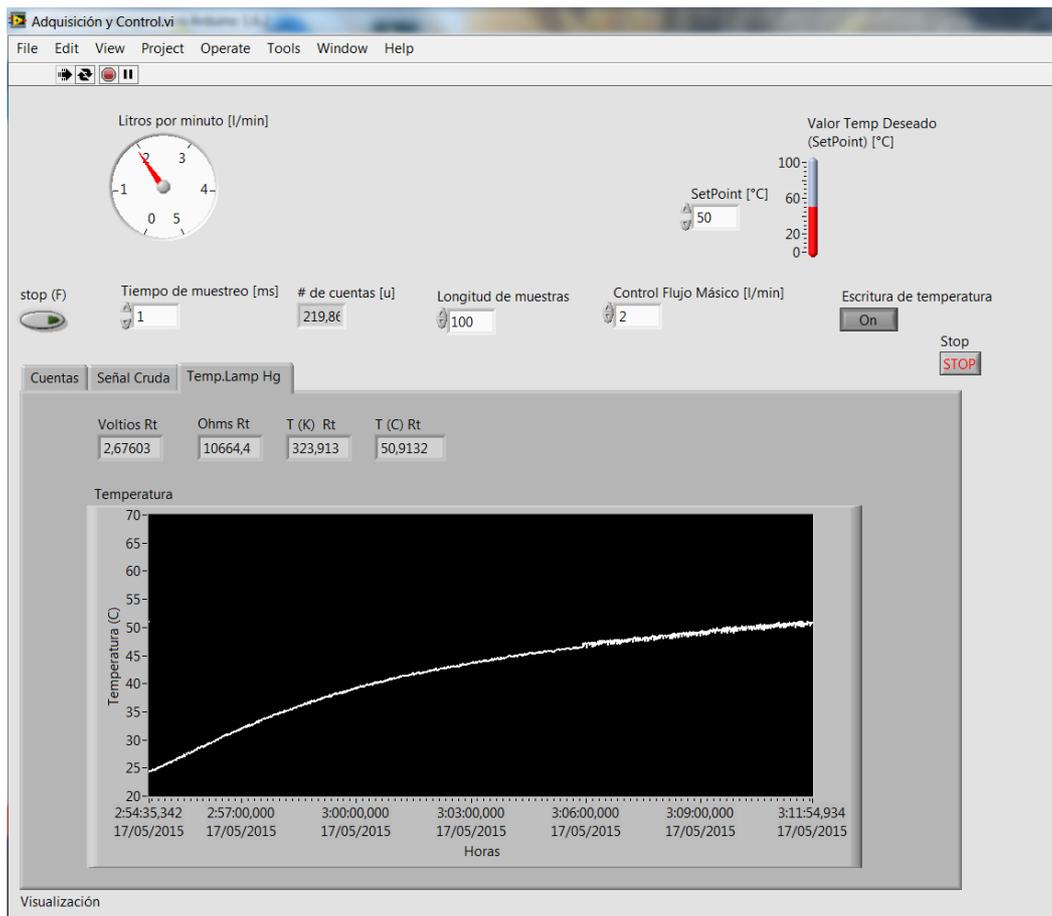


Figura 33.- Interfaz gráfica - Panel Frontal desarrollado en LabVIEW para adquisición de señales del sensor de ozono.

3.3.2.2 Diseño Back-End

El software Back End contiene la programación visual en bloques del control y adquisición de datos del sensor de ozono. Contiene componentes de software, algoritmos de monitoreo y manejo. Los módulos de software contienen los algoritmos de manejo para cada uno de los componentes del sistema como se observa en la Figura 34 y Figura 35.

3.3.3 Adquisición de Señales de la Banca Óptica

Cuando la bomba de aire se activa, inicia el flujo de aire ambiente con ozono y aire sin ozono. Las válvulas solenoides que se encuentran normalmente abiertas dejan pasar simultáneamente aire ambiente con ozono por el canal 1 y aire sin ozono por el canal 2. Luego de 10 segundos cambian de estado las válvulas y alternan el flujo, es decir que por el canal 1 ya pasará aire sin ozono y en el canal 2 aire ambiente con ozono y así sucesivamente. En todo este proceso, la lámpara de mercurio emite su luz con una longitud de onda de 254nm por los dos canales, y esta luz se atenúa al contacto con el aire ambiente con ozono en distintas cantidades al pasar por el camino óptico (longitud de los canales). Esta atenuación cambia el grado de intensidad de la luz de la lámpara de mercurio inicial y es sensada por el detector de sensibilidad mejorada de la banca óptica en forma de cuentas. La detección del número de cuentas se lo hace una vez por canal cada 10 segundos debido a que el troceador de señal tapa uno de los dos lentes del detector de ozono. De este modo, en la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) se usa el puerto contador para que contabilice la intensidad de la luz de mercurio en número de cuentas y así ver la cantidad de ozono existente.

Para la adquisición de datos a partir del detector de la banca óptica se desarrolla un programa en LabVIEW con el uso del bloque de asistencia para DAQ que se lo configura para que sea un contador y lea la información en el puerto PFIO donde se conecta el cable de señal del detector. La lectura en este puerto da un valor de cuentas que constituye la señal cruda del sensor de ozono, por lo que es necesario realizar un filtro de las mismas previo a ser guardado como archivo. Este filtro se implementa con un bloque “mean” después de un bloque de resta de la señal cruda actual con la anterior que se la retroalimenta en un lazo de

control. Esto nos permite realizar el cálculo de la media de las cuentas que contiene la señal cruda de entrada y evitar un contador infinito de cuentas.

Se crea un botón de control para asignar la cantidad de valores con los cuales se desea calcular la media de los datos, en este caso se lo inicializa en 100 pero puede tomar otro valor.

La señal cruda tanto como la señal filtrada se la visualiza a través de la implementación del bloque de gráfico de onda con un tiempo de muestreo de datos de 500ms. También, para guardar los datos del número de cuentas detectados por la DAQ a partir del detector, se implementa el bloque de escritura de datos que se lo configura con el respectivo formato de fecha que en este caso es día, mes, año, hora, minuto y segundo, como se muestra en la Figura 34. En esta figura también se observa que con otro bloque de asistente DAQ se realiza el control del caudalímetro DAKOTA. En éste se configura la salida analógica AO0 de la DAQ para envíe un valor de 0 a 5V al controlador flujo, que por ejemplo: al recibir 2V en su entrada, proporcionará un flujo de salida de aire de 2 litros por segundo.

Existe otro bloque asistente de DAQ que se lo denomina “Temperatura lámpara (C) Setpoint” al cual se lo configura para que el puerto analógico de salida AO1 envíe el valor de temperatura deseada al circuito de control de temperatura mostrado en la Figura 20. Se crea un SubVI (Figura 36), que es una subrutina de programación que permite realizar la conversión de un valor de grados centígrados que puede ingresar el usuario de 20 a 70 °C a un valor de voltaje de 1 a 5V para que el Arduino detecte en un puerto analógico y proceda al control por señales PWM que maneja el circuito controlador de temperatura.

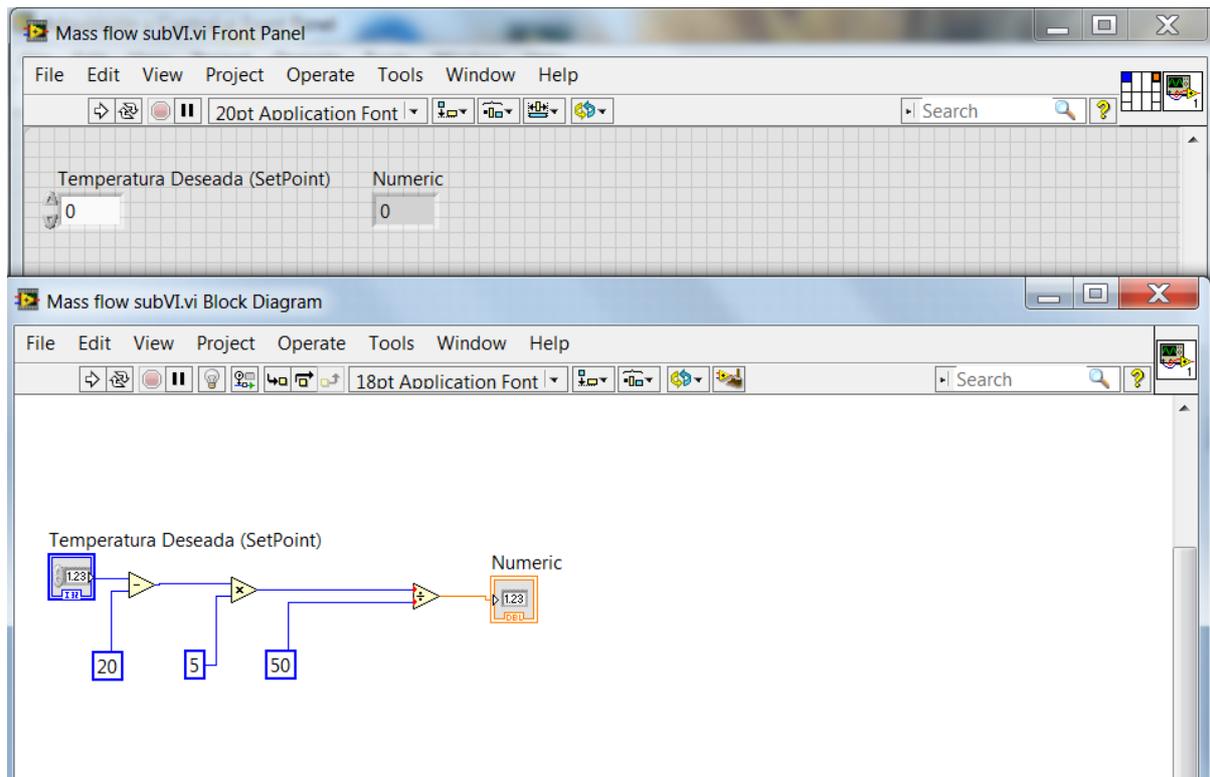


Figura 36.- Programación del Sub VI para transformar el valor de Setpoint a un valor analógico (voltaje).

Como se observa, el usuario a través del bloque de control ingresa un valor cualquiera de Setpoint en unidades de grados centígrados, a éste se le resta 20 que es el valor límite inferior del rango de temperatura de trabajo en que fue linealizado el termistor; luego, se lo multiplica por 5 que representa el valor en voltios máximo al cual se va a trabajar y se divide para 50 que es la diferencia del valor límite máximo (70°C) con el mínimo (20°C) de trabajo del termistor. Así, se obtiene la representación del valor de Setpoint como una señal analógica de voltaje de 1 a 5V y ser detectada en el microcontrolador.

3.3.4 Software para Control ON/OFF de Válvulas Solenoides.

El programa de control de las válvulas solenoides se lo realiza en código Arduino con el uso de funciones. Se crea la función `Control_Valvulas()` para que active o desactive los

pinos de control IN1, IN2 del módulo relé mostrado en la Figura 28 ya que éstos son los encargados de activar o desactivar las válvulas solenoides que se encuentran conectados en los relés.

```

void Control_Valvulas() {

    Serial.println(contador);
    if (contador > 0 && contador <= 10) {
        estval = HIGH;
    }
    if (contador > 10 && contador <= 20) {
        estval = LOW;
    }
    if (contador > 20)
    {
        contador = 0;
    }

    if (estval == HIGH) { // && estval==LOW){
        digitalWrite(valvula2, LOW);
        digitalWrite(valvulal, HIGH); //me escribe estado anterior negado
    } else { // && estval==HIGH){
        digitalWrite(valvulal, LOW); //me escribe estado anterior negado
        digitalWrite(valvula2, HIGH);
    }
    contador ++;
}

```

Figura 37.-Código en Arduino para control de válvulas solenoides a través del módulo relé.

En la Figura 37 se observa que se crea la función *Control_Valvulas ()* que tiene una variable llamada contador que sirve para activar una de las dos válvulas por un período de tiempo que en este caso es 10 segundos. Para que ocurra lo mencionado, se implementa la función *if* que condiciona al contador para que cuando este sea mayor a 0 y menor o igual a 10, el estado de la válvula (*estval*) se active o se ponga en HIGH, ya que se la inicializó en LOW o en OFF al inicio de la programación. Posteriormente, se condiciona al contador para que cuando este sea mayor a 10 y menor o igual a 20, el estado de la válvula cambie a su estado inicial de OFF o en LOW y si el contador es mayor a 20, se lo inicializa en cero para iniciar nuevamente el lazo de control. Asimismo, en el código se condiciona al estado de la válvula (*estval*) para que en estado activado HIGH prenda la válvula 1 y apague la válvula 2, de lo contrario que apague la válvula 1 y prenda la válvula 2.

3.3.5 Programación de Control de Temperatura

El control de la temperatura se realiza utilizando el circuito de control de la Figura 21 que con el semiconductor MOSFET y las señales de control PWM generados por la tarjeta Arduino, controla la corriente en el actuador (niquelina) para que transforme la energía eléctrica en calor y eleve o mantenga una temperatura en el compartimento de la lámpara de mercurio.

El período de las señales PWM es definido por el Arduino con el uso del controlador proporcional por histéresis, a partir del valor que escribe el usuario en el botón de “Temperatura SetPoint” en el SCADA.

El objetivo principal de control de temperatura es mantener la temperatura del montaje de metal de la lámpara y su compartimento (caja de aluminio) en un valor en rango mínimo de 50°C a máximo de 60°C, para lo cual se implementan dos funciones, la una que lee el valor deseado de temperatura y la otra que realiza el control proporcional.

La primera función se llama *lect_setpoint()* y se muestra en la Figura 38.

```

142 void lect_setpoint(){
143   set_point1=analogRead(setpoint);
144   set_point1=(set_point1*50/1024)+20;
145   if (set_point1>set_point+2 || set_point1<set_point-2){
146     set_point=set_point1;
147     digitalWrite(ledtemp,LOW);
148     on=0;
149   }

```

Figura 38.- Código que controla la señal de PWM que va al circuito de control de temperatura de la Figura 20.

Esta función permite leer en el pin analógico A5 la señal de control que envía la tarjeta DAQ a partir de la selección de Setpoint que realiza el usuario en el Panel Frontal del SCADA. La lectura de la señal se almacena en la variable *set_point1* para luego ser transformada a unidades de temperatura bajo la resolución de 10 bits $2^{10} = 1024$. Luego, se

implementa una condición en el cual el valor de setpoint que envía la tarjeta DAQ se lo mantenga en un rango de trabajo de +2 grados y -2 grados como compensación al saber que por diversas razones de error de hardware, la DAQ no envíe un valor exacto de voltaje y tenga una variación de ± 0.1 V que puede aproximadamente representar 2 a 4 grados, entonces el sistema siempre va a tratar de compensar a más o disminuir y generar oscilación. Entonces, se programa para que cambie el setpoint solo si hay una diferencia de 1.

Una vez leído el valor deseado de temperatura de funcionamiento de la lámpara, se procede al control y mantenimiento de la temperatura en ese valor de Setpoint. De esta manera, se implementa la función `cont_temp ()` que crea una variable contadora de ciclos llamada *ciccont* ya que el uso de retardos (delays) podría afectar la sincronización del movimiento del motor de pasos y activación de los relés que accionan las válvulas solenoides. Luego, con una sentencia *if* se define que cada dos cuentas se ponga en marcha el controlador y lo primero que hace es leer y almacenar el valor de voltaje del termistor en la variable *termval* para convertirlo en un valor temperatura con ecuación (10) y (11) que son resultado de la ecuación de la recta del rango de trabajo del termistor en el cual 1,3V equivale a 20°C y 3,5V equivale a 70°. Este nuevo valor en temperatura se lo guarda en la variable *temp*.

$$temp = 22.72 * Volt - 9.45 \tag{10}$$

$$Volt = \frac{lectura_{termistor} * 5}{1024} \tag{11}$$

```

153 void cont_temp(){
154 if (ciccont>=2){
155     Serial.println(analogRead(setpoint));
156     Serial.println(set_point1);
157
158 termval=analogRead(termpin);//lectura de voltaje termistor
159 Serial.println(termval);
160 temp=((termval*5/1023)*22.72)-9.45;//conversión voltaje a temperatura
161 Serial.println(temp);
162 //si la temperatura se encuentra dentro de +- 1 grado no hace nada y mantiene el valor de pwm
163 if( temp < set_point-1 && actval < 255){//comparación si la temperatura esta menor a la objetivo
164 actval=actval+1;
165 //analogWrite(A1,actval);//aumento pwm a niquelina
166 } else if( temp > set_point+1 && actval > 150){//comparación si la temperatura es mayor a la objetivo
167 actval=actval-1;
168 //analogWrite(A1,actval);//bajo pwm de niquelina
169 }
170 if ( temp < set_point+1 && temp > set_point-1)
171 {digitalWrite(ledtemp,HIGH);
172 on=1;}
173 ciccont=0;//reseteo contador
174 analogWrite(actpin,actval);
175 Serial.println(actval);
176 }
177 ciccont++;//cuento cada ciclo
178 }

```

Figura 39.-Código del Controlador proporcional por histéresis

Luego, como se muestra en la Figura 39, se crea una variable que representa la activación del actuador que en este caso es la niquelina, se la denomina *actval* y se lo inicializa en un valor de PWM de 200 ya que al prenderse el sistema del sensor de ozono empieza frío. Posteriormente, se compara con sentencias *if* la temperatura con el valor deseado *setpoint*. Si la temperatura (*temp*) se encuentra dentro de ± 1 grado no hace nada el controlador ni el actuador y mantiene el valor de PWM y si la temperatura es menor a la objetivo, se aumenta el valor de PWM a niquelina en 1 hasta un valor máximo de 255 de PWM. En contraste, si la temperatura es mayor a la objetivo, se disminuye en 1 el valor de PWM a la niquelina hasta un límite de 150 de PWM.

Se selecciona este límite porque la idea es de conservar la temperatura en un rango y no subir ni bajar bruscamente. Como es fundamental la adquisición de datos cuando la temperatura de mercurio está en un rango de 50 a 60°C, se programa para que cuando el

setpoint se cumpla, se prenda todo el sistema de control del sensor de ozono y se reinicie la variable contadora *ciccont*.

3.3.6 Programación del Control de Flujo Másico

Para poner en marcha el funcionamiento del controlador de flujo másico se debe seleccionar los pines adecuados de alimentación, tierra y control que se presentan en el manual del equipo y que se resume en la Figura 40.

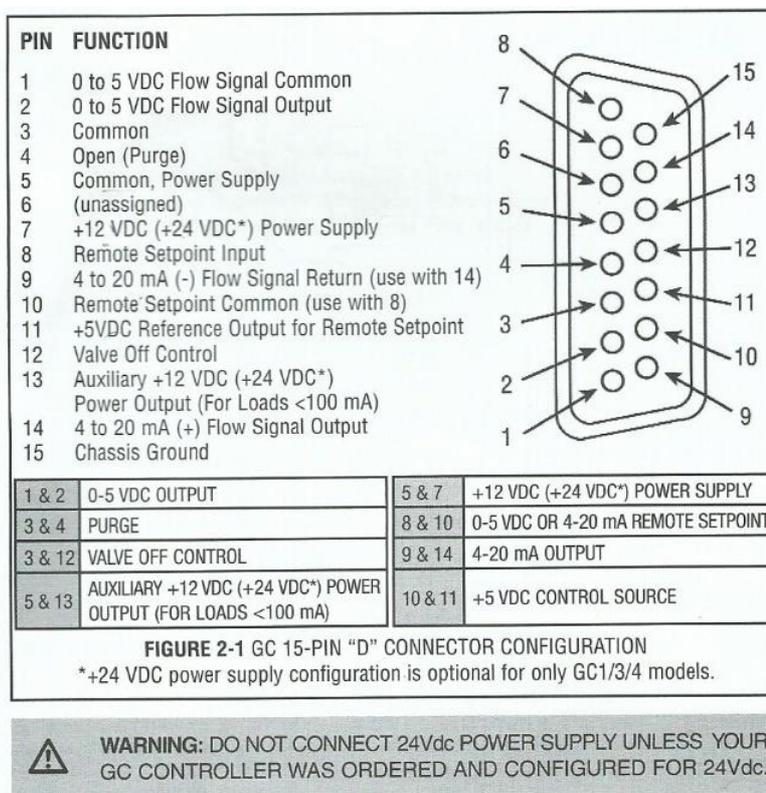


Figura 40.-Pines de programación del controlador de flujo másico

Los pines que son fundamentales para la lectura y control de flujo son los siguientes: el pin 7 para conectar la fuente de 12V_{DC} y el pin 5 como el común o tierra que se conecta en el pin AO GND de la DAQ. El pin 8 se selecciona porque es la entrada remota del setpoint, es decir, el pin que lee la salida de la señal analógica de la DAQ del pin AO0 al controlador

de flujo. Este pin 8 tiene como referencia común el pin 10 que es en el cual se conecta la tierra de la DAQ. El pin 2 es la señal de salida de flujo que se lo conecta al pin AI1 de la DAQ que lee la cantidad de flujo que circula en ese instante por las mangueras y canales ópticos. El pin 1 es el común de la señal de flujo y se lo conecta al pin AI GND de la DAQ. Según la Figura 40, se debe habilitar en un conector serial macho todos los pines mencionados para unirlos al conector serial hembra que corresponde al controlador de flujo.

3.3.7 Programación del Control del Motor de Pasos

El control del motor de pasos se lo programa en código Arduino creando la función `Control_Motor()`. El motor de pasos es bipolar por lo que tiene dos bobinas y cada bobina tiene cuatro cables de color negro, verde, rojo y azul. El cable negro físicamente se lo conecta en el puerto físico OUT 1 del driver del motor de pasos de la Figura 29, el verde en el OUT 2, el rojo en el OUT 4 y el azul en el OUT 3. Para que el motor realice los respectivos movimientos se necesita cambiar la dirección del flujo de corriente a través de las bobinas antes mencionadas en la secuencia apropiada (Stargazer, 2015), y es de este modo que para los pines de control IN1, IN2, IN4 y IN3 se asigna a los puertos digitales del Arduino 8, 9, 10 y 11 respectivamente para escribirlos en HIGH o en LOW a través de la función `digitalWrite()`. Se realizan ocho bloques de programación en los cuales se va realizando las distintas combinaciones de activación de las bobinas con HIGH o LOW. Al final de cada bloque se coloca un retraso de giro entre pasos de 2 milisegundos.

```

void Control_Motor() {

    for (int cont = 1; cont <= 25; cont++) //Control Motor de Pasos: Reducción de 50 a 1.

    {
        //Serial.println(cont);
        digitalWrite(motor1, HIGH);           //negro OUT1
        digitalWrite(motor2, LOW);           //verde OUT2
        digitalWrite(motor3, LOW);           //rojo OUT4
        digitalWrite(motor4, LOW);           //azul OUT3
        delay(v_giro);

        digitalWrite(motor1, HIGH);           //negro
        digitalWrite(motor2, LOW);
        digitalWrite(motor3, HIGH);           //rojo
        digitalWrite(motor4, LOW);
        delay(v_giro);

        digitalWrite(motor1, LOW);
        digitalWrite(motor2, LOW);
        digitalWrite(motor3, HIGH);           //rojo
        digitalWrite(motor4, LOW);
        delay(v_giro);
    }
}

```

Figura 41.-Bloques de programación para el control de motor de pasos bipolar. Resto de código se muestra en Anexos

Como se observa en la Figura 41, además de la activación de las bobinas, se implementa un lazo de control “for” que usa un contador desde 1 hasta 25 para que se ejecuten los 8 bloques de programación de la activación de bobinas. Esto se requiere debido a que el motor tiene una reducción de 50 a 1 y como se necesita solo media vuelta del rotor se selecciona el valor de 25. Al final de la programación de todos los bloques, se necesita desenergizar las bobinas, por lo que a todos los pines digitales se los inicializa en LOW y luego se coloca un retraso de 50 milisegundos entre pasos (dado que $v_giro = 50$).

La programación completa del motor de pasos se la detalla en Anexos.

3.3.8 Programación para Lectura de Temperatura

Una vez realizado el circuito acondicionador del sensor de temperatura mostrado en la Figura 25, se procede a la programación en el software LabVIEW para adquirir los datos de temperatura del recubrimiento de la lámpara de mercurio, crear la interfaz gráfica donde se visualice la temperatura que detecta el termistor, la resistencia y el voltaje de este sensor.

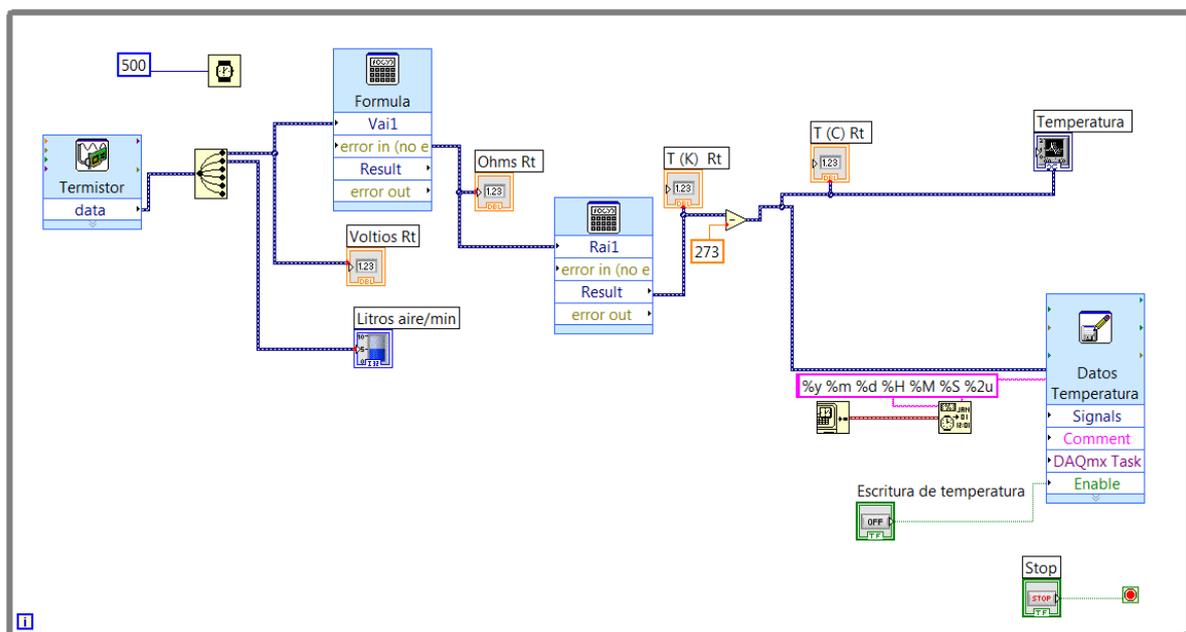


Figura 42.-Programación en LabVIEW para crear la interfaz gráfica del termistor y adquisición de valores de temperatura

En la Figura 42, se utiliza un asistente DAQ configurado para leer entradas analógicas, por lo que lee el sensor de temperatura que es el termistor asignado en el puerto AI3 de la tarjeta. La lectura del puerto AI3 es una señal de voltaje que se la muestra que se la puede leer por un bloque indicador. Además, se la añade un bloque de cálculo en la que se coloca la ecuación (9) que es un divisor de tensión para tener el valor en ohmios. Luego, el valor en ohmios se transforma a temperatura en grados Kelvin con la ayuda de la ecuación (5) que se implementa en otro bloque de cálculo.

El valor obtenido (al final de los dos bloques de cálculo) es en grados Kelvin de modo que se transforma a grados centígrados restando un valor de 273 para posteriormente adquirir el gráfico de temperatura con un período de muestreo de 500 milisegundos con la ayuda de un bloque de gráfico de onda.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 Visualización del Sistema SCADA

La interfaz gráfica del sensor de ozono de doble canal y un detector es bastante amigable para el usuario final debido a que los controles de los factores más importantes en la adquisición de datos del sensor como: los litros de aire por minuto que están pasando por los caminos ópticos del sensor, el tiempo de muestreo de datos de las cuentas y temperatura, el inicio o parada del proceso, la longitud de muestras para realizar el cálculo de la media del número de cuentas, el valor de setpoint o temperatura deseada en el compartimento de la lámpara de mercurio, y el inicio de escritura de los datos de temperatura, están tal como se muestran en la Figura 43.

Los datos adquiridos ya en grados centígrados se los guarda en un bloque de escritura de datos que se lo configura con el respectivo formato de fecha que en este caso es: día, mes, año, hora, minuto y segundo.

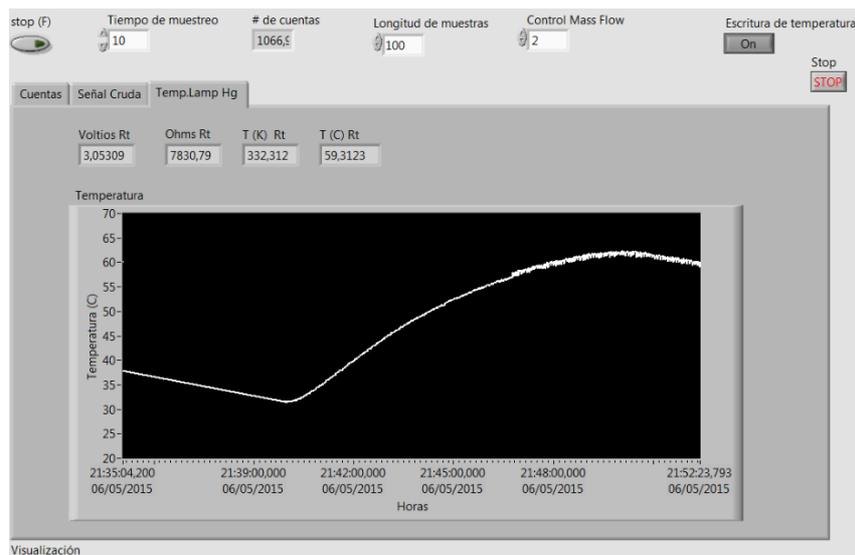


Figura 43.-Interfaz Gráfica (Front Panel) del Termistor.

La Figura 43 muestra la interfaz gráfica en la cual el usuario puede monitorear la temperatura de la lámpara en grados Kelvin y Centígrados, ver el valor en voltios de salida del circuito de acondicionamiento del sensor y la resistencia en ohmios del termistor a cierta temperatura. Existe un botón de escritura que permite al usuario habilitar o no el almacenamiento de los datos de temperatura que se obtienen durante el tiempo.

Con respecto a los indicadores, se tiene de forma gráfica la cantidad litros de aire por minuto que está permitiendo pasar el controlador de flujo a los dos canales en un tiempo determinado; y, se tiene el valor del número de cuentas del sensor de ozono cuando existe aire ambiente con ozono y aire sin ozono. Los indicadores para la forma de onda de salida son tres y lo conforman las cuentas, la señal cruda y la temperatura de la lámpara de mercurio como se muestra en las pestañas de la Figura 44.

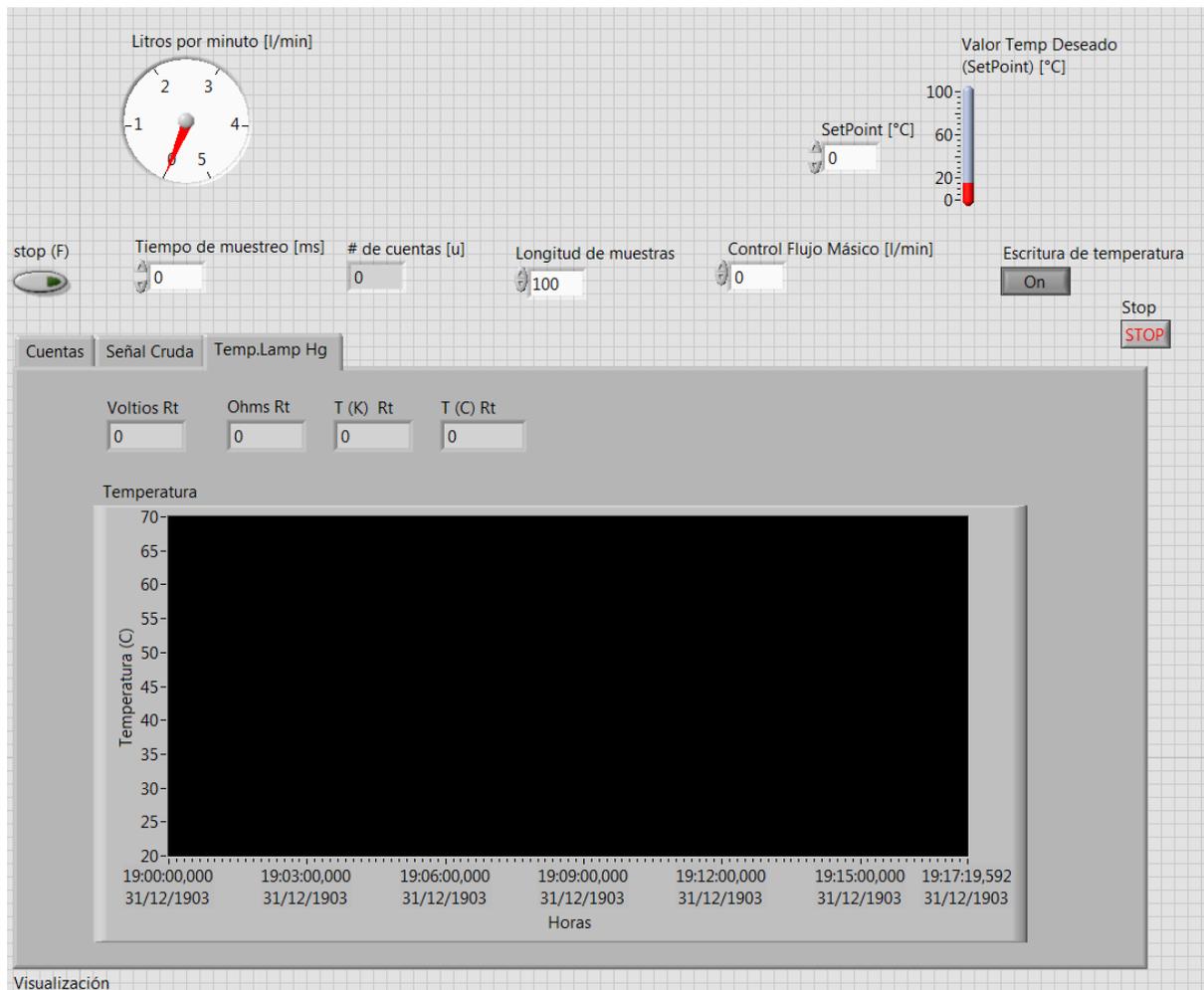


Figura 44.-SCADA del sensor de ozono de doble canal y un detector.

Los gráficos se cambian a la siguiente pestaña cada 30 segundos automáticamente para tener un rango de visualización amplio de todos los indicadores de onda. El procesamiento del Arduino al ser concebido dentro de este proyecto como un sistema embebido para optimizar la velocidad de procesamiento de los datos y evitar el consumo de recursos innecesarios en la computadora, no se lo integra en el SCADA del sensor de ozono, existiendo la opción de que el usuario visualice lo que está sucediendo con ciertas variables del proceso, por lo que se usa la ventana serial del software de Arduino como se muestra en la Figura 45.

Por otra parte, se tiene seis las variables a presentarse en la ventana serial de Arduino. La primera es el valor de 1 o 0 para saber si todo el sistema llegó a la temperatura deseada y se encendió el sistema (se imprime 1) o no (imprime 0). Segundo, el valor en PWM del Setpoint que escribe el usuario e inmediatamente debajo como tercer parámetro, el valor en grados centígrados del mismo. El cuarto es el valor en PWM de lo que mide el termistor y abajo como quinta variable el valor en grados centígrados del PWM. Como quinta variable, se mira el control en tiempo real de cuanto en señal PWM se está enviado a al circuito de control que contiene el semiconductor MOSFET para calentar más a la niquelina al enviar más energía eléctrica.

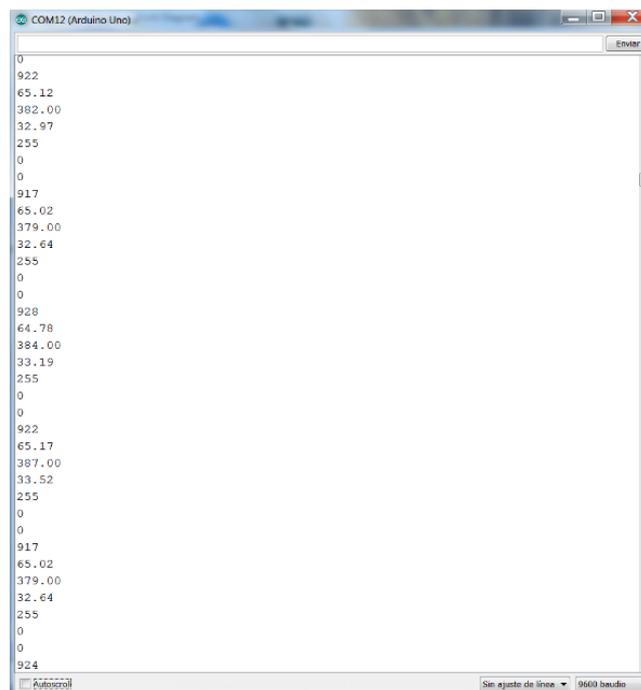


Figura 45.-Ventana serial de Arduino.

4.2 Control de la Temperatura de la lámpara de mercurio.

La temperatura existente en el recubrimiento de la lámpara de mercurio es monitoreada con un gráfico de temperatura (°C) versus tiempo (Horas), además de los

indicadores de voltaje en el termistor, la resistencia del termistor en un punto, la temperatura absoluta en Kelvin y la temperatura en grados centígrados como se muestra en la Figura 46.



Figura 46.-Gráfico Temperatura (C) vs Tiempo (horas)

Como se observa, el usuario ha seleccionado un valor de Setpoint de 60°C y según la gráfica de temperatura se mantuvo por 17 minutos en un rango de 60°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) tal como se programó en el controlador. Posteriormente, se detiene la medición y se observa que hay la existencia de ruido y es por esos pequeños picos que se decide colocar un capacitor de 10uF como filtro pasa bajo entre el puerto del termistor y tierra. Como resultado, se observa en la Figura 47 que el ruido es casi nulo por lo que el implementar el capacitor como filtro es factible y útil.

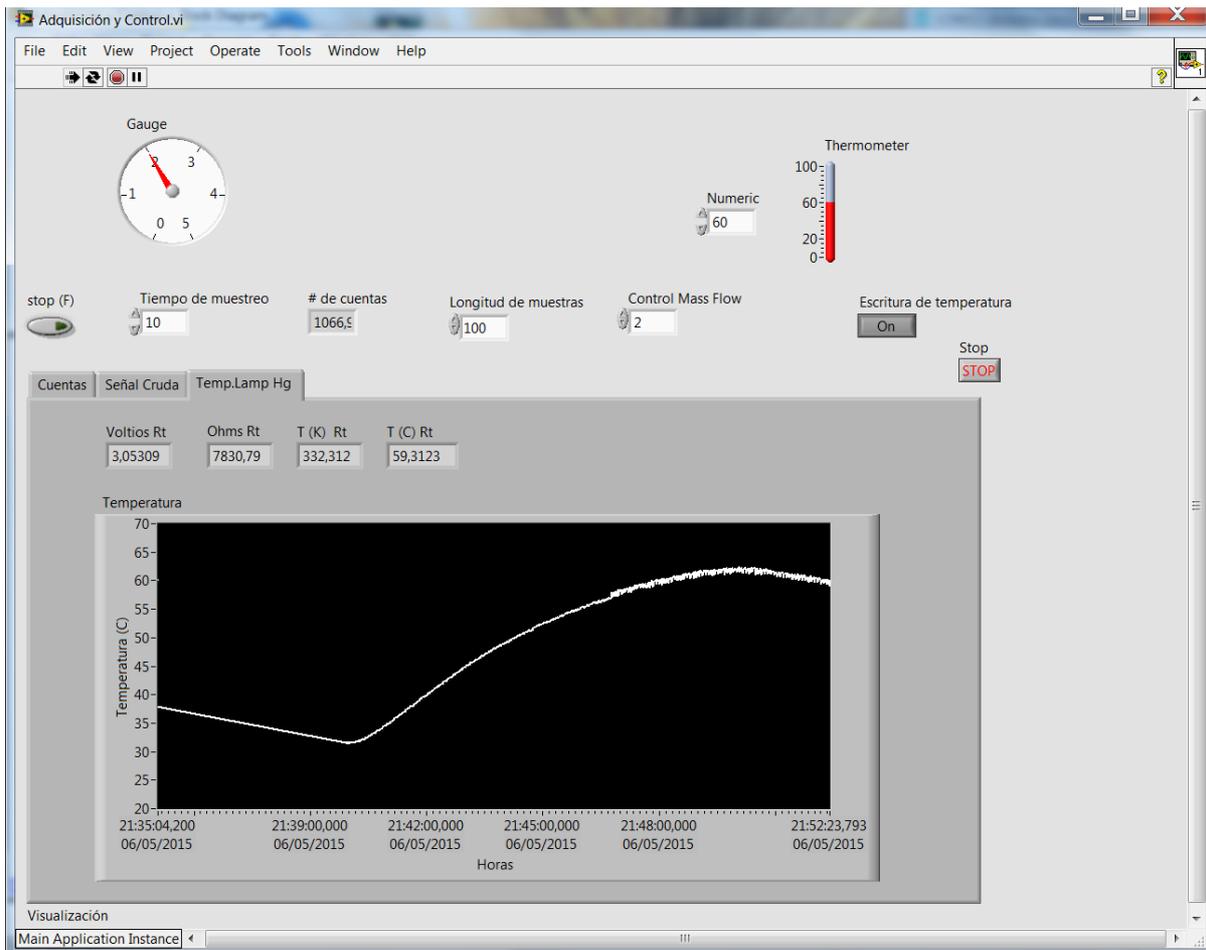
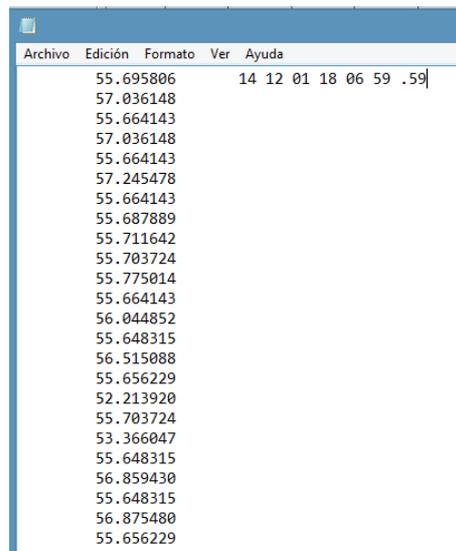


Figura 47.-Prueba controlador de temperatura con capacitor 10uF conectado a la entrada como filtro.

También se logra observar que en un momento se cambia el setpoint a uno menor que 60°C y el controlador responde muy bien al bajar el nivel de PWM a la niquelina y en consecuencia, baja la temperatura. Luego, a una temperatura 33°C se pide al controlador que suba al nuevo valor de setpoint de 60°C e inmediatamente el controlador cambia la modulación del PWM a la niquelina y aumenta la temperatura con un tiempo de respuesta de alrededor de 10 minutos para subir 27°C centígrados, que en procesos lentos como estos, ese valor es muy aceptable.

Los archivos que se guardan en el computador son archivos en formato .LVM que se los puede abrir desde el software de LabVIEW o también desde el bloc de notas. Estos archivos en sus datos presentan la hora y fecha respectiva y el valor de temperatura se lo muestran con cinco decimales de precisión como se ejemplifica en la Figura 48.



The image shows a screenshot of a text editor window. The title bar is blue and contains the text 'Archivo Edición Formato Ver Ayuda'. The main text area contains a list of temperature values, each with five decimal places. The first line includes a timestamp: '14 12 01 18 06 59 .59'. The values are: 55.695806, 57.036148, 55.664143, 57.036148, 55.664143, 57.245478, 55.664143, 55.687889, 55.711642, 55.703724, 55.775014, 55.664143, 56.044852, 55.648315, 56.515088, 55.656229, 52.213920, 55.703724, 53.366047, 55.648315, 56.859430, 55.648315, 56.875480, and 55.656229.

Figura 48.-Formato de los valores de Temperatura obtenidos

4.3 Control de Válvulas Solenoides

El funcionamiento de las válvulas solenoides es acertado porque en los resultados del gráfico del número de cuentas existe una variación en la forma de onda que significa una variación en el número de cuentas que representa la concentración de ozono en un medio, en este caso aire ambiente con ozono y aire sin ozono. Se puede observar que a la presencia de ozono, el número de cuentas es menor y que cuando es solo aire puro el número de cuentas es mayor (Figura 49). Esto se debe a que la intensidad de luz de la lámpara de mercurio se atenúa con el ozono y de este modo el funcionamiento de las válvulas es el adecuado porque

de no existir el cambio de estado de las válvulas solenoides, no existirían distintos tipos de forma de la onda que representa las atenuaciones de la luz.



Figura 49.-Curva resultante del sensor de ozono O3

Para que el usuario conozca si las válvulas solenoides cambian de estado sin ver lo que sucede en el SCADA, se integran focos Leds de color rojo y verde como indicadores que están colocados en el panel frontal de la carcasa de metal. El Led de color verde corresponde a la válvula solenoide 1 y el Led de color rojo a la válvula solenoide 2.



Figura 50.-LEDs indicadores del usuario

Estas se conectan al módulo relé en el pin normalmente cerrado y se activan o se apagan al cambio de estado de las válvulas. Por experimentación se verifica que el cambio de color de los Leds sucede cada 10 segundos por lo que el funcionamiento es óptimo.

4.4 Control del Flujo Másico

El control de flujo másico funciona muy bien debido a que en el SCADA al seleccionar un valor del 1 al 5 con el botón “control mass flow” se obtiene en el indicador gráfico que el valor seleccionado es el mostrado. En el caso de la Figura 51, el usuario en el botón llamado Control Mass Flow selecciona 2 que en realidad es una señal análoga de voltaje y se observa que en el indicador están pasando por los canales ópticos 2 litros por minutos. Existe una relación proporcional entre voltaje y flujo.

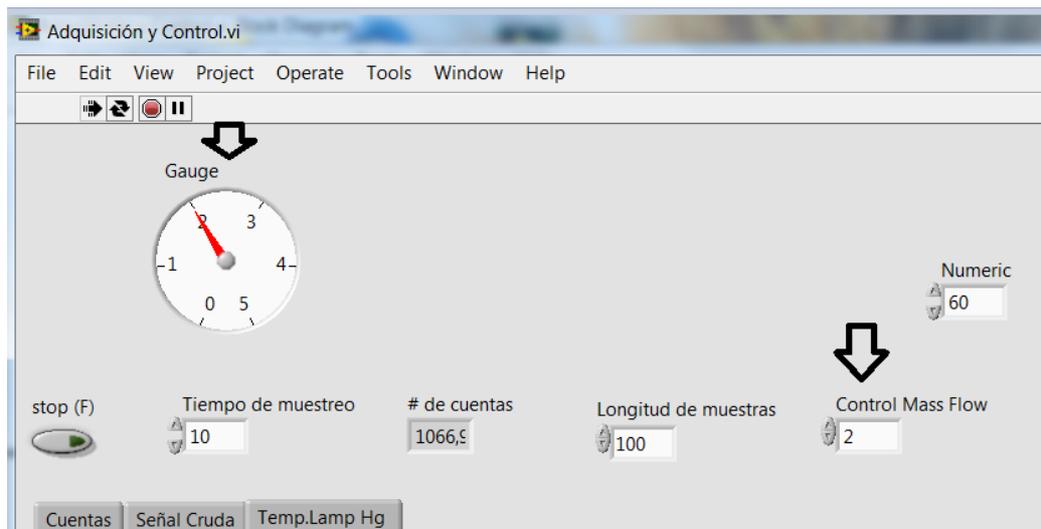


Figura 51.- Presentación y Control de Flujo de aire

De igual manera, al medir con un voltímetro a la salida de la señal de flujo del controlador de flujo que es el pin AI1, se observa que el valor seleccionado por el usuario 2V corresponde al valor de voltaje mostrado en el multímetro que es el valor de amplitud de la señal análoga que envía como señal del control la DAQ al flujómetro Dakota.

También, existe un medidor de flujo másico de la marca TSI modelo 4100 series calibrado para aire con el que se instala en línea a la salida de flujo del controlador Dakota y se verifica que el flujo asignado de salida desde la interfaz de LabVIEW sea el que se muestra en la pantalla digital de este medidor másico 4100 series.



Figura 52.-Flujómetro 4100 de la marca TSI

4.5 Control de Motor de Pasos

Se observa que el movimiento del motor de pasos es muy preciso debido a que el rotor gira 180° lo que significa una media vuelta, permitiendo la detección de intensidad de luz en un canal de los dos existentes gracias al troceador de señal que se mueve conforme el rotor lo indique. El movimiento del motor es suave y constante, no se queda enclavado en un solo lugar, por lo tanto la programación es la adecuada al permitir que la corriente fluya por las bobinas para que la secuencia de activación brinde un movimiento igual a la mitad de un paso real y se poseione en la óptica correcta para ser leído por el fotodiodo.

En el anexo C, se presenta el resultado de los movimientos del motor de pasos NEMA 17, en el cual se activan primero 2 bobinas y luego solo 1 y así sucesivamente hasta realizar los 8 movimientos que corresponden a los 8 bloques de programación que se implementó, más un bloque de reinicio.

Se observa que el movimiento del motor no se estanca en ningún punto por la secuencia de activación que tiene, lo que permite precisión en el posicionamiento del troceador que es importante para aumentar y conservar la sensibilidad del detector.

4.6 Lectura del Sensor de Ozono O₃

Para realizar las pruebas del sensor de ozono se usa un solo canal y una sola válvula solenoide. En el mismo canal, la válvula solenoide por un tiempo de 10 segundos permite el paso de aire ambiente y luego el aire con más ozono generado por la máquina generadora de ozono de la Figura 53.



Figura 53.-Máquina Generadora de Ozono

La válvula solenoide se encarga de alternar el flujo mientras la lámpara de mercurio a una temperatura en una rango de 50 a 53°C emite su luz a través del camino óptico para ser adquirido por el detector de ozono que es conectado a la tarjeta de adquisición de datos para el almacenamiento de las cuentas y presentación de las mismas como en la Figura 54.



Figura 54.- Gráfico de las cuentas detectadas por el sensor de ozono cuando existe aire y ozono

Cuando en el camino óptico del canal 1 existe aire ambiente, el número de cuentas es de alrededor de 11200 a 11500 unidades, pero cuando existe más presencia de ozono, las cuentas disminuyen en un rango de 6000 hasta 8000 unidades. Es claro que existen distintos valores de cuentas al ser el ozono un medio que absorbe la radiación de 254nm, lo que hace que se pierda más luz.

El número de cuentas en presencia del aire ambiente es lineal en un intervalo de tiempo, pero cuando la válvula a los 10 segundos cambia de estado, ingresa ozono y la tendencia de la línea baja a un nivel de 5900 a 6000 cuentas y esta tendencia no se mantiene lineal en sus 10 segundos de ingreso sino más bien tiende a incrementar en ese tiempo. Cuando está por estabilizarse en un valor de 8500, inmediatamente se incrementan las cuentas a nuevamente 11200 debido a que se activa la válvula solenoide y permite el paso de aire ambiente nuevamente. El ozono en su tiempo de acción no es constante debido a que la máquina generadora de ozono no envía un flujo constante de ozono y entonces la tendencia de la línea de estas cuentas no tiende a ser lineales.

El valor de las cuentas es proporcional a la intensidad de la luz de mercurio que se llega a atenuar por el medio (aire u ozono), y es de esta forma el cómo se sabe qué concentración de ozono existe en un intervalo de tiempo debido a que se obtiene el valor de transmitancia, que es la división de la luz transmitida ($I = 12000u$) para la luz incidente ($I_0 = 6000u$) que da como resultado 2 y ya es posible aplicar la ley de Lambert Beer en la ecuación (1).

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El diseño e implementación de los diagramas mecánicos y eléctricos permiten el funcionamiento óptimo del control y adquisición de señales del sensor de ozono de doble canal con un detector. Debido a la separación de la parte óptica, de control y de potencia del sensor en la estructura mecánica es fácil la puesta en marcha de todos sus componentes para la realización de mediciones atmosféricas en la EMA-USFQ.

El desarrollo de un circuito con un semiconductor MOSFET para conmutación de señales PWM a partir de un control proporcional on/off por histéresis programado en el microcontrolador Arduino es un método efectivo de control de temperatura de la lámpara de mercurio ya que mantiene la temperatura del compartimento de la lámpara de mercurio en un rango mínimo de 50 a un rango máximo de 60°C (exactamente 53.5 a 56.5 °C) por todo el tiempo de trabajo que se ponga al sensor a funcionar. El tiempo de respuesta fue de alrededor de 9 minutos para alcanzar la consigna deseada partiendo de la temperatura ambiente. Esta facilidad de control también es gracias al compartimento de aluminio que se hizo porque elimina todo tipo de aire externo que puede enfriar y retardar el aumento de temperatura.

El control proporcional por histéresis on/off no muestra cambios bruscos cuando está en proceso de funcionamiento lo que elimina cualquier oscilación y permite que la intensidad de luz emitida de mercurio sea la máxima en los dos canales del sensor y ésta se atenúe al pasar por medios absorbentes como el aire ambiente con ozono. La intensidad de la luz o el poder radiante disminuye con la exponencial de la longitud de los canales del sensor. Mientras mayor es el grosor óptico de la muestra, mayor la atenuación por absorción. (Paton, 1999).

El cambio de estado de las válvulas solenoides para permitir el paso alternado de aire ambiente con ozono y sin ozono por los dos canales ópticos del sensor permite tener diferencias de intensidad de luz de la lámpara de mercurio al controlar el paso de los medios absorbentes. Estas variaciones de intensidad de luz se las mide por número de cuentas y sirve para determinar el valor de la transmitancia, para luego, aplicar la ley de Beer y observar la concentración de ozono en un medio. El medidor de flujo másico controla la cantidad de aire que proviene de la bomba y al regular este caudal, el usuario realiza variaciones de la cantidad de los dos medios absorbentes que pasan por los canales ópticos afectando directamente en el valor de transmitancia.

La implementación de un troceador de señal con un motor de pasos en la óptica de la banca es fundamental para adquirir alta sensibilidad en la adquisición de señales del detector. El troceador de señal al elegir una de las señales provenientes de los dos canales ópticos toma muestras de ozono y aire puro en el primer canal y luego en el segundo canal, por lo que se obtiene valores de intensidad de luz dos veces y de dos medios por dos canales. Estas señales se detectan en un solo fotodiodo en vez de dos fotodiodos como en otros sensores, lo que reduce el ruido por componentes electrónicos y aumenta su sensibilidad.

La señal cruda tanto como las cuentas se muestran en la interfaz gráfica del usuario desarrollado en LabVIEW. Es muy fácil observar su tendencia y cambiar el tiempo de muestreo con el botón de control existente. La resolución alta de la tarjeta DAQ NI6009 permite una clara adquisición y gráfico de los datos lo que permite tener los valores más aproximados para calcular el valor de transmitancia a partir de la intensidad de luz incidente I_o y la luz transmitida I y proceder a la aplicación de la ley de Lambert-Beer en la ecuación (1) para determinar la concentración de ozono en el aire.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda que la estructura en la cual se ensamble la parte mecánica y eléctrica de una futura ampliación del sensor de ozono sea de un material no conductor para no tener problemas de aislamiento o posibles problemas de tierra de los circuitos con la carcasa.

Debido a interferencia electromagnética o al trabajar con fuentes inductivas, se recomienda que en vez de utilizar un sistema de relés para activación de válvulas solenoides, se use circuitos opto relé para evitar problemas con la señal o corrientes parásitas que pueden desestabilizar la programación del microcontrolador o dañar los circuitos.

Como trabajo futuro, se recomienda mejorar el sistema de control de temperatura mediante estrategias de control basadas en modelos dinámicos de la planta y también completar la parte de acondicionamiento de la señal para que las medidas sean de O_3 y no de cuentas.

Para aumentar el tiempo de respuesta del controlador de temperatura se sugiere alimentar ya no con 9V al circuito MOSFET de control de temperatura sino con 12V y aumentar la caída de voltaje en la niquelina y en consecuencia aumentar la temperatura más rápido por la dispersión de energía en forma de calor.

REFERENCIAS

- al., M. A. (2005). *Medición de Caudal*. Barcelona: Endress+Hauser.
- Arduino. (22 de 11 de 2014). *Arduino*. Obtenido de <http://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=>
- Areny, R. P. (2005). *Sensores y Acondicionadores de Señal*. Barcelona: Marcombo.
- Británica, E. d. (10 de 05 de 2015). *Enciclopedia Británica*. Obtenido de <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/632467/voltage-regulator>
- C.V., T. S. (11 de 05 de 2015). *Termokew S.A.* Obtenido de <http://www.termokew.mx/termocuplas-controles-temperatura.php>
- Carvalho Juan Pablo, V. R. (16 de 11 de 2003). *Válvulas de Solenoide*. Obtenido de <http://profesores.elo.utfsm.cl/~jgb/CARVALLOVARGASc.pdf>
- Corporation, G. (23 de 11 de 2014). *GLOLAB*. Obtenido de <http://www.glolab.com/relays/relays.html>
- Corporation, N. I. (03 de 12 de 2014). *National Instruments*. Obtenido de <http://www.ni.com/labview/esa/>
- Corporation, N. I. (28 de 03 de 2015). *National Instruments*. Obtenido de <http://www.ni.com/getting-started/labview-basics/esa/environment>
- Corporation, T. E. (11 de 09 de 2014). *Thermo*. Obtenido de http://www.cmbcontrol.com.mx/pdf/thermo_analizadordeozono_49i.pdf
- Corporation, V. E. (16 de 11 de 2014). *www.Valcor.com*. Obtenido de <http://www.valcor.com/valcor-technical-datasheets/3-way-universal-ptfe-instrumentation-valves-SV75.pdf>
- Cruz, A. (28 de 03 de 2015). *ELECTRONILAB*. Obtenido de <http://electronilab.co/tutoriales/tutorial-de-uso-driver-dual-l298n-para-motores-dc-y-paso-a-paso-con-arduino/>
- Domínguez, M. (25 de 03 de 2015). *Universidad de Vigo*. Obtenido de <http://mdgomez.webs.uvigo.es/>
- Encyclopedia, C. E. (2014). Relay. *Columbia Electronic Encyclopedia*, Q1.
- Extreme, D. (23 de 11 de 2014). *DX.com*. Obtenido de http://www.dx.com/p/2-channel-12v-high-level-trigger-relay-module-for-arduino-153966#.VHE0PouG_W8
- Fadali, M. (2009). *Digital Control Engineering Analysis and Design*. Burlington: ELSEVIER.
- García, A. (19 de 04 de 2015). *Panamá Hitek*. Obtenido de <http://panamahitek.com/conceptos-basicos-de-electronica-el-diodo/>
- GmbH, F. D. (10 de 05 de 2015). *Fluid SIM 5*. *Fluid SIM 5*. Berlín, Alemania.
- Hart, D. W. (2010). *Power Electronics*. New York: McGraw- Hill.
- Iftak Husain, A. C. (2013). Fiber-Optic Volumetric Sensor Based on Beer-Lambert Principle. *IEEE SENSORS JOURNAL VOL. 13, 2*.
- Instruments, N. (21 de 04 de 2015). *National Instruments*. Obtenido de <http://www.ni.com/labview/applications/embedded/esa/>
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering*. Boston: Prentice Hall.
- Omega. (16 de Noviembre de 2014). *Omega.com*. Obtenido de <http://users.obs.carnegiescience.edu/crane/pfs/man/Electronics/Omega-44000-thermistors.pdf>
- Paton, B. E. (1999). *Sensors, Transucers & LabVIEW*. New Jersey: Prentice Hall.

- PEITSCH.HNOS. (07 de 12 de 2014). *Preciolandia*. Obtenido de <http://www.preciolandia.com/ar/driver-control-motor-dc-o-a-pasos-puente-7s0ldq-a.html>
- Pierret, R. F. (1996). *Semiconductor Device Fundamentals*. New York: Addison Wesley Longman.
- Posada, A. (16 de 11 de 2014). *Hangar.org*. Obtenido de CapsuLabs: <http://hangar.org/webnouw/wp-content/uploads/2012/01/capsulab101.pdf>
- Sass, L. (16 de 11 de 2014). *Actuación y Sensores en Robótica*. Obtenido de IME 440: http://profesores.usfq.edu.ec/laurents/IME440/IME440_ActSens.pdf
- SGS-Thomson. (06 de 12 de 2014). *SGS-Thomson Microelectronics*. Obtenido de <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXrqtrw.pdf>
- Smith, A. S. (2010). *Microelectronics Circuits*. New York: OXFORD UNIVERSITY PRESS.
- Stargazer. (19 de 04 de 2015). *La Web de Android* . Obtenido de Todo Robot: <http://www.todorobot.com.ar/tutorial-sobre-motores-paso-a-paso-stepper-motors/>
- Store, T. (24 de 11 de 2014). *Tohobby Store*. Obtenido de <http://www.tohobby.com/1298n-dual-h-bridge-stepper-motor-controller-2-dc-motor-driver-for-2wd-arduino-robot-car-chassis.html>
- TIMESWITCH. (11 de 05 de 2015). *Instructivo #PA326,Mar*. Obtenido de <http://www.webddigital.com/Fabricantes%5Cddigital%5Ctimeswitch%5Cpdf%5CInstr401-901.PDF>
- Umar Hamid, R. A. (03 de 12 de 2014). *PC Based Data Acquisition and Signal Processing for Underwater Sensor Arrays*. Islamabad , Pakistan , Pakistan .
- WordPress. (27 de 04 de 2015). *Todo Robot/ La Web Android*. Obtenido de <http://www.todorobot.com.ar/tutorial-sobre-motores-paso-a-paso-stepper-motors/>

**ANEXO A.- CÓDIGO DESARROLLADO EN ARDUINO PARA EL SISTEMA DE
CONTROL DEL SENSOR DE OZONO (O₃) Y TEMPERATURA.**

```

//Control temperatura
int termpin = A3; // pin termistor
double termval = 0; // variable para almacenar el voltaje del termistor
int actpin=3;// pin del actuador niquelina
int actual=200;//valor para el actuador, empieza alto porque siempre comienza frío el sistema
double temp=0;//variable para almacenar la temperatura
double set_point=0;//constante de temperatura set point/objetivo
double set_point1=0;
int setpoint = A5;//pin lectura del setpoint
int ciccont=1;//contador de ciclos ya que no se puede usar delays
int ledtemp=7;//led indicador de temperatura alcanzada
int on=0;//activacion del sistema cuando temperatura es optima

//control motor
int motor1 = 8; //IN1
int motor2 = 9; //IN2
int motor3 = 10; //IN4
int motor4 = 11; //IN3

//tiempos entre funciones para sincronizacion
int espera = 100; //espera entre pasos milisegundos
int v_giro = 2; // velocidad giro entre pasos milisegundos
int contador = 0 ;

//control valvulas
int valvula1 = 12;
int valvula2 = 13;
int estval = LOW;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(actpin,OUTPUT);
  pinMode(ledtemp, OUTPUT);
  pinMode(motor1, OUTPUT);
  pinMode(motor2, OUTPUT);
  pinMode(motor3, OUTPUT);
  pinMode(motor4, OUTPUT);
  pinMode(valvula1, OUTPUT);

```

```

pinMode(valvula2, OUTPUT);

}

void loop() {
  Serial.println(on);
  if (on==1){
    Control_Motor();
    delay(round(espera/4));
    Control_Valvulas();
    delay(round(espera/4));
  }
  lect_setpoint();
  delay(round(espera/4));
  cont_temp();
  delay(round(espera/4));
}

void Control_Motor(){
  for (int cont=1; cont<=25; cont++) //Control Motor de Pasos: Reducción de 50 a 1.
  {
    //Serial.println(cont);
    digitalWrite(motor1, HIGH); //negro OUT1
    digitalWrite(motor2, LOW); //verde OUT2
    digitalWrite(motor3, LOW); //rojo OUT4
    digitalWrite(motor4, LOW); //azul OUT3
    delay(v_giro);

    digitalWrite(motor1, HIGH); //negro
    digitalWrite(motor2, LOW);
    digitalWrite(motor3, HIGH); //rojo
    digitalWrite(motor4, LOW);
    delay(v_giro);

    digitalWrite(motor1, LOW);
    digitalWrite(motor2, LOW);
    digitalWrite(motor3, HIGH); //rojo
    digitalWrite(motor4, LOW);
    delay(v_giro);

    digitalWrite(motor1,LOW);
    digitalWrite(motor2, HIGH); //verde
    digitalWrite(motor3, HIGH); //rojo
    digitalWrite(motor4, LOW);
    delay(v_giro);

    digitalWrite(motor1, LOW);

```

```

digitalWrite(motor2, HIGH); //verde
digitalWrite(motor3, LOW);
digitalWrite(motor4, LOW);
delay(v_giro);

digitalWrite(motor1, LOW);
digitalWrite(motor2, HIGH); //verde
digitalWrite(motor3, LOW);
digitalWrite(motor4, HIGH); //azul
delay(v_giro);

digitalWrite(motor1, LOW);
digitalWrite(motor2, LOW);
digitalWrite(motor3, LOW);
digitalWrite(motor4, HIGH); //azul
delay(v_giro);

digitalWrite(motor1, HIGH); //negro
digitalWrite(motor2, LOW);
digitalWrite(motor3, LOW);
digitalWrite(motor4, HIGH); //azul
delay(v_giro);
}

digitalWrite(motor1, LOW); //Se necesita desenergizar el motor para que no haya
trabas y empezar desde cero.
digitalWrite(motor2, LOW);
digitalWrite(motor3, LOW);
digitalWrite(motor4, LOW);

delay(round(espera/2));
}

void Control_Valvulas(){
  Serial.println(contador);
  if (contador>0 && contador<=10){
    estval=HIGH;
  }
  if (contador>10 && contador <=20){
    estval=LOW;}
  if (contador>20)
  {contador=0;}

  if (estval==HIGH){// && estval==LOW){

```

```

    digitalWrite(valvula2,LOW);
    digitalWrite(valvula1,HIGH); //me escribe estado anterior negado
} else { // && estval==HIGH){
    digitalWrite(valvula1,LOW); //me escribe estado anterior negado
    digitalWrite(valvula2,HIGH);
}
    contador ++;
}
void lect_setpoint(){
set_point1=analogRead(setpoint);
set_point1=(set_point1*50/1024)+20;
if (set_point1>set_point+2 || set_point1<set_point-2){
    set_point=set_point1;
    digitalWrite(ledtemp,LOW);
    on=0;
}
}

void cont_temp(){
if (ciccont>=2){
    Serial.println(analogRead(setpoint));
    Serial.println(set_point1);

termval=analogRead(termpin);//lectura de voltaje termistor
Serial.println(termval);
temp=((termval*5/1023)*22.72)-9.45;//conversión voltaje a temperatura
Serial.println(temp);
//si la temperatura se encuentra dentro de +- 1 grado no hace nada y mantiene el valor de
pwm
if( temp < set_point-1 && actual < 255){//comparación si la temperatura esta menor a la
objetivo
actual=actual+1;
//analogWrite(A1,actual);//aumento pwm a niquelina
} else if( temp > set_point+1 && actual > 150){//comparación si la temperatura es mayor a la
objetivo
actual=actual-1;
//analogWrite(A1,actual);//bajo pwm de niquelina
}
if ( temp < set_point+1 && temp > set_point-1)
{digitalWrite(ledtemp,HIGH);
on=1;}
ciccont=0;//reseteo contador
analogWrite(actpin,actual);
Serial.println(actual);
}
ciccont++;//cuento cada ciclo
}

```

ANEXO B.- PARÁMETROS DE ACONDICIONAMIENTO DEL SENSOR

Tabla 2.-Resumen de parámetros y variables para la linealización del termistor Omega 44032

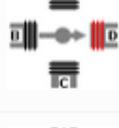
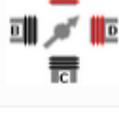
Constantes Steinhart-Hart							
a	9,376E-04	Temperatura					
b	2,208E-04	Rango de		20	70		
c	1,276E-07	Centigrados				Kelvin	
		45				318,15	
alpha	-17285,04						
beta	16327,768	9,494401					
Resistencia Termistor (ohms)							
13285,134							
Resistencia Acondicionadora (ohms)							
12288,518							
						Voltaje [V]	5
						Vi1 [V]	2,40257

Centigrado	Kelvin	Alpha	Beta	Rtc [ohm]	R [ohm]	Vi [V]	Temp[C]
20	293,15	-19385,76	16907,24	37367	12280	1,237	20
21	294,15	-19294,875	16881,23	35755,4	12280	1,278	21
22	295,15	-19204,606	16855,48	34221,6	12280	1,32	22
23	296,15	-19114,947	16829,98	32761,3	12280	1,363	23
24	297,15	-19025,891	16804,73	31370,8	12280	1,407	24
25	298,15	-18937,433	16779,73	30046,4	12280	1,451	25
26	299,15	-18849,566	16754,98	28784,5	12280	1,495	26
27	300,15	-18762,284	16730,47	27582	12280	1,54	27
28	301,15	-18675,583	16706,2	26435,9	12280	1,586	28
29	302,15	-18589,455	16682,17	25343,1	12280	1,632	29
30	303,15	-18503,895	16658,37	24300,9	12280	1,678	30
31	304,15	-18418,898	16634,81	23306,9	12280	1,725	31
32	305,15	-18334,458	16611,47	22358,5	12280	1,773	32
33	306,15	-18250,57	16588,36	21453,4	12280	1,82	33
34	307,15	-18167,228	16565,47	20589,4	12280	1,868	34
35	308,15	-18084,426	16542,81	19764,6	12280	1,916	35

36	309,15	-18002,161	16520,36	18976,9	12280	1,964	36
37	310,15	-17920,426	16498,13	18224,5	12280	2,013	37
38	311,15	-17839,216	16476,11	17505,6	12280	2,061	38
39	312,15	-17758,527	16454,31	16818,7	12280	2,11	39
40	313,15	-17678,353	16432,71	16162,1	12280	2,159	40
41	314,15	-17598,689	16411,32	15534,3	12280	2,207	41
42	315,15	-17519,531	16390,13	14934,1	12280	2,256	42
43	316,15	-17440,874	16369,14	14359,9	12280	2,305	43
44	317,15	-17362,713	16348,36	13810,7	12280	2,353	44
45	318,15	-17285,043	16327,77	13285,1	12280	2,402	45
46	319,15	-17207,86	16307,37	12782,1	12280	2,45	46
47	320,15	-17131,159	16287,17	12300,6	12280	2,498	47
48	321,15	-17054,935	16267,16	11839,6	12280	2,546	48
49	322,15	-16979,185	16247,34	11398,1	12280	2,593	49
50	323,15	-16903,904	16227,7	10975,2	12280	2,64	50
51	324,15	-16829,087	16208,25	10570,1	12280	2,687	51
52	325,15	-16754,731	16188,98	10181,8	12280	2,734	52
53	326,15	-16680,83	16169,89	9809,69	12280	2,78	53
54	327,15	-16607,381	16150,98	9452,96	12280	2,825	54
55	328,15	-16534,38	16132,24	9110,92	12280	2,87	55
56	329,15	-16461,822	16113,68	8782,89	12280	2,915	56
57	330,15	-16389,704	16095,29	8468,24	12280	2,959	57
58	331,15	-16318,022	16077,07	8166,37	12280	3,003	58
59	332,15	-16246,771	16059,02	7876,7	12280	3,046	59
60	333,15	-16175,948	16041,14	7598,68	12280	3,089	60
61	334,15	-16105,548	16023,42	7331,8	12280	3,131	61
62	335,15	-16035,569	16005,87	7075,55	12280	3,172	62
63	336,15	-15966,006	15988,47	6829,48	12280	3,213	63
64	337,15	-15896,856	15971,24	6593,12	12280	3,253	64
65	338,15	-15828,115	15954,16	6366,07	12280	3,293	65
66	339,15	-15759,779	15937,24	6147,9	12280	3,332	66
67	340,15	-15691,845	15920,47	5938,23	12280	3,37	67
68	341,15	-15624,31	15903,86	5736,7	12280	3,408	68
69	342,15	-15557,169	15887,39	5542,95	12280	3,445	69
70	343,15	-15490,419	15871,08	5356,65	12280	3,481	70

ANEXO C.- SECUENCIA DEL TIPO DE MEDIO PASO DEL MOTOR NEMA17

(WORDPRESS, 2015)

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	ON	ON	OFF	OFF	
3	OFF	ON	OFF	OFF	
4	OFF	ON	ON	OFF	
5	OFF	OFF	ON	OFF	
6	OFF	OFF	ON	ON	
7	OFF	OFF	OFF	ON	
8	ON	OFF	OFF	ON	

ANEXO D.- PLANOS MECÁNICOS

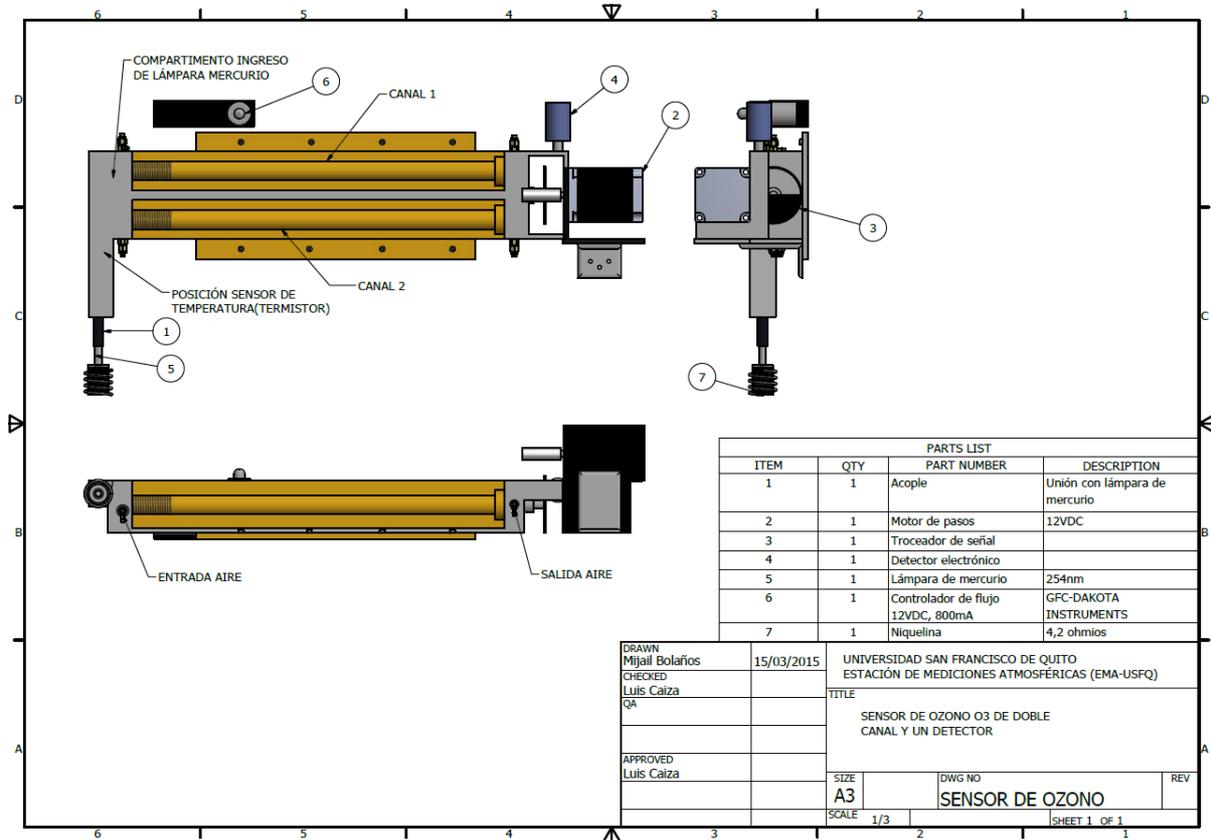


Figura 55.-Plano Mecánico Banca Óptica del sensor de Ozono (O3)

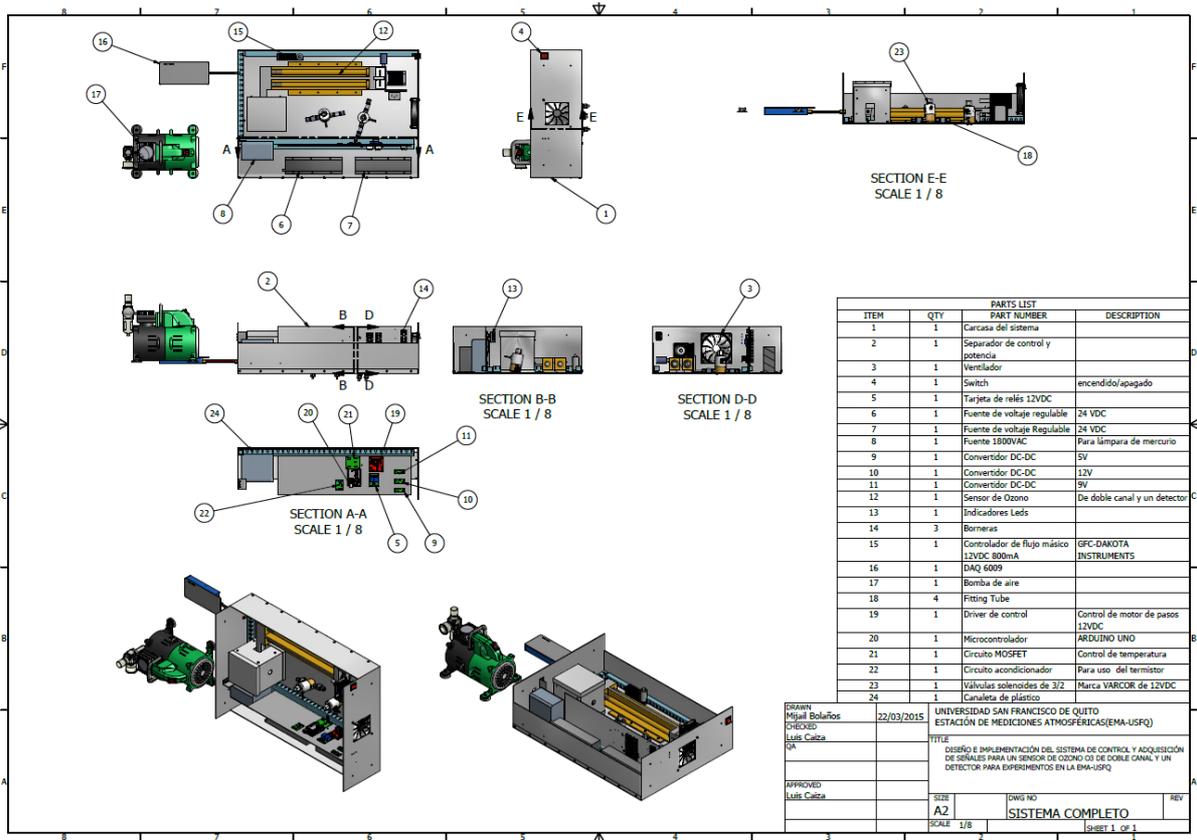


Figura 56.-Plano mecánico completo del ensamblaje del sensor de Ozono (O3)

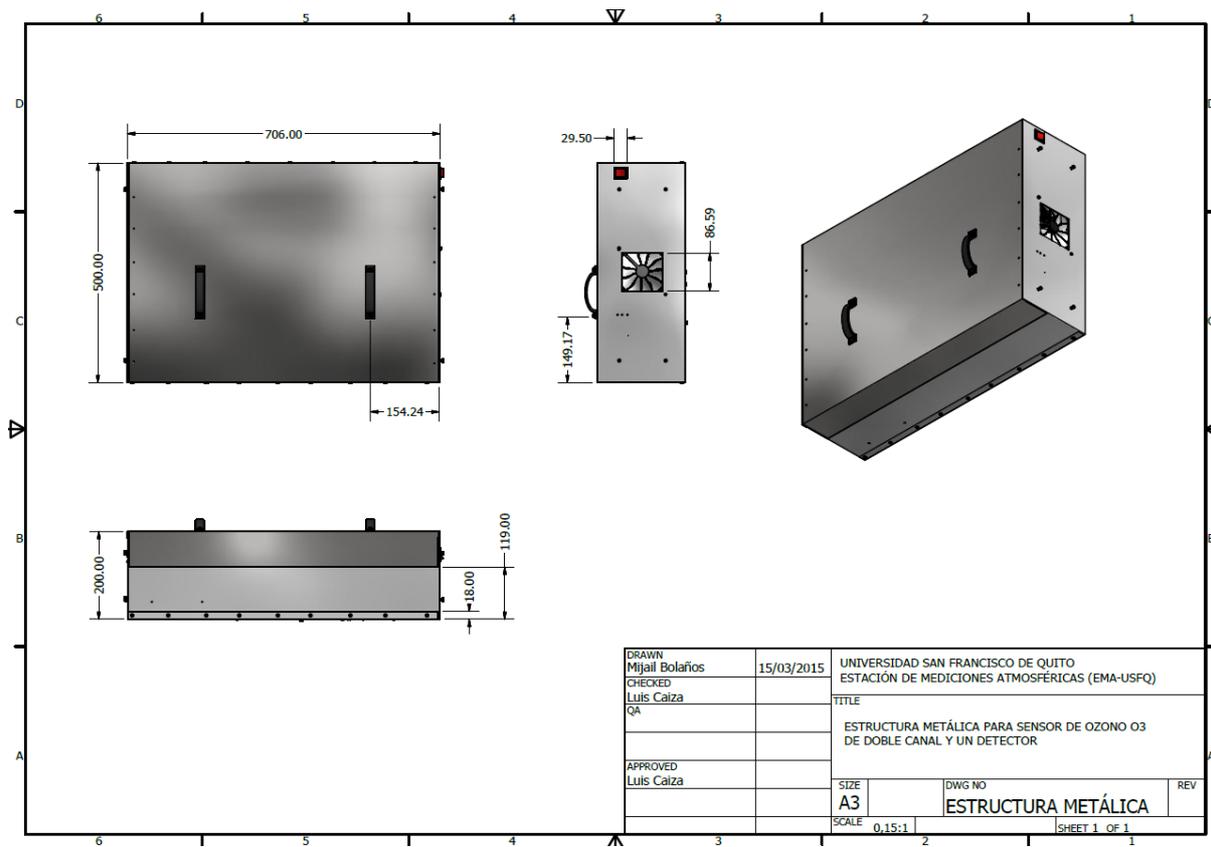


Figura 57.-Estructura Metálica del Sensor de Ozono (O3)

