

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Diseño e implementación de un sistema de control de un
generador de ozono y procesamiento
de datos de para la EMA-USFQ
Proyecto de Investigación**

Edgar Alexis Herrera Montalvo

Ing. Eléctrica y Electrónica

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Eléctrico y Electrónico

Quito, 16 de mayo de 2016

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Diseño e implementación de un sistema de control de un generador de ozono
y procesamiento de datos de para la EMA-USFQ**

Edgar Alexis Herrera Montalvo

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Luis Caiza, M.Sc. Director de Proyecto

María Del Carmen Cazorla, Ph. D.
Directora de Proyecto

Firma de los profesores

Quito, 16 de mayo de 2016

Derechos de Autor

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

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

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Edgar Alexis Herrera Montalvo

Código: 00100225

Cédula de Identidad: 1720745858

Lugar y fecha: Quito, mayo de 2016

RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad el diseño e implementación de un instrumento que integre las funcionalidades de sensor y generador de ozono, para ser empleado en pruebas y experimentos de la Estación de Mediciones atmosféricas de la USFQ (EMA-USFQ). La primera etapa del proyecto, ya ejecutada, consistió en ensamblar la carcasa donde residirán los componentes internos del instrumento, además del desarrollo del hardware, control de temperatura y control de flujo para el sensor de ozono. La segunda etapa, tratada a continuación, consiste primeramente en el procesamiento de la señal proveniente del sensor para conseguir la medida de concentración de ozono en partes por billón (ppb), lo que implica la medición de temperatura y presión del gas. En segundo lugar, se debe acoplar un generador de ozono basado en el método de luz ultravioleta (UV), cuya temperatura e intensidad tienen también que ser controladas, de manera que se ajusten a los valores definidos por el usuario.

Palabras clave: ozono, sensor, generador de ozono, ppb, Ley de Beer, luz ultravioleta.

ABSTRACT

The following project has the goal of designing and implementing an instrument that functions both as an ozone generator and sensor, to be employed on experiments at the EMA-USFQ. The first stage of the project, already finished, consisted of assembling the carcass in which all of the instrument's components will reside; and additionally, it includes the development of the ozone sensor's hardware, temperature control and air flow control. The second stage, which is the subject of this document, consists of three parts. First, the signal supplied by the sensor must be processed to obtain the measurement of ozone concentration in ppb units. This process also includes the measurement of the gas temperature and pressure. The second part consists of assembling an UV ozone generator to the instrument, along with the control of the generator's temperature and light intensity, so that their values can be manually adjusted by the end user.

Key words: ozone, sensor, ozonator, ppb, Beer Law, UV light.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| Capítulo 1: INTRODUCCIÓN | 11 |
| 1.1 Antecedentes | 11 |
| 1.2 Justificación e Importancia | 13 |
| 1.3 Objetivo General y Objetivos Específicos | 15 |
| 1.3.1 Objetivo General | 15 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos | 15 |
| Capítulo 2: MARCO TEÓRICO | 17 |
| 2.1 Medición de Ozono mediante la Ley de Beer | 17 |
| 2.1.1 Partes por billón (ppb)..... | 19 |
| 2.1.2 Banca Óptica..... | 19 |
| 2.2 Producción de Ozono por medio de Radiación Ultravioleta | 19 |
| 2.2.1 Generador de Ozono..... | 21 |
| 2.3 Descripción del Funcionamiento del Sensor y Generador de Ozono | 21 |
| 2.3.1 Etapa 1 | 23 |
| 2.3.2 Etapa 2 | 24 |
| 2.3.3 Etapa 3 | 25 |
| 2.3.4 Etapa 4 | 26 |
| 2.4 Hardware | 27 |
| 2.4.1 Sensores y Transductores..... | 27 |
| 2.4.1.1 Fotodiodo..... | 27 |
| 2.4.1.2 Termistores y Medición de Temperatura..... | 28 |
| 2.4.1.2.1 Ecuación Steinhart-Hart..... | 29 |
| 2.4.1.3 Transductor de Presión y Medición de Presión..... | 29 |
| 2.4.1.3.1 Sensor de Presión MPXV5100G | 30 |
| 2.4.2 Arduino MEGA 2560 | 30 |
| 2.4.2.1 Ciclo de Trabajo | 32 |
| 2.4.2.2 Modulación por Ancho de Pulsos (PWM)..... | 32 |
| 2.4.2.3 Bits de Resolución..... | 33 |
| 2.4.3 Lamp Manager | 33 |
| 2.4.3.1 Potenciómetro Digital MCP4141-503 | 35 |
| 2.4.3.2 Serial Peripheral Interface (SPI) | 36 |
| 2.4.4 Controlador de Flujo Másico (Mass Flow Controller - MFC) | 37 |
| 2.4.5 Válvula Solenoide 3/2 | 38 |
| 2.4.6 Motor Paso a Paso | 39 |
| 2.5 Software | 40 |
| 2.5.1 LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)..... | 41 |
| 2.5.1.1 Adquisición de datos (DAQ) | 41 |
| 2.5.1.2 DAQ NI USB-6009 | 42 |
| 2.5.1.3 Máquina de Estados | 43 |
| 2.5.1.4 Smoothing (Alisado) | 43 |
| 2.5.1.4.1 Promedio Móvil (Moving Average) | 44 |
| 2.5.2 Arduino IDE (Integrated Development Environment)..... | 45 |
| 2.5.2.1 Control PID (Proporcional-Integral-Derivativo)..... | 45 |
| 2.5.2.1.1 Sintonización Ziegler-Nichols para controladores PID..... | 46 |
| 2.5.3 MATLAB (Matrix Laboratory)..... | 47 |
| 2.5.3.1 Curve Fitting App | 47 |
| Capítulo 3: DESARROLLO | 49 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1 Configuración de Pines Arduino MEGA 2560 | 49 |
| 3.2 Diseño de Circuitos | 50 |
| 3.2.1 Circuito para la Medición de la Temperatura (Banca Óptica) | 50 |
| 3.2.2 Circuito para el Control de Temperatura (Lámpara de 185nm) | 52 |
| 3.2.3 Circuito para la Medición de Presión | 54 |
| 3.2.4 Circuito para el Control de la Intensidad de Luz | 54 |
| 3.3 Interfaz Gráfica LabVIEW | 56 |
| 3.4 Programación en LabVIEW | 60 |
| 3.4.1 Inicialización (Estado 0) | 60 |
| 3.4.2 Adquisición y Generación de Datos (Estado 1) | 61 |
| 3.4.2.1 Medición de la Intensidad de Luz | 63 |
| 3.4.2.2 Medición de Temperatura, Presión y Flujo Másico | 65 |
| 3.4.2.3 Control de Temperatura y Flujo Másico..... | 66 |
| 3.4.2.4 Control de la Intensidad de Luz | 67 |
| 3.4.2.5 Ajuste del Interruptor Óptico | 67 |
| 3.4.2.6 Sincronización del Control de Flujo Másico (MFC 2), Control de Intensidad de Luz (185nm) y Ajuste del Interruptor Óptico | 67 |
| 3.4.2.7 Periodo de Medición | 68 |
| 3.4.2.8 Señales de Salida | 71 |
| 3.4.3 Procesamiento de Datos (Estado 2)..... | 71 |
| 3.4.3.1 Señales de Entrada | 71 |
| 3.4.3.2 Procesamiento de la Señal de Intensidad de Luz | 72 |
| 3.4.3.3 Obtención de la medida de concentración de Ozono en ppb | 73 |
| 3.4.4 Salir (Estado 3)..... | 74 |
| Capítulo 4: Resultados | 75 |
| 4.1 Medición de Temperatura | 75 |
| 4.2 Control de Temperatura | 76 |
| 4.3 Medición y Control del Flujo Másico | 78 |
| 4.4 Ajuste de Posición del Interruptor Óptico | 79 |
| 4.5 Prueba del 14 de abril de 2016 | 80 |
| 4.5.1 Control de Temperatura | 81 |
| 4.5.2 Control de Flujo Másico | 82 |
| 4.5.3 Medición de la Intensidad de Luz (Lámpara de 254nm) | 82 |
| 4.5.4 Obtención de la relación I/I ₀ para la aplicación de la ley de Beer | 86 |
| Capítulo 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 88 |
| 5.1 Conclusiones | 88 |
| 5.2 Recomendaciones | 89 |
| REREFERENCIAS | 90 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Lista de Símbolos | 23 |
| Tabla 2. Lista de Abreviaciones | 23 |
| Tabla 3. Especificaciones del microcontrolador Arduino MEGA 2560 | 31 |
| Tabla 4. Especificaciones de la Fuente de Poder Lamp Manager..... | 34 |
| Tabla 5. Especificaciones de Potenciómetro Digital MCP4141-503 | 35 |
| Tabla 6. Reglas de Sintonización Ziegler-Nichols..... | 47 |
| Tabla 7. Configuración de Pines del Microcontrolador Arduino MEGA 2560 | 50 |
| Tabla 8. Configuración de Canales de la DAQ NI-USB 6009 (1)..... | 62 |
| Tabla 9. Configuración de Canales de la DAQ NI-USB 6009 (2)..... | 62 |
| Tabla 10. Obtención de la Concentración de Ozono..... | 87 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Esquema de Medición de Ozono | 17 |
| Figura 2. Espectro de Emisión de la Lámpara de Mercurio | 18 |
| Figura 3. Banca Óptica..... | 19 |
| Figura 4. Lámpara de Mercurio de 185nm..... | 20 |
| Figura 5. Generador de Ozono | 21 |
| Figura 6. Diagrama de Funcionamiento del Sensor y Generador de Ozono | 22 |
| Figura 7. Filtro de Ozono | 24 |
| Figura 8. Bomba de Aire | 26 |
| Figura 9. Característica I-V de un Fotodiodo..... | 28 |
| Figura 10. Temperatura vs Resistencia para un Termistor Típico | 28 |
| Figura 11. Sensor de Presión MPXV5100G | 30 |
| Figura 12. Arduino MEGA 2560 | 31 |
| Figura 13. Ejemplos de Ciclo de Trabajo..... | 32 |
| Figura 14. Fuente de Poder Lamp Manager | 33 |
| Figura 15. Intensidad de Corriente vs Intensidad de Luz..... | 34 |
| Figura 16. Potenciómetro Digital MCP4141: Descripción de pines | 35 |
| Figura 17. Controlador de Flujo Másico | 37 |
| Figura 18. Descripción de Pines del Puerto Serial del MFC..... | 38 |
| Figura 19. Válvula Solenoide SV75P48T-2..... | 39 |
| Figura 20. Motor Paso a Paso NEMA 17 | 40 |
| Figura 21. Adquisición de Datos..... | 42 |
| Figura 22. DAQ NI-USB 6009 y Descripción de Canales..... | 42 |
| Figura 23. Señal ruidosa (izq.) y la misma señal luego de aplicar el alisado (der.)..... | 44 |
| Figura 24. Método de la Tangente | 46 |
| Figura 25. Curve Fitting App | 48 |
| Figura 26. Circuito para la Medición de la Temperatura | 51 |
| Figura 27. Ajuste de Curvas Resistencia vs. Temperatura (1)..... | 51 |
| Figura 28. Circuito para el Control de Temperatura (Lámpara de 185nm) | 53 |
| Figura 29. Ajuste de Curvas Resistencia vs. Temperatura (2)..... | 53 |
| Figura 30. Circuito para la Medición de Presión | 54 |
| Figura 31. Circuito para el Control de la Intensidad de Luz | 55 |
| Figura 32. Ajuste de Curvas Taps vs Corriente | 56 |
| Figura 33. Botón Iniciar | 56 |
| Figura 34. Botón Salir | 56 |
| Figura 35. Control del Número de Ciclos de Procesamiento..... | 56 |
| Figura 36. Interfaz Gráfica en LabVIEW..... | 57 |
| Figura 37. Controles de Temperatura..... | 58 |
| Figura 38. Indicadores de Flujo..... | 58 |
| Figura 39. Controlador de Intensidad de Luz..... | 58 |
| Figura 40. Controladores de Flujo MFC 1 y MFC 2..... | 59 |
| Figura 41. Selección del Aire de Entrada..... | 59 |
| Figura 42. Selección de Pestañas | 59 |
| Figura 43. Pestaña de Procesamiento..... | 59 |
| Figura 44. Máquina de Estados para la Programación en LabVIEW | 60 |
| Figura 45. Iniciar | 60 |
| Figura 46. Wait Until Next ms Multiple VI..... | 61 |

| | |
|--|----|
| Figura 47. DAQ Assistant VI..... | 61 |
| Figura 48. Diagrama de conversión de la señal a escalar..... | 62 |
| Figura 49. Diagrama de Medición de Intensidad de Luz | 63 |
| Figura 50. Filter VI..... | 64 |
| Figura 51. Configuración de Bloque Filter VI | 64 |
| Figura 52. Ejemplo de una señal sin filtrar (izq.) vs la misma señal filtrada (der.) | 64 |
| Figura 53. Adquisición de Datos de Temperatura (Lámpara de 254nm y Banca Óptica), Presión y Flujo..... | 65 |
| Figura 54. Control de Temperatura y Flujo Másico (MFC 1), Medición de Temperatura (Lámpara de 185nm) y Switch para el Aire de Ingreso..... | 66 |
| Figura 55. Control de Intensidad de Corriente (Lámpara de 185nm), Flujo Másico (MFC 2) y Ajuste de Posición del Interruptor Óptico [TRUE] | 69 |
| Figura 56. Control de Intensidad de Corriente (Lámpara de 185nm), Flujo Másico (MFC 2) y Ajuste de Posición del Interruptor Óptico [FALSE]..... | 70 |
| Figura 57. Condicionamiento de la Señal de Intensidad de Luz a Procesar | 72 |
| Figura 58. Selección de Datos de cada Canal [TRUE] | 73 |
| Figura 59. Selección de Datos de cada Canal [FALSE] | 73 |
| Figura 60. Diagrama del SubVI para calcular la Concentración de Ozono en ppb | 74 |
| Figura 61. Control de Temperatura a 55°C desde Temperatura Ambiente [Lámpara de 254nm] | 76 |
| Figura 62 Control de Temperatura a 55°C por un lapso de 17min [Lámpara de 254nm] | 77 |
| Figura 63. Control de Temperatura a 55°C desde Temperatura Ambiente [Lámpara de 185nm] | 77 |
| Figura 64. Control de Temperatura a 55°C por un lapso de 17min [Lámpara de 185nm] | 78 |
| Figura 65. Medidor de Flujo Externo TSI 4100..... | 78 |
| Figura 66. Ajuste de Posición del Interruptor Óptico | 80 |
| Figura 67. Temperatura de la Lámpara de 254nm | 81 |
| Figura 68. Temperatura de la Lámpara de 185nm | 81 |
| Figura 69. Medida de Flujo Másico (MFC 1) | 82 |
| Figura 70. Intensidad de Luz Canal 1 | 83 |
| Figura 71. Intensidad de Luz Canal 2 | 83 |
| Figura 72. Niveles Base de Intensidad de Luz para ambos Canales [Canal1 (der.) y Canal 2 (izq.)] | 84 |
| Figura 73. Señal de Intensidad de Luz durante un periodo de 45min | 85 |

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El ozono (O_3) es un gas formado por tres átomos de oxígeno. Aunque es un componente poco común en la atmósfera de la Tierra (de cada cien millones de moléculas de aire, sólo tres son de ozono), es fundamental para la vida en la misma (Fabian, 2014).

Al nivel del suelo, el ozono es uno de los componentes principales del smog fotoquímico, es un poderoso oxidante que repercute negativamente en la salud humana, el ambiente y la producción de alimentos; el ozono es también un gas de efecto invernadero importante (Royal, 2008). Al contrario que otros contaminantes del aire, el ozono no se emite directamente, sino que se forma mediante reacciones químicas provocadas por la luz solar que incluyen monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (VOC's) y óxidos de nitrógeno (NO_x) (Royal, 2008). Estos precursores químicos surgen de fuentes naturales biológicas y de un amplio rango de actividades humanas: como incendios, gases de escape de vehículos y desechos industriales (Fabian, 2014).

El ozono ha sido reconocido como un problema de calidad de aire significativo a nivel local y regional debido al impacto de éste sobre la salud humana y cultivos (Royal, 2008). Está generalmente aceptado que el impacto en los seres humanos ocurre por encima de los 50 ppb, aunque se cree en algunos casos éste comienza a los 35 ppb. La mayor parte de problemas de salud humana se relacionan con el sistema respiratorio: reducida capacidad pulmonar, irritación de los pulmones; y en casos extremos, la muerte (Royal, 2008). En áreas urbanas las concentraciones de ozono son generalmente mayores que en áreas suburbanas y rurales. Debido a la repercusión en la productividad y salud del individuo es necesario el constante monitoreo del nivel de ozono en áreas urbanas (Rigas, 1997).

Los instrumentos convencionalmente utilizados para la medición del ozono están basados en la espectroscopia y quimioluminiscencia; son típicamente voluminosos, costosos, y requieren una fuente de poder significativa y un espacio físico cerrado para controlar su temperatura. Además, estos equipos necesitan un programa riguroso de mantenimiento y calibración (Williams, 2009). Los fotómetros más utilizados en la actualidad son aquellos que emplean fotometría ultravioleta y poseen dos cámaras de absorción para cuantificar la concentración de ozono basándose en la ley de Beer-Lambert (Garrido, 2013). Éstos utilizan como fuente de luz una lámpara de vapor de mercurio de baja presión, que genera luz en la longitud de onda de 254nm (Garrido, 2013). Debido a la alta precisión de este método, ha sido aceptado por el Comité Europeo de Normalización (CEN) como método de referencia para el análisis y calibrado de instrumentos de medición de ozono (ISO 13964, 1998).

El ozono es empleado como un poderoso desinfectante y el oxidante más fuerte disponible comercialmente (Smith, 2015). Es además un gas altamente inestable que no puede ser almacenado, por lo que es necesario producirlo artificialmente para su uso (Majewski, 2012). Existen cuatro métodos reconocidos para la producción de ozono: generación por efecto corona, radiación ultravioleta, electrólisis y generación radioquímica (Smith, 2015). De éstos, los más ampliamente utilizados son los de generación por efecto corona y radiación ultravioleta. El primero se emplea principalmente para la producción comercial de ozono, mientras que el segundo es ideal para pequeñas aplicaciones como trabajo de laboratorio y eliminación de olores, puesto que son de diseño simple y no requiere tratamiento del aire (Smith, 2015).

1.2 Justificación e Importancia

La Estación de Mediciones Atmosféricas (EMA) de la USFQ cuenta al momento con un equipo comercial para el propósito de medición de ozono a través de fotometría ultravioleta: El analizador de ozono 49i de Thermo Scientific. El desarrollo de la estación de medición de ozono, así como la evaluación de las primeras mediciones se detallan en el documento: *Atmospheric measurement station at Universidad San Francisco de Quito (EMA): ground-based physical meteorology instrumentation and assessment of initial measurements* (M. Cazorla & E. Tamayo, 2014). El estudio realizado a partir de las mediciones tomadas por este instrumento se resumen en el documento: *Air quality over a populated Andean region: Insights from measurements of ozone, NO and boundary layer depths* (M. Cazorla, 2016).

Debido al alto costo del equipo medidor de ozono, y la imposibilidad de modificar sus componentes internos, este equipo se emplea solamente para el monitoreo del ozono en el aire. Es por tanto necesario el desarrollo local de un equipo medidor de ozono que sobrelleve inconvenientes en el equipo comercial, tales como su costo restrictivo, la imposibilidad de modificar los componentes del equipo y la falta de un generador de ozono. Este equipo se ha estado desarrollando durante los últimos dos años, y ha sido posible gracias a las donaciones realizadas por Penn State University y al financiamiento de la EMA (Investigadora Principal: M. Cazorla).

Este nuevo equipo está basado, al igual que el equipo comercial, en fotometría ultravioleta de doble canal para la medición del ozono. Durante el desarrollo, si bien es cierto se replican algunas de las características del equipo tales como el control de flujo y temperatura, y la medición de presión, existe una diferencia: el nuevo equipo solamente utiliza un fotodiodo para la medición de la intensidad de luz de ambos canales, mientras que

el equipo comercial emplea dos, uno para cada canal. Se incorporará además un generador de ozono al instrumento, puesto que el equipo comercial no lo posee.

Por otra parte, el equipo a desarrollar también es importante para las investigaciones realizadas en la EMA, puesto que, una vez que se compruebe su funcionamiento adecuado, puede ser utilizado como respaldo del equipo comercial, para corroborar los resultados del mismo, o ser empleado independientemente en un área geográfica distinta. Igualmente, se debe recalcar que al ser accesibles los componentes internos del nuevo equipo y conocer detalladamente su funcionamiento, es posible realizar modificaciones o adicionar funciones al mismo si así se requiere en un futuro.

La primera etapa del desarrollo de este equipo fue realizada por Mijaíl Bolaños; quien fue el responsable de armar la carcasa del equipo, y ensamblar las diversas partes electrónicas y ópticas necesarias para el funcionamiento del medidor de ozono, además de la programación necesaria para el control y monitoreo del mismo. Este medidor consiste en un sensor de doble canal, el cual incorpora un control de temperatura de la fuente de luz: una lámpara de mercurio de 254nm. Además, el equipo implementa un control de flujo de las válvulas solenoides, las cuales inyectan aire con ozono en uno de los canales y aire libre de ozono en el otro. Se cuenta también con un motor de pasos que mueve un interruptor de señal para controlar el paso de la luz desde uno de los canales hacia el fotómetro (un fotodiodo).

En la segunda etapa de desarrollo, para completar el funcionamiento del instrumento, se requiere añadir un generador de ozono por el método de luz ultravioleta. Para esto se necesita otra lámpara de mercurio adicional como fuente de luz ultravioleta, y también el control de la temperatura y la intensidad de luz de la misma, que repercute

directamente en la cantidad de ozono producido. Este generador debe conectarse al medidor ya mencionado para el monitoreo del ozono obtenido. Adicionalmente, se debe procesar la señal cruda obtenida del medidor con el objetivo de filtrar el ruido de ésta y, principalmente, realizar un procedimiento estadístico de los datos que permita conseguir una lectura de la concentración de ozono en partes por billón (ppb).

1.3 Objetivo General y Objetivos Específicos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar y controlar un generador de ozono utilizando el método de luz ultravioleta a ser integrado al medidor de ozono disponible, y procesar su señal de salida para obtener una medición precisa de la concentración de ozono.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Construcción y control de un instrumento que permita la obtención de ozono por medio de radiación ultravioleta.
 - Diseñar e implementar un controlador que permita mantener la temperatura estable.
 - Controlar la intensidad de luz de la lámpara de mercurio mediante la variación del nivel de corriente.
- Procesamiento de la señal obtenida por fotometría ultravioleta.
 - Determinar y eliminar el ruido de la señal mediante un filtro.
 - Tomar la medida de presión del aire de entrada mediante un transistor de presión.
 - Tomar la medida de temperatura del aire de entrada por medio de un termistor.

- Realizar un procedimiento estadístico para comparar paralelamente las medidas de cada uno de los canales del sensor de ozono.
- Obtener los resultados de concentración de O₃ en partes por billón (ppb).
- Desarrollar la interfaz gráfica para el usuario final en LabVIEW.
 - Integrar todos los controladores implementados en la interfaz gráfica.
 - Mostrar las medidas tomadas de las diferentes variables del equipo para su monitoreo.

Capítulo 2: MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se exponen las definiciones y los conceptos a ser empleados a lo largo del proyecto; así como también se enumeran los conceptos relacionados al hardware y software que forman parte del equipo a desarrollar, y cuál es la función que cumplen cada uno de éstos.

En primer lugar, se describen los principios de medición y generación de ozono, a partir de los cuales se construye el equipo. Posteriormente, se muestra un diagrama que detalla la construcción del equipo y el funcionamiento del mismo. Finalmente, se describen de forma más específica los componentes en hardware y en software a emplear, junto con sus características y la función que desempeñan dentro del equipo.

2.1 Medición de Ozono mediante la Ley de Beer

El equipo a desarrollar en el presente proyecto, al igual que el equipo comercial existente en el laboratorio, está basado en la ley de Beer para la medición de concentraciones de gases.

El método de medición de ozono por medio de la ley de Beer consiste en direccionar un haz de luz a través de una cámara de absorción, y al final de ésta, medir su intensidad mediante foto-detectores. La muestra (aire), que contiene el gas a medir (ozono), se hace pasar por dicha cámara y se mide su absorción comparándola con una muestra que tenga cero contenido del gas a medir (Garrido, 2013), como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Esquema de Medición de Ozono

Para un sistema aislado de la atmósfera tenemos la ecuación de Beer-Lambert en la forma:

$$T = \frac{I(l)}{I_0} = e^{-\alpha cl} \quad (1)$$

Donde:

- α = absorbancia debida a la sustancia que se encuentra en la cámara al momento de incidir la luz. En el caso del ozono, la constante α está dada por su coeficiente de absorción.
- c = concentración de absorbente en el medio.
- l = la longitud atravesada por la luz en el medio.
- $I(l)$ = Intensidad de luz de la muestra con ozono.
- I_0 = Intensidad de luz de la muestra sin ozono.

(Garrido, 2013)

El equipo a desarrollar sigue el ejemplo de los fotómetros de ozono más comercializados en la actualidad, los cuales utilizan como fuente de luz una lámpara de vapor de mercurio de baja presión que genera luz en la longitud de onda de 254nm.

(Garrido, 2013). El espectro de emisión de la lámpara seleccionada se muestra en la Figura 2.

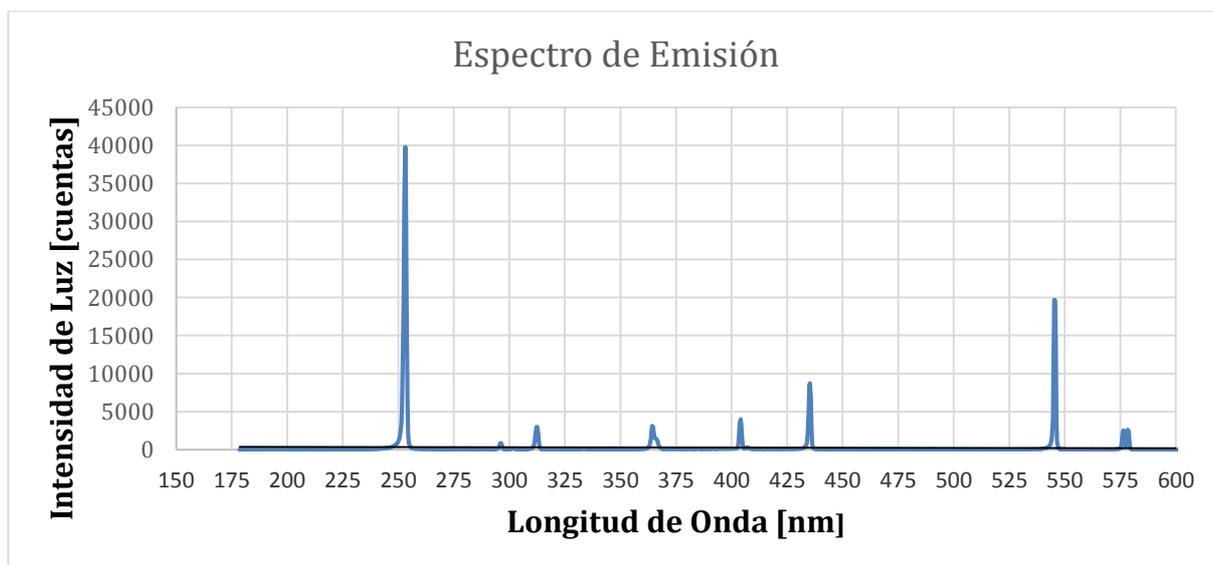


Figura 2. Espectro de Emisión de la Lámpara de Mercurio

Se debe tomar en cuenta además que la medida de concentración de ozono se presenta en partes por billón (ppb).

2.1.1 Partes por billón (ppb)

Es una de las notaciones usadas en la actualidad por científicos atmosféricos para indicar las proporciones de mezclas de gases atmosféricos (fracción molar); es decir, la fracción que cierta cantidad de una sustancia contribuye a la cantidad total de la muestra. La unidad partes por billón (ppb) representa una fracción de 10^{-9} . (IUPAC, 1995).

2.1.2 Banca Óptica

Para aplicar el método de medición de ozono descrito, se hace uso de un instrumento llamado banca óptica (véase Figura 3). Ésta consta de tres partes: el extremo izquierdo, por el cual ingresa la luz de la lámpara de 254nm y se expulsa el aire, la parte media formada por dos canales que hacen las veces de cámaras de absorción por donde fluyen tanto el aire como la luz, y el extremo derecho por donde ingresa el aire y desde donde la luz es reflejada hacia el fotodetector para su medición.

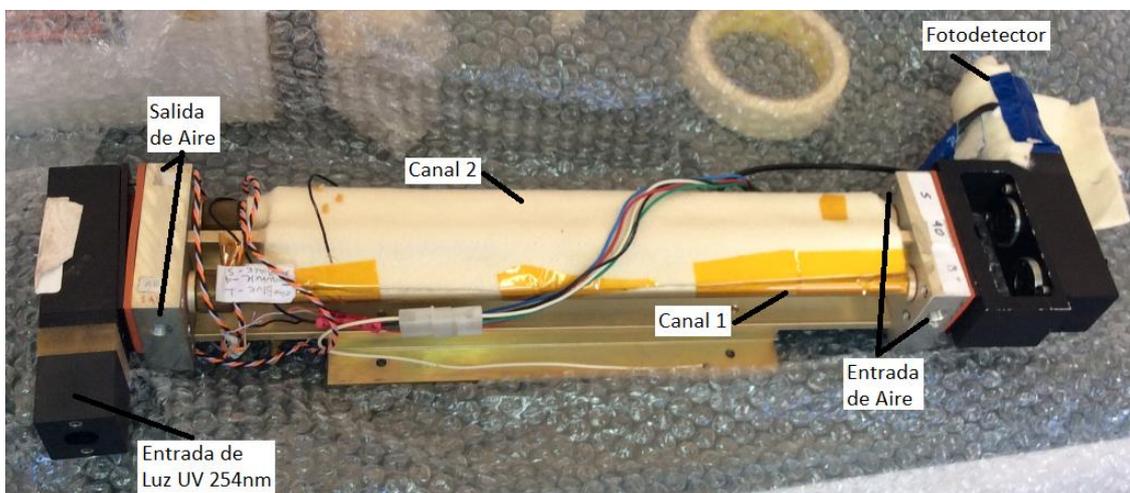


Figura 3. Banca Óptica

2.2 Producción de Ozono por medio de Radiación Ultravioleta

La formación de ozono a partir del oxígeno es endotérmico, es decir, que requiere energía para su producción. Cuando una molécula de oxígeno en estado fundamental (O_2) es expuesta a la luz, ésta absorberá su energía y se disociará de acuerdo a la longitud de onda

particular de dicha luz. Los átomos de oxígeno (O) reaccionan entonces con otras moléculas de oxígeno (O₂) para formar ozono (O₃) (Smith W., 2015): $O + O_2 \rightarrow O_3$.

Cada longitud de onda favorece una reacción diferente, así como su rendimiento (el número de moléculas disociadas para un número dado de fotones absorbidos). Para una producción de ozono eficiente, es necesario utilizar una longitud de onda corta de tal manera que se logre la mayor disociación de oxígeno y que al mismo tiempo se evite la disociación de ozono. La molécula de oxígeno tiene su mayor disociación para longitudes de onda menores a 200nm, mientras que la de ozono lo tiene entre 200 y 300nm. Por lo tanto, se elige la longitud de onda de 185nm para conseguir la mayor producción de ozono (Smith W., 2015).

Para este proyecto, se emplea como fuente de luz ultravioleta de 185nm una lámpara de mercurio (Figura 4). Su espectro de emisión es similar al de la lámpara de medición (Figura 2), pero adicionalmente posee una línea de emisión en la longitud de onda de 185nm. Esta línea no se muestra en la lámpara de medición debido a que posee una capucha que bloquea la emisión de luz de 185nm.



Figura 4. Lámpara de Mercurio de 185nm

En teoría, la producción de ozono con luz ultravioleta (UV) de 185nm sería de 130g/kWh. Sin embargo, puesto que la eficiencia de las lámparas es muy baja (alrededor del 1%), la producción por kWh (de la fuente de poder) se ve reducida (Smith W., 2015).

En la práctica, las lámparas UV producen cerca de 20g/kWh de ozono si es alimentada con oxígeno. No obstante, estas lámparas son más comúnmente utilizadas junto con aire ambiente, y su producción de ozono es de 1-2g/kWh. La ventaja de este último método de producción de ozono radica en la simplicidad de su diseño y es ideal para aplicaciones en el laboratorio (Smith W., 2015).

2.2.1 Generador de Ozono

Para la producción de ozono por medio de luz ultravioleta se requiere de un generador de ozono (Figura 5): un instrumento cuya función consiste en irradiar el gas concentrado en el depósito con luz ultravioleta de 185nm.



Figura 5. Generador de Ozono

2.3 Descripción del Funcionamiento del Sensor y Generador de Ozono

El equipo sensor y generador de ozono del presente proyecto se diseña de acuerdo a los principios de medición (ley de Beer) y generación de ozono descritos previamente, y requiere la integración de dos partes: los componentes ópticos y el flujo de aire; como se muestra en la Figura 6. La descripción de los símbolos y abreviaciones utilizadas se muestran en la Tabla 1 y la Tabla 2, respectivamente. Los componentes de hardware y software implementados se describen en las secciones siguientes.

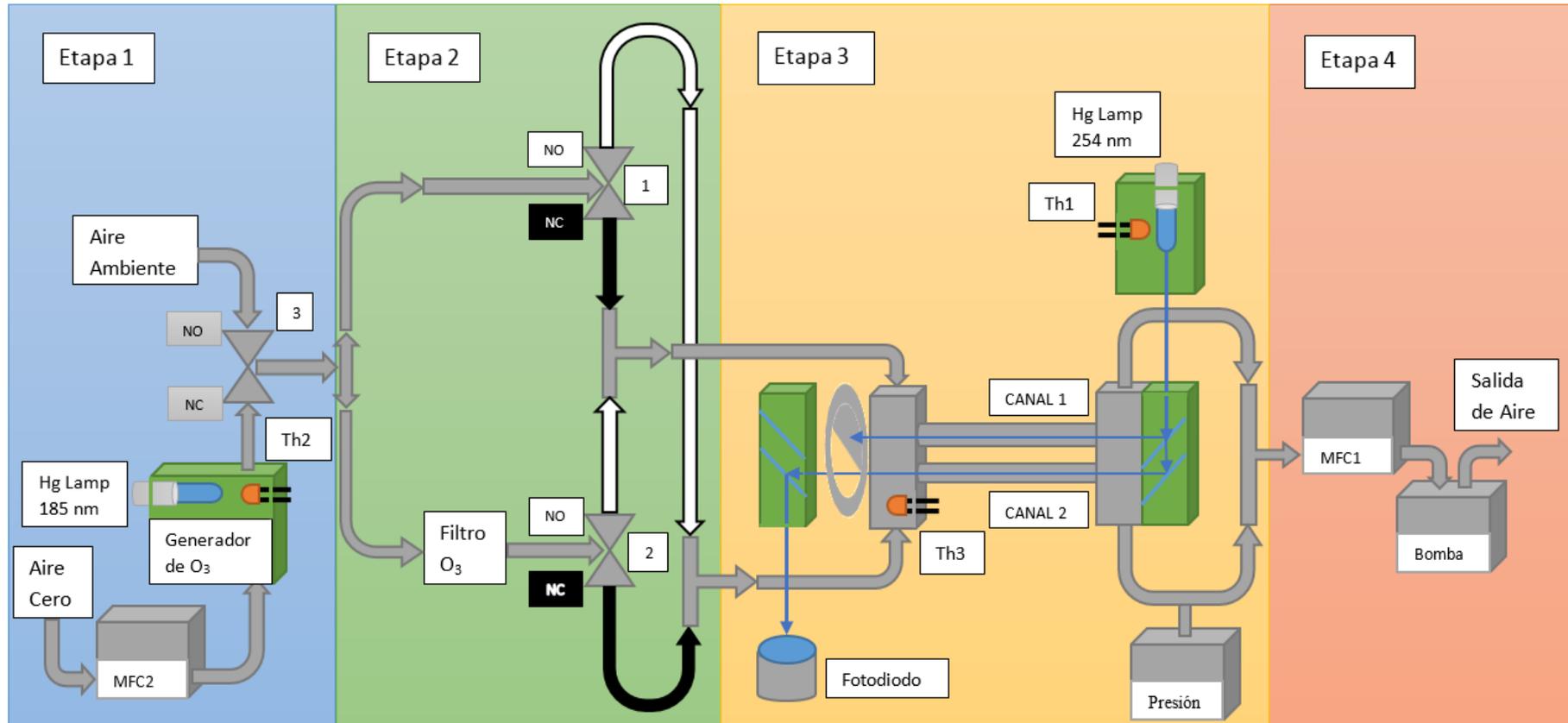


Figura 6. Diagrama de Funcionamiento del Sensor y Generador de Ozono

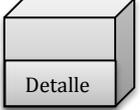
| Símbolo | Descripción |
|---|--|
|  | Lámpara de Mercurio |
|  | Tubería por donde circula el Aire |
|  | Haz de Luz de 254nm de Longitud de Onda |
|  | Termistor |
|  | Válvula Solenoide 3/2 |
|  | Espejo reflector y/o transmisor de luz |
|  | Interruptor de Luz |
|  | Fotodiodo para la Medición de la Intensidad de Luz |
|  | Instrumento de Medición y/o Control |

Tabla 1. Lista de Símbolos

| Abreviación | Significado |
|-------------|--|
| MFC | Mass Flow Controller (Controlador de Flujo Másico) |
| Th | Thermistor (Termistor) |
| NO | Normally Open (Normalmente Abierto) |
| NC | Normally Closed (Normalmente Cerrado) |

Tabla 2. Lista de Abreviaciones

El detalle de cada una de las etapas se presenta en seguida:

2.3.1 Etapa 1

El proceso inicia con la elección del gas cuya concentración de ozono se va a medir.

Las dos posibles opciones, seleccionadas mediante una válvula solenoide, son:

- Aire ambiente: Tomado directamente del ambiente.
- Aire del generador de ozono: Producido por medio de luz ultravioleta de 185nm.

El aire de entrada al generador puede provenir del ambiente o, más comúnmente, del tanque de aire cero (sin ozono, obtenido sintéticamente). Éste último nos permitirá cuantificar las concentraciones de ozono producidas exclusivamente por el generador.

La temperatura e intensidad de luz de la lámpara de 185nm, insertada en el generador, es regulada por el microcontrolador Arduino MEGA 2560 para conseguir diferentes concentraciones de ozono, que serán medidas posteriormente. Para el control de estas variables, se emplea un termistor (Th2) para la medida de la temperatura y la fuente de poder *Lamp Manager* para variar la intensidad de corriente de la lámpara, lo que a su vez incide en la intensidad de luz.

A la entrada del generador de ozono se coloca un controlador de flujo másico (MFC2) que regula la cantidad de aire que ingresa al dispositivo.

2.3.2 Etapa 2

El gas elegido en la etapa anterior se divide en dos flujos, uno de los cuales es filtrado para eliminar la presencia de ozono, mientras que el otro continúa su trayectoria sin filtrar. El gas filtrado servirá de referencia para la medición de la concentración de ozono presente en el gas no filtrado. El filtro de ozono se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Filtro de Ozono

Cada uno de los gases ingresa luego a una de las válvulas solenoides, las cuales se encargan de direccionar cada uno de los flujos hacia los canales de la banca óptica en la siguiente etapa.

2.3.3 Etapa 3

El gas filtrado ingresa por uno de los canales y el gas no filtrado por el otro canal; para, luego de 30 segundos, intercalar el flujo de aire de los canales. Es decir, que por cada canal fluye consecutivamente gas filtrado por 30 segundos y gas no filtrado por otros 30 segundos. Esta secuencia se consigue cambiando el estado de las válvulas 1 y 2.

El gas dentro de cada canal es a su vez irradiado por luz ultravioleta de 254nm. Ésta proviene de una lámpara de mercurio cuyo haz de luz se divide en dos partes relativamente iguales mediante un par de espejos: el primero de los cuales que refleja el 50% de luz, y transmite el otro 50% a un segundo espejo que refleja el 100%. A la salida de los canales se ha colocado un interruptor de luz que permite el paso de un solo haz de luz a la vez. Este interruptor, controlado mediante un motor paso a paso, gira cada 5 minutos para dar paso al haz de luz del canal adyacente. Finalmente, el haz de luz que logra pasar es reflejado totalmente por otro espejo y llega hasta un fotodiodo que, una vez por segundo, toma la medida de intensidad de luz del canal correspondiente.

Para obtener la medida de concentración de ozono en el aire de muestra, se mide independientemente cada canal durante 5 minutos, dentro de los que se intercambia el aire filtrado con el no filtrado cada 30 segundos. Puesto que el gas con ozono absorbe la luz de 254nm, la intensidad de luz medida en cada canal disminuye con respecto al resultado obtenido cuando fluye el gas libre de ozono. Entonces, para cada uno de los canales se toma el promedio de los datos de intensidad de luz arrojados al circular aire filtrado (denominado I_0) y el promedio de datos del aire sin filtrar (denominado I); y se consigue la relación I/I_0 que sirve de base para calcular la concentración de ozono mediante la ley de Beer.

Para transformar el valor de I/I_0 a ppb se necesita la medida de temperatura y presión del gas, las cuales se obtienen por medio de la tarjeta de adquisición de datos NI-6009 con la ayuda de otro termistor (Th3) y un sensor de presión.

Para maximizar la sensibilidad del sensor, se requiere que la intensidad de la lámpara de 254nm sea máxima, lo cual sucede cuando ésta se encuentra a una temperatura de 55°C medida por el termistor Th1. Para conseguir dicha temperatura, se programa un lazo de control automático en el Arduino MEGA.

2.3.4 Etapa 4

Finalmente, el gas que emerge de cada uno de canales se mezcla y se vuelve nuevamente un solo flujo, el cual ingresa a un segundo controlador de flujo másico (MFC1); en donde se regula el flujo de aire que absorbe la bomba colocada inmediatamente después. Esta bomba está ajustada de fábrica para que, al ser energizada con 12V, el flujo de aire que la atraviesa sea un valor fijo de 5L/min; el cual sería también el flujo de todo el equipo. Sin embargo, puesto que se requiere que el usuario sea capaz de regular este flujo, el dispositivo MFC1 sirve para limitar el aire absorbido por la bomba, ajustando entonces el flujo al definido por el usuario. La bomba de aire se muestra en la Figura 8.

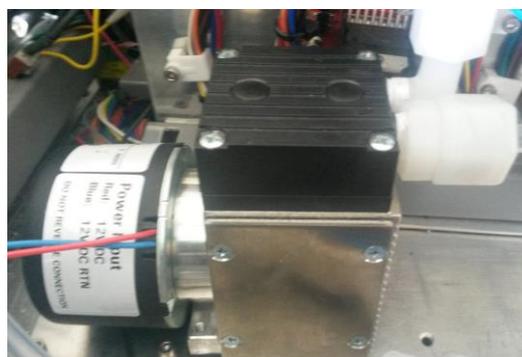


Figura 8. Bomba de Aire

2.4 Hardware

Los elementos en hardware requeridos para el desarrollo del instrumento, y posteriormente se detalla el funcionamiento cada uno de ellos:

- Sensores y Transductores
- Arduino MEGA 2560
- Lamp Manager
- Controlador de Flujo Másico
- Válvula Solenoide 3/2
- Motor Paso a Paso

2.4.1 Sensores y Transductores

El elemento fundamental para realizar la medición de las diferentes variables es el sensor, un dispositivo que responde a un estímulo para generar salidas procesables. Estas salidas están relacionadas con los estímulos de entrada de manera que se pueda describir las salidas como función de las entradas. Un sensor está comúnmente compuesto de dos componentes primarios: un elemento sensitivo y un transductor. El elemento sensitivo tiene la capacidad de interactuar con el estímulo de entrada para causar un cambio en la operación del transductor. Un transductor (término a veces usado para referirse a un sensor) es un dispositivo que convierte un tipo de energía en otra. (Kalantar-zadeh, 2013).

Los sensores utilizados son: un fotodiodo para la medición de la intensidad de luz, tres termistores para la medición de temperaturas y un sensor de presión; los cuales se detallan a continuación.

2.4.1.1 Fotodiodo

El fotodiodo empleado en el sensor de ozono tiene la función de medir la intensidad de luz de la lámpara de mercurio de 254nm, para la aplicación de la ley de Beer. Los fotodiodos son dispositivos optoelectrónicos con dos electrodos y características eléctricas

asimétricas (véase Figura 9). Usualmente se polarizan inversamente, y se utilizan para convertir flujos de luz en corrientes eléctricas. (Decoster, 2010).

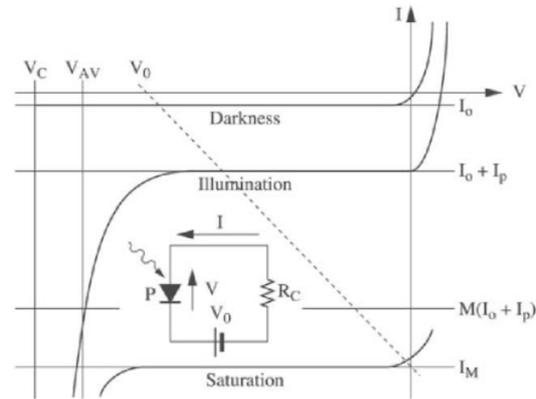


Figura 9. Característica I-V de un Fotodiodo

2.4.1.2 Termistores y Medición de Temperatura

El elemento sensor de temperatura utilizado es el termistor, el cual compuesto por un material semiconductor que exhibe un gran cambio en su resistencia proporcional a un pequeño cambio en su temperatura. Los termistores usualmente tienen coeficientes negativos de temperatura (NTC), lo que significa que su resistencia decrece a medida que la temperatura aumenta (Omega, 2015). En la Figura 10 se muestra un gráfico de resistencia vs temperatura para un termistor típico, denotando un cambio substancial en la resistencia con la variación de temperatura.

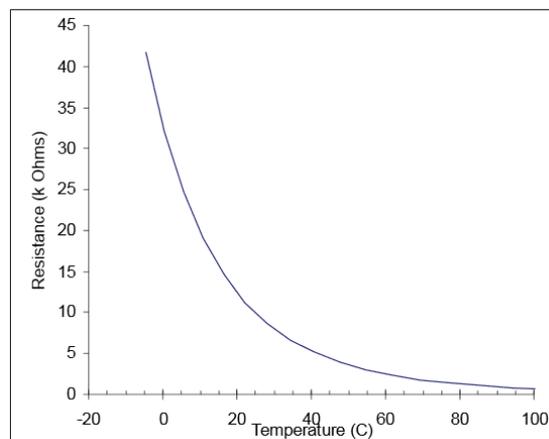


Figura 10. Temperatura vs Resistencia para un Termistor Típico

Se emplean tres termistores en el desarrollo del equipo, con los que se obtiene la temperatura de la lámpara de mercurio de 254nm, de la lámpara de 185nm y de la banca óptica.

Se debe tomar en cuenta que la variable que se mide directamente es la resistencia del termistor, la cual se relaciona a la temperatura del mismo por medio de la ecuación Steinhart-Hart.

2.4.1.2.1 Ecuación Steinhart-Hart

Las características no lineales que exhibe un termistor pueden ser modeladas con un alto grado de exactitud usando la ecuación Steinhart-Hart, que constituye el método más comúnmente empleado. La ecuación es la siguiente:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C[\ln(R)]^3 \quad (2)$$

Donde T es la temperatura en Kelvin y R la resistencia en ohmios. Los términos A, B y C son los coeficientes Steinhart-Hart únicos para cada termistor. (ILX, 2006).

2.4.1.3 Transductor de Presión y Medición de Presión

La presión del gas que fluye a través de la banca óptica se realiza mediante un transductor de presión, el mismo que convierte la presión en una señal eléctrica analógica. El diseño más comúnmente utilizado consigue la conversión de la presión en una señal eléctrica mediante la deformación física de los extensómetros que están unidos en el diafragma del transductor de presión y cableados en una configuración de puente de Wheatstone. La deformación producirá un cambio de resistencia eléctrica proporcional a la presión. (Omega, 2013). El sensor empleado en este proyecto se describe en la siguiente sección.

2.4.1.3.1 Sensor de Presión MPXV5100G

Es un sensor de presión en la forma de un chip integrado de silicio de 8 pines (Figura 11, se identifica al pin 1 porque posee una muesca), diseñado particularmente para aplicaciones que incluyan un microprocesador o microcontrolador con entradas digitales/analógicas (Freescale, 2010).

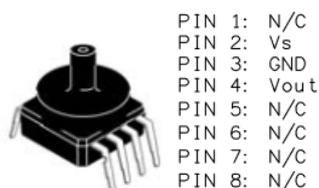


Figura 11. Sensor de Presión MPXV5100G

En este sensor, el pin 2 se conecta a 5V, el pin 3 va conectado a tierra, y se toma la medida de presión del voltaje proveniente del pin 4. Se debe tomar en cuenta que el resto de pines no deben conectarse a ningún circuito externo, ya que, de lo contrario, se puede estropear la medida de presión y, en algunos casos, ocasionar un daño permanente al sensor.

2.4.2 Arduino MEGA 2560

El dispositivo encargado de realizar el control de las diferentes variables es el microcontrolador Arduino MEGA 2560, el cual está basado en la tarjeta programable Atmega2560. Este microcontrolador posee 54 pines digitales de entrada/salida (de los cuales 15 pueden ser usados como salidas PWM), 16 entradas analógicas, un cristal de cuarzo de 16 MHz y conexión USB (Arduino, 2015). Para configurar este microcontrolador se hace uso del software libre Arduino IDE, que se describe en la sección de software de este capítulo. A continuación se puede observar el microcontrolador en la Figura 12, y sus especificaciones en la Tabla 3.

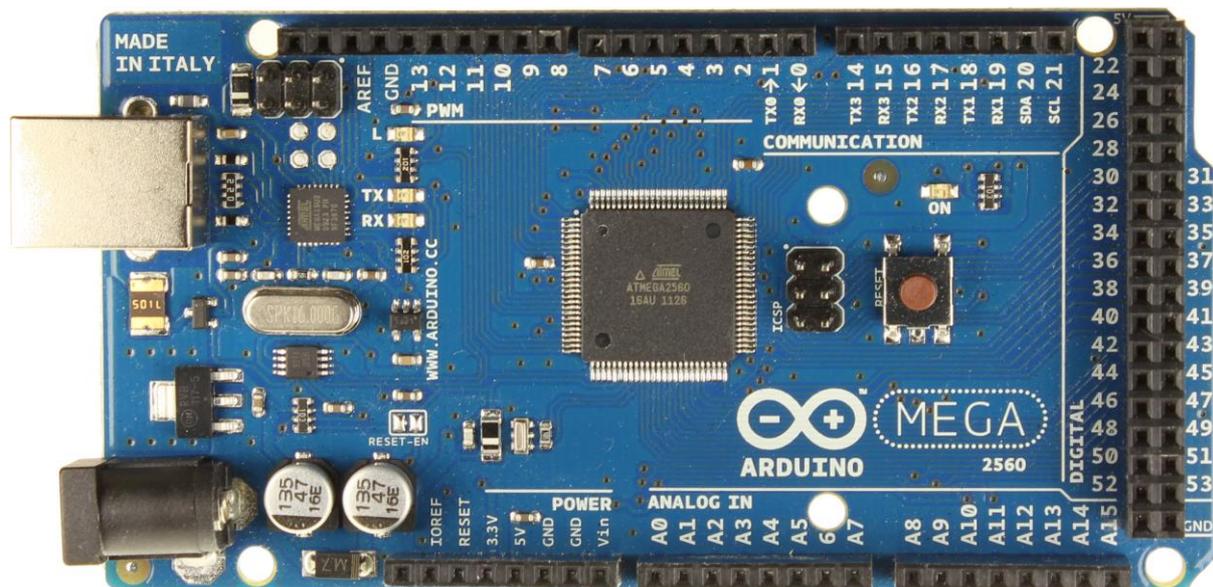


Figura 12. Arduino MEGA 2560

| | |
|--|--|
| Voltaje de Funcionamiento | 5 V |
| Voltaje de Entrada recomendado | 7-12 V |
| Corriente DC por pin de entrada/salida | 20 mA |
| Memoria Flash | 256 kB (de los que 8 kB son usados en el arranque) |
| SRAM | 8 kB |
| EEPROM | 4 kB |

Tabla 3. Especificaciones del microcontrolador Arduino MEGA 2560

Este microcontrolador es utilizado para controlar varios procesos del equipo medidor y generador de ozono:

- Control de Temperatura de ambas Lámparas de Mercurio.
- Control del Motor Paso a Paso.
- Control de las Válvulas Solenoides.
- Control de Intensidad de Corriente de la Lámpara de 185nm.
- Control del Flujo de Aire.
- Sincronización de todos los procesos anteriores.

Para algunos de los controles mencionados se requiere simplemente una señal digital como señal de control. No obstante, en otros casos es necesario una señal analógica. Puesto que el Arduino posee solamente salidas digitales, se recurre a una técnica llamada modulación por ancho de pulsos (PWM – Pulse Width Modulation), en donde se emplea una señal digital para hacer las veces de una analógica. Para comprender esta técnica, se define primero el concepto de ciclo de trabajo.

2.4.2.1 Ciclo de Trabajo

Una señal digital puede ser pensada como una onda rectangular: una secuencia de estados altos (high) y bajos (low) durante un periodo de tiempo. El ciclo de trabajo, expresado en porcentaje, es la relación entre el tiempo que la señal se encuentra en el estado alto y el periodo de la señal (véase Figura 13). Es decir, el ciclo de trabajo describe la fracción de tiempo en que la señal se halla en el estado alto. (Mathworks, 2015).

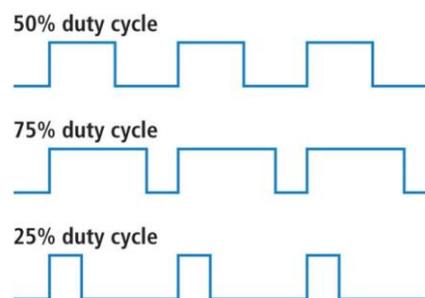


Figura 13. Ejemplos de Ciclo de Trabajo

2.4.2.2 Modulación por Ancho de Pulsos (PWM)

Es una poderosa técnica para controlar circuitos analógicos mediante las salidas digitales de un procesador. Mediante el uso de contadores de alta resolución, el ciclo de trabajo de una onda cuadrada se modula para codificar un nivel específico de una señal analógica. Dado el suficiente ancho de banda, cualquier valor analógico puede ser codificado de esta manera. (Barr, 2007).

2.4.2.3 Bits de Resolución

Otro concepto con el que es necesario familiarizarse es el de bits de resolución, que se explica tomando como ejemplo el caso del microcontrolador Arduino:

Al ser un dispositivo digital, el Arduino trabaja internamente sólo con señales digitales, por lo que es necesario convertir las señales analógicas ingresadas en señales digitales. Esta conversión está gobernada por el número de bits que se utilizan para representar una señal analógica. En las especificaciones del microcontrolador Arduino MEGA 2560 se observa que las entradas analógicas tienen una resolución de 10 bits; es decir, que se pueden representar: $2^{10} = 1024$ valores analógicos distintos.

Ya que el voltaje de funcionamiento del Arduino es de 5V, las señales que éste puede medir van de 0 a 5V, por lo que la precisión con que puede realizar mediciones es de: $5V/1024 = 4.88mV$.

2.4.3 Lamp Manager

La fuente de poder seleccionada para alimentar a la lámpara de mercurio de 185nm es fabricada por BHK y se denomina Lamp Manager. Ésta es una fuente de poder de alto rendimiento, diseñada específicamente para operar lámparas de mercurio de baja presión, para aplicaciones que requieran el control estable y preciso de la intensidad de luz de la lámpara (BHK, 2007). Esta fuente y sus características se muestran en la Figura 14 y la Tabla 4, respectivamente.

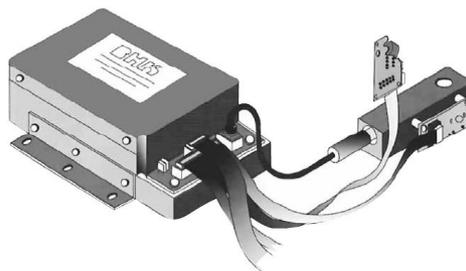


Figura 14. Fuente de Poder Lamp Manager

| | |
|-------------------------------|------------------------------|
| Potencia Requerida de Entrada | +24 VDC, @2Amps |
| Voltaje de Salida | >900 V RMS, circuito abierto |
| Corriente de Salida | 1.5 a 20 mA RMS, bajo carga |
| Frecuencia de Salida | 27 kHz, +/- 5% |

Tabla 4. Especificaciones de la Fuente de Poder Lamp Manager

Esta fuente es empleada además para controlar la intensidad de corriente que circula por ésta. El control de la corriente tiene como fin controlar la intensidad de luz ultravioleta que genera la lámpara, puesto que la intensidad de luz es directamente proporcional a la corriente que circula por la lámpara (Figura 15).

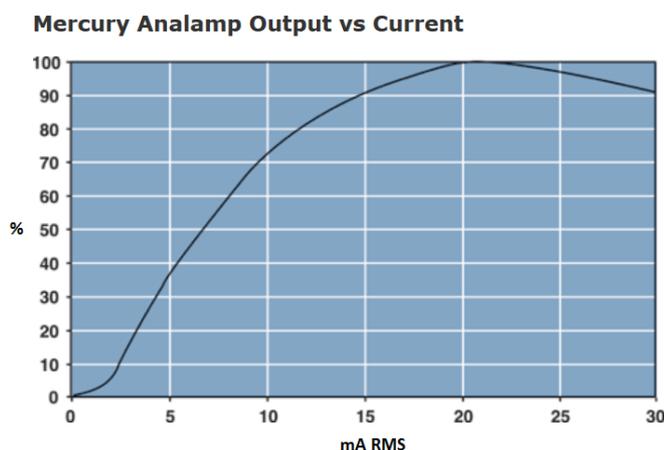


Figura 15. Intensidad de Corriente vs Intensidad de Luz

En el manual de este instrumento se indica que el control de corriente se realiza insertando un potenciómetro de 50k Ω entre los pines 25 (positivo) y 26 (tierra). Puesto que los potenciómetros tradicionales se ajustan de forma manual, para realizar este control por medio del microcontrolador Arduino MEGA 2560, de forma digital, se requiere de un potenciómetro digital. Éste es un resistor variable controlado digitalmente, que pueden ser utilizados en lugar de su contraparte mecánica. Mientras que los potenciómetros digitales poseen una funcionalidad comparable a los potenciómetros mecánicos, sus especificaciones

y confiabilidad son superiores para muchos diseños. (Creech, 2015). El potenciómetro seleccionado se describe a continuación.

2.4.3.1 Potenciómetro Digital MCP4141-503

Es un dispositivo (un chip integrado) que hace las veces de un potenciómetro tradicional, cuya resistencia se controla digitalmente mediante la interfaz SPI. Se muestra en la Figura 16 un diagrama del mismo, y sus especificaciones se detallan en la Tabla 5.

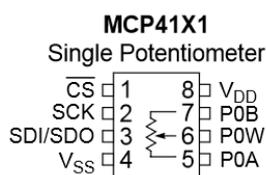


Figura 16. Potenciómetro Digital MCP4141: Descripción de pines

| | |
|-----------------------------|---------------|
| Resistencia entre P0A y P0B | 50 k Ω |
| Número de Pasos | 128 |
| Voltaje de Operación | 1.8 – 5.5 V |
| Ancho de Banda | 2 MHz |
| Rango de Temperatura | -40°C – 125°C |

Tabla 5. Especificaciones de Potenciómetro Digital MCP4141-503

Los pines V_{DD} y V_{SS} sirven para energizar el dispositivo; el primero se conecta a la fuente de 5V, y el segundo se conecta a tierra. Entre los pines P0A y P0B existe siempre una resistencia constante de 50k Ω . La resistencia del pin POW con respecto a P0A y P0B varía de acuerdo a la señal que ingresa al potenciómetro mediante la interfaz SPI. Al igual que en un potenciómetro regular se tiene que la resistencia entre POW y P0A ($R_{POW \rightarrow P0A}$) más la resistencia entre POW y P0B ($R_{POW \rightarrow P0B}$) es igual a la resistencia entre P0A y P0B ($R_{P0A \rightarrow P0B}$):

$$R_{POW \rightarrow P0A} + R_{POW \rightarrow P0B} = R_{P0A \rightarrow P0B} = 50k\Omega \quad (3)$$

El potenciómetro digital es un modelo de 7 bits (que equivale $2^7 = 128$ pasos) y $50\text{k}\Omega$; es decir, que la resistencia entre los pines POW y POA puede tomar cualquier valor entre 0 y $50\text{k}\Omega$ en pasos regulares de: $50\text{k}\Omega / 128 = 390.625\Omega$. Se elige el valor de resistencia mediante comunicación SPI enviando al dispositivo una palabra n de 7 bits entre 0 y 127. Entonces la resistencia R será:

$$R = n * 390.625\Omega \quad (4)$$

Los tres primeros pines del potenciómetro digital (CS, SDK y SDI/SDO) son utilizados para comunicarse con el Arduino por medio de la interfaz SPI, que se verá a continuación.

2.4.3.2 Serial Peripheral Interface (SPI)

Es un protocolo serial síncrono utilizado por los microcontroladores para comunicarse con dispositivos periféricos de forma rápida en distancias cortas. En una conexión SPI existe siempre un dispositivo maestro (comúnmente un microcontrolador) que controla dispositivos periféricos (también conocidos como dispositivos esclavos). (Arduino, 2015). En el presente proyecto el dispositivo maestro es el microcontrolador Arduino, y el dispositivo periférico es el potenciómetro digital.

Típicamente existen tres puertos comunes a todos los dispositivos que participan en este protocolo:

- MISO (Master In Slave Out): También llamado SDO (Slave Device Out), es el puerto utilizado para enviar datos al dispositivo maestro.
- MOSI (Master Out Slave In): También llamado SDI (Slave Device In), es el puerto utilizado para enviar datos hacia los dispositivos periféricos.
- SCK (Serial Clock): Es el puerto desde el cual el dispositivo maestro genera pulsos de reloj para sincronizar la transmisión de datos con los dispositivos periféricos.

Existe también un puerto específico para cada dispositivo:

- SS (Slave Select): También llamado CS (Chip Select), es el pin en cada dispositivo que el maestro puede habilitar o deshabilitar dispositivos específicos.

(Arduino, 2015)

2.4.4 Controlador de Flujo Másico (Mass Flow Controller - MFC)

Es un instrumento que permite medir y regular el flujo de aire que circula por el equipo. Para el proyecto se seleccionaron un par de controladores de flujo másico de Dakota Instruments, uno de los cuales se muestra en la Figura 17.



Figura 17. Controlador de Flujo Másico

Este dispositivo se comunica a través de puerto serial, como se indica en la Figura 18. No todos los pines son utilizados en este proyecto, la función de aquellos que si se manejan se describe a continuación: El MFC se alimenta con 12VDC, los cuales provienen de una fuente externa y se conectan a los pines 7 (12V) y 5 (tierra). Los pines 1(positivo) y 2 (negativo conectado a tierra) proveen una señal análoga de salida de 5 a 5V, que representa el valor de flujo actual y se conectan a dispositivos externos para su medición. Finalmente, los pines 8 (positivo) y 10 (negativo conectado a tierra) reciben una señal de entrada de 0 a 5V que corresponde al nivel de flujo deseado.

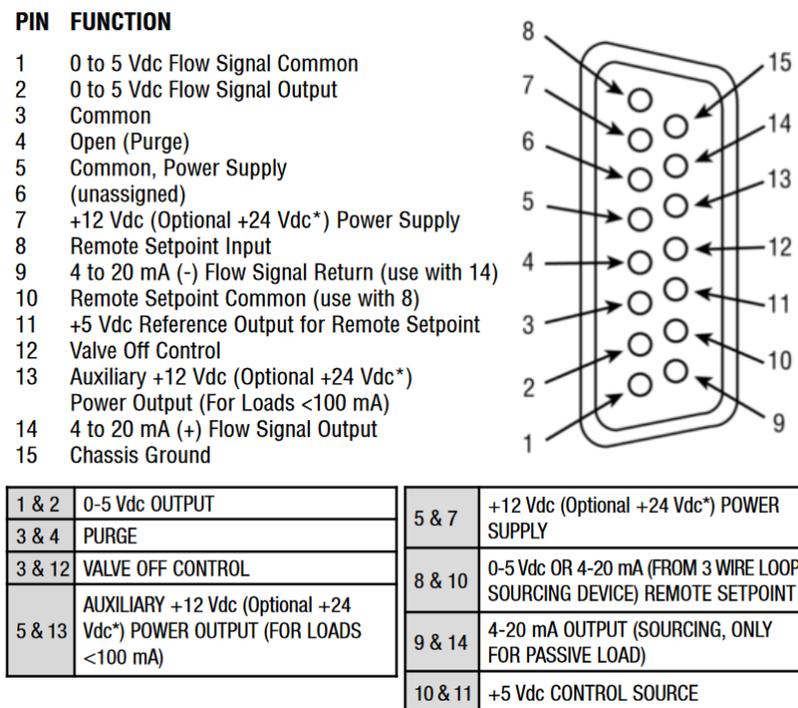


Figura 18. Descripción de Pines del Puerto Serial del MFC

La relación entre el voltaje (entre los pines 1-2 y los pines 8-10) y el valor de flujo es lineal, y depende del modelo de MFC. Para el MFC a la entrada del generador de ozono, que tiene un rango de 0 a 10L/min, cada voltio equivale a 2L/min; mientras que para el MFC a la entrada de la bomba, que tiene un rango de 0 a 5L/min, cada voltio equivale a 1L/min.

2.4.5 Válvula Solenoide 3/2

Esta válvula, controlada eléctricamente, es utilizada para permitir o restringir el paso de aire; posee tres canales: Normalmente Abierto (Normally Open - NO), Normalmente Cerrado (Normally Closed - NC) y Común (Common). El canal común se encuentra siempre abierto, mientras que solamente uno de los canales restantes se encuentra abierto al mismo tiempo; es decir, que si el canal NO está abierto, al canal NC estará cerrado, y viceversa. Como su nombre lo indica el canal NO es el que se encuentra abierto mientras la válvula esté desenergizada, y cuando se la energiza se cierra este canal y se abre el canal NC.

Esta válvula puede ser utilizada de dos maneras: establecer los canales NO y NC como entradas y el canal común como salida, o definir los canales NO y NC como salidas y el canal común como salida.

Las válvulas elegidas para el proyecto son del modelo SV75P48T-2 de Valcor (Figura 19). Éstas son válvulas de tres puertos, cuyo diámetro es de 0.156", se energizan con 24VDC y su presión máxima de funcionamiento es de 30 PSI.

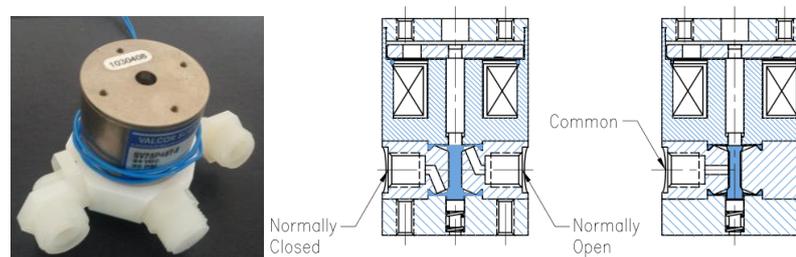


Figura 19. Válvula Solenoide SV75P48T-2

2.4.6 Motor Paso a Paso

Un motor paso a paso es un dispositivo electromagnético que convierte los pulsos digitales en la rotación mecánica de un eje. Las ventajas de este tipo de motor son su bajo costo, alta confiabilidad, alto torque a bajas velocidades, y una construcción simple y fuerte que le permite operar en casi cualquier ambiente. Sus desventajas son el efecto de resonancia exhibido a bajas velocidades y el torque que decae al incrementar la velocidad. (AMS, 2010).

El motor seleccionado para el caso es el NEMA 17, que se muestra en la Figura 20. Éste es utilizado para rotar el interruptor de luz que decide el canal cuyo haz de luz será medido por el fotodiodo. Este motor tiene un total de 200 pasos para lograr una vuelta completa; es decir, que en cada paso el motor gira 1.8°.



Figura 20. Motor Paso a Paso NEMA 17

Este motor es controlado por el Arduino mediante el uso de cuatro pulsos digitales. Cabe destacar que el motor se energiza con 12V, y la señal digital del Arduino es de 5V, por lo que se necesita una fuente extra que provea 12V.

2.5 Software

En el presente proyecto se emplean un total de tres aplicaciones informáticas: LabVIEW, Arduino IDE y MATLAB. Las dos primeras están ligadas a herramientas en hardware diseñadas específicamente para ser controladas por el software respectivo. Las funciones de cada aplicación se describen brevemente:

- **LabVIEW:** Es el programa en dónde se desarrolla la aplicación principal, la que desempeña tres papeles: contiene la interfaz gráfica para el usuario final, realiza la adquisición y procesamiento de datos, y establece el valor de control (*setpoint*) para los diferentes controladores.
- **Arduino IDE:** Trabaja de forma conjunta con LabVIEW y está encargado de ejecutar todos los controladores para ajustar las diferentes variables (como temperatura y flujo) a aquellas definidas por el usuario en la interfaz gráfica.
- **MATLAB:** Se utiliza esencialmente para obtener funciones matemáticas que permitan relacionar dos variables, como por ejemplo resistencia eléctrica vs temperatura. Estas funciones son introducidas posteriormente en las aplicaciones desarrolladas en LabVIEW y Arduino IDE.

A continuación se describe el funcionamiento de cada uno de estos programas informáticos y la manera en que son empleados para desempeñar las funciones descritas anteriormente.

2.5.1 LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)

Esta plataforma de programación gráfica integra la adquisición, control, análisis y presentación de datos para el desarrollo de aplicaciones. Tiene la ventaja de ser un software intuitivo y flexible, compatible con aplicaciones escritas en otros lenguajes (U. Sevilla).

Las aplicaciones desarrolladas en LabVIEW se conocen como instrumentos virtuales (*Virtual Instrument* o VI en inglés), los que, junto con un hardware determinado hacen las veces de instrumentos tradicionales. Los instrumentos virtuales (VIs) de LabVIEW son de naturaleza jerárquica; lo que significa que luego de crear uno, éste puede ser utilizado dentro de la programación gráfica de otro VI. A estos instrumentos virtuales que sirven de base para crear VIs más complejos se los conoce como SubVIs. De este modo, se facilita el realizar modificaciones en el código, y la búsqueda de errores en el mismo. (NI, 2015). Cabe recalcar que LabVIEW cuenta con herramientas (*Toolkits*) en forma de instrumentos virtuales ya preestablecidos desde su instalación, que realizan funciones comúnmente requeridas para el desarrollo de una aplicación por parte del usuario.

Una de las tareas que se programan en LabVIEW con más frecuencia es la adquisición de datos, que se describe a continuación.

2.5.1.1 Adquisición de datos (DAQ)

Es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Comparados con los sistemas tradicionales, los sistemas DAQ aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y

las habilidades de conectividad de las PCs, proporcionando una solución de medición más potente, flexible y rentable. (NI, 2015).

Un sistema DAQ consiste de tres componentes: un sensor, un dispositivo de medición DAQ en hardware, y una PC con software programable; como se muestra en la Figura 21.



Figura 21. Adquisición de Datos

En el presente proyecto se utilizan los diferentes sensores descritos con anterioridad, el software utilizado es la aplicación desarrollada en LabVIEW, mientras que el dispositivo DAQ se detalla a continuación.

2.5.1.2 DAQ NI USB-6009

Este dispositivo USB multifunción de adquisición de datos posee las siguientes características: resolución de 14 bits, provisto de ocho entradas analógicas, dos salidas analógicas, 12 entradas/salidas digitales y un contador de 32 bits (Figura 22) (NI, 2015).

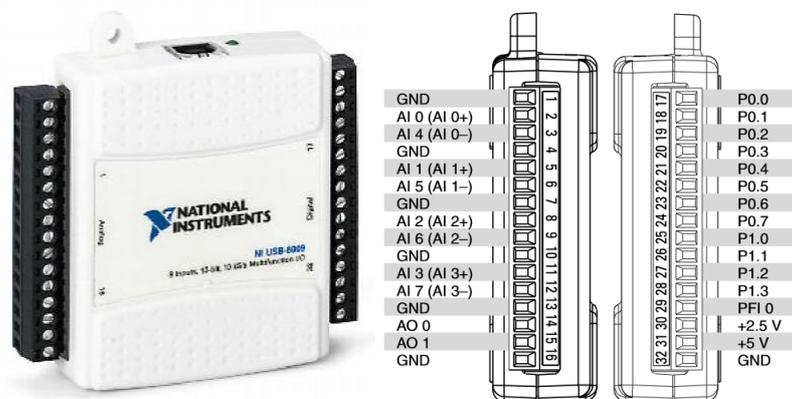


Figura 22. DAQ NI-USB 6009 y Descripción de Canales

La nomenclatura de los canales es como sigue: AI (Entrada Analógica), AO (Salida Analógica), P (Entrada/Salida Digital), PFI (Contador) y GND (Tierra). En el presente proyecto se requieren de dos tarjetas NI USB-6009.

Para facilitar la visualización y organización del programa desarrollado en LabVIEW, se implementó el modelo de máquina de estados que se describe a continuación.

2.5.1.3 Máquina de Estados

En el desarrollo de software, el modelo de máquina de estados es frecuentemente empleado para caracterizar el comportamiento de un sistema. Esta técnica permite pensar acerca del “estado” del sistema en un punto particular en el tiempo y modelar su comportamiento en dicho estado. El diseño de software sigue 3 etapas: (1) identificar los posibles estados en el que el sistema se puede encontrar, (2) el comportamiento del sistema en cada uno de los estados, y (3) qué eventos desencadenan la transición de un estado a otro. (Wright, 2005).

Por último, se implementa también en el programa un proceso que se conoce como *smoothing* (alisado), cuya función es disminuir el ruido de la señal de intensidad de luz tomada del fotodiodo.

2.5.1.4 Smoothing (Alisado)

En muchos experimentos científicos la amplitud de la señal real (los valores en el eje y) cambian suavemente como función de los valores del eje x, mientras que muchos tipos de ruido son vistos como rápidos cambios aleatorios en amplitud dentro de la señal. En estos casos, se puede reducir el ruido por un proceso conocido como alisado. En este proceso, los puntos de una señal se modifican del siguiente modo: los puntos más altos que los inmediatamente adyacentes (a causa del ruido) se reducen, mientras que los puntos más

bajos que los inmediatamente adyacentes se incrementan. Siempre que la señal real subyacente sea suave, ésta no se distorsionará significativamente por este proceso; pero el ruido se reducirá notablemente. (O’Haver, 2015). Un ejemplo de este proceso se muestra en la Figura 23.

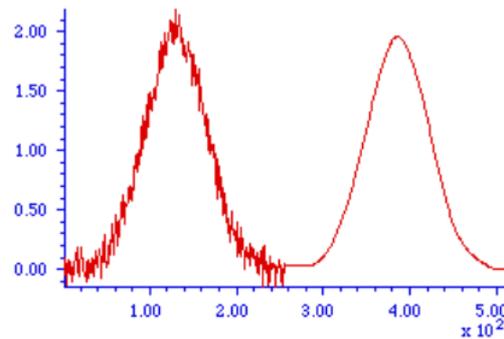


Figura 23. Señal ruidosa (izq.) y la misma señal luego de aplicar el alisado (der.)

El algoritmo de *smoothing* más comúnmente utilizado, debido a su fácil implementación en código, es el de promedio móvil, descrito a continuación.

2.5.1.4.1 Promedio Móvil (Moving Average)

Es el filtro más frecuente en el procesamiento de señales digitales ya que es óptimo para reducir el ruido de una señal rectangular (similar a la señal de intensidad de luz) al tiempo que se mantiene la forma de la misma. Como su nombre lo indica, este filtro consiste en promediar un número definido de puntos de la señal de entrada para producir un punto de la señal de salida (Smith S., 1998); ésto se describe en la siguiente ecuación:

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j = -(M-1)/2}^{(M-1)/2} x[i+j] \quad (5)$$

Donde $x[]$ es la señal de entrada, $y[]$ es la señal de salida, y M es el número de puntos a promediar. Puesto que el grupo de puntos de la señal de entrada se eligen simétricamente alrededor del punto de la señal de salida, el valor de M es siempre un número entero impar. A continuación se presenta un ejemplo con $M = 5$ e $i = 80$:

$$y[80] = \frac{x[78] + x[79] + x[80] + x[81] + x[82]}{5}$$

2.5.2 Arduino IDE (Integrated Development Environment)

La plataforma de desarrollo Arduino IDE contiene: un editor de texto para escribir código, un área de mensajes, una consola de texto y una barra de tareas con funciones comunes. Esta plataforma se comunica con el hardware de Arduino y también es utilizada para transferir programas (Arduino, 2015).

El software Arduino IDE es indispensable para desarrollar programas que indiquen al microcontrolador MEGA 2560 las tareas que éste debe realizar. Dentro de esta plataforma se definen las funciones de los diferentes puertos presentes en el microcontrolador, y se desarrollan los algoritmos de control para cada una de las variables a controlar.

Para realizar los diversos algoritmos de control se sigue como punto de partida el criterio de control PID, que se define como sigue:

2.5.2.1 Control PID (Proporcional-Integral-Derivativo)

Cuando se requiere mejorar la respuesta en estado estable y la respuesta transitoria de un sistema, se recurre a un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo), en el cual se añaden dos polos y un cero (Fadali, 2013). Su función de transferencia $C(s)$ es de la forma:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = K_d \frac{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s}$$

$$2\zeta\omega_n = K_p/K_d, \quad \omega_n^2 = K_i/K_d \quad (6)$$

O también puede ser expresada de la siguiente forma:

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

$$T_i = K_p/K_i, \quad T_d = K_d/K_p \quad (7)$$

En donde K_p , K_d y K_i son las ganancias proporcional, derivativa e integral respectivamente. Para obtener el valor de estos coeficientes se utiliza frecuentemente la regla de Ziegler-Nichols, expuesta a continuación.

2.5.2.1.1 Sintonización Ziegler-Nichols para controladores PID

Es una regla de sintonización empírica de controladores PID, consistente con el significado físico de los parámetros (Fadali, 2013). Para aplicar estas reglas se debe primeramente proceder con los pasos del método de la tangente:

1. Obtener experimentalmente la curva de la respuesta paso unitario del proceso.
2. Dibujar una tangente a esta curva en su punto de inflexión, como se muestra en la

Figura 24:

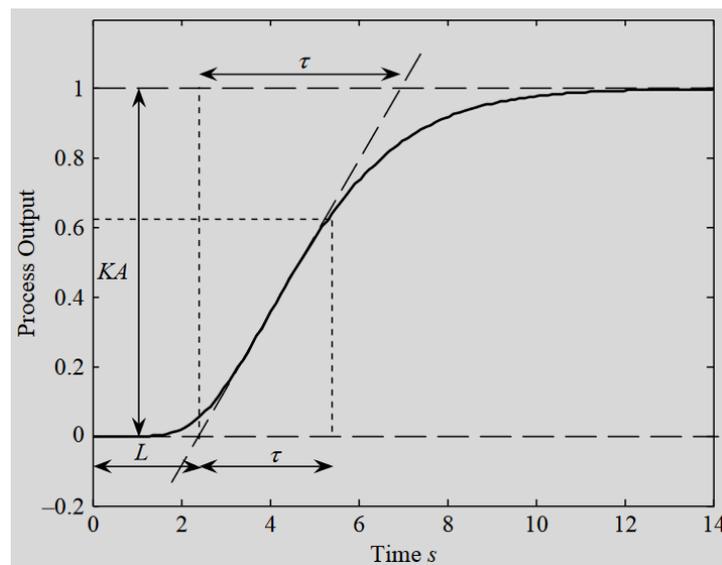


Figura 24. Método de la Tangente

3. Calcular la ganancia del proceso K como la razón entre el cambio en estado estable del proceso, la salida y , y la amplitud de la señal paso unitario de entrada A .
4. Calcular el tiempo muerto aparente L como el intervalo entre la aplicación de la entrada paso unitario y la intersección de la línea tangente con el eje de tiempo.
5. Determinar el valor de $T + L$ como el intervalo de tiempo entre la aplicación de la entrada paso unitario y el tiempo cuando el proceso alcanza el 63.2% de su valor final.

Una vez obtenidos los valores de K , T y L , se determinan las ganancias K_p , K_d y K_i de acuerdo a la siguiente tabla:

| Controller Type | K_p | T_i | T_d |
|-----------------|----------------------|-------|--------|
| P | $\frac{\tau}{KL}$ | – | – |
| PI | $0.9\frac{\tau}{KL}$ | $3L$ | – |
| PID | $1.2\frac{\tau}{KL}$ | $2L$ | $0.5L$ |

Tabla 6. Reglas de Sintonización Ziegler-Nichols

(Fadali, 2013)

2.5.3 MATLAB (Matrix Laboratory)

Es un lenguaje de programación de alto nivel que cuenta con un entorno interactivo, y permite realizar aplicaciones interdisciplinarias tales como procesamiento de señales, comunicaciones y sistemas de control. El elemento base de esta herramienta de cómputo matemático es la matriz, y si es necesario manipular información en forma de arreglos, MATLAB es generalmente el software indicado (Mathworks, 2015).

Para el presente proyecto se requiere de una aplicación dentro de MATLAB llamada *Curve Fitting App (cftool)*, la cual permite obtener una función que relacione dos variables (Ajuste de Curvas).

2.5.3.1 Curve Fitting App

Esta aplicación provee una interfaz flexible que permite construir y visualizar una función matemática que se ajuste lo mejor posible a una serie de datos. Esta aplicación permite: comparar múltiples funciones, usar regresiones lineales y no lineales, utilizar ecuaciones personalizadas, y chequear qué tan exacto es el ajuste (Mathworks, 2015). La interfaz de la aplicación se puede observar en la Figura 25.

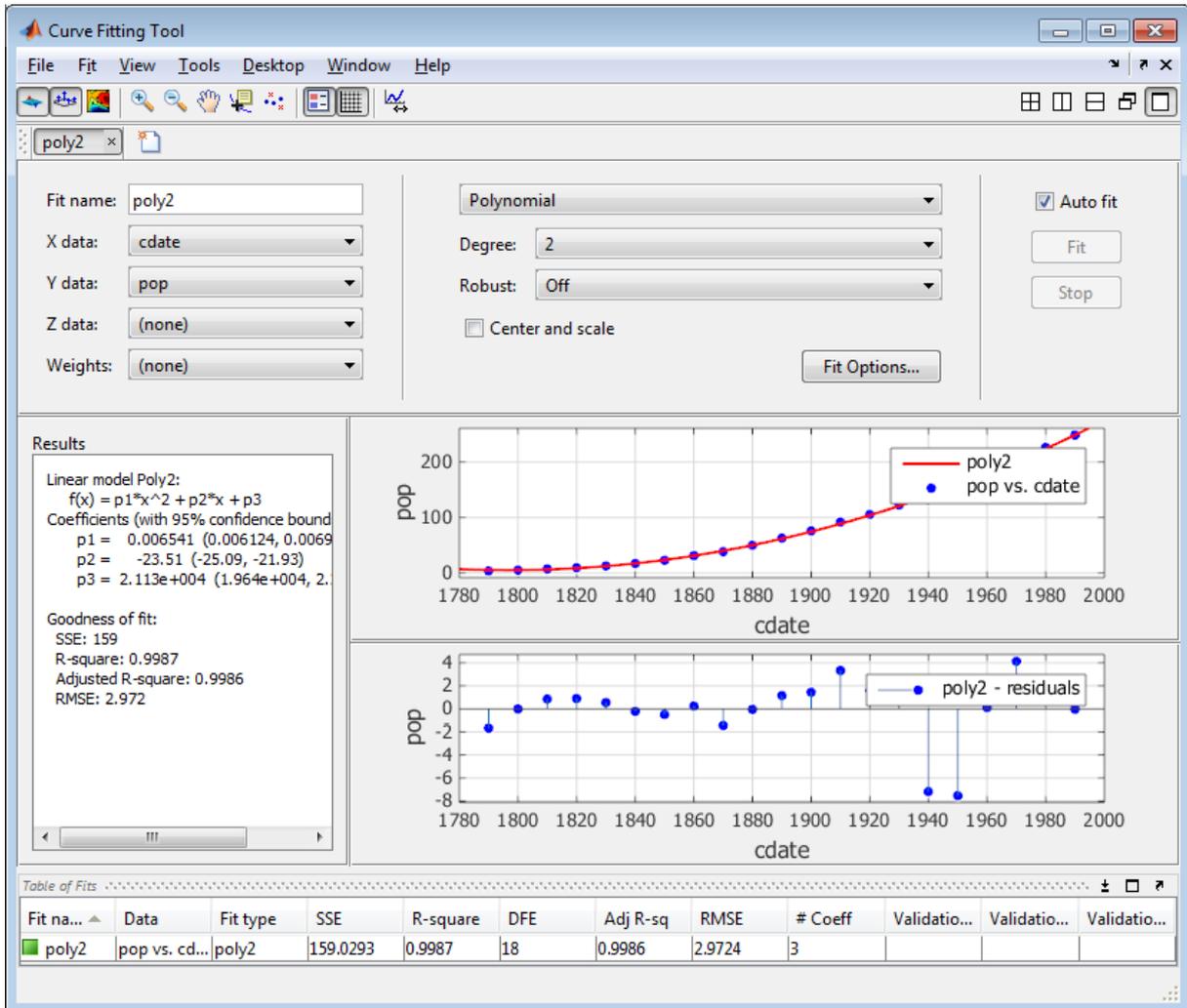


Figura 25. Curve Fitting App

Capítulo 3: DESARROLLO

En este capítulo se describe el desarrollo de las diferentes partes que componen el instrumento sensor y generador de ozono, haciendo uso de los conceptos, software, hardware y metodología definidos en el capítulo anterior. Se expone en primer lugar la configuración de los puertos del microcontrolador Arduino MEGA 2560. Posteriormente, se detalla el desarrollo y el funcionamiento de los circuitos implementados. Finalmente, se describe el proceso de programación de la aplicación en LabVIEW.

3.1 Configuración de Pines Arduino MEGA 2560

En la Tabla 7 se detalla la lista de pines que se ocupan en el microcontrolador Arduino, y la función de cada uno de ellos. El detalle del código desarrollado en Arduino puede verse en el Anexo A.

| Pin | Descripción |
|-----------------------------|---|
| Reset (Entrada Digital) | Reset Arduino |
| Vin (Entrada Analógica) | Fuente de Poder (9V) |
| A2 (Entrada Analógica) | Termistor de la Lámpara de Mercurio de 185nm |
| A3 (Entrada Analógica) | Termistor de la Lámpara de Mercurio de 254nm |
| A4 (Entrada Analógica) | Lectura de Corriente (Lámpara de 185nm) |
| A5 (Entrada Analógica) | Setpoint Corriente (Lámpara de 185nm) / Setpoint MFC2 / Lectura de Cuentas (Lámpara de 254nm) |
| A8 (Entrada Analógica) | Setpoint Temperatura (Lámpara de 254nm) |
| A9 (Entrada Analógica) | Setpoint Temperatura (Lámpara de 185nm) |
| 3 (Salida PWM) | Control de Flujo MFC 2 |
| 4 (Salida Digital) | LED indicador de la temperatura alcanzada (Lámpara de 254nm) |
| 5 (Salida PWM) | Control de Temperatura (Lámpara de 185nm) |
| 6 (Salida PWM) | Actuador de la Niquelina |
| 7 (Entrada Digital) | Recibir Setpoint MFC 2 |
| 24 – 28 (Salidas Digitales) | Motor Paso a Paso |
| 32 (Salida Digital) | Válvula Solenoide 1 |

| | |
|----------------------|--|
| 34 (Salida Digital) | Válvula Solenoide 2 |
| 36 (Salida Digital) | Inicio del Ajuste del Interruptor Óptico |
| 38 (Salida Digital) | Inicio del Procesamiento de la Señal |
| 50 (Entrada Digital) | MISO (SPI) |
| 51 (Salida Digital) | MOSI (SPI) |
| 52 (Salida Digital) | SCK (SPI) |
| 53 (Salida Digital) | CS (SPI) |

Tabla 7. Configuración de Pines del Microcontrolador Arduino MEGA 2560

3.2 Diseño de Circuitos

3.2.1 Circuito para la Medición de la Temperatura (Banca Óptica)

El circuito para la medición de temperatura se muestra en la Figura 26. Éste es alimentado con 5VDC provenientes del microcontrolador Arduino MEGA 2560. El sensor utilizado para la medición es el termistor RT1, que se encuentra incrustado en la banca óptica. Puesto que éste tiende a sobrecalentarse si se aplican los 5V directamente, debido a la corriente proveniente de la fuente del Arduino, fue necesario implementar un circuito que provea una corriente mucho menor; de lo contrario, se puede estropear la medida de temperatura. Con este fin se diseñó un circuito empleando el transistor NPN 2N3904 (Q1) y un diodo 1N4007 (D1) para limitar la corriente, de modo que fluyan solamente 10 μA por el termistor. Finalmente, se añadió un capacitor de 100 μF (C1) para filtrar el ruido.

En la práctica la intensidad de corriente que circula por el termistor es de 9 μA . Ya que el circuito actúa como una fuente de corriente constante, se mide el voltaje a través del termistor (V_{RT1}), y se calcula su resistencia ($RT1$) como sigue:

$$RT1 = V_{RT1} / I_C = V_{RT1} / 9\mu\text{A} \quad (8)$$

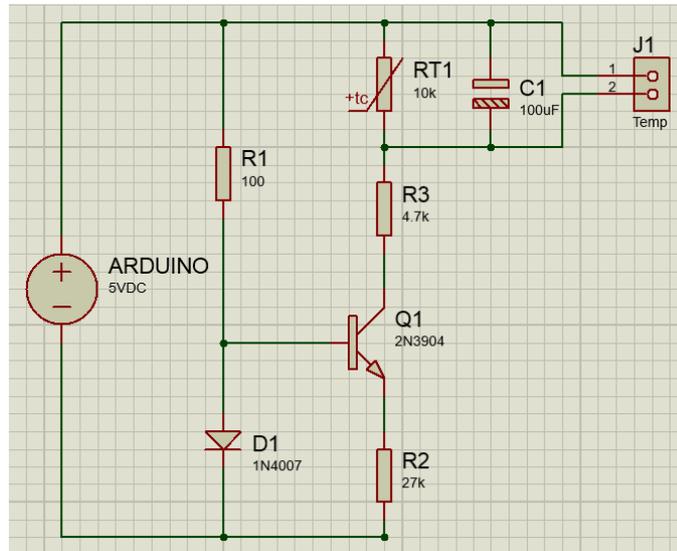


Figura 26. Circuito para la Medición de la Temperatura

No obstante, para transformar este valor a temperatura, es necesario conocer los coeficientes Steinhart-Hart (A, B y C), los cuales se determinaron experimentalmente. Para esto, se tomaron los datos de resistencia del termistor para las temperaturas entre 30°C y 55°, en incrementos de 1°C; y posteriormente se realizó una regresión mediante la herramienta *cftool* de Matlab haciendo uso de la ecuación Steinhart-Hart definida en la Ecuación 2.

Se ingresó un vector T de datos de temperatura en Kelvin y otro vector R de datos de resistencia en ohmios y se obtuvo la curva siguiente (Figura 27), y los coeficientes A, B y C.

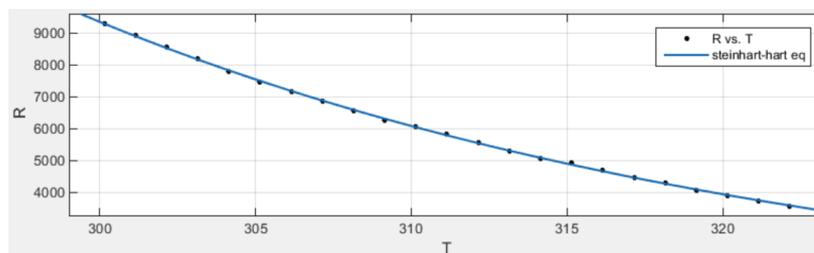


Figura 27. Ajuste de Curvas Resistencia vs. Temperatura (1)

$$A = 0.002145$$

$$B = 6.493e-05$$

$$C = 7.778e-07$$

3.2.2 Circuito para el Control de Temperatura (Lámpara de 185nm)

El circuito se muestra en la Figura 28. La lámpara de mercurio de 185nm para la generación de ozono se encuentra insertada en el generador de ozono. Dentro de este instrumento se encuentra acoplado un transistor de potencia (Q2) que es el dispositivo que sirve como fuente de calor, para incrementar la temperatura del generador y la lámpara que se halla dentro de éste. El generador posee además un termistor (RT1) que sirve para medir la temperatura del mismo.

Se debe tener en cuenta que el rango de temperatura de funcionamiento de la lámpara es de 40°C a 70°C, y para que llegue a la temperatura máxima en un tiempo adecuado se determinó que se requieren al menos 200mA de corriente a través del transistor Q2, por lo que se eligió una fuente de poder (V1) que provee 12VDC y hasta 3A.

El circuito consiste básicamente en un *switch* controlado por una onda PWM proveniente del pin 5 del microcontrolador Arduino. El transistor que hace la función de *switch* es el transistor PNP de potencia 2N6609 (Q2). Debido a que se requiere una fuente externa (V1) de 12VDC para alimentar el transistor Q2 y ésta es de un voltaje mucho mayor al que puede manejar el microcontrolador Arduino (que no soporta más de 5.5V), fue necesario recurrir a un segundo transistor (NPN, modelo 2N3904, denominado Q1) para que controle el *switching* del transistor Q2. El nivel de la onda PWM se ajusta según la temperatura monitoreada por el termistor RT1.

Para obtener el valor de la resistencia del termistor, se toma la medida del voltaje de salida VJ2, y se tiene un simple divisor de voltaje:

$$RT1 = R4 (V2 - V_{J2}) / V_{J2} = 1.8k\Omega (5V - V_{J2}) / V_{J2} \quad (9)$$

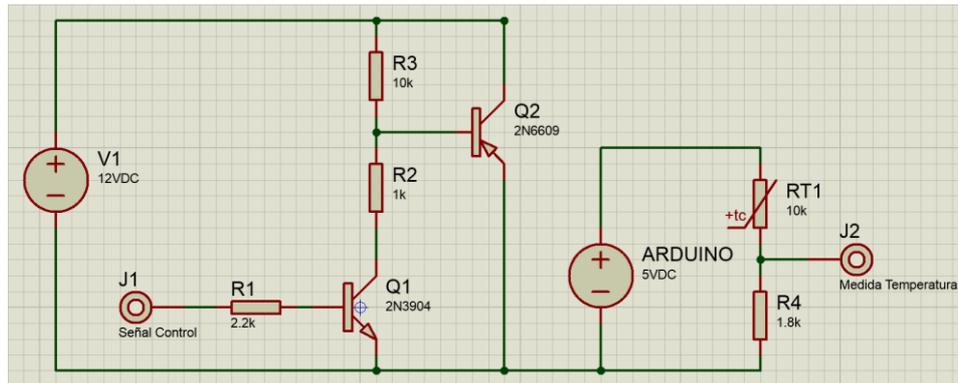


Figura 28. Circuito para el Control de Temperatura (Lámpara de 185nm)

Fue también necesario la obtención experimental de los coeficientes Steinhart-Hart.

Para ésto, se tomaron los valores de resistencia del termistor desde 45°C a 69°C, en incrementos de 3°C, ya que la velocidad a la que se elevaba la temperatura en el experimento era mayor que en la instancia anterior. Los resultados se muestran a continuación en la Figura 29, y posteriormente los valores de los coeficientes A, B y C.

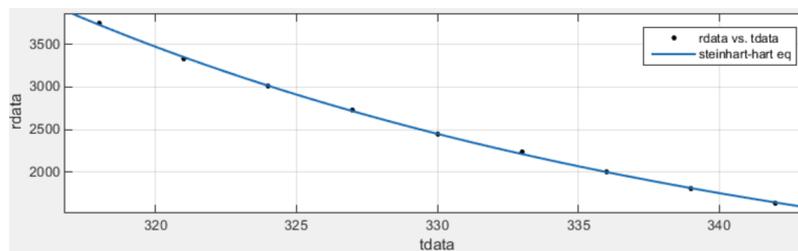


Figura 29. Ajuste de Curvas Resistencia vs. Temperatura (2)

$$A = 0.001218 \quad (0.0001721, 0.002264)$$

$$B = 0.0002141 \quad (1.272e-05, 0.0004154)$$

$$C = 2.984e-07 \quad (-8.283e-07, 1.425e-06)$$

Cabe recalcar que para mejorar la precisión de la medida de temperatura en el rango mencionado, se debió sacrificar la precisión para temperaturas más bajas, por lo que las temperaturas menores a 33°C presentan un error de medición mayor al 5% que se incrementa conforme disminuye la temperatura.

El rango de temperaturas en que la medición es más precisa está ligado directamente con la resistencia elegida en serie al termistor (denominada R4). El valor de esta resistencia

se selecciona para coincidir con la resistencia del termistor a una temperatura dada, en donde se tendrá la mayor precisión. A partir de esta temperatura se tiene un rango aproximado de $\pm 25^{\circ}\text{C}$ en donde los valores de resistencia y temperatura son casi lineales. En este caso la resistencia R4 de $1.8\text{k}\Omega$ elegida equivale a la resistencia del termistor a 65°C .

3.2.3 Circuito para la Medición de Presión

El circuito implementado (véase Figura 30) es el que se detalla en el *datasheet* del sensor de presión MPXV5100 para eliminar el ruido y desacoplar el circuito.

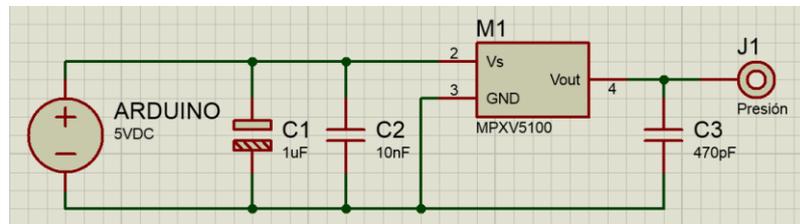


Figura 30. Circuito para la Medición de Presión

En dicho *datasheet* se describe también la ecuación a aplicar para determinar el valor de la presión P:

$$V_{\text{OUT}} = V_s (P * 0.009 + 0.04) \pm (\text{Pressure Error} * \text{Temp. Mult.} * 0.009 * V_s) \quad (10)$$

En donde V_{OUT} es el voltaje en J1, que se mide mediante la tarjeta NI USB-6009; V_s es el voltaje de la fuente, en este caso proveniente del Arduino (en la práctica se determinó que el valor era de 4.19V); Pressure Error es igual al 2.5% para el modelo del sensor de presión; y Temp. Mult. varía con la temperatura, que para valores 0°C y 85°C es igual a 1.

Reemplazando estos datos en la Ecuación 10, se puede obtener el valor de la presión P como sigue:

$$P = (V_{\text{OUT}} - 0.1671 \pm 0.00094725) / 0.03771 \approx (V_{\text{OUT}} - 0.1671) / 0.03771 \quad (11)$$

3.2.4 Circuito para el Control de la Intensidad de Luz

El circuito se muestra en la Figura 31. El control de intensidad de luz de la lámpara de mercurio se realizó por medio de la fuente de poder Lamp Manager de BHK, Inc. Ésta fuente permite ajustar el nivel de corriente que pasa por la lámpara mediante un potenciómetro de

50 k Ω . En este caso se trata de un potenciómetro digital (modelo MCP4141, denominado U1) que se comunica con el microprocesador Arduino MEGA 2560 mediante la interfaz SPI de éste. Los puertos destinados a este fin son los pines digitales 50, 51, 52 y 53; desde donde el Arduino envía palabras de 7 bits para ajustar remotamente la resistencia del potenciómetro de acuerdo a la Ecuación 4.

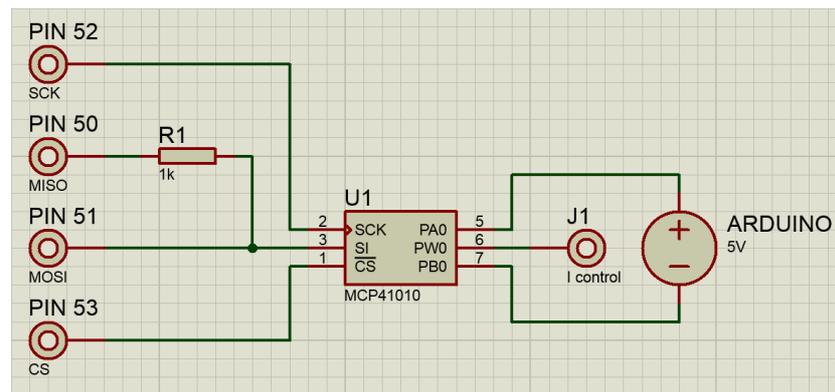


Figura 31. Circuito para el Control de la Intensidad de Luz

Para ajustar el nivel de intensidad de luz de la lámpara se controla la corriente de la misma desde 0 a 20mA, que es el valor donde la intensidad de luz es máxima. El nivel de intensidad de luz es directamente proporcional al de corriente.

Al igual que con la temperatura, se halló que la relación entre la resistencia del potenciómetro y la intensidad de corriente no es del todo lineal, por lo que se realizó una aproximación cuadrática mediante la herramienta *cftool* de Matlab. Para esto se tomaron los valores de corriente (I) en mA para el correspondiente valor de la palabra enviada por SPI (taps). La curva resultante se observa en la Figura 32 (en el eje Y el valor de corriente se muestra en incrementos de 0.1mA), junto con su ecuación correspondiente.

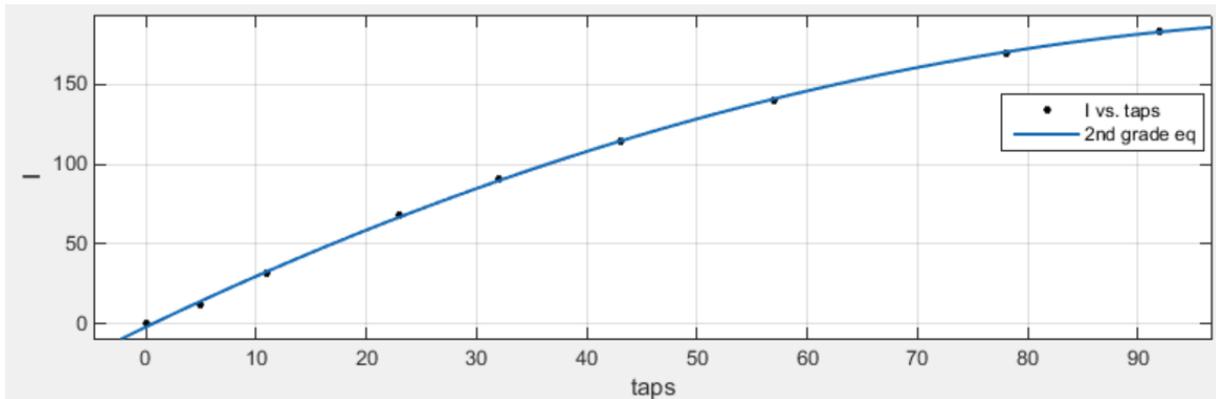


Figura 32. Ajuste de Curvas Taps vs Corriente

$$I = 0,01464 \text{ taps}^2 + 3.358 \text{ taps} - 2.2 \quad (12)$$

3.3 Interfaz Gráfica LabVIEW

La interfaz gráfica (Figura 36) integra los diferentes controladores y los valores adquiridos mediante los múltiples sensores ubicados dentro del equipo. A continuación se detallan los elementos de esta interfaz:

- El botón *Iniciar* (Figura 33) da comienzo al programa en LabVIEW, mientras que el botón *Salir* (Figura 34) lo finaliza.

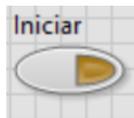


Figura 33. Botón Iniciar



Figura 34. Botón Salir

- El controlador *Ciclos de Procesamiento* (Figura 35) define el número de ciclos a procesar. Se denomina un ciclo cuando el aire filtrado y el no filtrado han fluido una vez a través del equipo. El valor por default es de 5.

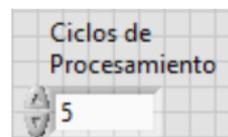


Figura 35. Control del Número de Ciclos de Procesamiento

- Las consignas de temperatura (Figura 37) son valores en los cuales se desan mantener la temperatura de cada una de las lámparas. El valor por default de ambas es de 55°C.

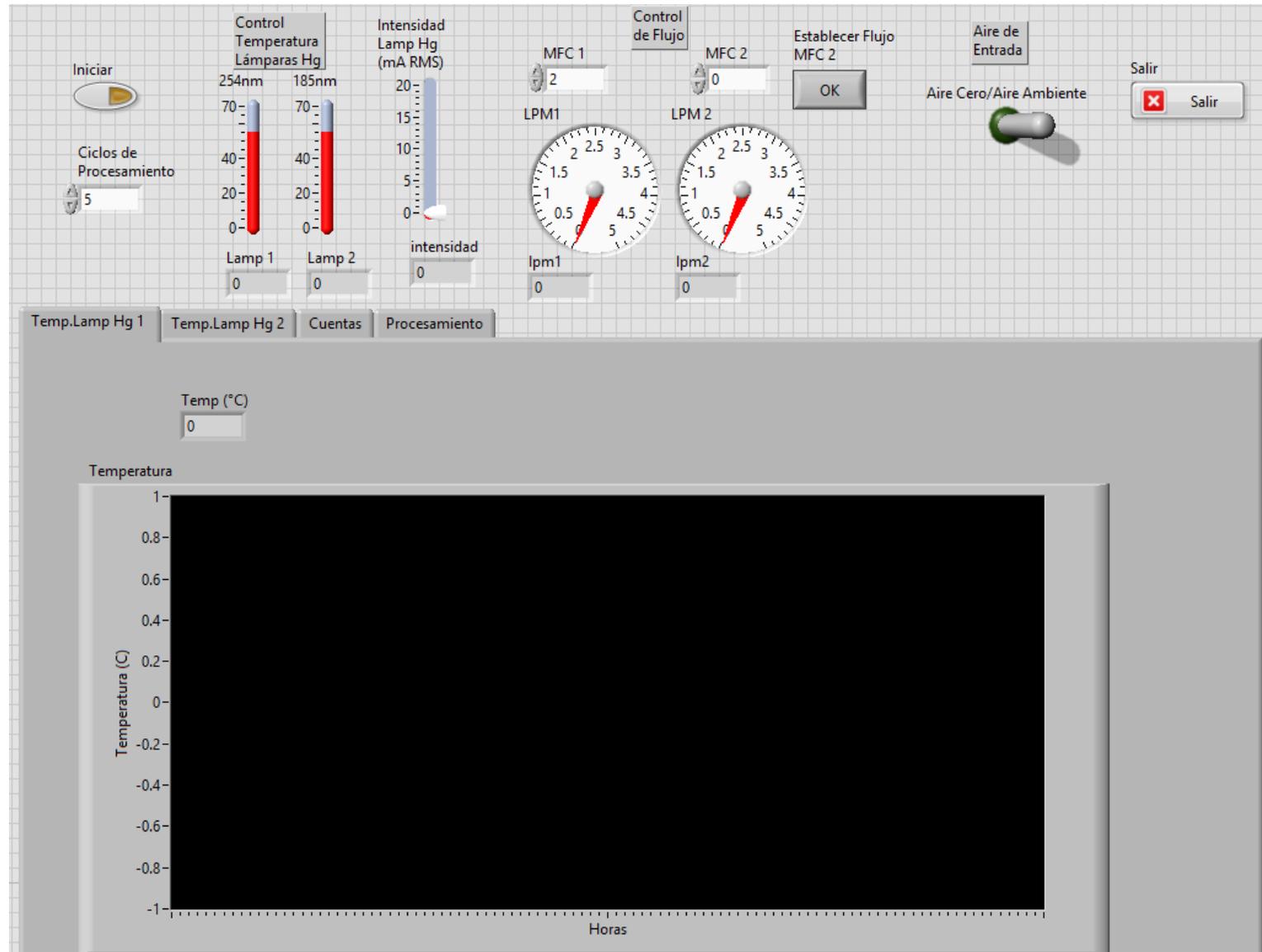


Figura 36. Interfaz Gráfica en LabVIEW

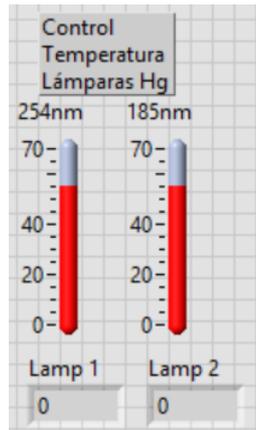


Figura 37. Controles de Temperatura

- Los indicadores de flujo másico para ambos instrumentos (Figura 38): a la entrada del generador de ozono (#2) y a la salida del flujo de aire (#1).

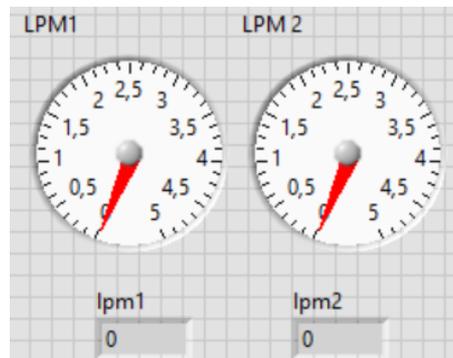


Figura 38. Indicadores de Flujo

- Se tiene además el controlador *Intensidad Lamp Hg* (Figura 38) que ajusta la corriente que circula por la lámpara de 185nm para variar su intensidad.



Figura 39. Controlador de Intensidad de Luz

- El controlador *MFC 1* (Figura 40 izq.) define el flujo del MFC 1, que puede variar de 0 a 5 L/min. Este controlador se encuentra debajo del botón *Salir*. Asimismo, el controlador *MFC 2* (Figura 40 med.) regula el flujo del MFC 2,

desde 0 a 10 L/min. Para enviar este último valor al Arduino se debe presionar el botón *Establecer Flujo Ozonator* (Figura 40 der.) por un par de segundos.

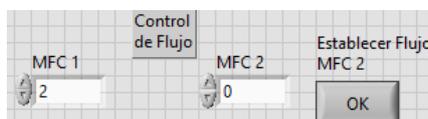


Figura 40. Controladores de Flujo MFC 1 y MFC 2

- Por último, se halla un interruptor que selecciona el aire de entrada para el equipo (Figura 41).



Figura 41. Selección del Aire de Entrada

En la parte inferior de la interfaz gráfica se muestran los datos de diversas variables dependiendo de una de las cuatro pestañas elegidas; como se muestra en la Figura 42.

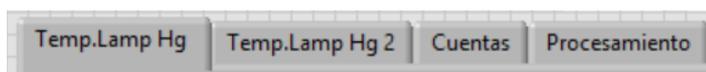


Figura 42. Selección de Pestañas

Las primeras tres pestañas nos muestran, dentro de la ventana correspondiente, una gráfica a lo largo del tiempo de la variable descrita en la etiqueta. La lámpara #1 es la de 254nm y la #2 es la de 185nm. Las cuentas son la medida de la intensidad de luz de la primera lámpara. En la ventana de procesamiento (Figura 43) se observan las variables para determinar la concentración de ozono en ppb.

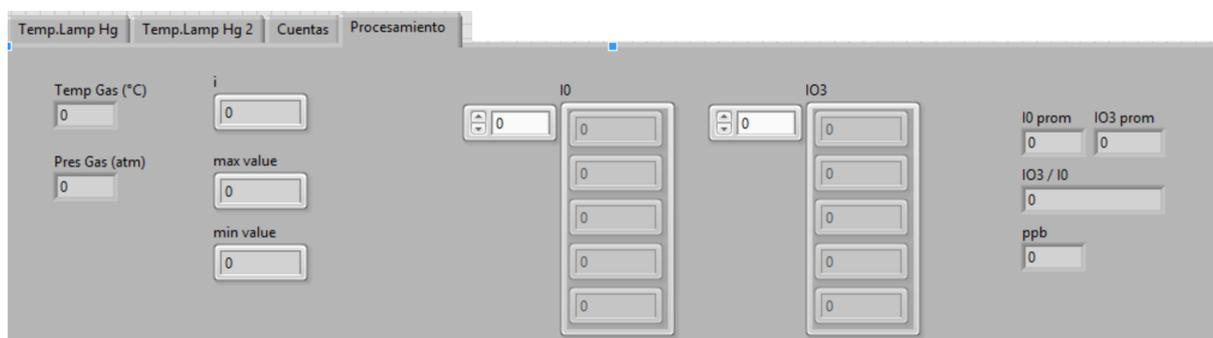


Figura 43. Pestaña de Procesamiento

3.4 Programación en LabVIEW

La programación gráfica en LabVIEW se realizó siguiendo el modelo de máquina de estados. La máquina de estados utilizada se muestra en la Figura 44.

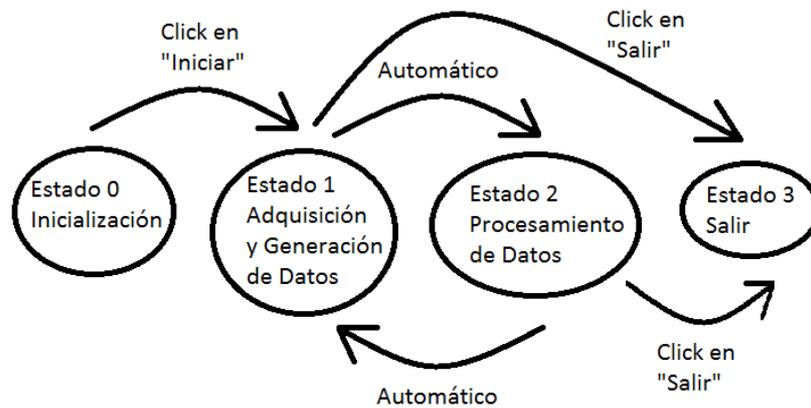


Figura 44. Máquina de Estados para la Programación en LabVIEW

3.4.1 Inicialización (Estado 0)

Al ejecutar el programa en LabVIEW se ingresa directamente al Estado 0. En éste la aplicación se mantiene en espera mientras se establecen las opciones de control: La temperatura para ambas lámparas, la intensidad de luz, el flujo másico a la entrada del generador de ozono y a la salida del instrumento, y el número de ciclos a tomar en cuenta para el procesamiento. Mediante la pulsación del botón Iniciar que ubicado en la interfaz gráfica se avanza al siguiente estado, al mismo tiempo que reinicia el microcontrolador Arduino para que su programa comience al mismo tiempo que el de LabVIEW, como se indica en la Figura 45.

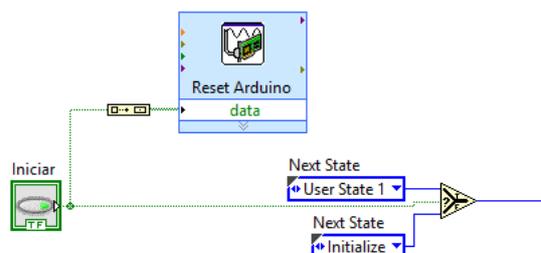


Figura 45. Iniciar

3.4.2 Adquisición y Generación de Datos (Estado 1)

Este estado consiste en un bucle *while*, dentro del cual se ejecutarán los instrumentos virtuales cada cierto periodo de tiempo de muestreo, que para nuestro caso se estableció a 100ms mediante la herramienta *Wait Until Next ms Multiple* (Figura 46), que se halla en la paleta de funciones: *Timing>> Wait Until Next ms Multiple*.

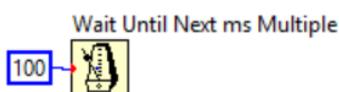


Figura 46. *Wait Until Next ms Multiple VI*

Para el proceso de adquisición y generación de datos se utilizaron un par de tarjetas NI USB-6009, las mismas que se configuraron mediante el instrumento virtual *DAQ Assistant* (Figura 47) de la aplicación LabVIEW. Éste se encuentra en la paleta de funciones: *Express>>Input>>DAQ Assistant*.

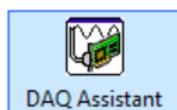


Figura 47. *DAQ Assistant VI*

Este instrumento virtual está diseñado para trabajar en conjunto con las tarjetas DAQ. Al arrastrarlo al diagrama de bloques se ejecuta automáticamente y abre una nueva ventana que permite configurar la adquisición y/o generación de señales para los diferentes canales analógicos/digitales de las tarjetas NI USB-6009, como se observa en las Tablas 8 y 9:

| Canal | Descripción |
|---|---|
| AO0 (Salida Analógica) | Control de Flujo Másico (1) |
| AO1 (Salida Analógica) | Control de Intensidad de Luz de la Lámpara de Mercurio de 185nm / Ajuste del Interruptor Óptico |
| AI0 (Entrada Analógica) | Clock |
| AI1 (Entrada Analógica) | Medición de Flujo Másico (1) |
| AI2+ – AI6- (Entrada Analógica Diferencial) | Medición de Temperatura de la Banca Óptica |

| | |
|-------------------------|---|
| A13 (Entrada Analógica) | Medición de Temperatura de la Lámpara de Mercurio de 254nm |
| A14 (Entrada Analógica) | Medición de la Presión |
| A15 (Entrada Analógica) | Medición de Flujo Másico (2) |
| P0.7 (Salida Digital) | Reset Arduino |
| P1.0 (Salida Digital) | Switch Aire Ambiente / Aire del Generador de O ₃ |
| P1.1 (Salida Digital) | Control de Flujo Másico (2) |
| P1.2 (Entrada Digital) | Iniciar Ajuste del Interruptor Óptico |
| P1.3 (Entrada Digital) | Terminar Bucle de Adquisición de Datos (Transición a Estado 2) |
| PFIO (Contador) | Medición de la Intensidad de Luz de la Lámpara de Mercurio de 254nm |

Tabla 8. Configuración de Canales de la DAQ NI-USB 6009 (1)

| Canal | Descripción |
|-------------------------|--|
| AO0 (Salida Analógica) | Control de Temperatura de la Lámpara de Mercurio de 254nm |
| AO1 (Salida Analógica) | Control de Temperatura de la Lámpara de Mercurio de 185nm |
| AI0 (Entrada Analógica) | Medición de Temperatura de la Lámpara de Mercurio de 185nm |

Tabla 9. Configuración de Canales de la DAQ NI-USB 6009 (2)

Las señales adquiridas por los canales de entrada analógica son del tipo *Dynamic Data* para la aplicación LabVIEW. Para facilitar su manejo se transforma las señales a escalares mediante la herramienta *Convert from Dynamic Data* (Figura 48), de la paleta de funciones: *Express>>Signal Manipulation>>Convert from Dynamic Data*.

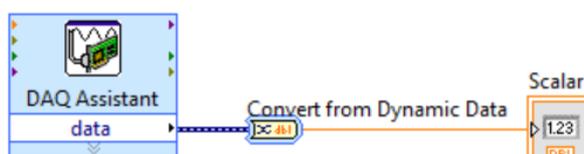


Figura 48. Diagrama de conversión de la señal a escalar

De esta manera se convierte un arreglo de formas de onda en un escalar simple que toma el valor de la última posición del arreglo.

A continuación se detallan los pasos que se siguieron para conseguir la medición y/o control de cada una de las variables.

3.4.2.1 Medición de la Intensidad de Luz

El canal PFIO realiza las mediciones de intensidad de luz en cuentas. Esto significa que durante un lapso de tiempo predeterminado (100 ms en este caso), el sensor de luz (un fotodiodo) recibe cierta cantidad de luz, que al final del periodo es convertida a un número determinado de cuentas proporcional a dicha luz. Sin embargo, el contador no es reseteado al inicio de cada ciclo, por lo que el número de cuentas recibido en el nuevo ciclo se suma a la cantidad del ciclo anterior. Para solventar esto, se resta el número de cuentas del ciclo anterior a la cantidad de cuentas actual, de forma que se obtiene un nivel de cuentas directamente proporcional a la intensidad de luz del último ciclo (Figura 49).

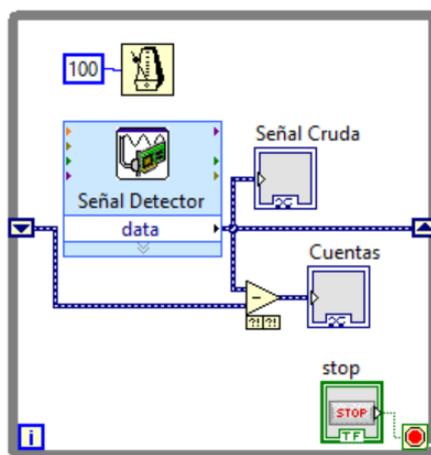


Figura 49. Diagrama de Medición de Intensidad de Luz

Para filtrar el ruido de la señal del canal PFIO, empleado para la medición de la intensidad de luz, se utilizó el instrumento virtual *Filter* (Figura 50), ubicado en la paleta de funciones: *Signal Processing*>>*Waveform Conditioning*>>*Filter*.

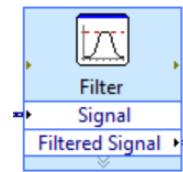


Figura 50. Filter VI

Se configuró el tipo e filtro como un promedio móvil rectangular donde todos los datos tienen el mismo peso (véase Ecuación 5), el número de datos a tomar en cuenta será de $M = 5$. La ventana de configuración se muestra en la Figura 51:

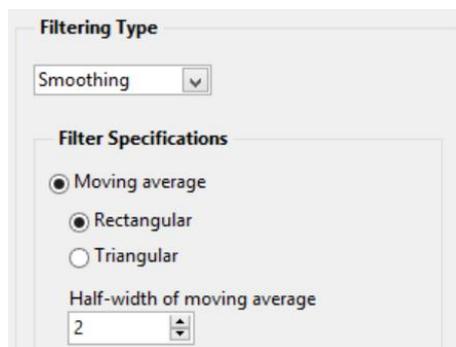


Figura 51. Configuración de Bloque Filter VI

Al aplicar el filtro de alisado se disminuye notablemente el ruido de la señal de intensidad de luz. Aunque este proceso hace que se prolongue el tiempo de transición entre los picos máximos y mínimos, no es un inconveniente porque la importancia de la señal radica en los valores de estos picos, los cuales mejoran al eliminar el ruido, como se puede ver en el ejemplo de la Figura 52:

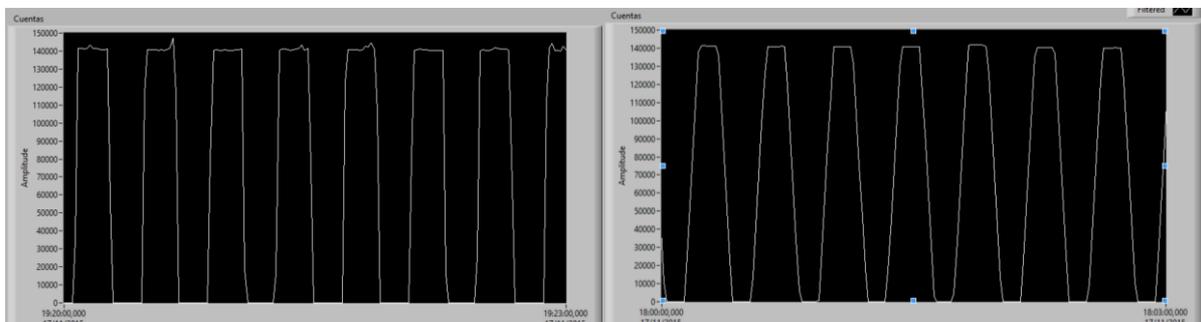


Figura 52. Ejemplo de una señal sin filtrar (izq.) vs la misma señal filtrada (der.)

3.4.2.2 Medición de Temperatura, Presión y Flujo Másico

La aplicación se encarga de tomar las medidas de voltaje de los termistores de ambas lámparas de mercurio, del termistor incrustado en la banca óptica y del sensor de presión conectado al tubo de flujo del aire. Las medidas de voltaje de los termistores se toman como base para hallar las resistencias de los termistores, y con éstas se aplica la ecuación de Steinhart-Hart (Ecuación 2) para convertirlas a temperatura. En el caso de la presión, es posible una conversión directa mediante la ecuación proporcionada en el *datasheet* del sensor (Ecuación 11).

La señal de medida del flujo másico está dada por los dos instrumentos *Mass Flow Controller*, cada uno de los cuales envía una señal de voltaje analógica de 0 a 5V que corresponde linealmente a un valor de flujo en L/min. Para el MFC 1 el flujo se tiene que $1[V] = 1[L/min]$, mientras que para el MFC 2 se tiene que $1[V] = 2[L/min]$.

A continuación se muestra en la Figura 53 la configuración en LabVIEW para obtener la medida de las diferentes variables.

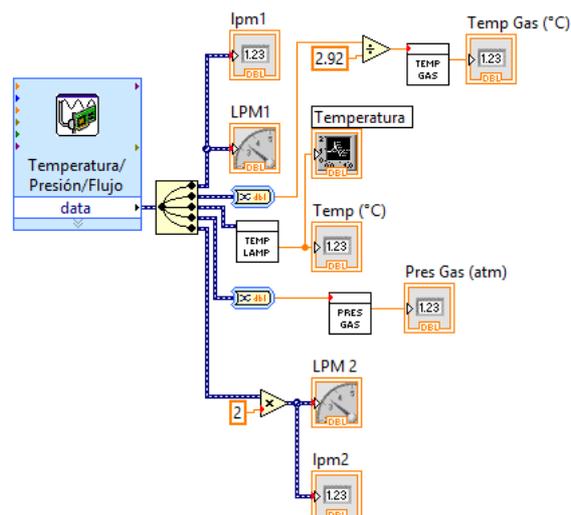


Figura 53. Adquisición de Datos de Temperatura (Lámpara de 254nm y Banca Óptica), Presión y Flujo

3.4.2.3 Control de Temperatura y Flujo Másico

Para el control de temperatura de las lámparas se cuenta con una segunda tarjeta DAQ NI USB-6009, en donde los voltajes de sus dos salidas analógicas se establecen mediante un par de controles deslizadores en la interfaz de usuario (mostrados ya en la Figura 37). El canal AO0 corresponde a la lámpara de 254nm y el canal AO1 corresponde a la lámpara de 185nm. Ambas salidas analógicas son ingresadas al microcontrolador Arduino y sirven de *setpoint* para que éste realice el control de ambas temperaturas.

El control de flujo másico es muy similar al proceso de medición de flujo, sólo que esta vez se requiere enviar una señal hacia los instrumentos MFC para que éstos ajusten el flujo al nivel requerido. La señal de control del MFC 1 es una onda PWM enviada desde el canal AO0 de la DAQ 1. Para el MFC 2 la señal PWM de control proviene del Arduino, el cual recibe el *setpoint* del canal AO1 de la DAQ 1. En la Figura 54, se presenta la programación para el control de temperatura y flujo másico.

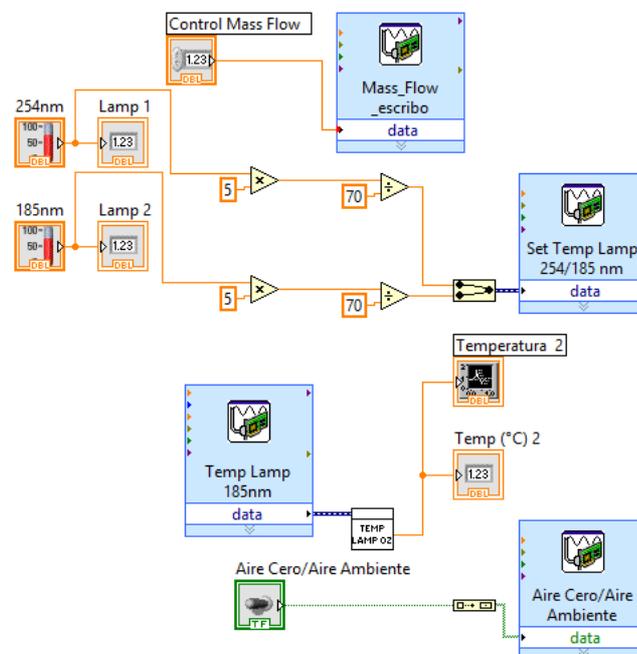


Figura 54. Control de Temperatura y Flujo Másico (MFC 1), Medición de Temperatura (Lámpara de 185nm) y Switch para el Aire de Ingreso

3.4.2.4 Control de la Intensidad de Luz

Para realizar este ajuste desde la aplicación LabVIEW se genera una salida analógica por el canal AO1 de la DAQ 1, cuyo nivel de voltaje se controla por medio de un deslizador vertical en la interfaz de usuario (ya mostrado en la Figura 39). Esta salida se conecta a una de las entradas analógicas del microprocesador Arduino UNO, el mismo que se comunica con el potenciómetro digital MCP4141 mediante el estándar SPI. El programa en Arduino lee el nivel de voltaje enviado desde el canal AO1 y lo transforma a un número entero en un rango entre 0 a 127 (que coincide con el número de pasos del potenciómetro en cuestión), que ajusta la posición del potenciómetro y éste a su vez el nivel de corriente de la lámpara.

3.4.2.5 Ajuste del Interruptor Óptico

La posición del motor paso a paso requiere ser definida para que el interruptor óptico (*optical chopper*) al que está acoplado se alinee con los canales de salida de luz de la banca óptica de manera que llegue toda la cantidad de luz de cada canal hacia el fotodiodo. Para este ajuste se aprovecha el hecho de que los niveles de luz de ambos canales difieren. El proceso de ajuste, realizado en Arduino, consiste en girar lentamente el motor (8 pasos a la vez) y tomar la medida de intensidad de luz en cada una de estas posiciones. En cada posición, la medida de intensidad es guardada en un arreglo y, al completar dos vueltas, se comparan entre sí para obtener la posición de máxima intensidad de luz. Finalmente el motor vuelve a girar hasta alcanzar el 97.5% del valor máximo calculado.

3.4.2.6 Sincronización del Control de Flujo Másico (MFC 2), Control de Intensidad de Luz (185nm) y Ajuste del Interruptor Óptico

Los procesos de ajuste del interruptor óptico, control de intensidad de luz (185nm), y control de flujo másico (MFC 2) son gobernados por el microprocesador Arduino UNO y

requieren una señal analógica de entrada; el primer proceso requiere esta señal para observar la medida de intensidad de luz, y ambos controladores la necesitan como valor de *setpoint*. Debido a que la tarjeta NI USB-6009 posee solamente dos salidas analógicas, una de las cuales (AO0) está conectada permanentemente al controlador de flujo másico, se hace uso de la entrada AO1 para los tres procesos. El Arduino se encarga de decidir qué señal se transfiere por medio de un par de señales digitales que se conectan a los canales P1.1 y P1.2 de la DAQ 1.

Normalmente, la señal de control de la intensidad de luz es la que está activa. Para establecer un nuevo *setpoint* de flujo se necesita presionar el botón *Establecer Flujo MFC 2* (ligado al canal P1.1) por un par de segundos para interrumpir el control de corriente y enviar al Arduino un nuevo valor dado por el control *MFC 2* en la interfaz de usuario. Por otra parte, cuando se requiere ajustar la posición del interruptor óptico, decisión que el Arduino está programado a tomar, éste envía a la DAQ una señal digital (ligada al canal P1.2) para que ésta a su vez transmita la señal de intensidad de luz hacia el Arduino y así ajustar la posición del interruptor conectado al motor paso a paso. Durante este proceso se deshabilitan los controles para el MFC 2, de modo que no estropee la señal del canal AO1.

Se presentan en las Figuras 55 y 56 la programación en LabVIEW para configurar los procesos anteriormente descritos.

3.4.2.7 Periodo de Medición

Sin contar el tiempo necesario para realizar el ajuste de posición del interruptor óptico, el periodo de medición de las tarjetas NI USB-6009 (la duración del bucle *while*) se toma como el doble del tiempo programado para que las válvulas solenoides cambien de estado (aproximadamente 1min).

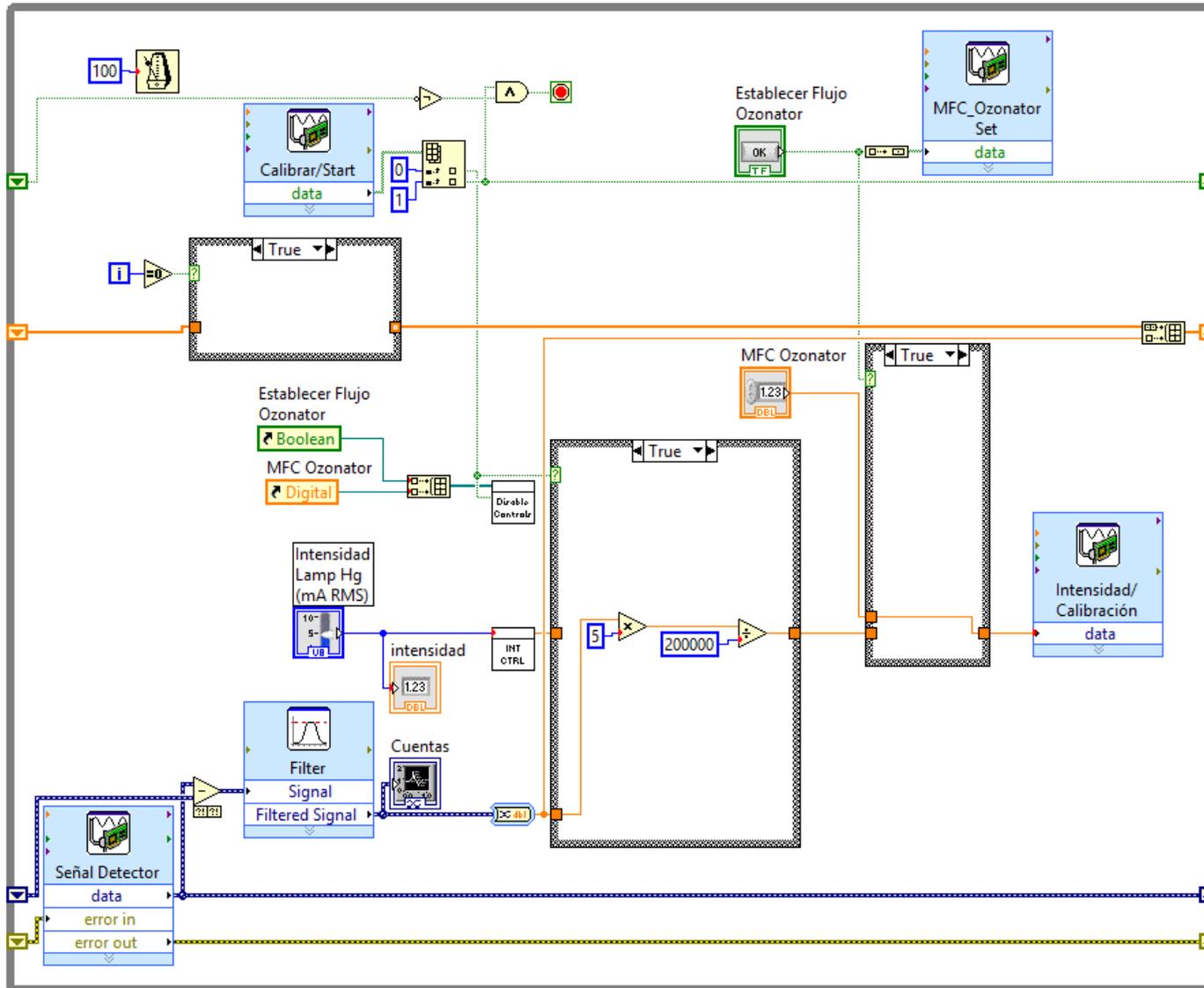


Figura 55. Control de Intensidad de Corriente (Lámpara de 185nm), Flujo Másico (MFC 2) y Ajuste de Posición del Interruptor Óptico [TRUE]

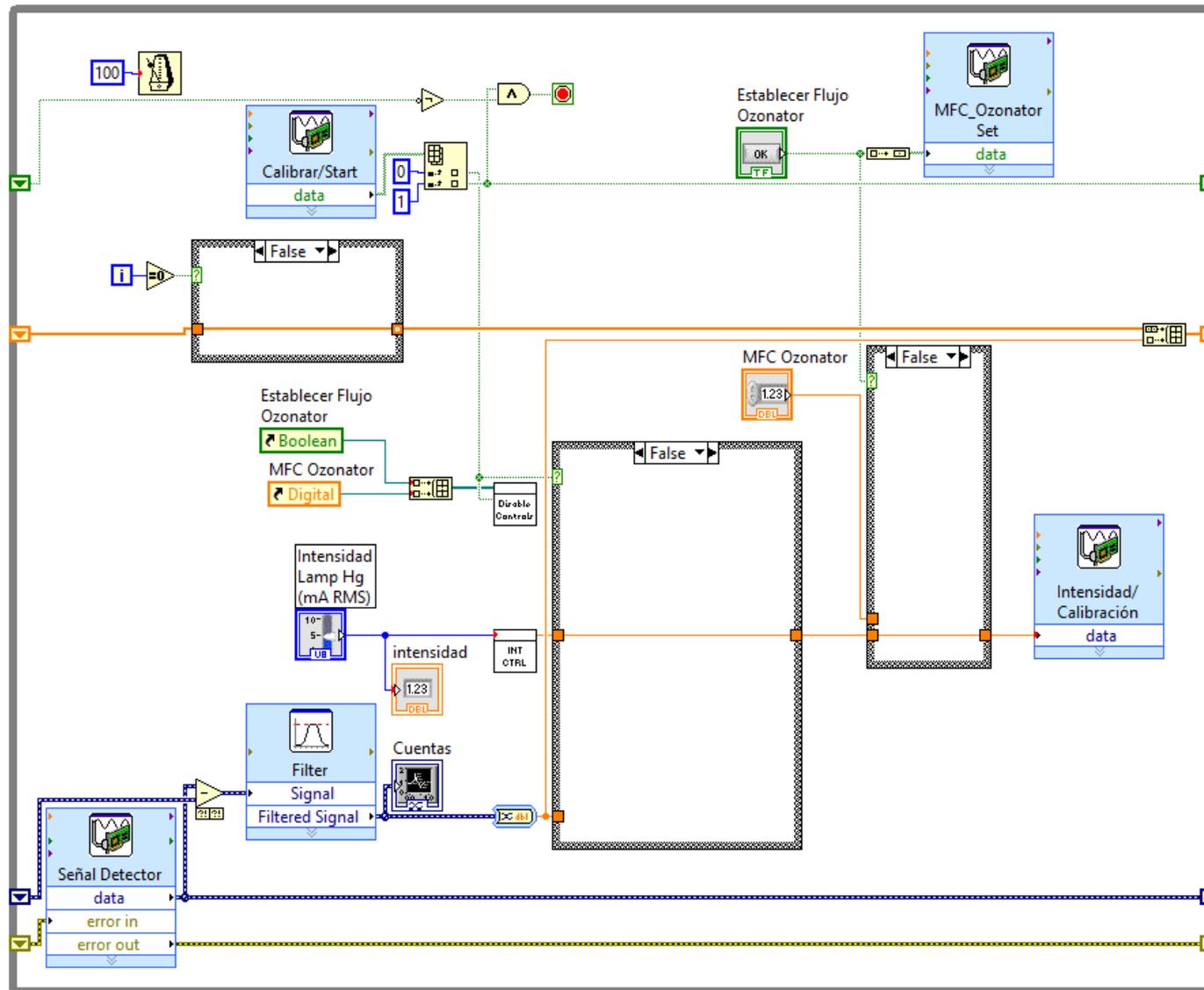


Figura 56. Control de Intensidad de Corriente (Lámpara de 185nm), Flujo Másico (MFC 2) y Ajuste de Posición del Interruptor Óptico [FALSE

3.4.2.8 Señales de Salida

Las señales que arroja la aplicación al terminar el periodo son las siguientes:

- Señal de Intensidad de la Luz: Es un arreglo que contiene las mediciones tomadas a lo largo del periodo.
- Índice: El número de ciclos que se ejecutó el bucle while.
- Temperatura de la Banca Óptica.
- Presión del Aire.

3.4.3 Procesamiento de Datos (Estado 2)

Éste es el estado donde se procesan las señales provenientes del estado anterior con el fin de obtener la medida de ozono en ppb. Luego de conseguir este dato la aplicación vuelve nuevamente al estado 1 para la adquisición y generación de nuevas señales a ser procesadas posteriormente en el estado 2, y así sucesivamente.

Puesto que en el procesamiento no se necesita adquirir ya señal alguna desde las tarjetas NI USB-6009, no se fija ningún tiempo de muestreo para este estado; lo que conlleva la ventaja de que el procesamiento se lleva a cabo lo más rápidamente posible (dependiendo de la velocidad del procesador). Con esto se consigue que la adquisición de datos (estado 1) se realice en forma prácticamente continua.

3.4.3.1 Señales de Entrada

Además de todas las señales de salida del estado anterior, las señales que ingresan para el procesamiento son las siguientes:

- Arreglo IO / Arreglo IO3: Son los arreglos donde se guardarán los valores de intensidad de luz, para luego ser promediados (inicialmente vacíos).
- Promedio Anterior IO / Promedio Anterior IO3: Los resultados del procesamiento previo.

3.4.3.2 Procesamiento de la Señal de Intensidad de Luz

Lo primero que se realiza con el arreglo que contiene los datos de medición de intensidad luz es invertirlo, y tomar los primeros datos de acuerdo al número entregado por la señal Índice; de esta forma se toman en cuenta solamente los datos del último periodo para el procesamiento. Se calcula entonces el valor máximo y mínimo del subarreglo resultante, antes de ingresar al bucle *for*. Este procedimiento fue programado como se indica en la Figura 57.

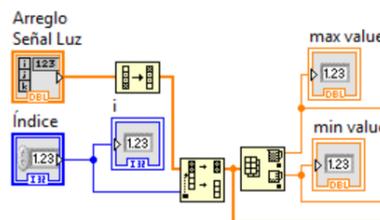


Figura 57. Condicionamiento de la Señal de Intensidad de Luz a Procesar

Dentro de este *for*, se discrimina qué datos pertenecen a cada uno de los dos niveles posibles (aire con ozono y aire libre de ozono) y se guarda en dos arreglos separados. Para esto, se toma la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo, y se la divide para 3. Este resultado sirve como margen para seleccionar los datos de cada nivel. Es decir, los datos que se encuentran dentro del rango del valor máximo menos este margen pertenecen al nivel del aire libre de ozono, mientras que los que se encuentran dentro del rango del valor mínimo más dicho margen pertenecen al nivel de aire con ozono. Este proceso se muestra en las Figuras 58 y 59.

Al terminar de ejecutarse el lazo *for*, se promedian los datos de cada nivel, y los valores obtenidos se archivan a su vez en otro par de arreglos (IO e IO3), cuya longitud es gobernada por la variable ingresada en # Ciclos. Éste control, ubicado en la interfaz gráfica, dicta el número de veces que se ejecuta el estado 1 antes de proseguir con el

procesamiento. Es decir, el programa espera a que los arreglos IO e IO3 estén completos para nuevamente promediar los datos que contienen y conseguir el valor de IO e IO3 con los que se continúa el procesamiento.

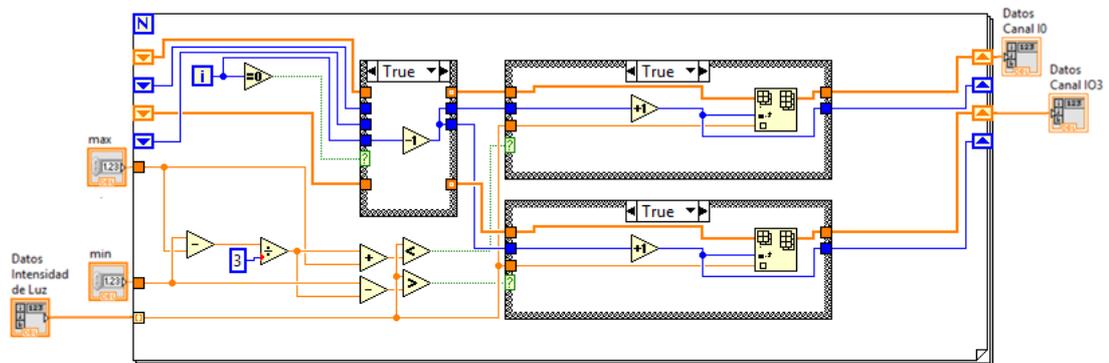


Figura 58. Selección de Datos de cada Canal [TRUE]

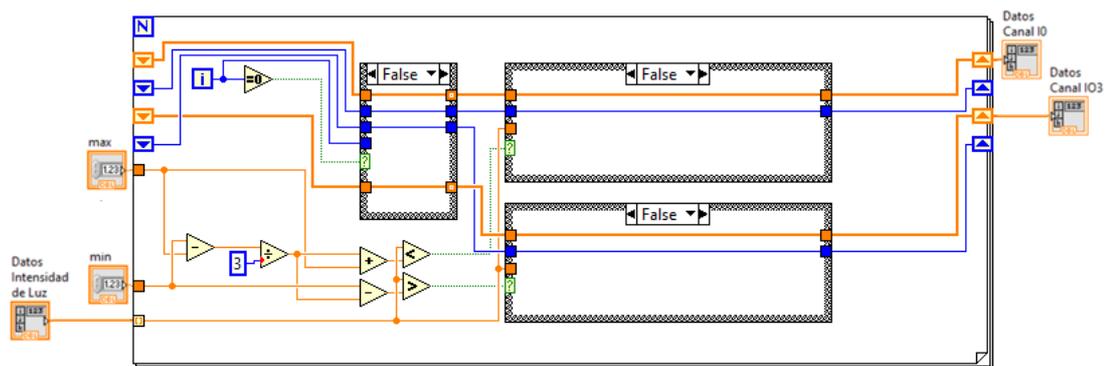


Figura 59. Selección de Datos de cada Canal [FALSE]

3.4.3.3 Obtención de la medida de concentración de Ozono en ppb

Una vez conseguidos los valores de IO e IO₃, se necesita la medida de la temperatura y la presión del gas para la aplicación de la ley de Beer. Estas señales provienen del estado anterior en magnitud de voltaje, por lo que se deben transformar en temperatura (en °K) y presión (en atm). Una vez obtenidos los datos necesarios, se ingresan la relación IO₃/IO, la presión y la temperatura en un SubVI que calcula la medida en ppb basándose en la ley de Beer. El diagrama del mismo se muestra en la Figura 60.

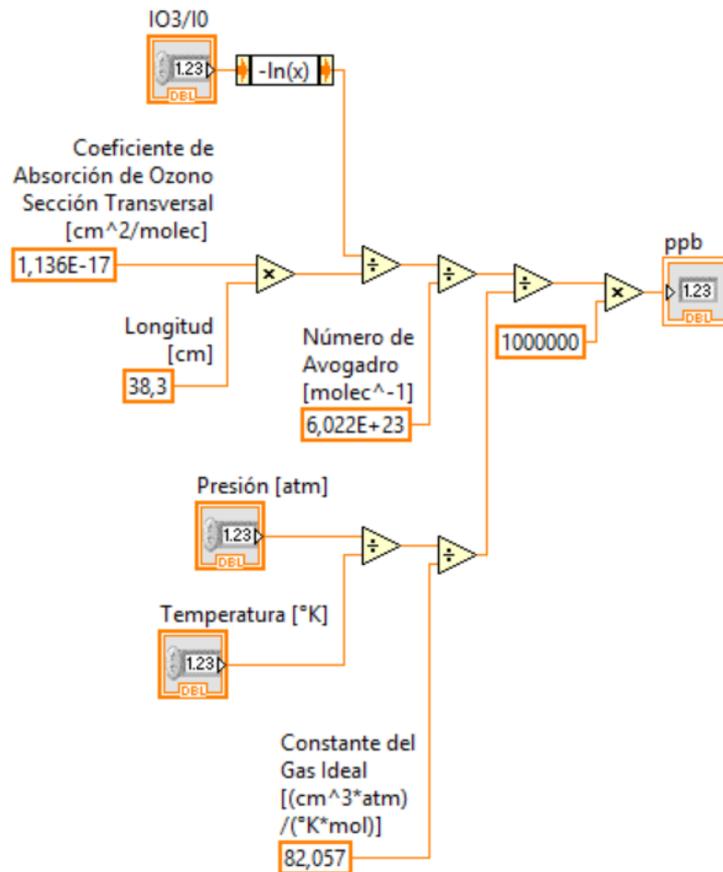


Figura 60. Diagrama del SubVI para calcular la Concentración de Ozono en ppb

3.4.4 Salir (Estado 3)

En este estado se detiene la ejecución de la aplicación LabVIEW. La manera de acceder a este estado consiste en pulsar el botón Salir en la interfaz de usuario. Se espera que la aplicación finalice la ejecución de uno de los estados antes de detenerse.

Capítulo 4: Resultados

En este capítulo se exponen los resultados de cada uno de los procesos de medición y control desarrollados para el equipo. Se verifican primeramente que las mediciones tomadas de cada uno de los sensores sean precisas para que, en base a éstas se pueda luego comprobar el correcto funcionamiento de cada controlador implementado. Finalmente, se muestran los resultados de la prueba realizada en la mañana del 14 de abril de 2016, en la cual se verifica que el comportamiento de la señal de intensidad de luz es coherente con la teoría.

4.1 Medición de Temperatura

Se toman tres medidas de temperatura en el equipo: la temperatura de ambas lámparas y la temperatura de la banca óptica. Para comprobar que las mediciones tomadas por la tarjeta NI USB-6009 son correctas se empleó un termómetro. Para cada uno de los termistores se tomaron al mismo tiempo los valores de temperatura arrojados por LabVIEW y el por termómetro. De esta forma se pudo comprobar que, en los rangos de temperatura establecidos para el funcionamiento de cada termistor, el error con respecto a la temperatura tomada por el termómetro es muy bajo.

En el caso de la banca óptica, el error en el rango de 20°C a 70°C no superó nunca el 1%. Para el caso de la lámpara de 254nm, en el rango de 20°C a 70°C el error fue siempre menor al 3%. Por último, para la lámpara de 185nm, en el rango de 40°C a 70°C, el error fue también menor al 3% en todo momento.

Cabe recalcar que debajo del rango de temperatura indicado para la lámpara de 185nm, el error incrementa substancialmente conforme se reduce la temperatura; y así, por debajo de los 30°C, la medida no es confiable puesto que el error es mayor al 10%.

4.2 Control de Temperatura

Una vez establecida la precisión de las medidas de temperatura, se procede a comprobar la eficacia de los controladores de temperatura para ambas lámparas. En las primeras pruebas se implementaron para ambas lámparas controladores puramente proporcionales, y se comprobó que eran lo suficientemente buenos para la aplicación desarrollada. Los valores de los controladores se ajustaron empíricamente hasta que se obtuvieron los resultados deseados, con una ligera variación de temperatura en estado estable.

En las Figuras 61 y 62, se muestra del control de temperatura de la lámpara de 254nm fijar el *setpoint* en 55°C. La Figura 61 nos muestra el incremento de temperatura desde la temperatura ambiente hasta alcanzar el valor deseado. La Figura 62 nos muestra el control de temperatura en estado estable, donde se observa que la temperatura fluctúa en $\pm 1^\circ\text{C}$.

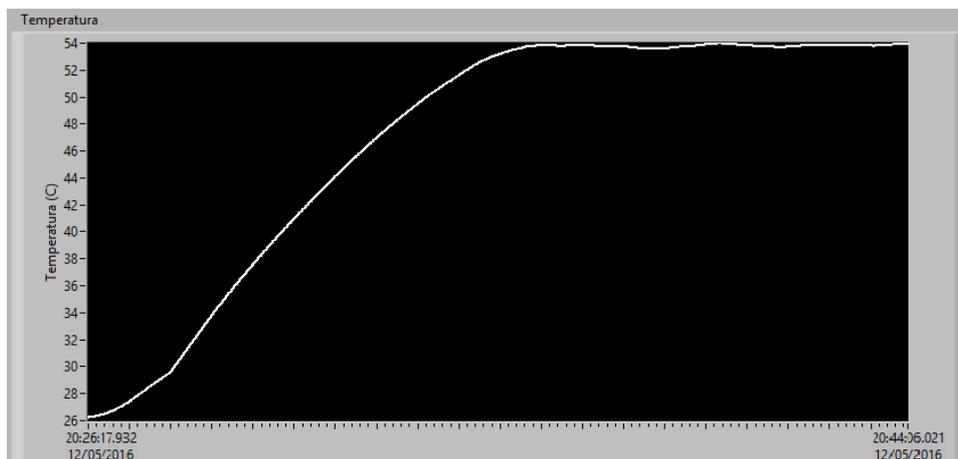


Figura 61. Control de Temperatura a 55°C desde Temperatura Ambiente [Lámpara de 254nm]

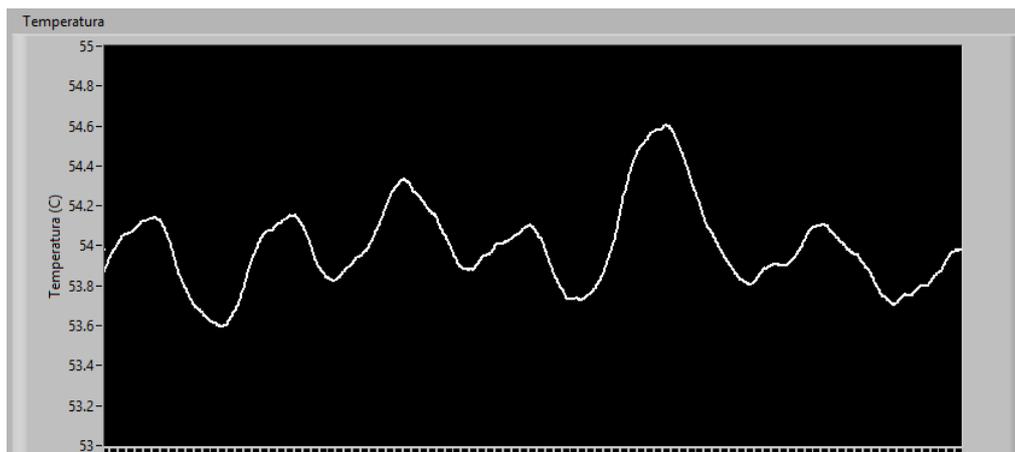


Figura 62 Control de Temperatura a 55°C por un lapso de 17min [Lámpara de 254nm]

Las Figuras 63 y 64 muestran el control de temperatura de la lámpara de 185nm fijar el *setpoint* en 55°C. En la Figura 63 se observa el incremento de temperatura desde la temperatura ambiente hasta llegar al valor deseado. La Figura 64 se muestra el control de temperatura en estado estable, también con una fluctuación de $\pm 1^\circ\text{C}$.

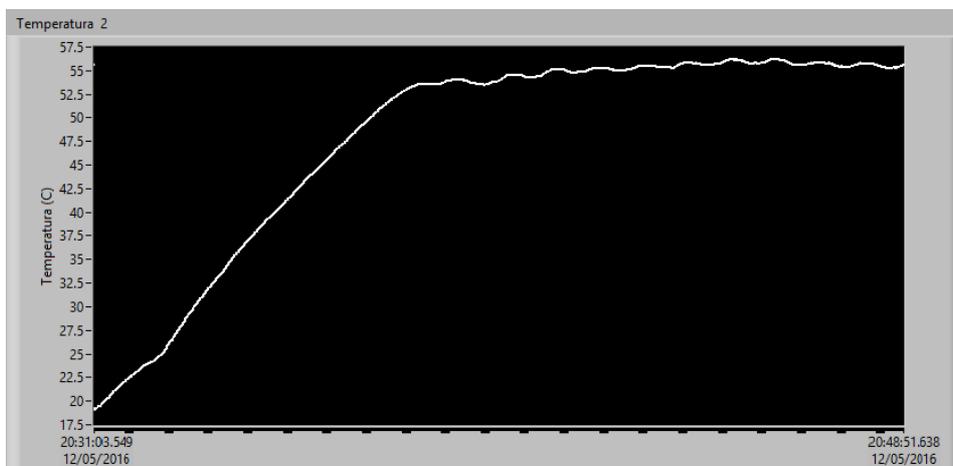


Figura 63. Control de Temperatura a 55°C desde Temperatura Ambiente [Lámpara de 185nm]

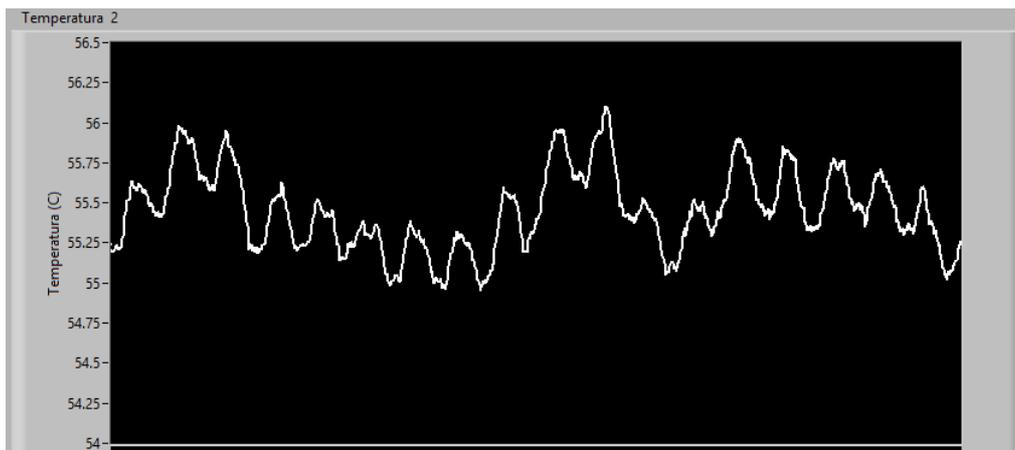


Figura 64. Control de Temperatura a 55°C por un lapso de 17min [Lámpara de 185nm]

Cabe recalcar que, en los controladores de ambas lámparas, el valor de temperatura alrededor del cual fluctúa la señal de temperatura no es exactamente igual al valor deseado, establecido en la interfaz gráfica. Esto puede deberse a la naturaleza puramente proporcional de ambos controladores y a la resolución de bits de lectura del microcontrolador Arduino.

4.3 Medición y Control del Flujo Másico

Los controladores de flujo másico seleccionados para el proyecto (de Dakota Instruments) son de alta calidad y confiabilidad; sin embargo, se realizaron pruebas con la ayuda de un medidor de flujo externo ya calibrado (Figura 65) para corroborar su funcionamiento.



Figura 65. Medidor de Flujo Externo TSI 4100

Para esto se prosiguió como sigue: desde la interfaz gráfica de la aplicación en LabVIEW se envía una señal de voltaje como *setpoint* hacia el instrumento MFC, el cual a su

vez retorna hacia la tarjeta DAQ NI USB-6009 el valor de flujo medido por el mismo; este valor se lo compara con el entregado por el medidor de flujo externo, y de este modo se verifica al mismo tiempo la precisión del MFC y su función como controlador.

Al hacer esto con varios valores de *setpoint*, desde 0L/min hasta 5L/min en incrementos de 0.5L/min, se comprobó que los valores medidos por ambos instrumentos coincidían. Sin embargo, se observó que la precisión del controlador decrecía conforme se incrementaba el valor de flujo definido, y no era capaz de elevar el flujo a mucho más de 3L/min. Se determinó que este problema fue causado por la bomba de aire, la cual tiene un límite de flujo de un poco más de 5L/min, por lo que al acercarse el *setpoint* a este valor el MFC no era capaz de conseguir el flujo deseado. Al intercambiar la bomba por una más potente no se tuvo ningún inconveniente en llegar al flujo de 5L/min. No obstante, puesto que el valor de flujo recomendado para equipos sensores y generadores de ozono es de 2 a 3L/min, se volvió a reemplazar la bomba por la original ya que ésta es más práctica por ser más pequeña y requerir menos voltaje.

4.4 Ajuste de Posición del Interruptor Óptico

Debido a que la posición del interruptor óptico puede verse afectada en largos periodos de tiempo, ésta necesita ser ajustada de manera que el fotodiodo reciba toda la luz proveniente de cada canal. Este ajuste se muestra en la Figura 66. Aquí se observa que en un principio no llega toda la señal de luz del canal 1, por lo que el interruptor realiza dos vueltas completas hasta hallar la posición en dónde la intensidad de luz es máxima.

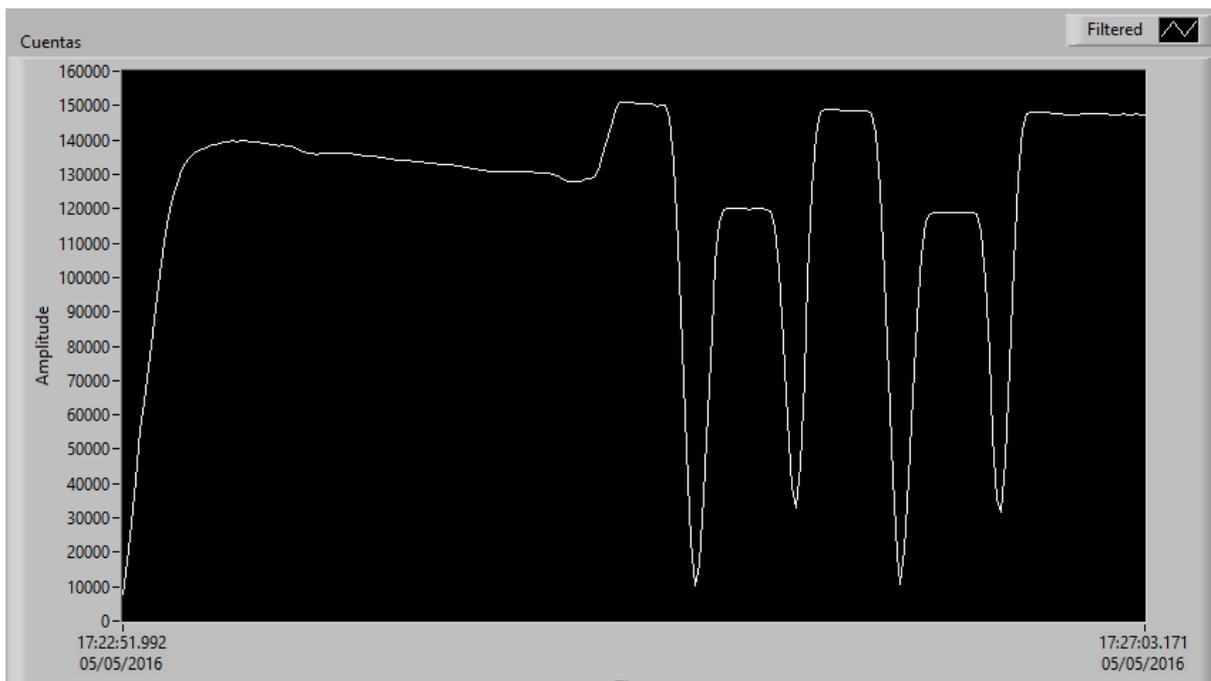


Figura 66. Ajuste de Posición del Interruptor Óptico

4.5 Prueba del 14 de abril de 2016

Los resultados que se muestran a continuación fueron tomados de la prueba realizada en la mañana del 14 de abril de 2016. La prueba consistió en emplear el generador de ozono variando la intensidad de corriente de la lámpara generadora (185nm) con el fin de observar las diferentes concentraciones producidas. El gas que ingresa al generador de ozono proviene del tanque de aire cero (libre de ozono), de manera que el ozono obtenido sea totalmente derivado del generador.

Para esta prueba se estableció la temperatura de ambas lámparas a 55°C, el flujo de salida del controlador de flujo másico (MFC 1) a 2L/min, y se emplearon tres valores de corriente distintos (20mA, 12mA y 15mA) para la lámpara de 185nm. Aunque se comprobó con anterioridad el funcionamiento del control y medida del flujo másico del generador (MFC2), éste no se utilizó en el experimento por cuestiones de tiempo y espacio.

4.5.1 Control de Temperatura

Se pudo comprobar que la temperatura de ambas lámparas se mantuvo estable durante el tiempo que duró el experimento, una vez que se llegó a la temperatura deseada, que para ambas se estableció en 55°C. Para un lapso de dos minutos se observa para cada lámpara el comportamiento observado en las Figuras 67 y 68, que se mantuvo en el transcurso de la prueba.

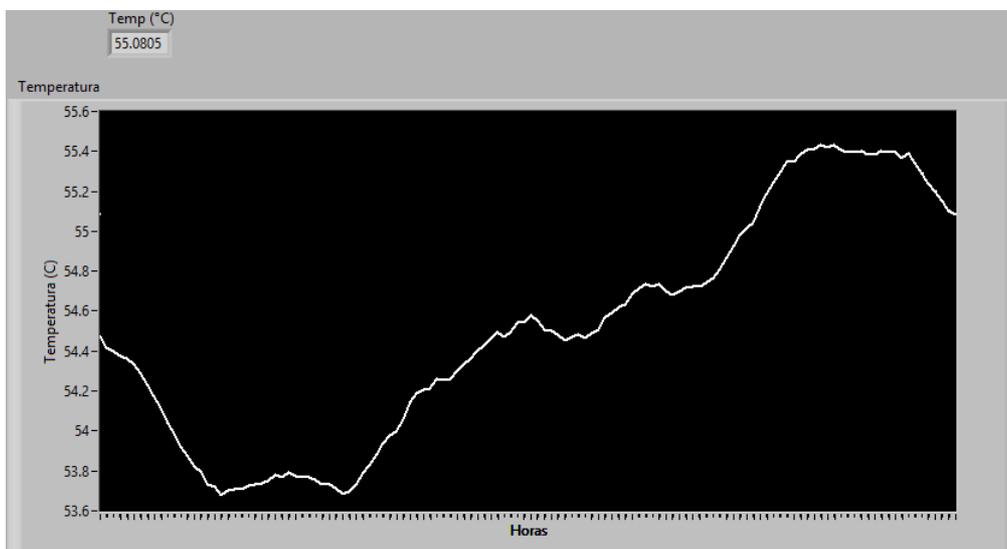


Figura 67. Temperatura de la Lámpara de 254nm

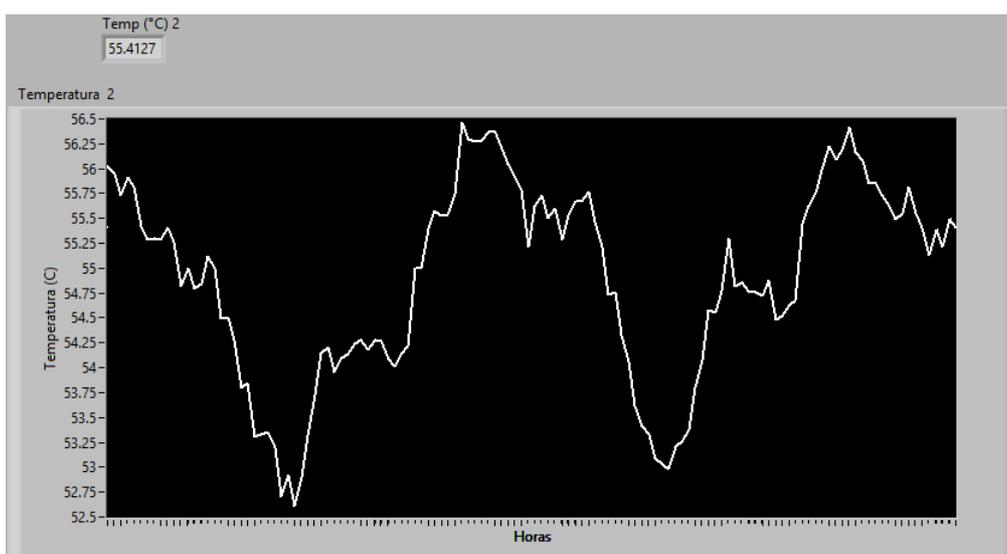


Figura 68. Temperatura de la Lámpara de 185nm

4.5.2 Control de Flujo Másico

Se pudo también observar que el flujo del aire a través del instrumento fue notablemente constante durante la prueba, ya que su variación estuvo en el rango de los 40mL/min como máximo, es decir, un 2% del valor establecido de 2L/min (Figura 69).

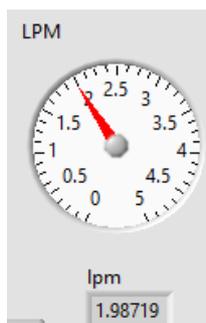


Figura 69. Medida de Flujo Másico (MFC 1)

4.5.3 Medición de la Intensidad de Luz (Lámpara de 254nm)

Puesto que el funcionamiento de todos los sensores y controladores fueron comprobados previamente, el objetivo principal de la prueba fue el de comprobar que los niveles de intensidad de luz en cada canal varíen al intercalar el aire con ozono y el aire filtrado, de acuerdo con lo previsto teóricamente. Es decir, que para cada uno de los canales de la banca óptica se tenga un nivel de intensidad de luz para el gas de referencia (libre de ozono, más alto) y un nivel de intensidad de luz para el gas con ozono (más bajo).

El experimento arrojó los resultados mostrados en las Figuras 70 y 71, en donde se puede corroborar las expectativas teóricas.

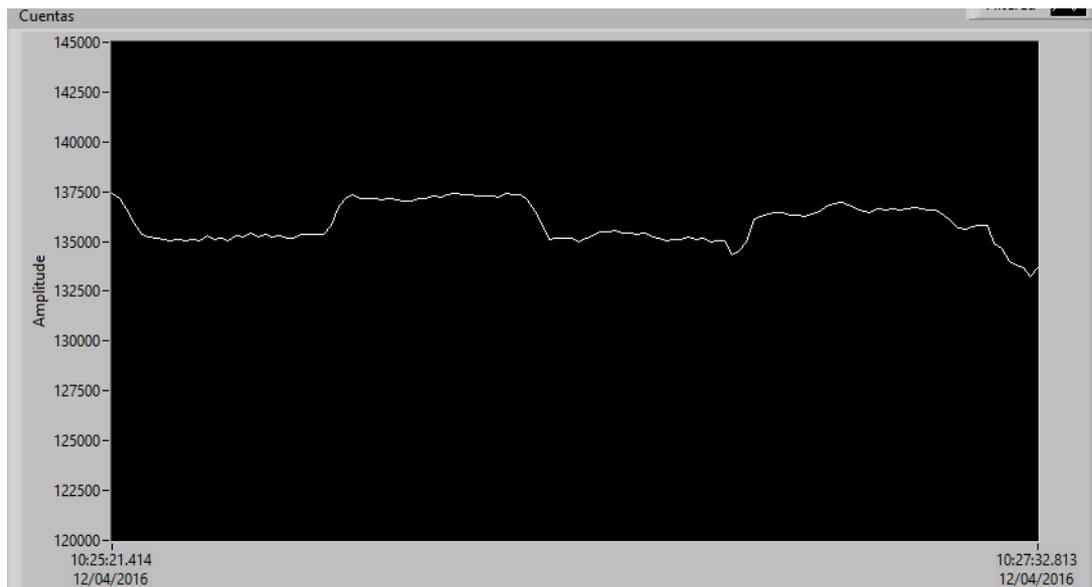


Figura 70. Intensidad de Luz Canal 1

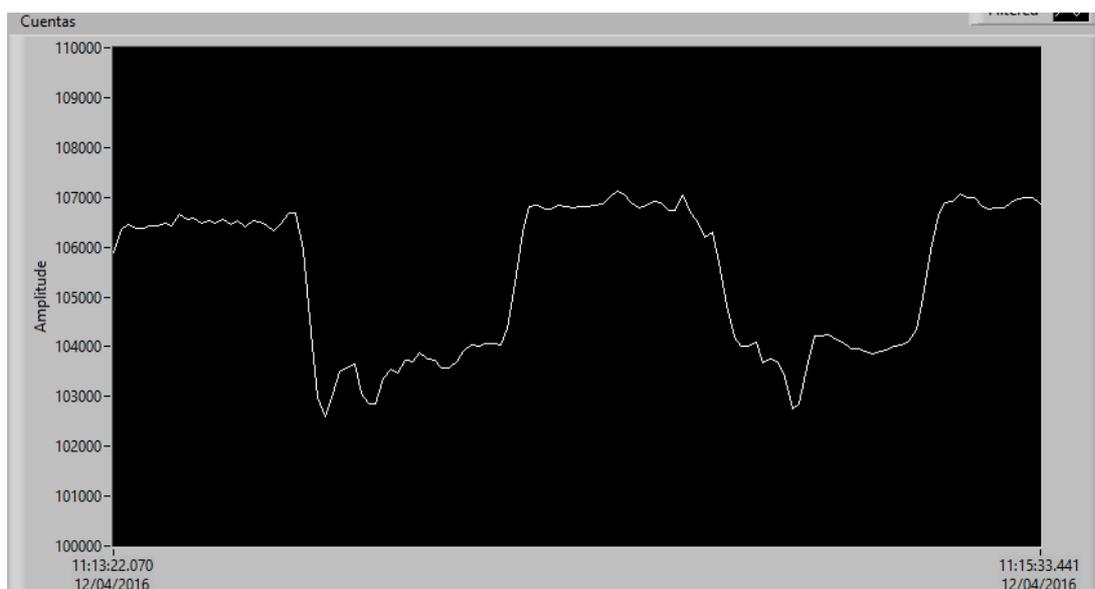


Figura 71. Intensidad de Luz Canal 2

Asimismo, se pudo verificar que la intensidad de luz que ingresa a cada canal (independientemente del gas que circule por éste) es distinta (Figura 72); lo que significa que los diferentes espejos, con los que choca el haz de luz proveniente de la lámpara de 254nm (véase Figura 6), antes de llegar al fotodiodo no dividen su intensidad en mitades exactamente iguales, por lo que se tiene también un nivel base distinto de intensidad de luz

para cada canal, además de los dos niveles por canal mencionados anteriormente (con ozono y sin ozono); como se aprecia en la Figura 72.

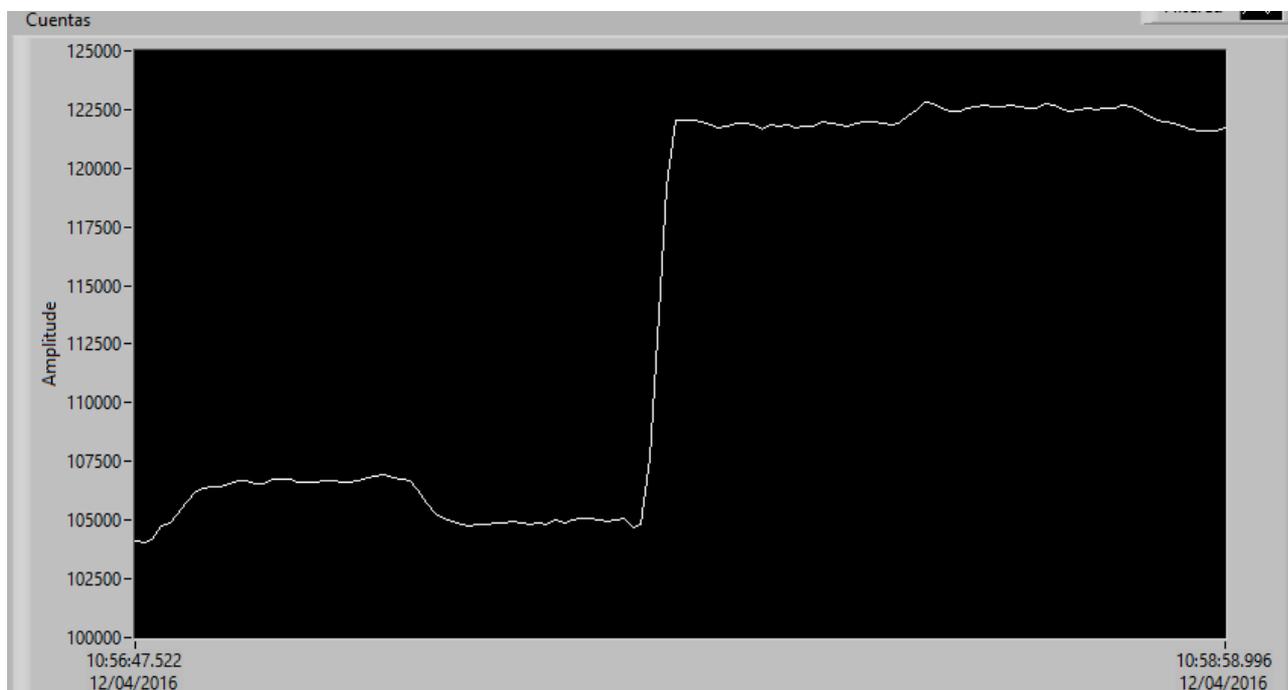


Figura 72. Niveles Base de Intensidad de Luz para ambos Canales [Canal1 (der.) y Canal 2 (izq.)]

Para tener una visión más amplia de la forma de la señal obtenida en la prueba, se muestra a continuación, en la Figura 73, la señal de intensidad de luz por un periodo más extenso.

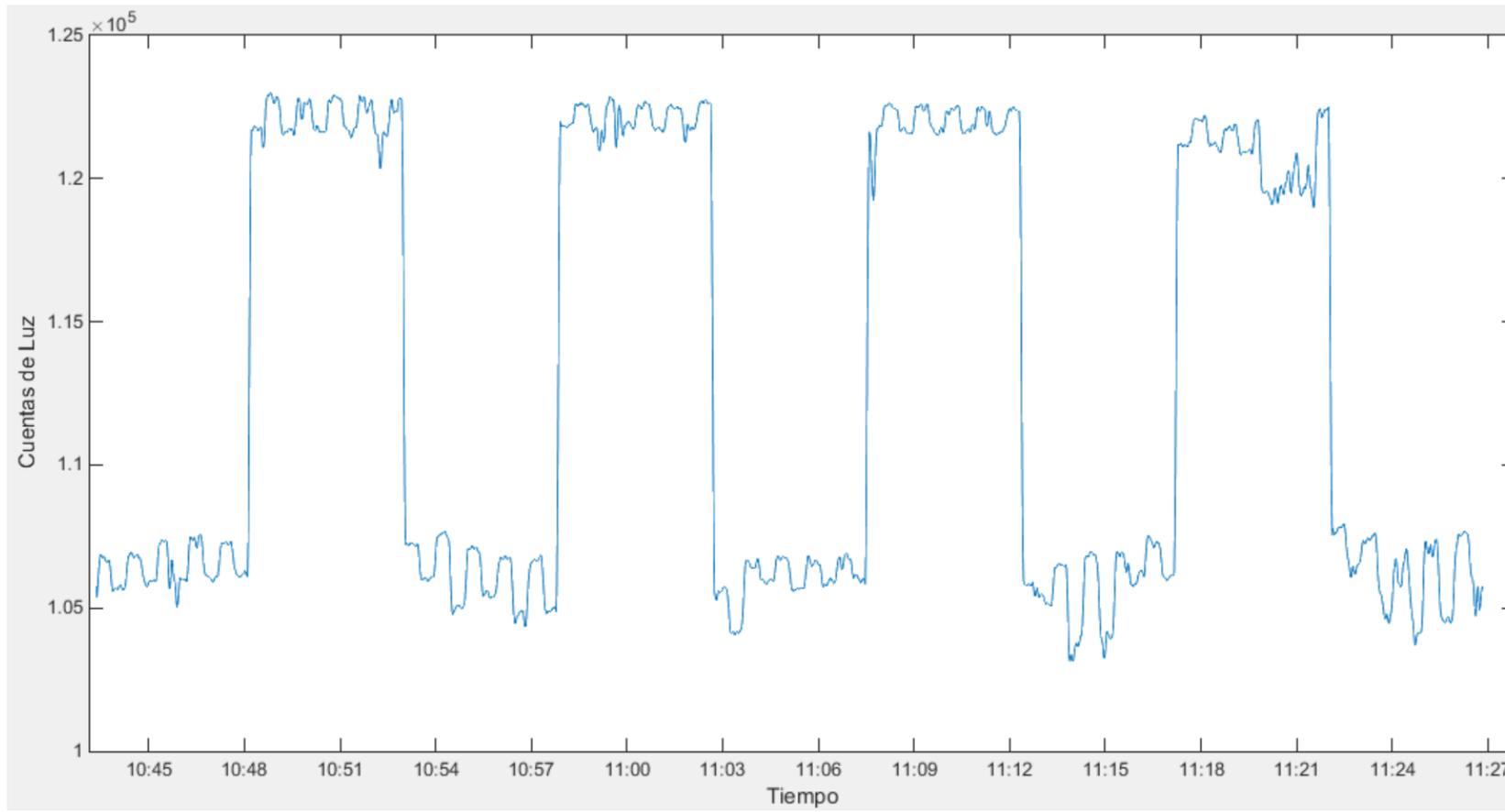
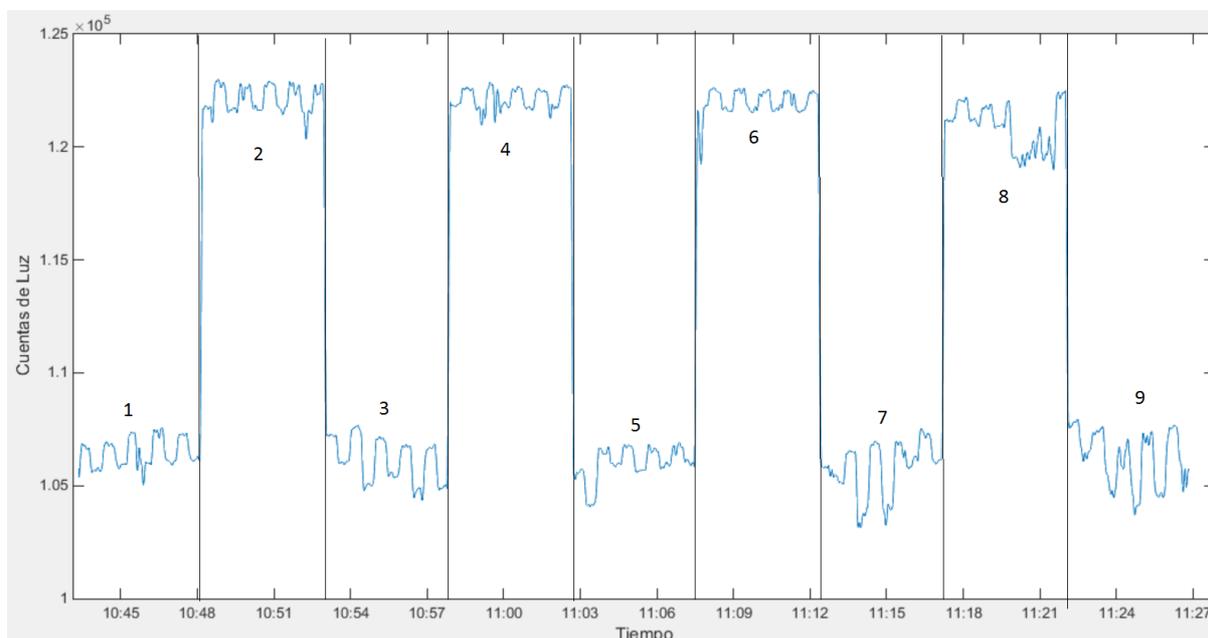


Figura 73. Señal de Intensidad de Luz durante un periodo de 45min

4.5.4 Obtención de la relación I/I_0 para la aplicación de la ley de Beer

A la señal mostrada en la Figura 73 se la puede dividir en 9 secciones, como se muestra en la Figura 74. De las cuales las secciones pares corresponden al canal 1, y las impares corresponden al canal 2. Además, en las primeras tres secciones se tuvo la intensidad de la lámpara de 185nm a 20mA, en las siguientes tres a 12mA, y en las últimas tres a 15mA.



Para cada una de las secciones se promedian los valores máximos para obtener I_0 (referencia), y del promedio de los valores mínimos se obtiene I (aire con ozono); con los cuales se puede aplicar la ley de Beer (Ecuación 1). Debido a que en la prueba no se conectó el sensor de presión del gas de muestra, no se poseen datos de presión con los que transformar la concentración de ozono a ppb. Sin embargo, se pueden obtener, para cada sección, la relación I/I_0 . Estos resultados se resumen en la Tabla 10.

| Sección | Canal | Corriente | I0 | I | I/I0 |
|---------|-------|-----------|-------|-------|--------|
| 1 | 2 | 20mA | 10697 | 10592 | 0.9902 |
| 2 | 1 | | 12226 | 12127 | 0.9919 |
| 3 | 2 | | 10690 | 10522 | 0.9842 |
| 4 | 1 | 12mA | 12213 | 12025 | 0.9845 |
| 5 | 2 | | 10621 | 10451 | 0.9840 |
| 6 | 1 | | 12205 | 12002 | 0.9834 |
| 7 | 2 | 15mA | 10637 | 10414 | 0.9791 |
| 8 | 1 | | 12155 | 11970 | 0.9848 |
| 9 | 2 | | 10703 | 10487 | 0.9798 |

Tabla 10. Obtención de la Concentración de Ozono

Cabe recalcar que la señal de intensidad de luz, utilizada para obtener los datos de la Tabla 10, deber ser todavía pulida para conseguir resultados más precisos; puesto que ésta presenta en algunos puntos una desviación del comportamiento esperado, por lo que no existe un nivel uniforme de intensidad de luz para el gas de referencia y el gas con ozono.

Capítulo 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se implementaron satisfactoriamente los diferentes controladores y sensores requeridos para el correcto funcionamiento del instrumento. Estos son: el control de temperatura de ambas lámparas de mercurio y el control de intensidad de luz de una de ellas, la medición de la presión y temperatura del gas para obtener su concentración de ozono, y el control del flujo másico en dos puntos del sistema.

Sin embargo, se puede concluir que las mediciones y controladores se vieron afectados por el hecho de que el microcontrolador Arduino MEGA 2560 tiene una resolución de bits (10 bits) mucho menor a la de la tarjeta DAQ NI USB-6009 (14 bits). Por este motivo se pueden observar ligeras discrepancias en los valores medidos de las diversas variables para cada dispositivo, además de que el *setpoint* enviado desde LabVIEW se ve limitado por la resolución del microcontrolador Arduino. No obstante estos impedimentos, se concluye que en este caso los errores son muy pequeños y pueden ser despreciados.

Las tarjetas de adquisición de datos NI-USB 6009 y el microcontrolador Arduino MEGA 2560 fueron dispositivos clave para el desarrollo del código del programa que permite manejar el instrumento con todos los datos de medición y variables de control pertinente.

La aplicación de desarrollo LabVIEW es una herramienta poderosa que permite la programación visual de instrumentos virtuales que realicen las tareas de adquirir y procesar señales externas, y también generar señales propias; proporcionando los medios necesarios para lograr los objetivos propuestos. Además, LabVIEW facilita la implementación de una

interfaz gráfica donde se monitoreen los datos adquiridos y generados con su procesamiento en tiempo real.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda, en la medida de lo posible, la utilización de materiales, equipos y dispositivos de fácil obtención en el mercado local, para evitar los tiempos de espera y costos asociados con la importación de productos.

La tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6009 tiene un número limitado de canales de salida analógica, dos para ser exactos, que requirió la utilización de un mismo canal para tres funciones. En el futuro se recomienda emplear una tarjeta con mayor número de salidas analógicas de manera que se simplifique el código del programa, y además se tenga posteriormente la posibilidad de añadir más funciones al mismo.

El espacio físico dentro de la máquina es muy reducido, lo que dificultó la introducción y cableado eléctrico de los nuevos componentes, necesarios para el funcionamiento completo del instrumento. Se recomienda para el desarrollo posterior de otros equipos el dejar un mayor espacio del calculado en un comienzo, para facilitar la introducción de nuevos componentes en caso de que se incurra en una necesidad inesperada.

Se recomienda además ser muy precavido con las conexiones y cableado eléctrico para evitar cortocircuitos o fallos que podrían ocasionar el daño permanente de alguno de los componentes eléctricos del equipo.

REREFERNCIAS

- A Brief Introduction to the Serial Peripheral Interface (SPI)*. Arduino (2015). Tomado de <<https://www.arduino.cc/en/Reference/SPI>>
- Arduino UNO*. (2015). Arduino. Tomado de <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno#>>
- Barr, M. (2007). *Introduction to Pulse Width Modulation (PWM)*. Tomado de <<http://www.barrgroup.com/Embedded-Systems/How-To/PWM-Pulse-Width-Modulation>>
- Cazorla M. & Tamayo, E. (2014). *Atmospheric measurement station at Universidad San Francisco de Quito (EMA): ground-based physical meteorology instrumentation and assessment of initial measurements*. Avances 6, No. 2, C21-C30.
- Cazorla, M. (2016). *Air quality over a populated Andean region: Insights from measurements of ozone, NO and boundary layer depths*, Atmos. Pollut. Res., 7, 66-74.
- Creech, J. & Rice, D. (2015). *Digital Potentiometers vs. Mechanical Potentiometers: Important Design Considerations to Maximize System Performance*. Analog Devices, Inc.
- Decoster, D & Harari, J. (2010). *Optoelectronic Sensors*. Wiley.
- Duty Cycle of a Rectangular pulse Waveform*. (2015). The Mathworks Inc. Tomado de <<http://es.mathworks.com/help/signal/ug/duty-cycle-of-rectangular-pulse-waveform.html>>
- Fabian, P. & Dameris, M. (2014). *Ozone in the Atmosphere: Basic Principles, Natural and Human Impacts (1st ed.)*. Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Fadali, M.Sami & Visioli, Antonio. (2013). *Digital Control Engineering: Analysis and Design*. 2nd Edition. Waltham,USA. Elsevier Inc.
- Garrido Tamayo, Miguel Ángel & Ospina Montoya, Amado (2013). *Técnicas de medición de ozono: Tradicionales frente al método de cámara de absorción con led ultravioleta como fuente de luz*. Universidad Nacional de Colombia: Revista Gestión y Ambiente.
- Ground-level ozone in the 21st century: futur trends, impacts and policy implications*. (2008). The Royal Society. Tomado de <https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2008/7925.pdf>
- Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. (2008). Séptima Edición. World Meteorological Organization.
- Introducción a los transmisores y transductores de presión*. Omega Engineering inc. (2015). Tomado de <<http://es.omega.com/prodinfo/transductores-de-presion.html>>

- Kalantar-zadeh, K. (2013). *Sensors: And introductory course*. Springer US.
- Majewski, Jacek (2012). *Methods for measuring ozone concentration in ozone treated water*. Lublin University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Informatics.
- Matlab, el lenguaje de cálculo técnico: Descripción General*. (2015). The Mathworks Inc. Tomado de <<http://es.mathworks.com/products/matlab/index.html>>
- Model 49i Instruction Manual*. Thermo Fisher Scientific Inc. (2011).
- Model 49i Ozone Analyzer*. Thermo Fisher Scientific Inc. (2015). Tomado de <<http://www.thermoscientific.com/en/product/model-49-i-i-i-ozone-analyzer.html>>
- MPX5100*. Freescale Semiconductor (2010). Tomado de <http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX5100.pdf?pspll=1>
- NI USB-6008/6009 User Guide*. (2015). National Instruments Corporation. Tomado de <<http://www.ni.com/pdf/manuals/371303n.pdf>>
- O'Haver, T. (2015). *Smoothing*. Tomado de <<https://terpconnect.umd.edu/~toh/spectrum/Smoothing.html>>
- Operating Instructions for Lamp Manager*. (2007). BHK, Inc.
- ¿Qué es Adquisición de Datos?* (2015). National Instruments Corporation. Tomado de <<http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>>
- Smith, Steven W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. (1998). Tomado de <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/dsp-book/dsp_book_Ch15.pdf>
- Smith, Wayne. *Principles of Ozone Generation*. (2015). Watertec Engineering Pty Ltd, Australia. Tomado de <<http://watertecengineering.com/TZ000002%20Principles%20of%20Ozone%20Generation.pdf>>
- Stepper Motor System Basics*. (2010). Advanced Micro Systems, Inc. Tomado de <<http://www.stepcontrol.com/pdf/step101.pdf>>
- Schwartz, S. & Warneck, P. (1995). *Units for Use in Atmospheric Chemistry*. International Union Of Pure And Applied Chemistry.
- Thermistors: An Introduction to Temperature Measurement*. Omega Engineering inc., (2015). Tomado de <<http://www.omega.com/prodinfo/thermistor.html>>
- Thermistor Calibration and the Steinhart-Hart Equation*. (2006). Application Note 4: ILX Lightwave Corporation.
- Tutorial de Labview*. Universidad de Sevilla. Tomado de <<http://www.esi2.us.es/~asun/LCPC06/TutorialLabview.pdf>>

Tutorial: SubVIs. (2015). National Instruments Corporation. Tomado de
<<http://www.ni.com/white-paper/7593/en/>>

Virtual Instrumentation. (2013). National Instruments Corporation. Tomado de
<<http://www.ni.com/white-paper/4752/en/>>

What is Arduino? Arduino (2015). Tomado de <<http://www.arduino.cc/>>

Rigas, M.L.; Ultman, James S.; Ben-Jebria, Abdellaziz. (1997). *The effect of exposure concentration, duration, and ventilation rate on ozone absorption during continuous inhalation exposure.* Engineering in Medicine and Biology Society, 1997. Proceedings of the 19th Annual International Conference of the IEEE , vol.5, no., pp.2153,2156 vol.5.

Williams, D.E.; Salmond, J.; Yu Fai Yung; Akaji, J.; Wright, B.; Wilson, J.; Henshaw, G.S.; Wells, D.B.; Ding, G.; Wagner, J.; Laing, G. (2009). *Development of low-cost ozone and nitrogen dioxide measurement instruments suitable for use in an air quality monitoring network.* Sensors, 2009 IEEE, vol., no., pp.1099,1104, 25-28.

Wright, D. (2005). *Finite State Machines.* Tomado de
<www4.ncsu.edu/~drwrigh3/docs/courses/csc216/fsm-notes.pdf>

ANEXO A: CÓDIGO ARDUINO

```

//control temperatura lámpara
int termpin = A3;    // pin termistor
double termval = 0; // variable para almacenar el voltaje del termistor
int actpin = 6; //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 = 55; //constante de temperatura set point/objetivo
int temp_set = A8; //pin de lectura del set point
int ledtemp = 4; //led indicador de temperatura alcanzada
int on = 0; //activacion del sistema cuando temperatura es optima

//control motor
int motor1 = 22;    //IN1
int motor2 = 24;    //IN2
int motor3 = 26;    //IN4
int motor4 = 28;    //IN3
int pasos = 200;    //número de pasos del motor

//tiempos entre funciones para sincronizacion
int espera = 100; //espera entre pasos
milisegundos
int v_giro = 1000000; // 1000000 velocidad giro entre pasos
microsegundos
int contador = 1;

//control válvulas
int valvula1 = 32;
int valvula2 = 34;
int estval = LOW;

//posición interruptor
int ok = 36; //variable que controla el inicio del ajuste
int start = 38; //variable que controla el inicio del procesamiento
bool calib = LOW;
bool calib1 = LOW;
//bool calib1 = HIGH;
unsigned long tiempo = 0;
unsigned long tprev = 0;
unsigned long periodo = 0;

//control intensidad (lámpara de 185nm)
#include <SPI.h>
int CS = 53;
int i_lamp = 0;
int taps = 0;
int imon = A4; //pin lectura de la corriente de la lámpara
int ictrl = A5; //pin lectura del setpoint / ajuste interruptor

//control temperatura ozonator
#include <math.h>
int volterm = A2;
double volt = 0;
double res = 0.0;
double oz_temp;
int temp_ctrl = 5;

```

```

int temp_val = 200;
int setpoint = 1580;
int oz_set = A9; //pin lectura del setpoint de temperatura

//mfc ozonator
int mfc = 3;
int flow = 0;
int mfc_set = 7;

void Calibracion()
{
  analogWrite(actpin,55);
  double cuentas = 0;
  double cprom = 0;
  double cmax = 0;

  for (int j=1; j<=pasos/2; j++)
  {
    Paso();

    for (int l=0; l<10; l++)
    {
      cuentas = analogRead(A5);
      cprom = cprom + cuentas;
      delay(100);
    }
    cprom = cprom/10;
    if (cprom > cmax)
    {
      cmax = cprom;
    }
  }

  int k = 1;
  int cont = 1;
  while (k!=0)
  {
    Paso();

    for (int l=0; l<10; l++)
    {
      cuentas = analogRead(A5);
      cprom = cprom + cuentas;
      delay(100);
    }
    cprom = cprom/10;
    //Serial.println("cprom: ");
    //Serial.println(cprom);
    if (cprom >= 0.975*cmax)
    {
      k = 0;
      digitalWrite(ok,LOW);
      calib = LOW;
      calib1 = LOW;
      digitalWrite(start,HIGH);
    }
    cont = cont + 1;
    if (cont == pasos/2)
    {
      k = 0;
    }
  }
}

```



```

    digitalWrite(motor2, LOW);
    digitalWrite(motor3, LOW);
    digitalWrite(motor4, LOW);
    delayMicroseconds(v_giro);
}

void Control_Valvulas(){
check_mfc();

if (estval == LOW)
{
    estval=HIGH;
}
else if (estval == HIGH)
{
    estval=LOW;
}

if (estval==HIGH){
    digitalWrite(valvula2,HIGH);
    digitalWrite(valvula1,HIGH); //me escribe estado anterior negado
} else if (estval==LOW)
{
    digitalWrite(valvula1,LOW); //me escribe estado anterior negado
    digitalWrite(valvula2,LOW);
}

if ((contador%2)==0)
{
    digitalWrite(start,LOW);
    for (int i=0; i<27; i++)
    {
        delay(1000);
        cont_temp();
        pwm_calc();
    }
    delay(738);
    digitalWrite(start,HIGH);
}
else
{
    for (int i=0; i<27; i++)
    {
        delay(1000);
        cont_temp();
        pwm_calc();
    }
    delay(738);
}
}

void Control_Motor(){
check_mfc();
//Serial.println(contador);
if (contador>20)
    {contador=1;}
}

```

```

    if (contador%10 == 0)
    {
        for (int cont=1; cont<=pasos/8; cont++) //Control Motor de Pasos:
        Reducción de 50 a 1.
        {
            Paso();
        }
    }

    contador ++;
}

void cont_temp(){
    check_mfc();
    termval=analogRead(termpin); //lectura de voltaje termistor
    set_point = ((double)analogRead(temp_set) * 70.0) / 1024.0; //lectura de la
    temperatura deseada
    temp=((termval*5/1023)*22.72)-9.45; //conversión voltaje a temperatura
    //si la temperatura se encuentra dentro de +- 1 grado no hace nada y
    mantiene el valor de pwm
    if( temp < set_point && actual < 255){ //comparación si la temperatura esta
    menor a la objetivo
    actual=actual+25;
    if (actual > 255){
        actual = 255;}
    } else if( temp > set_point){ //comparación si la temperatura es mayor a la
    objetivo
    actual=actual-25;
    if (actual < 0){
        actual = 0;}
    }
    if ( temp < set_point+1 && temp > set_point-1)
    {
        digitalWrite(ledtemp, HIGH);
        on=1;
    }
    analogWrite(actpin, actual);
}

void reset()
{
    digitalWrite(CS, LOW);
    SPI.transfer(0x0000);
    digitalWrite(CS, HIGH);
    delay(10);
}

void escribir()
{
    check_mfc();
    if (digitalRead(mfc_set==LOW))
    {
        int i_set = 0;
        i_set = (double)analogRead(ictrl)/5.12;
        //taps = round((double)(analogRead(ictrl)/8.0));
        //taps = 0.4794*(double)i_set-9.981;
        //taps = 0.001338*pow((double)i_set,2)+0.2051*(double)i_set-1.363;
        taps = 0.001673*pow((double)i_set,2)+0.1696*(double)i_set+2.176;
        if (taps > 127)
        {

```

```

        taps = 127;
    }
    if (taps < 0)
    {
        taps = 0;
    }
    digitalWrite(CS,LOW);
    SPI.transfer(0x00);
    SPI.transfer(taps);
    digitalWrite(CS,HIGH);
    delay(1000);
    i_lamp = ((double)analogRead(imon)*500.0)/1024.0;
}
}

void pwm_calc()
{
    check_mfc();

    double A = 0.001218;
    double B = 0.0002141;
    double C = 0.0000002984;
    volt = 5.0 * ((double)analogRead(volterm) / 1024.0);
    res = 1782.0 * (5.0 / volt - 1.0);
    oz_temp = 1.0 / (A + B * log(res) + C * log(pow(res,3)));
    oz_temp = oz_temp - 273.15;
    double set_temp = (70 * ((double)analogRead(oz_set) / 1024.0)) + 273.15;
    double x = (1.0/C) * (A - 1.0/set_temp);
    double y = sqrt(pow((B/(3.0*C)),3) + pow((x/2.0),2));
    double D = pow((y - x/2.0),1.0/3.0);
    double E = pow((y + x/2.0),1.0/3.0);
    setpoint = pow(2.718, (D-E));

    if (res >= (setpoint + 25.0))
    {
        temp_val = temp_val + 25;
        if (temp_val > 250)
            temp_val = 250;
    }
    else if (res < (setpoint + 25.0) && res > (setpoint - 25.0))
    {
        temp_val = temp_val - 25;
        if (temp_val < 25)
            temp_val = 25;
    }
    else if (res < (setpoint - 25.0))
    {
        temp_val = 25;
    }
    analogWrite(temp_ctrl,temp_val);
}

void imprimir()
{
    check_mfc();
    Serial.println("Temp Lamp 254nm [C]:");
    Serial.println(temp);
    Serial.println("Valor de Control:");
    Serial.println(actval);
    Serial.println("\t");
}

```

```

Serial.println("Temp Lamp 185nm [C]");
Serial.println(oz_temp);
Serial.println("Valor de Control:");
Serial.println(temp_val);
Serial.println("\t");
Serial.println("Corriente Lamp 185nm [mA]:");
Serial.println(i_lamp);
Serial.println("\t");
Serial.println("\n");
}

void check_mfc()
{
  if (digitalRead(mfc_set)==HIGH)
  {
    flow = analogRead(A5)/4;
    analogWrite(mfc, flow);
  }
}

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  //control temperatura lámpara
  pinMode(actpin, OUTPUT);
  pinMode(ledtemp, OUTPUT);
  digitalWrite(ledtemp, LOW);

  //control motor
  pinMode(motor1, OUTPUT);
  pinMode(motor2, OUTPUT);
  pinMode(motor3, OUTPUT);
  pinMode(motor4, OUTPUT);

  //control válvulas
  pinMode(valvula1, OUTPUT);
  pinMode(valvula2, OUTPUT);

  //posición interruptor
  pinMode(ok, OUTPUT);
  digitalWrite(ok, LOW);
  pinMode(start, OUTPUT);
  digitalWrite(start, LOW);

  //control temperatura ozonator
  pinMode(temp_ctrl, OUTPUT);

  //control intensidad
  SPI.begin();
  SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV128);
  SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
  SPI.setDataMode(SPI_MODE0);
  pinMode(CS, OUTPUT);
  digitalWrite(CS, HIGH);
  reset();

  //mfc ozonator
  pinMode(mfc, OUTPUT);
  analogWrite(mfc, flow);
}

```

```

    pinMode(mfc_set, INPUT);
}

void loop()

{
tiempo = millis()+1;
if ((tiempo%86400000) == 0)
{
    calib = HIGH;
}
    cont_temp();
    delay(round(espera/4));
    escribir();
    delay(round(espera/4));
    pwm_calc();
    delay(round(espera/4));
    check_mfc();
    delay(round(espera/4));

    if(calib==HIGH || (calib1==HIGH && on==1))
    {
        digitalWrite(ok,HIGH);
        Calibracion();
        delay(round(espera/4));
    }
    else if(calib==LOW && on==1)
    {
        Control_Motor();
        delay(round(espera/4));
        Control_Valvulas();
        delay(round(espera/4));
        periodo = tiempo - tprev;
        tprev = tiempo;
    }
    imprimir();
}

```