

Implementación de un sensor de concentración de  $CO_2$  atmosférico basado en espectroscopia láser de diodo sintonizable embarcado como carga útil en el globo sonda estratosférico E3Tratos

Harley Fernando García Robles y Kevin Andrés Tautiva Salazar

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

Julián Gustavo Rodríguez Ferreira

Doctor en Física, Especializado en Astrofísica

Co-Director

Hans Yecid Garcia Arenas

Magister en Ingeniería Electrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2023

### Dedicatoria

Yo **Harley Fernando García Robles** nacido en **Barrancabermeja, Santander**, En labor de estudiante y profesional en formación, dedico la presente tesis a mis familiares, en especial a mis padres quienes me han brindado el apoyo y confianza necesarios durante toda mi vida.

Yo **Kevin Andrés Tautiva Salazar**, nacido en **Barrancabermeja, Santander** dedico esta tesis a mi familia, la cual siempre me ha apoyado de forma incondicional, teniendo plena confianza en mí, en mis decisiones, y en el camino que he elegido tomar en mi vida. Gracias por siempre estar ahí para mí y por estar dispuestos a dar más de lo necesario para que tuviera una formación ideal.

### **Agradecimientos**

A nuestro director Dr. Julián Gustavo Rodríguez Ferreira por orientarnos en los avances realizados y al co-director Msc. Hans Yecid Garcia Arenas por ser una guía indispensable para culminar con éxito este proyecto de investigación y por el préstamo del equipo necesario para la realización de las pruebas en laboratorio.

A Leandro Sebasthyan Rojas Rodriguez por tomarse el tiempo de brindarnos indicaciones y consejos durante el inicio y desarrollo de este proyecto, ayudándonos a realizar mejoras para la presentación de un producto final completo.

## Tabla de Contenido

Introducción . . . . .	20
1 Definición del Problema . . . . .	22
2 Misión E3Tratos . . . . .	24
2.1 Planteamiento de la Misión . . . . .	24
2.2 Estado Actual de E3Tratos . . . . .	26
2.3 Este Proyecto Como Parte de E3Tratos . . . . .	27
3 Objetivos. . . . .	28
3.1 Objetivo General . . . . .	28
3.2 Objetivos Específicos . . . . .	28
4 Fundamentos Teóricos . . . . .	29
4.1 Espectroscopia . . . . .	29
4.2 Bandas de Absorción Atmosféricas . . . . .	29
4.3 Líneas de Absorción . . . . .	31
4.4 Espectroscopia Láser de Diodo Sintonizable . . . . .	37
4.5 Ley de Beer-Lambert . . . . .	40
5 Sistemas De Medición De $CO_2$ . . . . .	43
5.1 Sistemas No Ópticos . . . . .	43
5.1.1 Sensores De $CO_2$ Electroquímicos . . . . .	43
5.2 Sistemas Ópticos . . . . .	43
5.2.1 Sensores De $CO_2$ Surface Plasmon Resonance (SPR) . . . . .	44
5.2.2 Sensores De $CO_2$ Foto Acústicos . . . . .	44
5.2.3 Sensores De $CO_2$ Non-Dispersive Infrared (NDIR) . . . . .	44
6 Sistema de Sensado de $CO_2$ Propuesto . . . . .	46
6.1 Requerimientos del Sistema . . . . .	46
6.1.1 Requerimientos de Hardware . . . . .	46
6.1.2 Requerimientos de Software . . . . .	47

6.2	Simulación Del Sistema De Sensado De $CO_2$ . . . . .	48
6.2.1	Simulación del Camino Óptico en la Celda de Herriott . . . . .	48
6.2.2	Simulación de Metodología del Estado del Arte . . . . .	52
6.2.3	Simulación Empleando Parámetros Reales de Laboratorio . . . . .	57
7	Módulos Del Sistema . . . . .	60
7.1	Etapa de Sensado - Sensor de $CO_2$ T6713 . . . . .	61
7.2	Etapa de Sensado - Sensor de Presión ASDXACX015PAAA5 . . . . .	63
7.3	Etapa de Procesamiento de Datos - MSP432E401Y LaunchPad . . . . .	65
7.4	Etapa de Sensado - Módulo BOOSTXL-BASSENSORS . . . . .	67
7.5	Etapa de Sensado - Power Meter PM101 y Fotorreceptor Esfera Integrante S148C . . . . .	69
7.6	Módulo Electro-Óptico - Módulo Controlador Láser DX1 . . . . .	70
7.7	Módulo Electro-Óptico - DAC53608EVM y BOOSTXL-DAC-PORT . . . . .	73
7.8	Almacenamiento en Memoria - BOOSTXL-SHARP128 . . . . .	75
7.9	Etapa de Potencia - PCB y level shifter . . . . .	80
7.10	Módulo Electro-Óptico - Elementos Varios . . . . .	82
7.11	Base estructural - Componentes . . . . .	84
7.12	Diagramas de Interacciones . . . . .	86
8	Integración de los Subsistemas . . . . .	87
8.1	Conexión Física de los Subsistemas del Sensor de $CO_2$ . . . . .	87
8.2	Programación del Sistema de Sensado de $CO_2$ . . . . .	91
9	Pruebas en laboratorio del sistema . . . . .	97
9.1	Sensor Usado Para la Comparación . . . . .	97
9.2	Metodología de Los Experimentos Realizados en Laboratorio. . . . .	97
9.3	Experimentos Utilizando el Sistema de Sensado . . . . .	98
9.3.1	Montaje del Sistema Planteado . . . . .	98
9.3.2	Procesamiento de los Datos Reales Obtenidos en Laboratorio. . . . .	101
9.4	Resultados Obtenidos de las Mediciones en Laboratorio. . . . .	102

9.4.1 Análisis de los Resultados Medidos en el Laboratorio. . . . .	104
9.5 Comparación de Características Entre el Sensor Comercial y el Sensor Imple- mentado. . . . .	107
10 Conclusiones . . . . .	109
11 Recomendaciones . . . . .	110
12 Trabajo Futuro . . . . .	111
Referencias Bibliográficas . . . . .	115
Apéndices . . . . .	116
A Mapa de GPIOs disponibles en el Launchpad MSP432E401Y . . . . .	116

### Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Distancia entre los espejos requerida para diversas cantidades de rebotes.</i>	50
Tabla 2. <i>Valor de los parámetros utilizados para calcular la distancia óptica recorrida.</i>	52
Tabla 3. <i>Datos de variables iniciales necesarios para el cálculo de la concentración.</i>	54
Tabla 4. <i>Datos de variables iniciales necesarios para el cálculo de la concentración.</i>	55
Tabla 5. <i>Datos de variables iniciales utilizados en el algoritmo.</i>	58
Tabla 6. <i>Rango de longitud de onda y número de onda realizado por el barrido del láser.</i>	59
Tabla 7. <i>Pines de conexión del sensor T6713</i>	62
Tabla 8. <i>Resultados del diagnóstico del sensor T6713 realizados al aire libre.</i>	63
Tabla 9. <i>Pines de conexión del sensor ASDXACX015PAAA5.</i>	64
Tabla 10. <i>Resultados del diagnóstico del sensor de presión realizados en las oficinas de CEMOS.</i>	65
Tabla 11. <i>Resultados del diagnóstico de todos los sensores incluidos en el BOOSTXL-BASSENSORS.</i>	68
Tabla 12. <i>Resultados del diagnóstico.</i>	70
Tabla 13. <i>Asignación de pines módulo DX1.</i>	71
Tabla 14. <i>Resultados del diagnóstico del DAC medidos mediante la utilización de un multímetro</i>	74
Tabla 15. <i>Condiciones de operación del level shifter TXS0108E (Fuente: Texas Instruments)</i>	81
Tabla 16. <i>Pines de conexión entre el DAC53608EVM - BOOSTXL-DAC-PORT y el Controlador Láser DX1.</i>	89
Tabla 17. <i>Conexiones entre los pines del Launchpad y los diferentes dispositivos utilizados.</i>	90
Tabla 18. <i>Pines de conexión entre el Level Shifter y el Power Meter 101.</i>	90

Tabla 19. <i>Características del sensor de CO<sub>2</sub> comercial T6713 a comparar con el sensor implementado . . . . .</i>	97
Tabla 20. <i>Comparación de características entre el sensor T6713 y el sensor implementado en el presente proyecto. . . . .</i>	105
Tabla 21. <i>Tabla de comparación de características entre los sensores. . . . .</i>	107

### Lista de Figuras

Figura 1.	<i>Progreso de las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera en los últimos años. . . . .</i>	22
Figura 2.	<i>Esquema del globo sonda. A-Globo de látex de 3[kg], B-Sistema de descenso, C-Reflector de radar, D-Góndola. . . . .</i>	25
Figura 3.	<i>Esquema de la estación terrena. . . . .</i>	25
Figura 4.	<i>Plataforma IoT de E3Tratos. . . . .</i>	26
Figura 5.	<i>Transmisión atmosférica de diferentes elementos. . . . .</i>	31
Figura 6.	<i>Perfiles de ensanchamientos de línea normalizados y sus anchos a media altura. <math>\gamma_D = \gamma_L</math>. . . . .</i>	32
Figura 7.	<i>Perfil de Voigt resultante de la convolución entre el perfil de Lorentz y Doppler con el mismo valor de HWHM. . . . .</i>	36
Figura 8.	<i>Barrido de longitud de onda al cambiar la corriente de polarización. . . . .</i>	38
Figura 9.	<i>Potencia de salida del láser al cambiar la corriente de polarización. . . . .</i>	38
Figura 10.	<i>Diagramas de las señales involucradas en los métodos de TDLS. . . . .</i>	39
Figura 11.	<i>Atenuación en la intensidad de luz debido al gas presente en el medio. . . . .</i>	40
Figura 12.	<i>Arreglos de espejos para la celda de Herriott . . . . .</i>	48
Figura 13.	<i>Esquemático con los parámetros de la simulación de la celda de Herriott en el software de Virtual Lab Fusión 2021 versión trial. . . . .</i>	50
Figura 14.	<i>Simulación de la celda de Herriott con 10 rebotes en el software de Virtual Lab Fusión 2021 versión trial. . . . .</i>	51
Figura 15.	<i>Longitud del camino óptico obtenido de la simulación de la celda de Herriott con 10 rebotes. . . . .</i>	51
Figura 16.	<i>Diagramas de flujo para el cálculo de concentración del estado del arte. a) Análisis en el centro de línea b) Absorbancia integrada . . . . .</i>	53
Figura 17.	<i>Curvas de señal recibida y absorbancia extraídas del documento. . . . .</i>	54

Figura 18. <i>Curvas de absorbancia extraída documento y curva aproximada mediante el uso de una hoja de cálculo.</i> . . . . .	56
Figura 19. Diagrama de flujo del algoritmo empleado para realizar la simulación del sistema en condiciones de laboratorio. . . . .	57
Figura 20. <i>Curvas de potencias y absorbancia obtenidas en la simulación en condiciones de laboratorio.</i> . . . . .	60
Figura 21. <i>Módulo CO<sub>2</sub> Sensor T6713</i> . . . . .	61
Figura 22. Conexiones del sensor T6713 realizadas para el diagnóstico del correcto funcionamiento del mismo. . . . .	63
Figura 23. <i>Sensor de presión ASDXACX015PAAA5 con su distribución de pines.</i> . . . . .	64
Figura 24. Función de transferencia del sensor de presión. . . . .	65
Figura 25. <i>Launchpad MSP432E401Y integrado con los módulos DAC53608EVM y BOOSTXL-DAC-PORT.</i> . . . . .	66
Figura 26. Divisor de tensión con valores resistivos reales empleado a la entrada del ADC del Launchpad. . . . .	67
Figura 27. Distribución de pines módulo BOOSTXL-BASSENSORS. . . . .	68
Figura 28. <i>Medidor de potencia PM101 y sensor S148C.</i> . . . . .	69
Figura 29. Software Optical Power Monitor con el sensor S148C conectado y ajustado a una longitud de onda de 2004 nm. . . . .	70
Figura 30. <i>Módulo controlador láser DX1.</i> . . . . .	71
Figura 31. <i>Curva de Potencia vs Longitud de Onda inferida de las curvas entregadas por el fabricante.</i> . . . . .	72
Figura 32. Curvas de potencia del láser entregadas por el fabricante (azul) y medidas a la salida de la fibra óptica del láser (naranja). . . . .	72
Figura 33. <i>Módulo del DAC.</i> . . . . .	73
Figura 34. Software DAC53608EVM 1.0.1 utilizado para comunicarse con el DAC y escribir los niveles de voltaje deseados. . . . .	74

Figura 35. Distribución de pines BOOSTXL-SHARP128 (Fuente: Texas Instruments) . . . . .	75
Figura 36. Visualización en display LCD del logo de Texas Instruments como prueba del correcto funcionamiento del módulo. . . . .	76
Figura 37. Documento de ejemplo guardado en la microSD durante el diagnóstico del proceso de escritura . . . . .	77
Figura 38. <i>Resultado del guardado de los datos medidos en el archivo CO2_XX.txt</i>	78
Figura 39. <i>Pantallas de interfaz gráfica encontradas en la implementación final del sistema</i> . . . . .	79
Figura 40. <i>Diagrama de la PCB diseñada, incluyendo los reguladores, level shifter y sensores a utilizar en el proyecto.</i> . . . . .	80
Figura 41. <i>Level shifter necesario para establecer comunicación entre el PM101 y el Launchpad.</i> . . . . .	81
Figura 42. <i>Espejos de referencia CM254-100EH3-M02 y CM254-100-M02.</i> . . . .	82
Figura 43. <i>Colimador F028APC-2000.</i> . . . . .	83
Figura 44. <i>Lente biconvexo de referencia LB1676-ML.</i> . . . . .	83
Figura 45. <i>MB3060/M</i> . . . . .	84
Figura 46. <i>Instrumentos de anclaje</i> . . . . .	85
Figura 47. <i>Soporte KS1T escogido para los espejos de oro.</i> . . . . .	86
Figura 48. <i>Diagrama de interacciones de las etapas del sistema de sensado de CO<sub>2</sub></i>	86
Figura 49. <i>Conexiones Nivel 0 - Launchpad y PCB (Reguladores, sensor de CO<sub>2</sub>, presión y level shifter).</i> . . . . .	88
Figura 50. <i>Conexiones Nivel 0, 1 - BOOSTXL-BASSENSORS y BOSSTXL-SHARP128</i>	88
Figura 51. <i>Conexiones Nivel 0, 1, 2 - BOOSTXL-DAC-PORT y DAC53608EVM, vista superior final de la tarjeta.</i> . . . . .	89
Figura 52. <i>Algoritmo ejecutado en el inicio del sistema y algoritmo escritura I2C al DAC.</i> . . . . .	92

Figura 53. <i>Algoritmo de los diferentes subprocesos encargados del sensado de variables y escritura en la SD.</i> . . . . .	92
Figura 54. <i>Algoritmo de interfaz gráfica encargado de iniciar los diferentes modos de ejecución.</i> . . . . .	93
Figura 55. <i>Algoritmo encargado del barrido láser y de la llamada a los diferentes subprocesos del sistema.</i> . . . . .	94
Figura 56. <i>Elementos utilizados en el montaje inicial orientado en el uso de la celda de Herriot.</i> . . . . .	98
Figura 57. <i>Alineación con láser visible en el sistema implementado en laboratorio.</i>	99
Figura 58. <i>Gráfica de Potencia obtenida al incrementar la distancia entre el fotorreceptor y el láser.</i> . . . . .	99
Figura 59. <i>Elementos utilizados en el montaje final con una distancia de 34cm entre el fotorreceptor y el láser.</i> . . . . .	100
Figura 60. <i>Diagrama del montaje final realizado en SolidWorks.</i> . . . . .	100
Figura 61. <i>Fotografías del montaje final implementado con el cual se realizaron las últimas mediciones.</i> . . . . .	101
Figura 62. <i>Algoritmo de post procesamiento en MATLAB de los datos reales obtenidos en laboratorio.</i> . . . . .	102
Figura 63. <i>Curvas resultantes a partir del procesamiento de datos de una curva de potencia.</i> . . . . .	102
Figura 64. <i>Mediciones de concentración de CO<sub>2</sub> a lo largo del tiempo obtenidas del sensor comercial.</i> . . . . .	103
Figura 65. <i>Comparación de mediciones reales en laboratorio entre los dos sensores.</i>	103
Figura 66. <i>Curva de absorbancia completa obtenida al realizar un solo barrido necesaria para obtener un valor de concentración de CO<sub>2</sub>.</i> . . . . .	104
Figura 67. <i>Curva obtenida al dividir las mediciones en grupos de 10 para disminuir el efecto de la variación de concentración en el tiempo.</i> . . . . .	105

Figura 68. *Mapa de Periféricos Disponibles en el Launchpad MPS432E401Y (Fuente: Texas Instruments)* . . . . . 116

**Lista de Apéndices**

Apéndice A. Mapa de GPIOs disponibles en el Launchpad MSP432E401Y. . . . .116

## Glosario

- **Absorbancia:** medida que refleja la atenuación de la radiación cuando esta atraviesa un medio o elemento.
- **ASCII:** código Estadounidense Estándar para el Intercambio de Información. Sistema de codificación que permite insertar caracteres especiales y símbolos en los textos.
- **Carga Útil:** capacidad de carga máxima de un vehículo aéreo o espacial compuesta por un conjunto de instrumentos que cumplen un objetivo específico.
- **Celda de Herriott:** celda formada por dos espejos esféricos opuestos que permiten aumentar la longitud total del camino óptico realizado por un haz de luz.
- **CCS:** "Code Composer Studio". Es un entorno de desarrollo integrado para desarrollar aplicaciones para microcontroladores de Texas Instruments.
- **Efecto Invernadero:** fenómeno natural en el cual determinados gases que componen la atmósfera retienen parte de la energía solar reflejada por la superficie de la Tierra, generando un aumento de la temperatura.
- **FAT-16:** "File Allocation Table" o Tabla de Asignación de Archivos. Sistema de archivos codificados en 16 bits, desarrollado para el intercambio y almacenamiento de datos.
- **Globo Estratosférico:** sistema compuesto por varios subsistemas intrínsecamente relacionados que se desplaza por la estratosfera (11-50[km]). Por lo general, es utilizado como herramienta de investigación científica.
- **HWHM:** "Half-Width at Half-Maximum" o Anchura a media altura. Es una medida de la extensión de una función, que viene dada por la diferencia entre los dos valores extremos de la variable independiente en los que la variable dependiente es igual a la mitad de su valor máximo.

- **I2C:** "Inter-Integrated Circuit" o Circuito Inter-Integrado. Puerto y protocolo de comunicación serial, define la trama de datos y las conexiones físicas para transferir bits entre 2 dispositivos digitales.
- **IoT:** "Internet of Things" o Internet de las Cosas. Es la agrupación e interconexión de dispositivos y objetos a través de una red.
- **Láser:** amplificación de luz por emisión estimulada de radiación.
- **Monocromático:** en física, se define como la radiación electromagnética de una sola longitud de onda.
- **Perfil Atmosférico:** representación gráfica del cambio que presentan las distintas variables encontradas en la atmósfera en función de su altitud.
- **Reflectancia:** representa la capacidad de una superficie para reflejar la luz proveniente de otras fuentes de luz.
- **Scattering:** "Dispersión". Describe los procesos físicos en los que las partículas en movimiento o la radiación se desvían de una trayectoria recta debido a no uniformidades por el medio en el que pasan.
- **SCPI:** "Standard Command for Programmable Instruments" o Estándar de comandos para Instrumentos Programables. Define un estándar para la sintaxis y comandos utilizados para controlar dispositivos de prueba y medición programables.
- **Simplelink SDK:** "Software Development Kit" o Kit de Desarrollo de Software. Proporciona un paquete de software completo para el desarrollo de aplicaciones entre 1 GHz y 2,4 GHz, incluido el soporte para Bluetooth, Low Energy, Zigbee, Thread, basado en 802.15.4, propietario y soluciones multiprotocolo en las MCU inalámbricas SimpleLink.

- **SMF:** "Single Mode Fiber" o Fibra Óptica Monomodo. Diseñada para transportar luz en un solo modo de propagación.
- **SNR:** "Signal to Noise Ratio" o Relación Señal a Ruido. Relación existente en la potencia de una que señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe.
- **SPI:** "Serial Peripheral Interface" o Interfaz de Periféricos Serial. Estándar de comunicación utilizado para la transferencia de información entre circuitos integrados en dispositivos electrónicos.
- **TDLS:** "Tunable Diode Laser Spectroscopy". Técnica de medición no invasiva que permite obtener la concentración de ciertos compuestos en una mezcla gaseosa, logrando límites de detección muy bajos (partes por billón).
- **Trama:** unidad de envío de datos. Se compone de una serie sucesiva de bits, organizados en forma cíclica, que transportan información, la cual, es posible extraer en la recepción.
- **UART:** "Universal Asynchronous Receiver Transmitter" o Transmisor-Receptor Asíncrono Universal. Protocolo para el intercambio bidireccional de datos entre dos dispositivos.
- **WMS:** "Wave Modulation Spectroscopy" o Espectroscopía de Modulación de Longitud de Onda. Técnica dedicada al caso donde la frecuencia de modulación es mucho menor que el ancho de línea de absorción, con detección en la frecuencia de modulación  $1f$  o los siguientes armónicos.

## Resumen

**Título:** Implementación de un sensor de concentración de  $CO_2$  atmosférico basado en espectroscopia láser de diodo sintonizable embarcado como carga útil en el globo sonda estratosférico E3Tratos\*

**Autor:** Harley Fernando García Robles, Kevin Andrés Tautiva Salazar\*\*

**Palabras Clave:** Globo Estratosférico, Calidad del Aire, Diodo Láser, Celda de Herriott, Absorbancia, Intensidad de Línea, Medición.

**Descripción:** Este trabajo de investigación tiene como base el estudio del cambio climático a nivel mundial, pues una de las causas de este es el aumento de las concentraciones de  $CO_2$ . Para realizar esto existen varias alternativas en el estado del arte, siendo una de ellas las plataformas de vuelo no tripuladas tales como los globos sonda. Por tal motivo, surge el planteamiento de este proyecto que busca desarrollar el sistema de sensado de  $CO_2$  atmosférico a partir de la simulación e implementación del instrumento de medición, con base en la técnica de Espectroscopia de Diodo Láser Sintonizable (TDLS). Este sistema se plantea a futuro embarcarlo como carga útil en la misión E3Tratos y en conjunto con los demás subsistemas, busca adquirir datos durante el vuelo a través de las distintas capas de la atmósfera para establecer un índice de la calidad del aire en Bucaramanga y construir un perfil atmosférico de la zona. Para cumplir con esto se realizan simulaciones del sistema, se implementan por separado los módulos electrónicos de diferentes etapas, se verifica su correcto funcionamiento y posteriormente se unen en un sistema completo, el cual se caracteriza en laboratorio, obteniendo características del mismo en comparación con un sensor de  $CO_2$  comercial.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director Julián Rodríguez Ferreira, Doctorado en Física, Especialidad astrofísica, Codirector Hans Yecid Garcia Arenas, Magister en Ingeniería electrónica.

### Abstract

**Title:** Implementation of an atmospheric CO<sub>2</sub> concentration sensor based on tunable diode laser spectroscopy shipped as a payload on the E3Tratos stratospheric probe balloon\*

**Author(s):** Harley Fernando García Robles, Kevin Andrés Tautiva Salazar\*\*

**Keywords:** Stratospheric Balloon, Payload, Air Quality, Laser Diode, Herriott Cell, Absorbance, Line Intensity.

**Description:** This research work is based on the study of global climate change, since one of the causes of this is the increase in the concentrations of CO<sub>2</sub>. To do this, there are several alternatives in the state of the art, one of which is unmanned flight platforms such as trial balloons. For this reason, the approach of this project arises, which seeks to develop the atmospheric CO<sub>2</sub> sensing system from the simulation and implementation of the measurement instrument, based on the Tunable Diode Laser Spectroscopy (TDLS) technique. In the future, this system is planned to be shipped as a payload in the E3Tratos mission and, together with the other subsystems, seeks to acquire data during the flight through the different layers of the atmosphere to establish an air quality index in Bucaramanga and build a climatic profile of the area. To accomplish this, simulations of the system are carried out, the modules of different stages are implemented separately, their correct operation is verified and later they are joined in a complete system for which its operation in the laboratory is characterized, obtaining its characteristics in comparison with a commercial CO<sub>2</sub> sensor.

---

\*Bachelor Thesis

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Julián Rodríguez Ferreira, Doctorado en Física, Especialidad astrofísica, Codirector Hans Yecid Garcia Arenas, Magister en Ingeniería electrónica.

## Introducción

A lo largo de los últimos años se ha visto un incremento en la emisión de gases de efecto invernadero en la atmósfera, un ejemplo de estos gases nocivos para la salud es el dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Por tal motivo, el monitoreo y control de la concentración de gases presentes en la atmósfera ha tomado cada vez más relevancia. Para ello, existen diferentes alternativas y técnicas de medición dentro de las que se encuentra el globo estratosférico diseñado en la misión E3Tratos Rodriguez-Ferreira et al. (2021) basado en el balonismo científico, (lanzamiento de globos meteorológicos) el cual comprende un barrido por la estratosfera comprendida en el rango de 11[km] a 50[km] de altura Luis (2018).

La carga útil en estos globos puede variar dependiendo de los requerimientos de la investigación que se desee realizar. De esta forma, la misión E3Tratos está encaminada a realizar un perfil atmosférico y determinar la calidad del aire, centrándose en el sensado de la concentración de  $CO_2$ , gas contaminante de mayor abundancia en la atmósfera terrestre. Para cumplir este propósito, se desarrolla un instrumento capaz de medir dichas concentraciones de  $CO_2$  el cual formará parte de la carga útil de la misión, basado en la técnica de espectroscopia láser de diodo sintonizable.

En este trabajo se presenta toda la documentación relacionada con el desarrollo del sensor, partiendo de una contextualización previa sobre el estado actual de la misión E3Tratos y el papel que desempeña este trabajo de grado en la misma. Un marco teórico que permita definir y explicar los conceptos físicos en los cuales se basa el funcionamiento del instrumento a partir de investigaciones previas. Se describen diferentes métodos comerciales de sensado de  $CO_2$ . Además, se realizan simulaciones de la metodología del estado del arte, la cual se aplica en este proyecto. Y se abordan los elementos seleccionados que componen las diferentes etapas del sistema de sensado (etapa de potencia, etapa de sensado, módulo optoelectrónico, procesamiento de datos y almacenamiento en memoria) diagnosticando su correcto funcionamiento individual y la interacción e integración de estos subsistemas y se

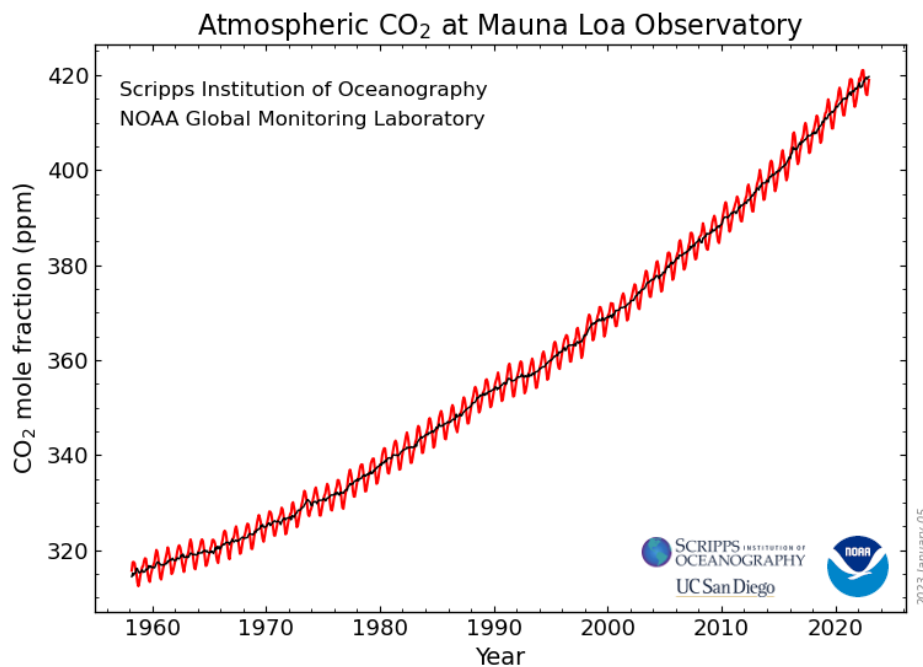
describen los algoritmos encargados de obtener los datos de los diferentes elementos del sistema (Code Composer Studio) además de los encargados de post-procesar estos datos (MATLAB). Posteriormente se documenta el montaje y las pruebas realizadas en laboratorio. Finalmente, se presenta el análisis de los resultados obtenidos, la comparación con el sistema comercial, recomendaciones, trabajo futuro y conclusiones.

## 1 Definición del Problema

El aire es la mezcla gases que componen la atmosfera, la cual es rica en Oxígeno, Nitrógeno y otros gases en menor concentración como el vapor de agua, el dióxido de carbono, el Argón, entre otros, los cuales se mantienen en proporciones aproximadamente constantes hasta los 80 km de altura (Godish et al., 2014). La calidad de aire es de suma importancia debido a que está estrechamente relacionada con la salud pública, la conservación de los ecosistemas terrestres y la regulación del clima, sin embargo, los desarrollos industriales y la alta dependencia de los hidrocarburos, han ocasionado una mayor emisión de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera, hasta el punto de que, según datos de la OMS (Organización Mundial de la Salud), se estima que cerca de siete millones de personas mueren al año debido a la exposición a la contaminación presente en el aire (Osseiran and Lindmeier, 2018).

Figura 1:

*Progreso de las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera en los últimos años.*



*Nota. Imagen extraída de US Department of Commerce, 2005.*

Por tal motivo, a nivel mundial surge la necesidad de monitorear constantemente la calidad del aire presente en la atmósfera, generando así una conciencia sobre los gases del efecto invernadero. Dentro de estos gasesse destaca el  $CO_2$  debido a que ha sido identificado como la principal causa del calentamiento global, esto como consecuencia del aumento acelerado de sus emisiones, como se puede observar en la figura 1, siendo este crecimiento superior al de los demás gases de efecto invernadero , por lo cual mantener un monitoreo del  $CO_2$  se ha convertido en una prioridad (Ritchie et al., 2020).

Como respuesta a esto han surgido grandes avances respecto a sensores ópticos de concentración de gases, principalmente los basados en la Espectroscopia Láser de Diodo Sintonizable (TDLS) y Non-Dispersive Infrared (NDIR), aunque se han diseñado gran variedad de estos sensores en diversos trabajos (Durry et al., 2004) (Xin et al., 2021), la mayoría de los sensores comerciales disponibles requieren calibraciones periódicas las cuales implican una gran complejidad para el usuario común, derivando en la perdida de precisión por parte de dichos sensores (Lan et al., 2020).

La necesidad de monitorear la calidad del aire da inicio a la MISIÓN E3TRATOS para la cual es indispensable implementar un dispositivo que permita determinar la concentración de  $CO_2$  atmosférico, el cual pueda ser utilizado en diferentes misiones y localizaciones sin necesidad de realizar calibraciones recurrentes.

## 2 Misión E3Tratos

### 2.1 Planteamiento de la Misión

Debido a lo expuesto en la sección 1, como respuesta a la problemática y enfocándose en el área metropolitana de Bucaramanga, Santander, Colombia se da inicio a la **Misión E3Tratos** (Rodríguez-Ferreira et al., 2021) la cual se basa en el desarrollo de un globo sonda, el cual tendrá una gran adaptabilidad y será reconfigurable para llevar a cabo gran cantidad de experimentos científicos, con el fin de estudiar la atmósfera terrestre mediante un recorrido desde la troposfera a 0 km de altura en el punto de lanzamiento del globo hasta la baja estratosfera a una elevación de alrededor de 35 Km, donde uno de estos experimentos se basará en el monitoreo de la calidad de aire, que ayude a determinar la concentración de CO<sub>2</sub> (Douglas, 2019) y a su vez, permita construir un perfil atmosférico mediante los datos adquiridos.

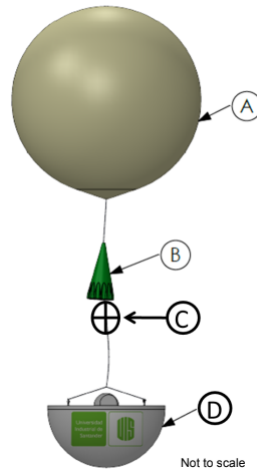
Para lograr esto, se idea la construcción de un instrumento basado en la técnica de espectroscopia láser de diodo sintonizable, el cual se plantea como carga útil del globo sonda mencionado anteriormente. Esta misión se encuentra segmentada en 3 etapas:

1. **Globo Sonda:** Esta etapa hace referencia al instrumento que realiza el sensado y recolecta datos durante el vuelo alrededor de la atmósfera, dicho instrumento está conformado por: el globo, el sistema de recuperación, el reflector radar y la góndola.

La góndola incluye la carga útil de la misión, la cual comprende el sistema de telemetría del globo, la fuente de poder y el sistema de sensado de CO<sub>2</sub>, el cual es la base fundamental del presente proyecto.

Figura 2:

Esquema del globo sonda. A-Globo de látex de 3[kg], B-Sistema de descenso, C-Reflector de radar, D-Góndola.

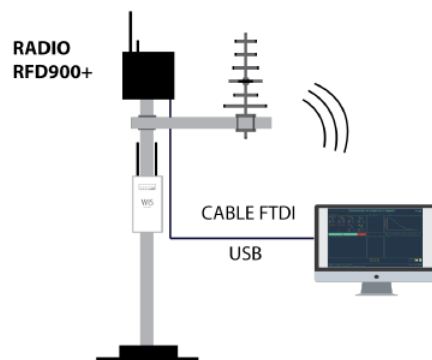


Nota. Imagen extraída de Jairo and Leandro, 2021, página 20.

2. **Estación Terrena:** Esta etapa está orientada a la recepción y procesamiento de los datos obtenidos por el globo meteorológico, la estación se encuentra compuesta por antenas, sistemas de transmisión/recepción por radiofrecuencia y demás elementos necesarios para esta tarea.

Figura 3:

Esquema de la estación terrena.

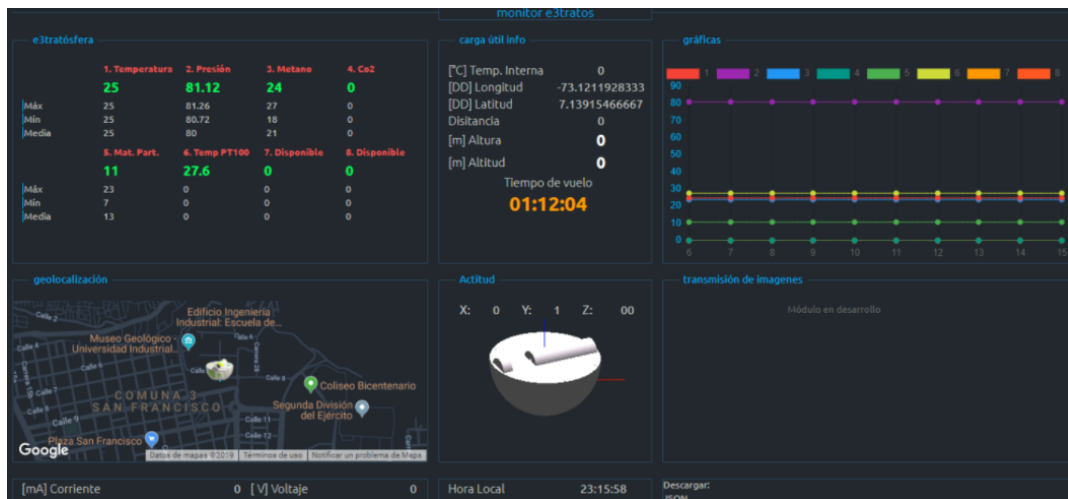


Nota. Imagen extraída de Douglas, 2019, página 46.

3. **Plataforma IoT:** En esta sección, se abarca todo lo relacionado con la correcta visualización de los datos recolectados por el globo meteorológico. De igual forma, se espera que sea sencilla y de fácil acceso para que los datos generados puedan ser accedidos por aquellas personas interesadas en el monitoreo de la calidad del aire.

Figura 4:

*Plataforma IoT de E3Tratos.*



*Nota. Imagen extraída de Douglas, 2019, página 65-66.*

## 2.2 Estado Actual de E3Tratos

La misión E3Tratos, cuyas bases se establecieron en 2018, ha presentado un avance considerable gracias al desarrollo y correlación de diversos proyectos realizados como parte de la misión, los cuales han dado como resultado aportes como:

-El planteamiento del diseño inicial del sensor de  $CO_2$  basado en espectroscopia láser de diodo sintonizable con el método modulación de longitud de onda WMS, la selección inicial de los instrumentos ópticos y electrónicos que le conforman y el diseño del montaje inicial basado en el uso de las celdas de Herriott. (Heiner and Nelson, 2018).

-El diseño de la estructura para el Globo Sonda y la construcción de la Góndola con base en los requerimientos establecidos y la adquisición de toda la instrumentación

correspondiente a los numerales A, B y C presentes en la figura 3 (Andrés and Sergio, 2019).

-El diseño y construcción de la Estación Terrena de la misión E3Tratos para la recepción de los datos provenientes del globo sonda, la programación de un servidor con soporte web como visualizador de los datos y la implementación del sistema de telemetría encargado de transmitir estos datos a la estación terrena (Douglas, 2019).

-El rediseño en simulación del sensor  $CO_2$  utilizando el método de absorción directa, la selección y compra de la sensórica requerida para la implementación del sensor y el desarrollo de una propuesta de montaje, donde se exponen las interacciones entre los diferentes elementos que lo componen (Jairo and Leandro, 2021). Estos últimos aportes funcionan como la base fundamental para la realización de este proyecto de grado.

### **2.3 Este Proyecto Como Parte de E3Tratos**

Como continuación de lo expuesto anteriormente, se desarrolla el presente trabajo de investigación, el cual tiene como objetivo principal Implementar un sensor de  $CO_2$  atmosférico basado en espectroscopia láser de diodo sintonizable (TDLS). A dicho sensor se le atribuye el indicativo de 'Instrumento Principal' debido a que es indispensable para cumplir el objetivo fundamental de la misión E3Tratos de monitorear la calidad del aire y construir un perfil atmosférico.

Para la implementación del sensor se desarrolla la definición y el diseño de cada una de las etapas: Etapa de potencia encargada de suministrar energía, etapa óptica, módulo Electro-Óptico compuesto del láser y controlador, etapa de sensado la cual adquiere datos de variables atmosféricas, procesamiento de señal para adecuar las mediciones y almacenamiento en memoria donde se realiza guardado de los datos en una memoria microSD, además de un algoritmo encargado de todo el sistema de sensado y uno para el posterior procesamiento de los datos de la memoria microSD.

### 3 Objetivos

#### 3.1 Objetivo General

Implementar un sensor de  $CO_2$  atmosférico basado en espectroscopia láser de diodo sintonizable.

#### 3.2 Objetivos Específicos

Diagnosticar el correcto funcionamiento de los subsistemas que componen al instrumento para proceder a la puesta en marcha de este.

Integrar en laboratorio los subsistemas del sensor de  $CO_2$  planteados en etapas anteriores del proyecto.

Realizar pruebas de sensado en diferentes condiciones ambientales para verificar la capacidad del instrumento para medir concentraciones de  $CO_2$ , comparando con el sensor comercial T6713 el cual posee un rango de medición de entre 0 y 2000 PPM (Telaire, s.f.) con el fin de validar parámetros como la incertidumbre sobre la medida y su resolución en ppm.

## 4 Fundamentos Teóricos

### 4.1 Espectroscopia

La espectroscopia es el estudio de las interacciones entre la materia y los diferentes tipos de radiación en el espectro electromagnético (Yadav, 2013), su principal ventaja es su naturaleza no destructiva que se traduce en la capacidad de estudiar los objetos sin hacer contacto directo con estos. Dentro de la espectroscopia se distinguen dos ramas principales, la espectroscopia de emisión y la espectroscopia de absorción (Tkachenko, 2006).

La espectroscopia de emisión se basa en el estudio del espectro de las radiaciones emitidas por sustancias que han sido expuestas a altas temperaturas, mientras que la espectroscopia de absorción se basa en el estudio del espectro de la banda de absorción de las sustancias, es decir, el estudio del conjunto de longitudes de ondas específicas en las cuales los fotones son absorbidos por las moléculas de la sustancia bajo estudio (Yadav, 2013).

Específicamente en el presente proyecto de investigación se hace uso de la espectroscopia de absorción, puesto que ella permite determinar la concentración de sustancias específicas, para el caso de este trabajo, en muestras de gas debido a que la absorción de dicha sustancia se relaciona con su concentración, por esta razón, los métodos basados en espectroscopia de absorción se caracterizan por tener gran sensibilidad y selectividad, características que los destacan sobre otros métodos de detección y cuantización de la concentración de gases (Fu et al., 2022), estas propiedades hacen de la espectroscopia de absorción una base fundamental para el sensor de CO<sub>2</sub> a implementar.

### 4.2 Bandas de Absorción Atmosféricas

En la atmósfera terrestre se encuentra una gran variedad de moléculas actualmente identificadas, de las cuales se conoce un amplio número de propiedades físicas y químicas, entre ellas, sus respectivas bandas de absorción, las cuales se definen como los intervalos de longitudes de onda del espectro electromagnético dentro del cual dicha molécula absorbe la

energía radiante (UNESCO and WMO, 1992).

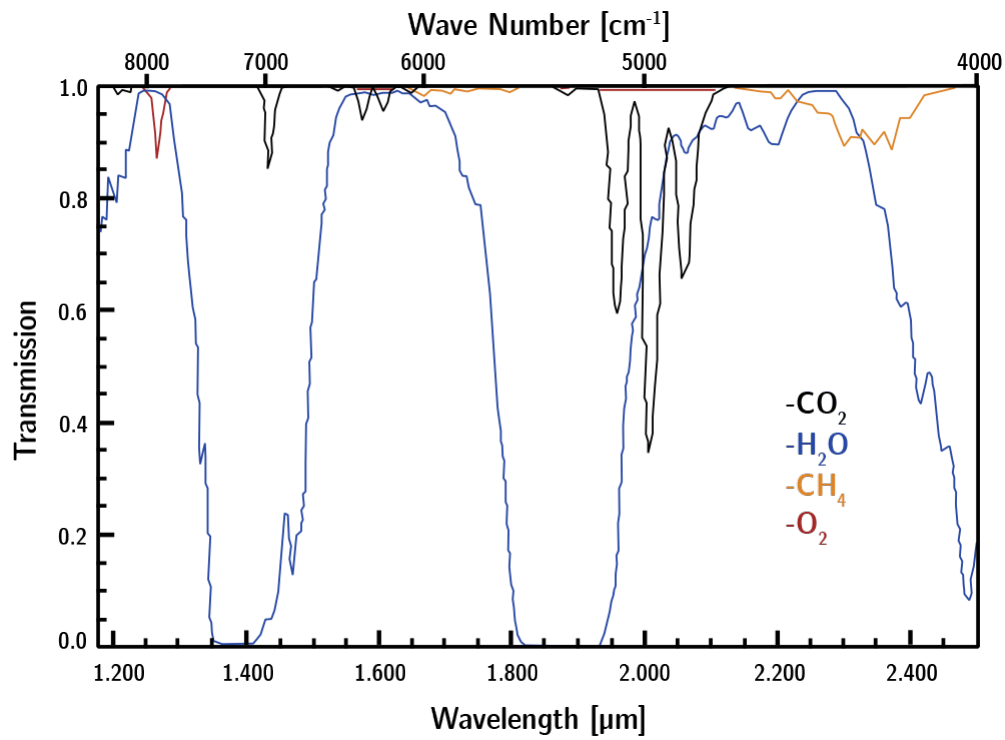
Las bandas de absorción de las moléculas presentes en la atmósfera actualmente poseen una naturaleza segmentada y solapada (Jairo and Leandro, 2021), es decir, estas poseen diversas bandas de absorción y algunas son compartidas con otras moléculas, lo cual ocasiona que según el rango de frecuencia usado en el análisis espectral, se observe la intensidad absorbida de un conjunto de diferentes moléculas, dicho efecto, dificulta el proceso para determinar las propiedades de estas, aumentando así la complejidad del análisis individual de las mismas.

Debido a lo expuesto anteriormente, en este proyecto se hace uso de una rama determinada de la espectroscopia de absorción, la espectroscopia infrarroja (IR Spectroscopy) que comprende las longitudes de onda entre 780[nm] y 1[mm]. A nivel más detallado, se trabaja en el infrarrojo cercano (NIR) que se encuentra entre los 750[nm] y 2500[nm].

Para el sensado de  $CO_2$  se hace uso de una pequeña banda de absorción ubicada en los 2004[nm], haciendo incidir un haz de luz monocromático a través del área de estudio y posteriormente, se registra la cantidad de energía absorbida con el propósito de trazar un espectro de absorbancia y analizar la muestra en cuestión, dicha banda de absorción se elige debido a que no es compartida con la mayoría de moléculas presentes en la atmósfera, es decir la absorción de estas en dicha frecuencia es despreciable, debido a ello, el comportamiento que se observa en el sistema de sensado es en gran parte atribuido al  $CO_2$  cómo se puede analizar en la figura 5.

Figura 5:

*Transmisión atmosférica de diferentes elementos.*



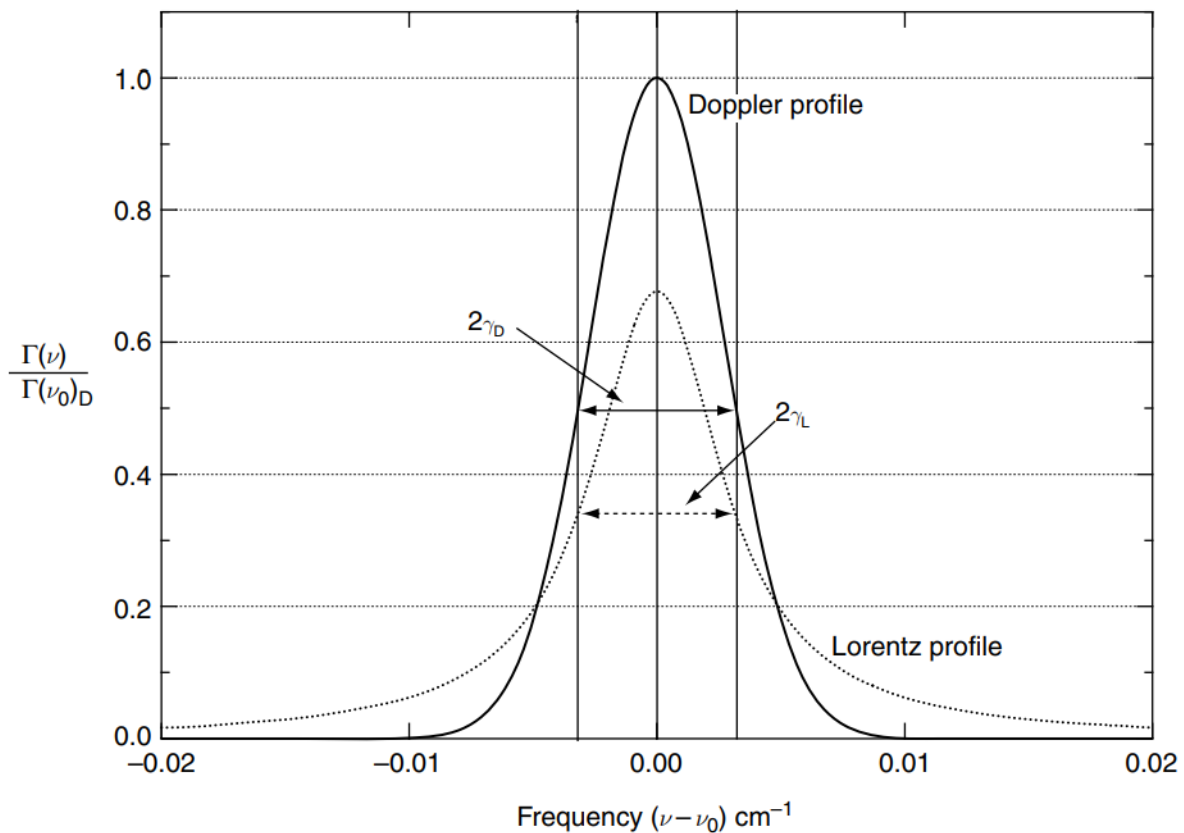
*Nota. Imagen extraída de Dufour and Breon, 2003.*

### 4.3 Líneas de Absorción

Cuando una sustancia es irradiada por luz, esta puede experimentar una interacción conocida como absorción estimulada, que sucede cuando la energía de ciertos fotones es absorbida por los átomos de dicha sustancia. Esto se debe a que dichos fotones en determinadas longitudes de onda poseen la energía necesaria para que los electrones experimenten transiciones electrónicas. Las líneas de absorción son la representación de los picos de absorción individuales a longitudes de ondas definidas que conforman el espectro de absorción, el cual se puede obtener al realizar mediciones de la absorción estimulada utilizando una fuente con un espectro de frecuencias lo suficientemente amplio.

Figura 6:

*Perfiles de ensanchamientos de línea normalizados y sus anchos a media altura.  $\gamma_D = \gamma_L$ .*



*Nota. Imagen extraída de Manahan, 2017.*

El espectro de absorción es una de las bases de la espectroscopia para el análisis cuantitativo de un gas usando la ley Beer-Lambert (Liu et al., 2015), debido a esto el conocimiento de la forma y dimensiones de la línea de absorción tiene una gran importancia, pues permite estudiar diversas características del gas a analizar (Xia et al., 2022) y aunque teóricamente se espera que estas se presentan como líneas verticales infinitamente finas, es decir, que posean distribución delta dirac, estas en realidad poseen un ancho finito, ocasionado por un efecto conocido como ensanchamiento o broadening, donde dichas transiciones se extienden alrededor de un rango finito de longitudes de onda, cuyo pico se encuentra en la longitud de onda central.

Existen tres tipos principales de ensanchamiento, los cuales son: Natural Broadening, Doppler Broadening y Lorentz Broadening, cada uno con su respectivo perfil de línea, de los cuales destacan los 2 últimos, debido a que son elementos de suma importancia para el cálculo de la concentración de CO<sub>2</sub> mediante la Ley de Beer-Lambert. Por lo mencionado anteriormente se aborda la explicación de cada tipo de ensanchamiento y se muestran los procedimientos extraídos de (Heard, 2008) para calcular los perfiles de estos últimos, los cuales se puede observar en la figura 6.

- **Ensanchamiento Natural (Natural Broadening):** Este tipo de ensanchamiento intrínseco de la línea de absorción se relaciona con el grado de tolerancia con el que se define la energía de los niveles atómicos. Dicho grado de tolerancia se explica mediante el principio de incertidumbre de Heisenberg que establece que no se pueden obtener los valores exactos de forma simultánea de la energía de transición de los electrones y el tiempo que estos se mantienen excitados. Este tipo de ensanchamiento resulta en un perfil Lorentziano.
- **Ensanchamiento Doppler (Doppler Broadening):** Este tipo de ensanchamiento se debe al movimiento térmico aleatorio de las partículas del gas que depende de la distribución de velocidades de dichos átomos, esta distribución de velocidades provoca que los fotones que a determinadas frecuencias no interactúan con los electrones, sean absorbidos por estos, debido al efecto doppler que resulta en la distorsión de la frecuencia de dichos fotones respecto a la velocidad de los electrones en movimiento. Estas nuevas interacciones producen un ensanchamiento de perfil de tipo Gaussiano influenciado por la distribución de velocidad.

La función de distribución del perfil de línea gaussiano se puede calcular como se muestra en la ecuación 1

$$\Gamma_D(v)[cm] = \frac{1}{\gamma_D} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp \left[ - \left( \frac{v - v_0}{\gamma_D} \right)^2 \ln 2 \right], \quad (1)$$

en la cual se tienen parámetros como la frecuencia de onda central  $v_0$ , el valor de frecuencia de onda de interés  $v$  y el valor de medio-ancho de Doppler  $\gamma_D$ , los tres expresados en  $cm^{-1}$ , donde el último depende de otros parámetros como la temperatura  $T$  en Kelvins y la masa molar de la molécula de interés  $M$  expresado en  $g/Mol$  como se observa en la ecuación 2:

$$\gamma_D[cm^{-1}] = 3.581 \times 10^{-7} v_0 \sqrt{\frac{T}{M}}. \quad (2)$$

La función general de distribución gaussiana mostrada en la ecuación 1 posee un valor integrado igual a 1, y como se observa en esta, el valor pico de la función de línea de Doppler, es decir su valor en la longitud central  $v_0$ , puede calcularse al simplificar el término exponencial resultando en la ecuación 3

$$\Gamma_D(v_0)[cm] = \frac{1}{\gamma_D} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}}. \quad (3)$$

Debido a que las bases de datos como HITRAN proveen intensidades de línea integradas  $S$ , es útil integrar la ecuación 1 sobre todas las frecuencias de la línea de absorción para así relacionar el valor pico del centro de la línea de absorción con el valor de la intensidad obtenido de la base de datos como se muestra en la ecuación 4

$$\Gamma_D(v_0)[cm] = \frac{\int \Gamma(v)}{\gamma_D} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} = \frac{0.4697}{\gamma_D} \int \Gamma(v). \quad (4)$$

- **Ensanchamiento por presión (Pressure Broadening):** Se produce debido a que los átomos, iones o moléculas de estudio se ven influenciadas por la presencia de átomos, iones o moléculas cercanos, lo cual perturba los niveles energéticos, causando así un ensanchamiento de la línea espectral en procesos de absorción y emisión. Este tipo de ensanchamiento recibe su nombre debido a que, en temperaturas constantes, el acercamiento entre átomos y moléculas aumenta con la presión, por lo cual el efecto de

otras partículas sobre los niveles energéticos también aumenta con la presión a la que se encuentre dicho gas. Esta interacción entre las partículas provoca un ensanchamiento de tipo lorentziano de la línea de absorción (Kitchin, 1995).

En el caso del ensanchamiento por presión o ensanchamiento de perfil lorentziano, la función de distribución está dada por la ecuación 5

$$\Gamma_L(v)[cm] = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{\gamma_L}{(v - v_0)^2 + \gamma_L^2} \right], \quad (5)$$

en la cual  $\gamma_L(T, P)$  hace referencia al valor de medio-ancho de Lorentz el cual puede calcularse como se muestra en:

$$\gamma_L(P, T)[cm^{-1}] = (\gamma_{air}(P - P_{self}) + \gamma_{self}P_{self}) \left( \frac{T_0}{T} \right)^n, \quad (6)$$

en esta expresión,  $P$  es la presión en atm,  $P_{self}$  es la presión parcial de la molécula,  $T_0$  es la temperatura de referencia que tiene valor de 296K y  $\gamma_{air}, \gamma_{self}$  [ $cm^{-1} atm^{-1}$ ] son los Half Width Half Maximum (HWHM) ensanchados por el aire y por la misma molécula, los cuales pueden encontrarse al igual que el exponente  $n$  en bases de datos sobre espectroscopia como HITRAN.

Al igual que con el pico de la función de distribución Gaussiana, el pico de la función Lorentziana puede relacionarse fácilmente con el valor integrado de la intensidad de línea, como se muestra en la ecuación 7

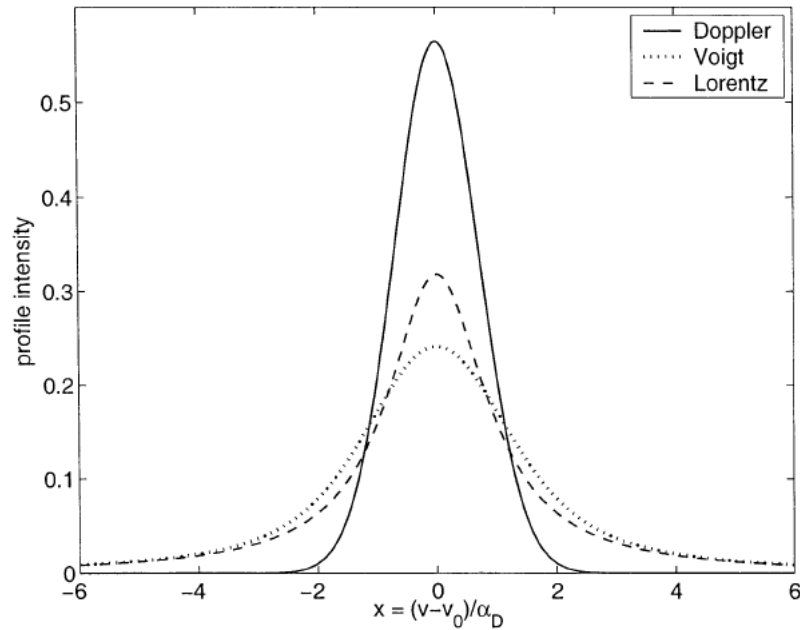
$$\Gamma_L(v_0)[cm] = \frac{1}{\pi\gamma_L} \int \Gamma(v). \quad (7)$$

Para la misión E3Tratos, se deben tener en cuenta el efecto de los 2 tipos de ensanchamiento anteriormente mencionados, pues los valores de presión y temperatura variarán durante el vuelo, por esto se hace uso del perfil Voigt, el cual, se adapta a las condiciones de estudio para el sensado de  $CO_2$  atmosférico al tener en cuenta la contribución a la forma de línea

general que producen los ensanchamientos de Doppler y Lorentz, este perfil se puede observar en la figura 7.

Figura 7:

*Perfil de Voigt resultante de la convolución entre el perfil de Lorentz y Doppler con el mismo valor de HWHM.*



*Nota: imagen extraída de Huang and Yung, 2004.*

El perfil Voigt es el resultado de la convolución entre la función de línea de Lorentz y de Doppler dada por:

$$\Gamma_V(v)[cm] = \Gamma_D(v_0) \left[ \frac{y}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-t^2}}{y^2 + (x-t)^2} dt \right], \quad (8)$$

se observan los parámetros  $x$ ,  $y$  y  $t$  los cuales dependen de otros parámetros que han sido utilizados para el cálculo de los perfiles de Doppler y Lorentz como se muestra en la ecuación 9.

$$x = \left( \frac{v - v_0}{\gamma_D} \right) \sqrt{\ln 2} \quad ; \quad y = \left( \frac{\gamma_L}{\gamma_D} \right) \sqrt{\ln 2} \quad ; \quad t = \left( \frac{\delta}{\gamma_D} \right) \sqrt{\ln 2}. \quad (9)$$

De forma algorítmica, el proceso de convolución se lleva a cabo dejando una de las funciones línea fija en un valor  $x$ , es decir, el proceso se hace para cada longitud de onda, mientras se desplaza la otra al variar el valor de  $\delta[cm^{-1}]$  sobre toda la función de línea, pues el parámetro  $\delta$  referencia la diferencia entre frecuencias de ambas funciones.

Una vez obtenido el perfil de línea se puede relacionar la intensidad de línea  $S(T)$  calculada mediante la ecuación 10

$$S(T)[cm/molec] = S(T_{ref}) \left[ \frac{Q(T_{ref})}{Q(T)} \frac{\exp(-c_2 E''/T)}{\exp(-c_2 E''/T_{ref})} \frac{1 - \exp(-c_2 v/T)}{1 - \exp(-c_2 v/T_{ref})} \right], \quad (10)$$

donde  $T$  es la temperatura medida en Kelvin,  $c_2 = 1.43880285[cmK]$  es la segunda constante de radiación de cuerpo negro,  $Q(T)$  es el valor de la suma de la partición interna total para la temperatura  $T$ ,  $Q(T_{ref})$  es la suma de la partición interna total para una temperatura de 296K,  $E''$  es la energía de estado inferior de la transición y  $S(T_{ref})$  es la intensidad de línea obtenida de HITRAN al igual que los 3 parámetros anteriores. Con esta intensidad de línea, se puede obtener la intensidad afectada por los fenómenos de ensanchamiento  $S(v) = \Gamma(v)S(T)[cm^2 molecule^{-1}]$ .

#### 4.4 Espectroscopia Láser de Diodo Sintonizable

Este proyecto se basa en la Espectroscopia Láser de Diodo Sintonizable (TDLS), la cual es una técnica donde se hace uso de un láser de longitud de onda ajustable, la cual varía en función de su temperatura de operación y su corriente, permitiendo determinar la absorbancia al realizar un barrido de potencia por la banda de absorción del gas.

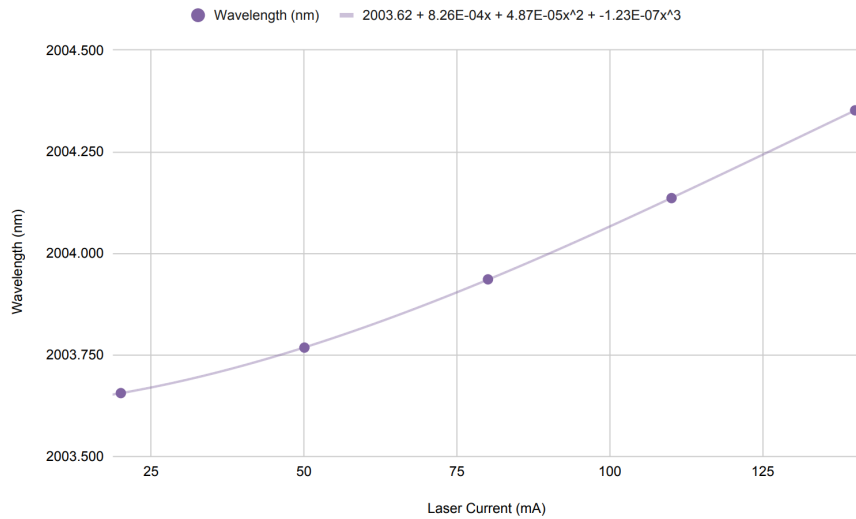
Un elemento fundamental para la elección del láser para TDLS es la longitud de onda central, debido a que esta definirá en que rango de longitud de onda se realizará el barrido, por lo tanto, esta debe elegirse teniendo en cuenta el espectro de absorción del gas a estudiar.

En el presente proyecto se hace uso de un láser de Ebana Photonics de referencia EP2004-0-DM-DX1-FA, cuya longitud de onda central es de 2004 nm, el cual posee un

barrido de longitud de onda entre 2003 y 2004 [nm] a una temperatura de operación fija como se puede observar en la figura 8 y una curva de potencia óptica al variar la corriente de polarización como se puede ver en la figura 9.

Figura 8:

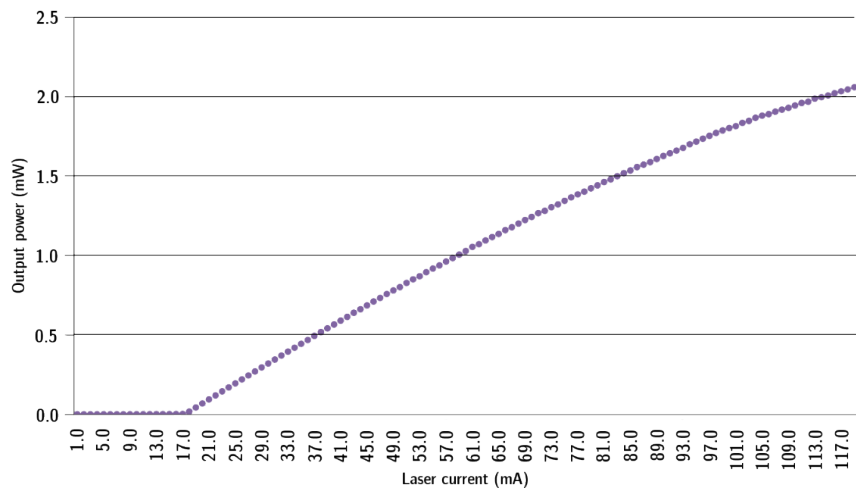
*Barrido de longitud de onda al cambiar la corriente de polarización.*



*Nota. Imagen obtenida de Eblana Photonics.*

Figura 9:

*Potencia de salida del láser al cambiar la corriente de polarización.*

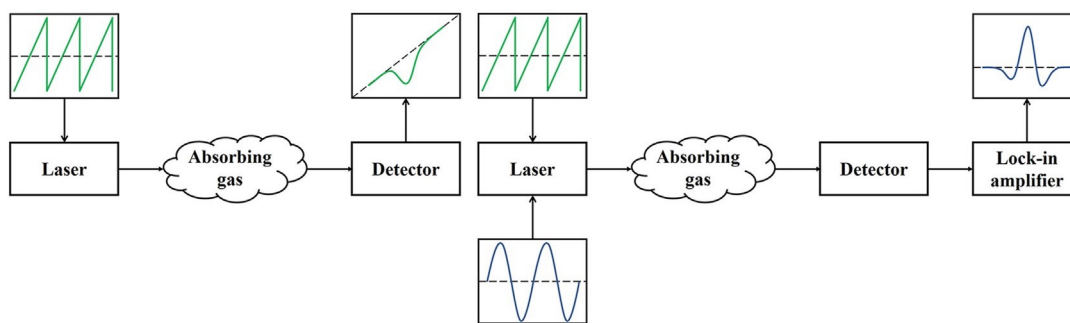


*Nota. Imagen obtenida de Eblana Photonics.*

Con la técnica de TDLS se podrá obtener de forma experimental la intensidad incidente del láser, con la cual se puede estimar el valor de absorción asociado a una longitud de onda determinada, con estos datos se puede calcular la concentración de CO<sub>2</sub> a partir de dos métodos: Wavelength Modulation Spectroscopy (WMS) y Direct Absorption como se puede observar en la figura 10).

Figura 10:

*Diagramas de las señales involucradas en los métodos de TDLS.*



(a) Diagrama representativo del método de absorción directa. (b) Diagrama representativo del método de WMS.

*Nota. Imágenes extraídas de Lin et al., 2022.*

En el método de WMS se aplica una señal de modulación AC a la corriente del diodo láser, de la señal recibida por el fotorreceptor se extrae el primer y segundo armónico para determinar los parámetros del gas. Este método confiere dos ventajas en comparación a la absorción directa, una mayor sensibilidad a las características espectrales y una mejor relación señal a ruido (SNR) (Jane and Ralph, 2012), esto se debe a que en los métodos de modulación se puede seleccionar una frecuencia de modulación que permita disminuir el ruido óptico que está presente al usar el método de absorción directa.

Independiente de lo mencionado con anterioridad, este método no es viable para ser utilizado en el presente proyecto con los instrumentos destinados para la Misión E3Tratos debido a que el láser seleccionado está anclado a un dispositivo denominado DX1-Module, el cual impide acceder a la señal interna de modulación, imposibilitando en uso de este método,

por lo tanto, se aplicara el método de absorción directa, el cual es un método bastante estudiado, efectivo y sencillo de aplicar en comparación al WMS (Jairo and Leandro, 2021).

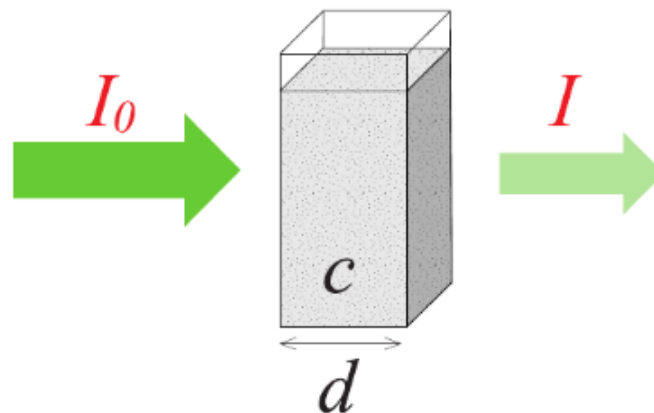
En el método de Absorción directa se usa la intensidad incidente recibida por el fotoreceptor y la intensidad transmitida por el láser con la finalidad de calcular la concentración de CO<sub>2</sub> mediante el uso de la ecuación de Beer-Lambert. Aunque este método es sensible al ruido, los efectos de estos sobre el cálculo de la concentración del gas pueden ser mitigados mediante la aplicación de filtros a la señal de absorción, realizando mediciones simultáneas para sensar ruido óptico y eliminarlo de la señal de interés o de forma más efectiva usando cámaras de inyección del gas de interés las cuales descontaminan aplicando gas de nitrógeno antes de cada barrido.

#### 4.5 Ley de Beer-Lambert

La ley de Beer-Lambert permite conocer la relación existente entre la intensidad incidente del láser con la intensidad transmitida y la concentración de los gases presentes en el medio, esto debido a que, como se explicó con anterioridad, la materia experimenta fenómenos de absorción al ser irradiada con luz.

Figura 11:

*Atenuación en la intensidad de luz debido al gas presente en el medio.*



*Nota. Imagen extraída de De Caro and Haller, 2015.*

La ley de Beer-Lambert define la relación anteriormente mencionada como

$$I(v) = I_0(v) \exp[-S(v) (PXN) l] = I_0 \exp[-A(v)], \quad (11)$$

donde:

- $I(v)$  = Intensidad de luz recibida o incidente (después del medio) [ $\mathbf{W}$ ].
- $I_0(v)$  = Intensidad de luz emitida o transmitida (antes del medio) [ $\mathbf{W}$ ].
- $P$  = Presión [ $\mathbf{atm}$ ].
- $X$  = Razón de mezcla de volumen de muestra.
- $N$  = Densidad del gas en el volumen de muestreo. [ $\mathbf{molecules * cm^{-3} * atm^{-1}}$ ]
- $l$  = Distancia recorrida por el haz de luz [ $\mathbf{cm}$ ].
- $A(v)$  = Absorbancia.

En la ecuación anterior, la intensidad de línea espectral  $S(v)$  hace referencia a la intensidad calculada por medio de la relación entre la intensidad de línea y el perfil de línea explicados en el final de la sección 4.3 y la razón de mezcla de volumen de muestra  $X$  es equivalente a la concentración de  $CO_2$  en partes por millón  $C$  dividido por un factor de  $10^6$ .

Observando la ecuación 11 podemos determinar que el valor de la absorbancia  $A(v)$  puede expresarse como

$$A(v) = -\ln \frac{I(v)}{I_0(v)}. \quad (12)$$

Esta Ley de Beer-Lambert se puede aplicar de dos formas distintas:

- Primer método: Intensidades integradas sobre la función de absorbancia, este método utiliza la integral de  $A(v)$  sobre todas las frecuencias en conjunto con la intensidad de

línea  $S(T)$  donde a partir de la ecuación 11 de la ley de Beer-Lambert la expresión para el cálculo de la concentración  $C$  de un gas en partes por millón se establece como:

$$C[ppm] = \frac{\int A(v)}{S(T)PNl} * 10^6, \quad (13)$$

al utilizar la integral de la absorbancia es bastante sensible al ruido presente en  $A(v)$  en casos en que la absorbancia no posea una gran diferencia de valor respecto al ruido medido, sin embargo, en señales limpias es más preciso que el método alternativo.

- Segundo método: Análisis del centro de la línea el cual utiliza la absorbancia en el centro de la línea  $A(v_0)$  y la intensidad de línea espectral en el centro de la línea que se calcula como:

$$S(v_0) = \Gamma(v_0)S(T), \quad (14)$$

esto se combina con la ley de Beer-Lambert dando como resultado la expresión:

$$C[ppm] = \frac{A(v_0)}{S(v_0)PNl} * 10^6. \quad (15)$$

Este método posee la ventaja de tener una mayor SNR al aplicarse sobre el pico de absorbancia, sin embargo, como utiliza el perfil de Voigt, el cual es una aproximación, para valores de presión al rededor de los 10 torr su precisión se ve disminuida.

Debido a lo explicado anteriormente, en el presente proyecto se trabaja la ecuación 15 en el valor fijo de la frecuencia central  $v_0$  pues las pruebas se harán en el laboratorio y a presiones mucho mayores a los 10 torr.

## 5 Sistemas De Medición De CO<sub>2</sub>

Comercialmente y en la literatura se tienen diferentes métodos para la medición de concentraciones de dióxido de carbono, para validar el correcto funcionamiento del sensor a implementar se requiere comparar los resultados de este con otros sensores, esto hace que se requiera un análisis de las diferentes opciones disponibles, centrándose principalmente en que este método sea confiable y no intrusivo para evitar alteraciones en las diferentes mediciones.

### 5.1 Sistemas No Ópticos

La base fundamental de los sistemas no ópticos son las reacciones químicas, diferenciándose entre si por los elementos que las componen, de forma general se pueden englobar todos estos sistemas en uno solo.

#### 5.1.1 Sensores De CO<sub>2</sub> Electroquímicos

Esta clase de sensores se basan en reacciones químicas que ocurren cuando el dióxido de carbono entra en contacto con el sensor, estas varían dependiendo de la reacción utilizada. El proceso genera cambios en las propiedades eléctricas del dispositivo, dichas alteraciones son medidas y se relacionan con la concentración de CO<sub>2</sub> presente. Sin embargo, este tipo de sensores poseen múltiples desventajas como:

- Baja precisión en comparación a otros métodos.
- Las lecturas se ven afectadas por la presencia de otros gases en el ambiente.
- Poseen un tiempo de uso con una baja duración.

### 5.2 Sistemas Ópticos

Los sistemas ópticos son los más confiables, pues se pueden establecer a una longitud de onda fija en la que otros gases no afectan las lecturas debido a que se definen rangos de

longitud de onda para determinado gas, debido a esta fiabilidad se elige este tipo de sistema para el sensado que se desea implementar.

### ***5.2.1 Sensores De CO<sub>2</sub> Surface Plasmon Resonance (SPR)***

Los sensores SPR se basan en la interacción de nano materiales y luz incidente a un ángulo específico, esta luz permite generar oscilaciones de electrones conocidas como Surface Plasmons en la interfaz entre 2 medios. Para medir los cambios en la concentración de CO<sub>2</sub> se monitorean las variaciones en el índice de refracción efectiva del nano material y en el ángulo de SPR.

### ***5.2.2 Sensores De CO<sub>2</sub> Foto Acústicos***

Estos se basan en el efecto foto acústico en el cual se forman ondas acústicas en medios gaseosos debido a la absorción de fotones. Cuando se usa una fuente IR modulada en el tiempo, dichas ondas acústicas se pueden medir como ondas de presión moduladas en este mismo dominio, según la ley de los gases ideales dicho cambio de presión genera un aumento de temperatura el cual es causado por la absorbanza de IR del CO<sub>2</sub>, de esta forma se puede hallar la relación entre cantidad de CO<sub>2</sub> y la amplitud de la señal de presión.

### ***5.2.3 Sensores De CO<sub>2</sub> Non-Dispersive Infrared (NDIR)***

Estos sensores están basados en la espectroscopia láser, los cuales aprovechando la absorbanza del gas permiten definir una longitud de onda en la cual otros gases no afecten significativamente las lecturas. Se utiliza un emisor de luz infrarroja y un sensor receptor, los tipos de sensores de estas ramas varían según el emisor y el sensor usado. Se obtiene la cantidad de CO<sub>2</sub> medido usando la ley de Beer-Lambert relacionando la intensidad medida, la intensidad de salida del emisor, el coeficiente de absorción y la concentración del gas.

El sensor T6713 de Telaire el cual es del tipo NDIR, se elige para poder comprobar el funcionamiento del sensor planteado en este proyecto por medio de comparación, al ser

un método no intrusivo y de tamaño reducido, este es ideal para la validación del sensor implementado, pues se puede realizar la medición en el mismo instante sin afectar la medida.

## 6 Sistema de Sensado de CO<sub>2</sub> Propuesto

El sensor de concentración de CO<sub>2</sub>, el cual posee un diseño propuesto en trabajos de investigación precedentes a este, puede definirse como un sensor basado en espectroscopia láser orientado en el método de absorción directa, cuyo eje fundamental es el módulo controlador DX1 del láser EP2004-0-DM-DX1-FA de Eblana Photonics, alrededor del cual se plantearon todos los subsistemas con los cuales se busca la correcta medición de la concentración del gas.

### 6.1 Requerimientos del Sistema

Para el correcto funcionamiento del sensor planteado, se definen una serie de requerimientos de operación de hardware y software que permiten la constitución de un modelo funcional con una arquitectura y subsistemas definidos.

#### 6.1.1 *Requerimientos de Hardware*

Teniendo presente lo establecido en el **Planteamiento de la Misión**, se tienen 2 requerimientos, los de prueba piloto en tierra y los de vuelo para la misión.

Para la validación en tierra, al ser necesario el uso del sensor T6713, se pueden establecer los mismos requisitos del sensor comercial en caso de hacer una validación en todas las condiciones posibles, siendo así los requerimientos los siguientes:

1. Rango de operación térmica entre -10[°C] y 60[°C].
2. Capacidad de operar en presiones atmosféricas de nivel de suelo.
3. Rango de operación entre 0 y 95% de humedad relativa.
4. Robustez mecánica suficiente para ser transportado entre diferentes localizaciones.
5. Poseer la capacidad de ser transportable entre localizaciones sin necesidad de ajustar nuevamente los elementos.

En el caso del vuelo, la carga útil se verá sometida a bajas temperaturas y bajas presiones, por lo tanto, se requiere el uso de componentes que sean aptos para el balonismo y que funcionen bajo dichas condiciones en la atmósfera y la estratosfera baja. A partir de lo anterior se establecen los siguientes requerimientos de hardware:

1. Rango de operación térmica mínimo entre  $-50[^\circ\text{C}]$  y  $60[^\circ\text{C}]$ .
2. Rango de operación de presión mínimo entre  $0[\text{atm}]$  y  $1[\text{atm}]$ .
3. Poseer la capacidad de conectarse mecánicamente a una superficie.
4. Alta robustez mecánica capaz de resistir turbulencias.
5. Operar por medio de un sistema de alimentación de batería.

### ***6.1.2 Requerimientos de Software***

En el apartado del software se requiere desarrollar una tecnología que le permita al sistema llevar a cabo las siguientes actividades:

1. Operar en modo manual (pruebas en tierra) y modo automático (en vuelo).
2. Permitir la manipulación de los instantes de medición (pruebas en laboratorio).
3. Ejecutar órdenes de lectura y escritura en diversos protocolos de comunicación a gran velocidad.
4. Almacenar datos a alta velocidad en una memoria micro-SD.
5. Generar diferentes archivos de texto para diferenciar fácilmente las diferentes pruebas y lanzamientos realizados.
6. Comunicarse con una Raspberry Pi encargada del envío de datos a la estación terrena.

## 6.2 Simulación Del Sistema De Sensado De CO<sub>2</sub>

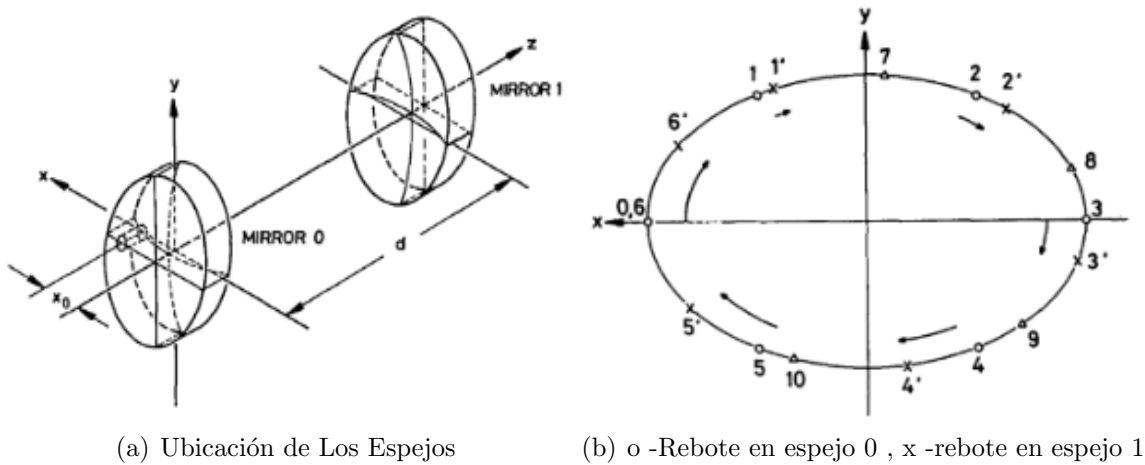
Con el fin de realizar un montaje y un análisis correcto se realiza la simulación de los rebotes y el camino óptico a obtener en la celda de Herriott, además de replicar los resultados obtenidos en el estado del arte basándose en la técnica de TDLS y realizar una simulación de las mediciones que se esperan observar en el laboratorio.

### 6.2.1 Simulación del Camino Óptico en la Celda de Herriott

Durante el proceso de diseño del montaje, se plantea hacer uso de la celda de Herriott con el fin de extender la distancia óptica del láser realizando un barrido de varios metros en un espacio reducido como lo es la góndola diseñada para la misión de E3TRATOS.

Figura 12:

*Arreglos de espejos para la celda de Herriott*



(a) Ubicación de Los Espejos

(b) o -Rebote en espejo 0 , x -rebote en espejo 1

*Nota. Imagenes extraídas de Altmann et al., 1981.*

El uso de la celda se basa en que cuando un haz de luz ingresa por la cavidad de la celda de Herriott, este rebota en múltiples puntos de ambos espejos con una distancia angular entre sí de  $\theta$  grados, completando un barrido entero de  $2\pi$  al finalizar todos los rebotes, esto se traduce en que el valor de distancia angular está definido por el número de rebotes que se desee realizar, y que en el último rebote se recorre toda circunferencia, haciendo así que dicho haz de luz salga por la misma cavidad por la que ingresó.

El número de rebotes  $N$  se puede expresar como una función dependiente del número de vueltas alrededor de la elipse  $j = 1, 2, 3, \dots$ ,

$$N = 2(2j + 1), \quad (16)$$

y la distancia entre los espejos  $\mathbf{d}$  está dada por la ecuación 17 (siendo  $\mathbf{f}$  la distancia focal de los espejos)

$$\text{Cos}(\theta) = 1 - \left( \frac{d}{2f} \right), \quad (17)$$

donde  $\theta$  se define como

$$\theta = \frac{2j\pi}{N} = \frac{N - 2}{2N}\pi, \quad (18)$$

con lo anterior, la distancia correspondiente de los espejos para un camino cerrado de  $N$  rebotes está dado por:

$$d_N = 2f \left( 1 - \text{cos} \left( \frac{N - 2}{2N}\pi \right) \right). \quad (19)$$

Con las ecuaciones mostradas con anterioridad se realiza el cálculo de la distancia entre los espejos con diferentes cantidades de rebotes utilizando una distancia focal de 100 mm la cual pertenece a los espejos de referencia CM254-100EH3-M02-01 y CM254-100-M02-01 de THORLABS.

Tabla 1:

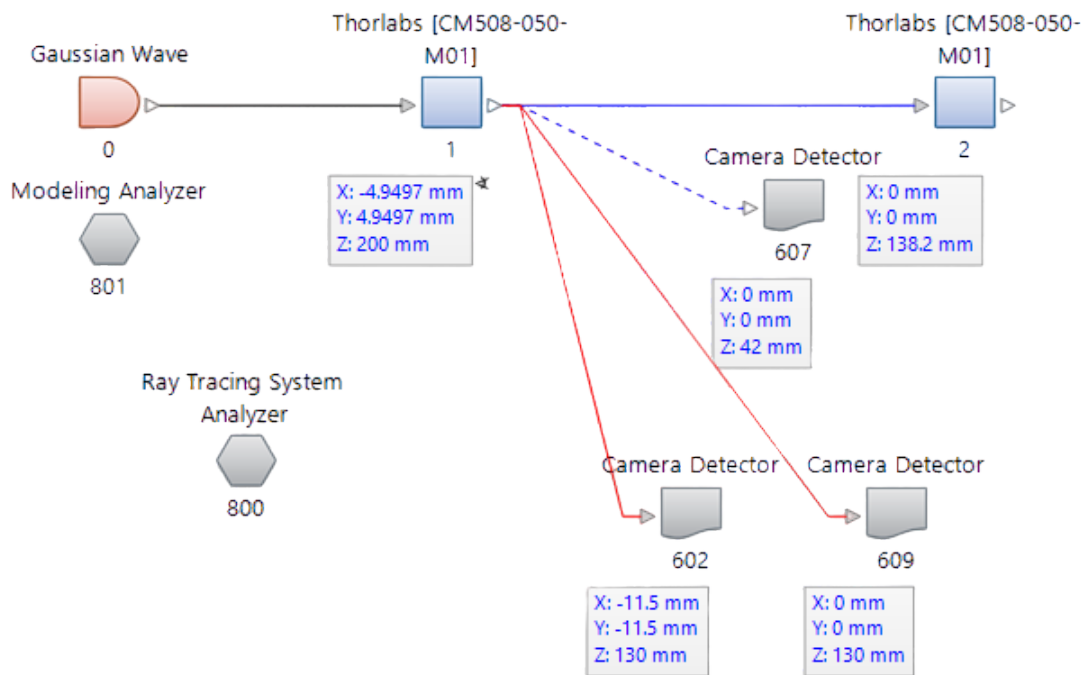
*Distancia entre los espejos requerida para diversas cantidades de rebotes.*

N	Distancia entre los espejos [mm]
6	100
10	138.1966011
14	155.4958132

Con el fin de comprobar los cálculos anteriores, se realiza una simulación en el software de Virtual Lab Fusión 2021 versión trial, con el fin de observar la cantidad de rebotes que se producirían con una distancia entre espejos de 138.2 mm.

Figura 13:

*Esquemático con los parámetros de la simulación de la celda de Herriott en el software de Virtual Lab Fusión 2021 versión trial.*

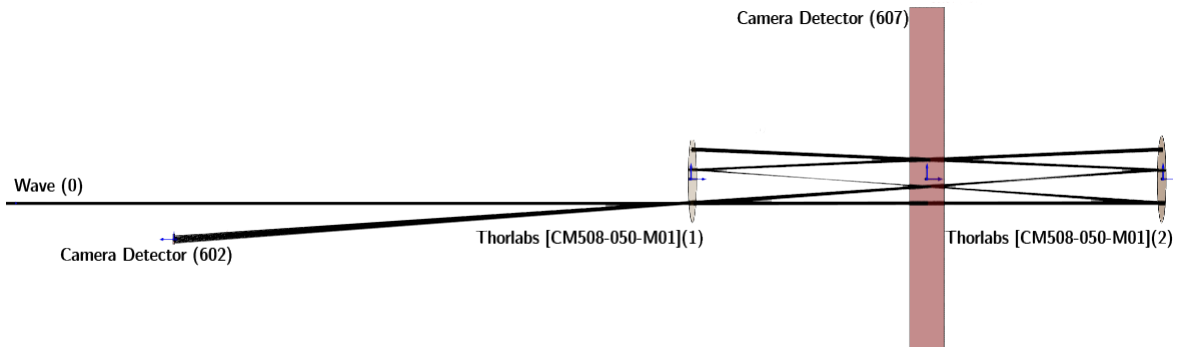


Para realizar dicha simulación se modifican los parámetros del ejemplo demo, tales como la distancia focal, ubicación de la apertura respecto al centro del espejo, y tamaño de los espejos, los parámetros de la distancia entre espejos y la distancia de la fuente gaussiana, dando como resultado la simulación de la figura 14, donde se observa que efectivamente se

presentan 10 rebotes con dicha distancia.

Figura 14:

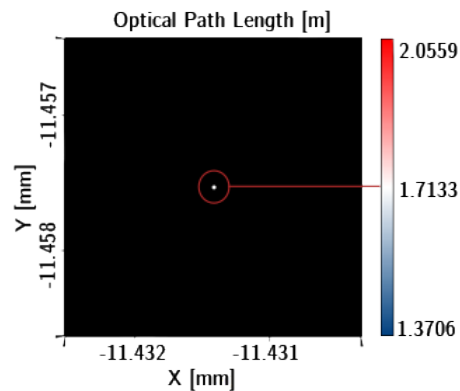
*Simulación de la celda de Herriott con 10 rebotes en el software de Virtual Lab Fusión 2021 versión trial.*



El recorrido óptico total del láser de la simulación de la celda de Herriott es de 1713.3 mm como se puede observar en la figura 21, dicho recorrido óptico incluye la distancia entre la salida láser y el espejo con apertura que es de 200 mm, la distancia entre el espejo con apertura y el fotorreceptor que es de 130 mm y el recorrido del láser dentro de la celda de Herriott.

Figura 15:

*Longitud del camino óptico obtenido de la simulación de la celda de Herriott con 10 rebotes.*



Con el fin de comprobar el valor de recorrido óptico total obtenido a partir de la simulación, se realiza el cálculo de este por medio de la ecuación 20

$$L = Nd + \frac{Nx_0^2}{4f - d}, \quad (20)$$

en la cual el parámetro  $x_0$  hace referencia a la distancia entre el centro del espejo al centro de la apertura de entrada.

Sustituyendo los parámetros por los utilizados en la simulación se obtiene el siguiente valor de recorrido óptico:

Tabla 2:

*Valor de los parámetros utilizados para calcular la distancia óptica recorrida.*

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
$N$	10 [rebotes]
$d$	138.2 [mm]
$x_0$	7 [mm]
$f$	100 [mm]
$L$	1383.871658 [mm]

Sumando las distancias externas a la celda mencionadas anteriormente, se obtiene un recorrido óptico de 1713.871658 mm el cual es un valor cercano al obtenido a partir del software de simulación.

### ***6.2.2 Simulación de Metodología del Estado del Arte***

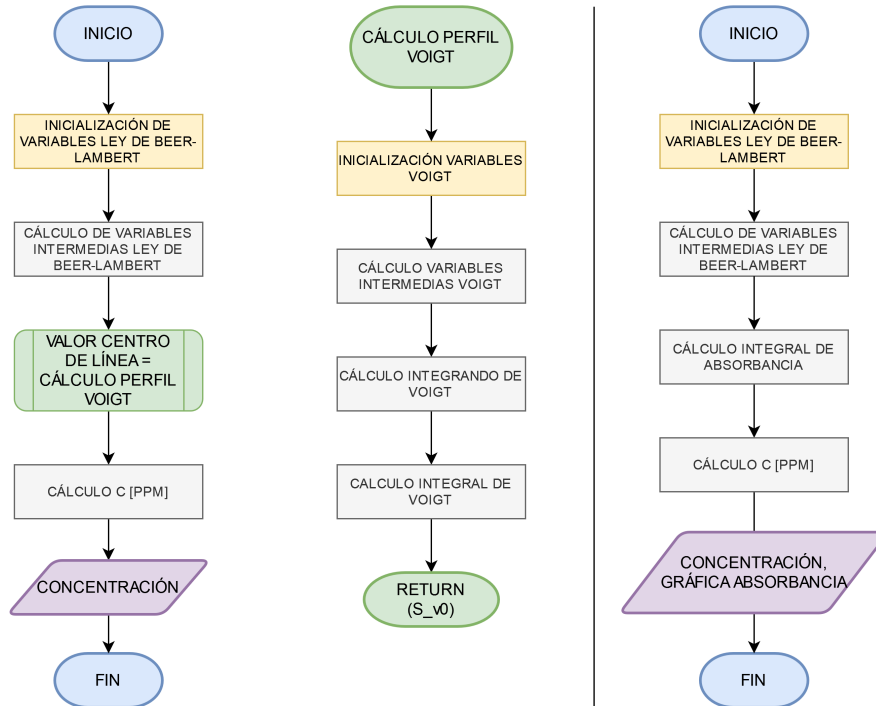
Durante el desarrollo del trabajo de grado se replican los resultados de otros proyectos de investigación basados en la técnica de absorción directa para validar la correcta aplicación del algoritmo de procesamiento de las mediciones, para esto se trabaja con las ecuaciones mencionadas en las secciones 4.3 y 4.5, y se obtiene la concentración utilizando los dos métodos de análisis de la sección 4.5 de esta forma se presenta el diagrama de flujo que se utiliza para obtener la concentración en partes por millón en la figura 16.

Figura 16:

Diagramas de flujo para el cálculo de concentración del estado del arte.

a) Análisis en el centro de línea

b) Absorbancia integrada



Aplicando dicho algoritmo se presentan los resultados de dos documentos de investigación, los cuales se eligen debido a su naturaleza de aplicar la técnica TDLS in situ con el camino que recorre el láser abierto al ambiente, pues este tipo de implementación es la que se realiza en el proyecto, estos documentos son:

- **Measurement of Atmospheric  $CO_2$  Column Concentrations Based on Open-Path TDLAS**

Este documento es elegido debido a que sus mediciones poseen la particularidad de haber sido realizadas en tierra, a temperaturas y presiones cercanas a las encontradas al nivel del mar, pues son situaciones similares a las que se tienen en las pruebas en laboratorio, para realizar los cálculos se extraen los datos presentados en la tabla 3. En el documento se presenta un rango de temperaturas, sin embargo, al realizar el cálculo de la concentración, esta variación de temperatura no tuvo un efecto significativo sobre

el resultado obtenido.

Tabla 3:

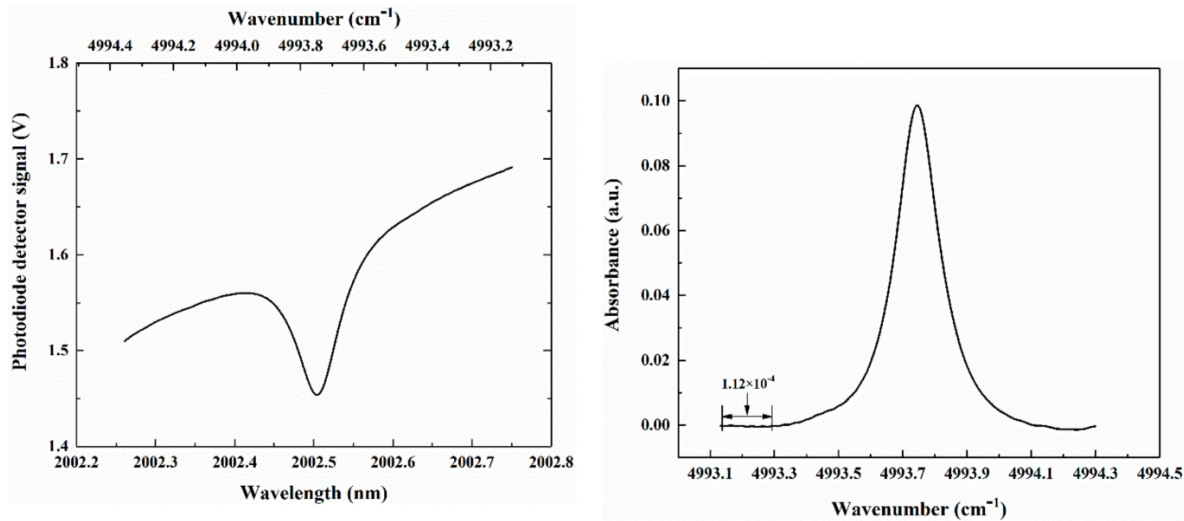
*Datos de variables iniciales necesarios para el cálculo de la concentración.*

Parámetro	Valor	Unidad
$M$ - Peso molar	43.989	g/mol
$P$ - Presión	100.1	kPa
$T$ - Temperatura	30.5	°C
$L$ - Longitud del camino	2100	cm
$V_0$ - Número de onda central	4993.74	$cm^{-1}$
$A(V_0)$ - Pico de absorbancia	1.05E-01	-
$C$ - Concentración esperada	458.89	ppm

*Nota. Valores extraídos de Xin et al., 2021.*

Figura 17:

*Curvas de señal recibida y absorbancia extraídas del documento.*



*Nota. Curvas extraídas de Xin et al., 2021.*

Para realizar el cálculo de la concentración, otros parámetros como la intensidad de línea  $S = 1.15E-21$  [cm/mol], el valor  $\gamma_{air} = 0.0712$  [ $cm^{-1} atm^{-1}$ ] y el valor  $\gamma_{self} = 0.095$  [ $cm^{-1} atm^{-1}$ ] se obtienen mediante la base de datos de HITRAN utilizando el número de onda central.

El dato de la absorbancia, se toma de la figura 17. Esta curva se replica aplicando un grid encima de esta y se realiza un registro de los valores en una hoja de cálculo, una vez se tienen estos datos se calcula la integral de la absorbancia por medio del método del trapecio, además de esto se obtiene el máximo de los datos el cual se corresponde al pico de absorbancia.

El valor de concentración obtenido al realizar los cálculos es de  $C = 435.26[ppm]$  para el método del análisis en el centro de línea y de  $C = 433.89[ppm]$  para el método de la integral de la absorbancia.

- **In situ sensing of the middle atmosphere with balloonborne near-infrared laser diodes**

En este proyecto se realizan las mediciones in situ durante el ascenso y descenso de una góndola en la estratosfera media durante el año 2002, lo cual permite tener cierta intuición de como serán los resultados en etapas futuras del proyecto donde se ponga en vuelo el sensor. Se extraen los datos que se observan en la tabla 5, además del valor de la intensidad de línea  $S = 1.75E-23$  [cm/mol],  $\gamma_{air} = 0.074$  [ $cm^{-1} atm^{-1}$ ] y  $\gamma_{self}=0.1$  [ $cm^{-1} atm^{-1}$ ] obtenidos de HITRAN.

Tabla 4:

*Datos de variables iniciales necesarios para el cálculo de la concentración.*

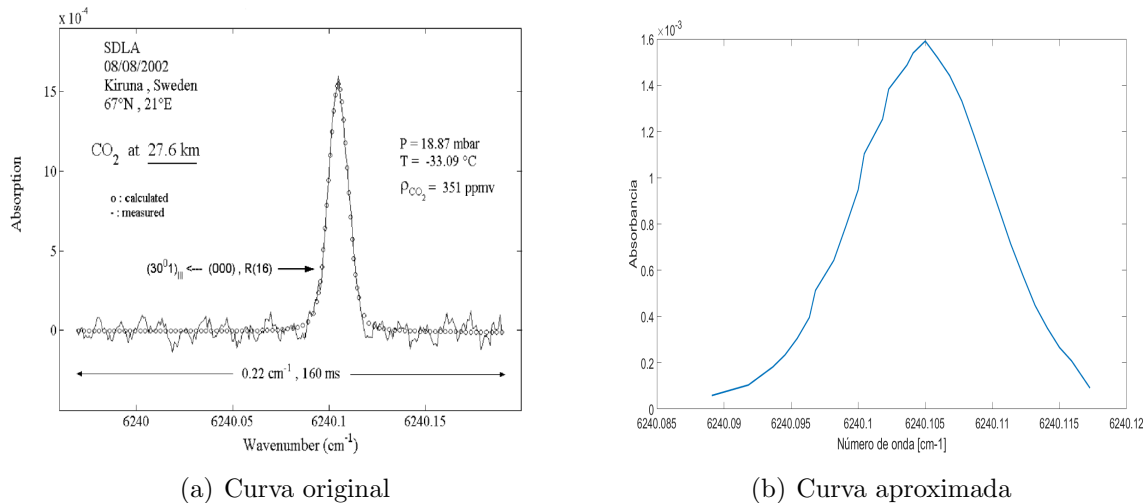
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
$M$ - Peso molar	43.989	g/mol
$P$ - Presión	18.87	mbar
$T$ - Temperatura	-33.09	°C
$L$ - Longitud del camino	5600	cm
$\lambda$ - Longitud de onda	1602	nm
$V_0$ - Número de onda	6240.1	$cm^{-1}$
$A(V_0)$ - Pico de absorbancia	15E-04	-
$C$ - Concentración esperada	351	ppm

*Nota. Valores extraídos de Durrý et al., 2004.*

El valor del pico de absorción y la integral de la misma se obtiene analizando los datos de la figura 18

Figura 18:

*Curvas de absorción extraída documento y curva aproximada mediante el uso de una hoja de cálculo.*



*Nota. Curva original extraída de Durrý et al., 2004.*

Al utilizar estos datos se aplica el algoritmo de la figura 16 mediante el cual se obtiene un valor de concentración de  $C = 352.964[ppm]$  para el método de análisis en el centro de línea y de  $C = 342.70[ppm]$  para el método de la absorción integrada.

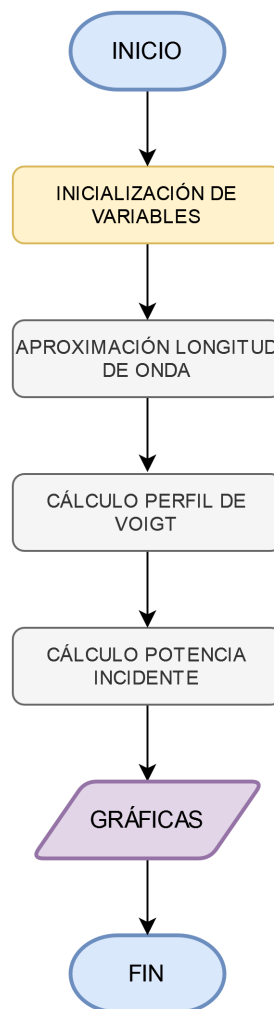
Los resultados obtenidos al analizar los dos documentos son similares a los presentados en el estado del arte, con unas variaciones producto de las aproximaciones realizadas debido a la falta de un acceso completo y exacto a los datos, de esta forma se logra concluir que el método de análisis utilizado es válido para ser aplicado en mediciones reales.

### 6.2.3 Simulación Empleando Parámetros Reales de Laboratorio

Las simulaciones iniciales para las pruebas de laboratorio se realizan teniendo como base la curva potencia entregada por el fabricante, y la distancia recorrida por el haz de luz en la celda de Herriott obtenida en la sección 6.2.1, con el fin de tener una idea del resultado a esperar al realizar las mediciones, para esto se aplica el algoritmo de la figura 19 que se explica a continuación.

Figura 19:

Diagrama de flujo del algoritmo empleado para realizar la simulación del sistema en condiciones de laboratorio.



- **Inicialización de variables:** En esta sección se registran los valores de la tabla 5

Tabla 5:

*Datos de variables iniciales utilizados en el algoritmo.*

Parámetro	Valor	Unidad
$I_0$ - Potencia emitida	0 - 2.062	mW
$S$ - Intensidad de línea	1.32E-21	cm/mol
$\gamma_{air}$ - HWHM ensanchado por aire	0.074	$cm^{-1} atm^{-1}$
$\gamma_{self}$ - HWHM autoensanchado	0.1	$cm^{-1} atm^{-1}$
$M$ - Peso molar	43.989	g/mol
$P$ - Presión	0.89	atm
$T$ - Temperatura	23.5	°C
$L$ - Longitud del camino	1713.3	cm
$C$ - Concentración de $CO_2$	2000	ppm

La potencia emitida se obtiene de la curva entregada por el fabricante de la figura 9, debido a que el láser opera al rededor de los 2004 nm se obtiene que el valor del número de onda central es  $V_0 = 4989.971 \text{ cm}^{-1}$  para el cual se obtienen su valor de intensidad de línea y de coeficientes de ensanchamiento de la base de datos de HITRAN, se asume una temperatura de aproximadamente 23.5 °C y una presión de 0.89 atm, pues son los valores que usualmente se tienen en el laboratorio, el valor de peso molar es conocido al ser propio del  $CO_2$ , la longitud del camino es conocida de la sección 6.3.1, y el valor de concentración se toma de una medición realizada con un sensor de  $CO_2$  en el laboratorio.

- **Aproximación de longitud de onda:**

Debido a la limitada información disponible sobre el láser, los rangos de valores de la longitud de onda se obtienen al realizar un ajuste polinómico de los datos presentados en la figura 8, el valor de los números de onda se obtiene mediante la relación  $V = 1 * 10^7 / \lambda$ .

Tabla 6:

*Rango de longitud de onda y número de onda realizado por el barrido del láser.*

Parámetro	Valor	Unidad
$\lambda$ - Longitud de onda	2003.622 - 2004.208	nm
$V_0$ - Número de onda	4989.503 - 4990.962	$cm^{-1}$

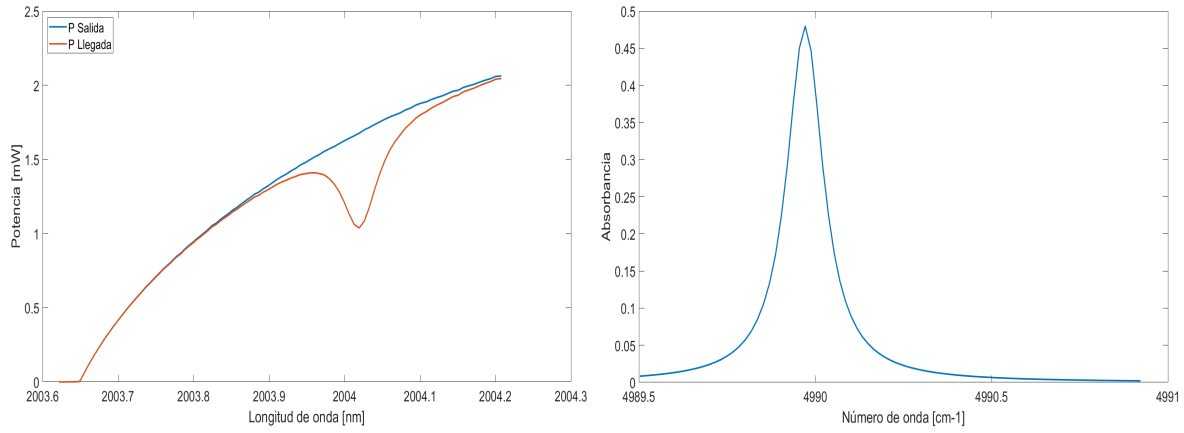
- **Cálculo perfil de Voigt** En esta etapa se calculan las variables necesarias para el perfil de Voigt, tales como  $\gamma_D$ ,  $\gamma_L$ ,  $S(T)$ ,  $\delta$  y se realiza el cálculo del perfil de Voigt, a diferencia de los algoritmos anteriores se calcula el valor de  $S(V)$  para todos los números de onda del barrido del láser, donde es importante aclarar que anteriormente el cálculo solo era necesario realizarlo para  $V = V_0$ .
- **Cálculo potencia incidente y gráficas** En la etapa final se calcula la potencia incidente al receptor  $I$  mediante la ecuación 11 además de esto se generan las gráficas de potencia de salida y potencia incidente contra número de onda y la gráfica de la absorbancia.

Al ejecutar el algoritmo en MATLAB se obtienen las curvas de la figura 20, en la curva (a) se tienen en azul la potencia de salida del láser  $I_0$  y en naranja la curva de potencia llegada al receptor  $I$ , en el laboratorio se espera que los valores de potencia de llegada al fotorreceptor sean menores debido a efectos como atenuación de potencia debido a scattering, presencia de  $H_2O$  o difracción, sin embargo, las formas de las gráficas se espera que se mantengan, permitiendo así a simple vista saber si se está obteniendo un resultado acorde a lo esperado.

Debido a que la curva entregada por el fabricante estaba en unidades de longitud de onda se muestra el eje horizontal de la misma manera para más claridad en las gráficas de potencia, sin embargo, los cálculos se realizan en unidades de número de onda, por esto en la figura (b) se muestra la curva de absorbancia que se espera obtener con un eje horizontal en unidades de  $cm^{-1}$ .

Figura 20:

*Curvas de potencias y absorbancia obtenidas en la simulación en condiciones de laboratorio.*



(a) Curva de potencias vs longitud de onda

(b) Curva absorbancia vs número de onda

## 7 Módulos Del Sistema

El sistema completo de detección de  $CO_2$  a usar en el laboratorio se obtiene al integrar múltiples componentes que interactúan entre sí para la correcta recolección de datos, estos elementos se agrupan en diferentes etapas las cuales son: etapa de potencia, módulo electro-óptico, etapa de sensado, procesamiento de señal y almacenamiento en memoria, además de la base estructural donde se implementará el sistema completo.

Para llegar al objetivo de tener un sistema integrado final primero es necesario realizar un análisis de:

- Los elementos conseguidos en proyectos anteriores Jairo and Leandro (2021), destacando sus características más importantes para la implementación y los elementos añadidos en este proyecto con una descripción más detallada.
- El diagnóstico del correcto funcionamiento individual de los elementos, realizado en un principio mediante un Arduino para posteriormente efectuarlo con el microcontrolador destinado a ser usado en el proyecto final, facilitando la identificación de posibles problemas y de esta forma poder corregirlos o actuar acordeamente según corresponda.

- El tipo de comunicación que se realiza entre elementos electrónicos, pues el protocolo empleado limita los pines a usar.

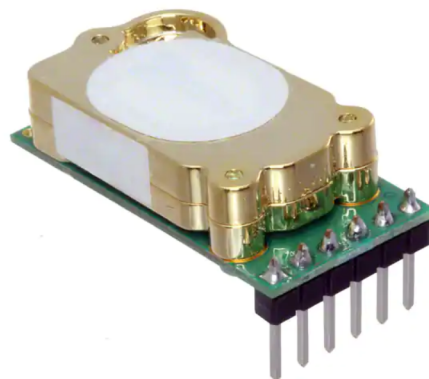
Para realizar el diagnóstico se parte del uso de un Arduino UNO como unidad central debido a la familiaridad que se tiene con el uso de este microcontrolador, además del conocimiento de que el mismo funciona de forma apropiada, se estudia la correcta comunicación con cada elemento. Las conexiones se hacen por medio de una protoboard de prueba, se analiza si la respuesta obtenida es la esperada y posteriormente se reemplaza el Arduino con el microcontrolador del proyecto.

### 7.1 Etapa de Sensado - Sensor de CO<sub>2</sub> T6713

La etapa de sensado se encuentra compuesta por todos los dispositivos que permiten medir las variables requeridas para calcular las concentraciones de CO<sub>2</sub> mediante la ley de Beer-Lambert, además de incluir el sensor de CO<sub>2</sub> comercial necesario para las pruebas en laboratorio.

Figura 21:

*Módulo CO<sub>2</sub> Sensor T6713*



*Nota. Imagen del sensor fabricado por TELAIRE.*

El sensor T6713 de Amphenol, como fue explicado anteriormente, es un sensor de tipo NDIR de  $CO_2$  que permite medir la calidad del aire en un rango de 400 a 2000 ppm con una precisión de  $\pm 25$  ppm  $\pm 3\%$  de la lectura. Fue seleccionado con el fin de comparar los valores entregados por este sensor con respecto a la solución implementada en el presente proyecto de investigación para validar el correcto funcionamiento de la misma.

Observando la tabla de pines extraída del datasheet del dispositivo, se observa que el presente sensor puede comunicarse por I2C y UART, por lo cual se usan los pines 1 y 2 para comunicar dicho sensor con la tarjeta mediante el protocolo de I2C el cual se selecciona conectando el pin 6 a GDN.

Tabla 7:

*Pines de conexión del sensor T6713*

<b>Pines</b>	<b>Función/Función Alterna</b>
1	TX(UART)/I2C SDA
2	RX(UART)/I2C SCL
3	V+
4	V-/GND
5	PWM OUTPUT
6	Select interface

*Nota: Datos extraídos del datasheet del sensor T6713.*

Para verificar el funcionamiento de este sensor se conecta el sistema de acuerdo con lo planteado en la figura 22 y se ejecuta un código de Arduino ofrecido por Amphenol. Las mediciones para este sensor se hacen al aire libre, pues la concentración en un espacio cerrado es desconocido, sin embargo, en un espacio abierto se tiene un valor aproximado.

Figura 22:

Conexiones del sensor T6713 realizadas para el diagnóstico del correcto funcionamiento del mismo.

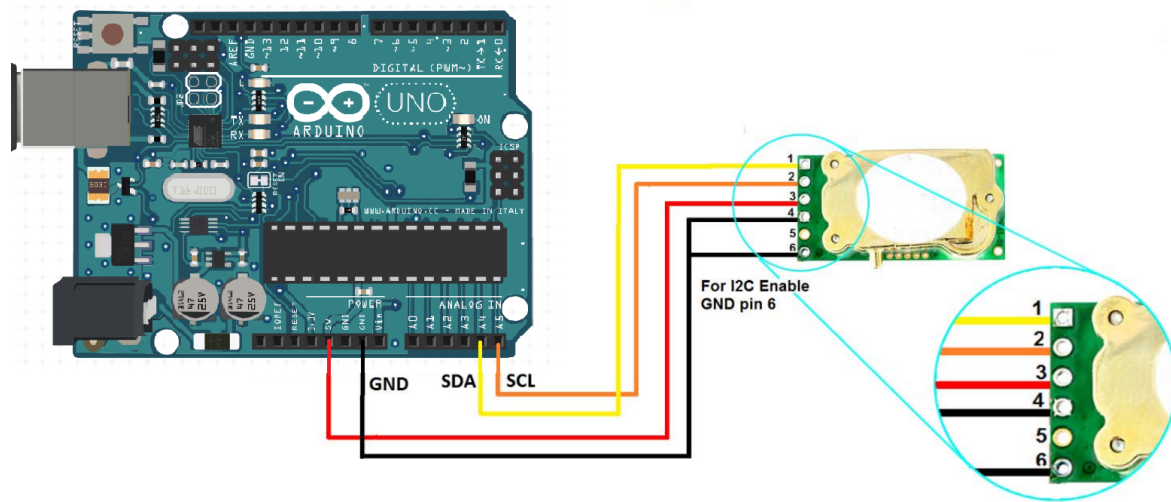


Tabla 8:

Resultados del diagnóstico del sensor T6713 realizados al aire libre.

Parámetro	Resultado obtenido	Resultado esperado	Unidad
Concentración	450-460	$\geq 400$	ppm

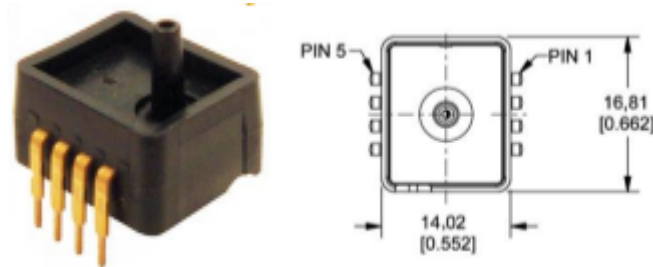
El valor de concentración ambiental esperado es de aproximadamente 400 partes por millón, además el sensor de  $CO_2$  tiene una incertidumbre en la medición mínima de  $\pm 37$  ppm, dando así que los resultados obtenidos concuerdan lo suficientemente bien con los esperados, por lo tanto, el sensor funciona correctamente.

## 7.2 Etapa de Sensado - Sensor de Presión ASDXACX015PAAA5

Para el sensado de presión se hace uso del sensor ASDXACX015PAAA5 fabricado por Honeywell, el cual posee la capacidad de realizar mediciones de presión atmosférica en un rango de 0 a 15 psi y puede operar a temperaturas entre 0 y 85 °C.

Figura 23:

*Sensor de presión ASDXACX015PAAA5 con su distribución de pines.*



*Nota. Imágenes del sensor fabricado por HONEYWELL.*

Tabla 9:

*Pines de conexión del sensor ASDXACX015PAAA5.*

<b>Pines</b>	<b>Definición</b>	<b>Tipo</b>
1	Vsupply	supply
2	Vout	analog output
3	GND	supply
4 a 8	N/C	not used

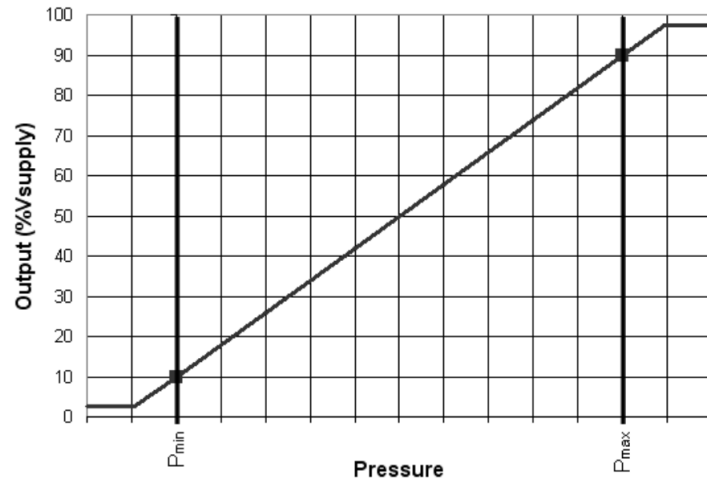
*Nota. Datos extraídos del datasheet del sensor ASDXACX015PAAA5.*

En este caso se conecta la salida de voltaje del sensor a las entradas analógicas del Arduino aplicando la ecuación de función de transferencia entregada por Honeywell para obtener la presión y este resultado se compara con el entregado por diferentes páginas de medición atmosféricas, además de esto se mide con el multímetro la salida del sensor para comprobar que se esté obteniendo el valor de tensión esperado.

Figura 24:

Función de transferencia del sensor de presión.

### A Calibration, 10% to 90%



$$\text{Output (volts)} = \frac{0.8 \cdot V_{\text{supply}}}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}} \cdot (\text{Pressure}_{\text{applied}} - P_{\text{min}}) + 0.10 \cdot V_{\text{supply}}$$

*Nota. Imagen extraída del datasheet del sensor ASDXACX015PAAA5.*

Tabla 10:

*Resultados del diagnóstico del sensor de presión realizados en las oficinas de CEMOS.*

Parámetro	Resultado obtenido	Resultado esperado	Unidad
Presión	12.93-12.95	12.99	psi
Voltaje	3.965	3.965	V

Los resultados obtenidos demuestran que el sensor funciona correctamente, la diferencia en medición obtenida por el Arduino se debe al ADC que este posee, por lo tanto, la variación entra dentro del rango de error aceptable.

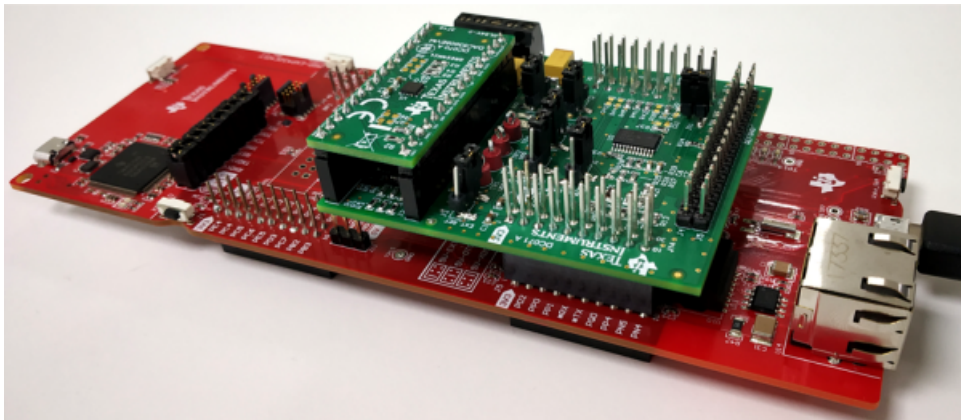
### 7.3 Etapa de Procesamiento de Datos - MSP432E401Y LaunchPad

La etapa de procesamiento de datos es la encargada de controlar los demás elementos electrónicos del sistema de sensado, comunicándose con ellos por medio de diferentes protocolos y recopilando la información de los instrumentos de la etapa de sensado, procesando

la información obtenida de cada sensor. Con el objetivo de cumplir lo anterior, se selecciona la tarjeta electrónica de Texas Instruments MSP-EXP432E401Y.

Figura 25:

*Launchpad MSP432E401Y integrado con los módulos DAC53608EVM y BOOSTXL-DAC-PORT.*



*Nota. Imagen del launchpad fabricado Texas Instruments.*

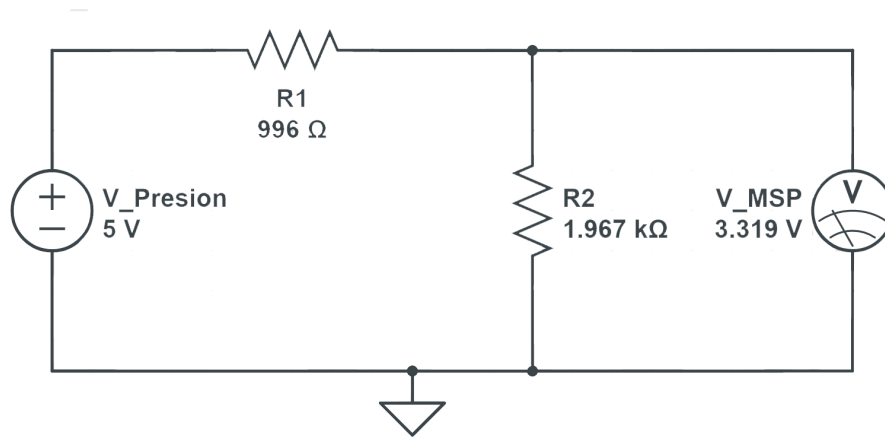
Esta plataforma de desarrollo ofrece la interfaz estándar de 80 pines con dos conectores BoosterPack XL independientes para expandir hardware, además posee más de 20 interfaces seriales que permiten conectar y controlar sensores y actuadores e integra ADCs duales de 12 bits. Su distribución de pines se puede observar en el Anexo A.

Para comprobar el correcto funcionamiento del Launchpad se toman los sensores anteriores y se conectan a la tarjeta esperando obtener resultados similares a los entregados por el Arduino, para esto se usan las GPIOs destinadas a las conexiones de tipo I2C y de entrada para el ADC del microcontrolador.

En el caso del sensor de presión es necesario disminuir el nivel de tensión de 5V máximos a 3.3V debido a los límites en las entradas del Launchpad, para esto se usa un divisor de tensión, el cual posee los valores de resistencia reales que se muestran en la figura 26.

Figura 26:

Divisor de tensión con valores resistivos reales empleado a la entrada del ADC del Launchpad.



Los resultados obtenidos fueron similares a los mostrados anteriormente con un leve aumento en la presión obtenida de 0.3 psi demostrando un correcto funcionamiento del microcontrolador.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del Launchpad se procede a probar los módulos expansores que se conectan al mismo, estos se comunican por medio del protocolo I2C al igual que el sensor T6713.

#### 7.4 Etapa de Sensado - Módulo BOOSTXL-BASSENSORS

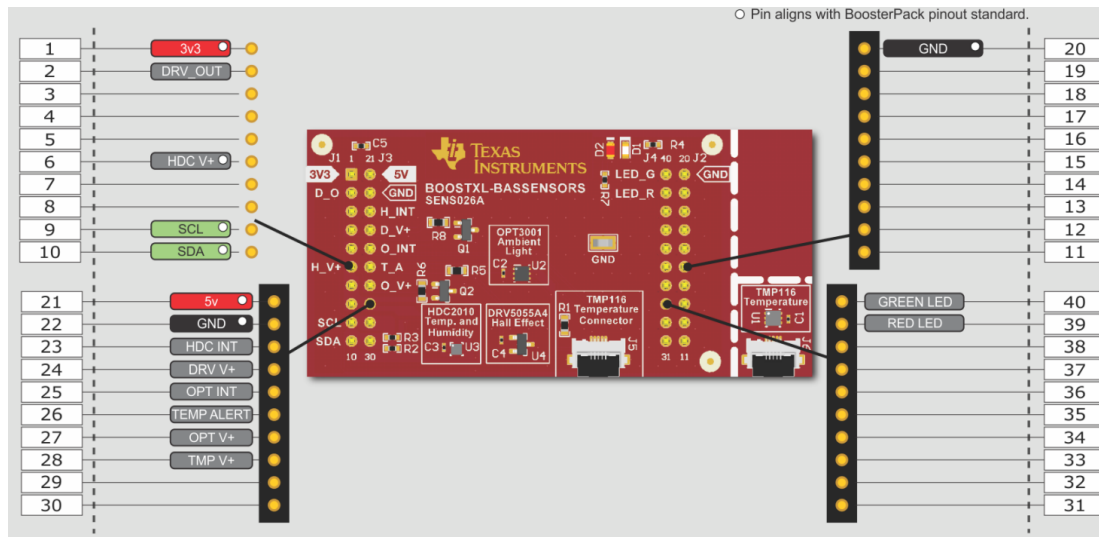
El BOOSTXL-BASSENSORS es un módulo que incorpora 4 sensores para realizar la medición de múltiples variables, dentro de las cuales se incluye el sensor TMP116, el cual posee un rango de -55 a 125 °C con una precisión de  $\pm 0.3$  °C. Además incorpora otros 3 sensores (efecto Hall, luz ambiente y humedad relativa) que pueden resultar útil para diferentes mediciones en la misión E3Tratos.

Este módulo viene en forma de BoosterPack plug-in, lo cual permite que sea añadido fácilmente a la MCU, comunicándose por medio del protocolo I2C, esto se realiza mediante los pines 9 y 10 con los puertos SCL y SDA del bus I2C respectivamente, como se observa

en la figura 27. Además el módulo posee la característica de tener la capacidad de extraer el sensor TMP116, permitiendo así su fácil orientación hacia el área donde se realizarán las mediciones.

Figura 27:

Distribución de pines módulo BOOSTXL-BASSENSORS.



*Nota. Imagen extraída del datasheet de módulo BOOSTXL-BASSENSORS.*

Para el caso del presente módulo se prueban todos los sensores incluidos, donde el de mayor importancia es el de temperatura, esto se realiza adjuntando el módulo al Launchpad de forma similar a la observada en la figura 25. Los resultados esperados son los de un salón típico cerrado con aire acondicionado, en este caso fue el salón de CEMOS.

Tabla 11:

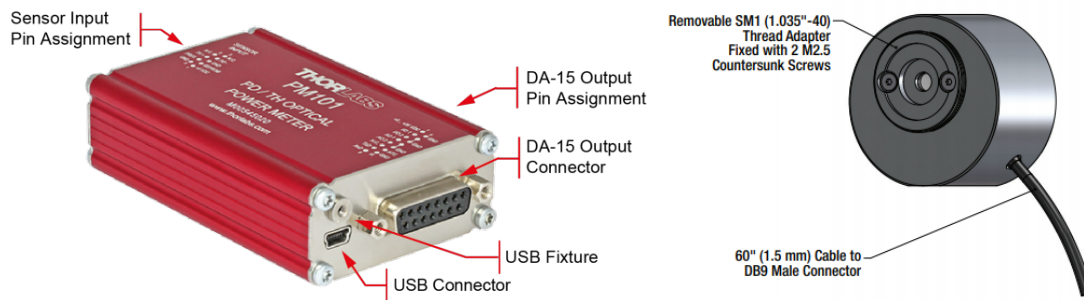
*Resultados del diagnóstico de todos los sensores incluidos en el BOOSTXL-BASSENSORS.*

Parámetro	Resultado obtenido	Resultado esperado	Unidad
Intensidad de luz	719-725	500-750	Lux
Humedad relativa	46.4-46.5	30-50	% RH
Densidad de flujo magnético	0.05-0.1	0	mT
Temperatura	25.367-25.375	25	°C

## 7.5 Etapa de Sensado - Power Meter PM101 y Fotorreceptor Esfera Integrante S148C

Figura 28:

*Medidor de potencia PM101 y sensor S148C.*



*Nota. Imagen extraída de los datasheets del modulo de potencia PM101 y del sensor S148C.*

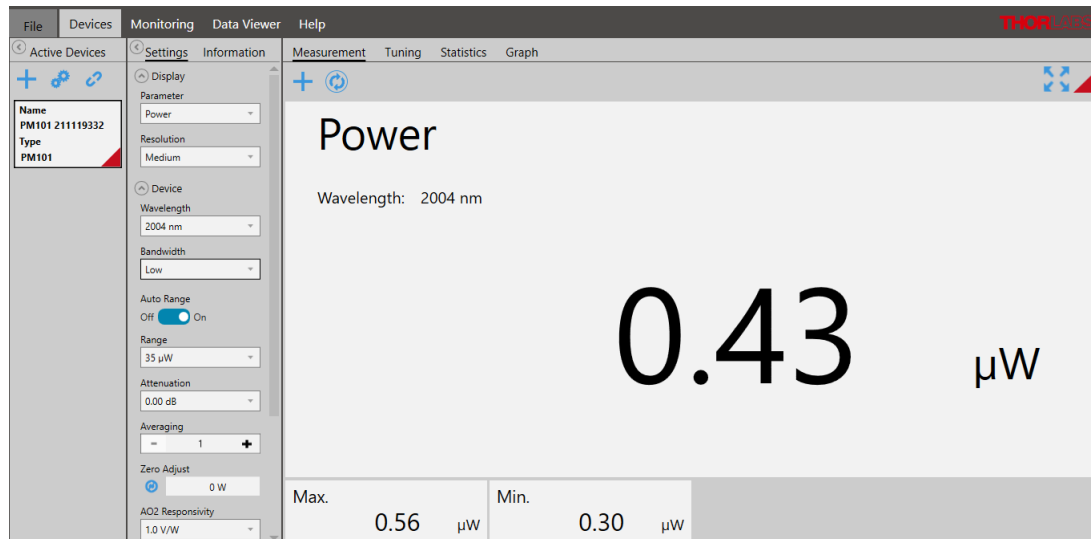
El sensor de fotodiodo S148C de Thorlabs posee rango de trabajo de potencia óptica de 1 uW a 1000 mW y maneja un rango de longitudes de onda entre 1200 nm y 2500 nm. Este sensor posee compatibilidad con el PM101 el cual es un dispositivo que funciona como interfaz para medir la potencia óptica detectada por un sensor conectado a este dispositivo y proporciona comunicación entre el sensor y una computadora o un microcontrolador externo mediante el estándar de comandos SCPI por medio del protocolo UART.

Estos dos elementos funcionan en conjunto, el fotorreceptor se conecta al PM101 y este último se conecta a un PC donde se usa el software Optical Power Monitor para las pruebas, este programa verifica automáticamente el tipo de sensor que se conecta, sus parámetros, la calibración que este posee y permite ver en tiempo real la potencia que recibe el mismo, esto permite comprobar que los elementos tienen una conexión correcta.

Se observa la potencia que muestra el programa con el lente del sensor cubierto y posteriormente se realiza la conexión de estos elementos con el Launchpad donde es necesario el uso de un level shifter y el conector DA-15 del PM101 para la comunicación entre el Power

Figura 29:

Software Optical Power Monitor con el sensor S148C conectado y ajustado a una longitud de onda de 2004 nm.



Meter y el Launchpad, finalmente se comparan los resultados obtenidos por ambos métodos.

Tabla 12:

*Resultados del diagnóstico.*

Parámetro	Resultado obtenido	Resultado esperado	Unidad
Potencia OPM	0.30-0.56	0	uW
Potencia Launchpad	0.35-0.45	0.30-0.56	uW

## 7.6 Módulo Electro-Óptico - Módulo Controlador Láser DX1

Esta etapa se encuentra compuesta por los instrumentos que permiten la generación del haz de luz, además de los elementos usados en el aumento del recorrido realizado por el láser para cumplir lo planteado en la sección 6.3.1 (Simulación Celda de Herriott).

El presente proyecto y todos los subsistemas que lo componen fueron desarrollados en torno a la fuente de luz monocromática con referencia EP2004-0-DM-DX1-FA de Eblana Photonics. Este controlador posee la capacidad de ajustar la longitud de onda de salida del láser, además de la temperatura de operación del mismo mediante las entradas de tensión

$V_{bias}$  y  $V_{tec}$ , respectivamente. El módulo posee 4 terminales de entrada que se observan en la tabla 13.

Figura 30:

*Módulo controlador láser DX1.*



*Nota. Imagen del módulo controlador láser DX1 producido por Eblana Photonics.*

Tabla 13:

*Asignación de pines módulo DX1.*

Pin #	Nombre	Color	Descripción
1	$V_{TEC}$	Verde	Controla la temperatura TEC (0.1 - 3.0[V])
2	Ground	Negro	Tierra común (0[V])
3	$V_{CC}$	Rojo	Provee el voltaje de alimentación para el DX1 (5[V])
4	$V_{bias}$	Azul	Fija el valor de corriente de polarización (0 - 1.2[V])

*Nota. Datos extraídos del Datasheet del módulo DX1.*

Con la compra del módulo se adjuntan las curvas de calibración del instrumento, las cuales fueron mostradas en las figuras 8 y 9, de estas se puede obtener la figura 31 que relaciona la longitud de onda con la potencia de salida de la fibra óptica del láser.

Para identificar un correcto funcionamiento del láser se hace un barrido de la tensión de polarización  $V_{bias}$ , donde se espera que la potencia medida a la salida de la fibra óptica sea similar a la presentada por el fabricante, pues las curvas entregadas por el fabricante fueron obtenidas con el mismo fotorreceptor utilizado en este proyecto, los resultados obtenidos se presentan en la figura 32

Figura 31:

*Curva de Potencia vs Longitud de Onda inferida de las curvas entregadas por el fabricante.*

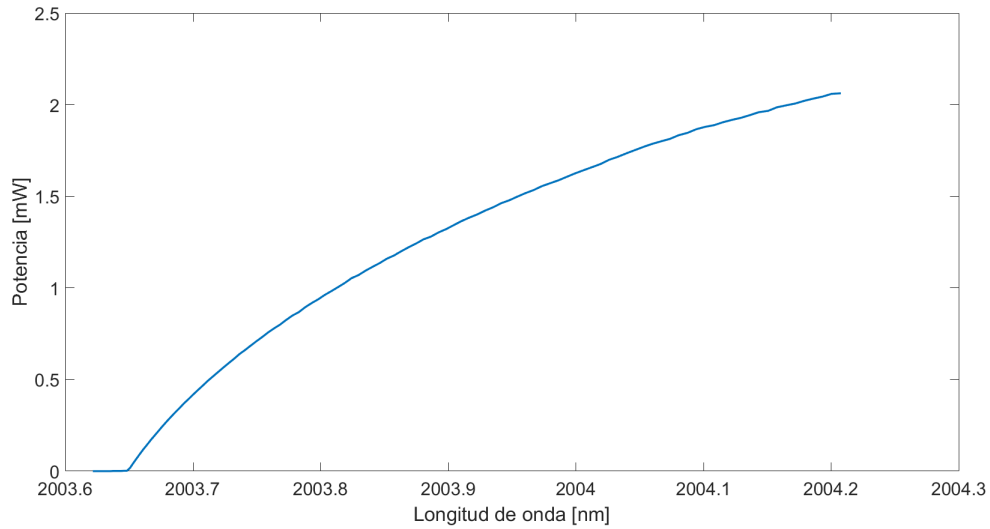
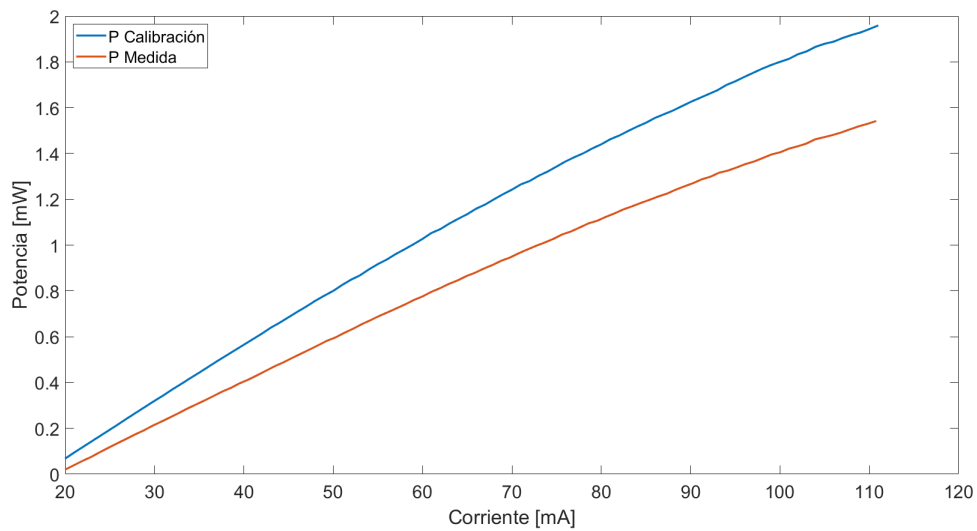


Figura 32:

Curvas de potencia del láser entregadas por el fabricante (azul) y medidas a la salida de la fibra óptica del láser (naranja).



El paso de voltaje del DAC no permite que el cambio de tensión sea en múltiplos exactos como los de la curva de calibración, por lo tanto, las curvas no se corresponden entre sí punto a punto, aun así se logra observar como el láser ha presentado pérdidas en su potencia de salida, esto puede deberse al tiempo que este ha estado inutilizado debido a las circunstancias presentadas por el COVID-19.

### 7.7 Módulo Electro-Óptico - DAC53608EVM y BOOSTXL-DAC-PORT

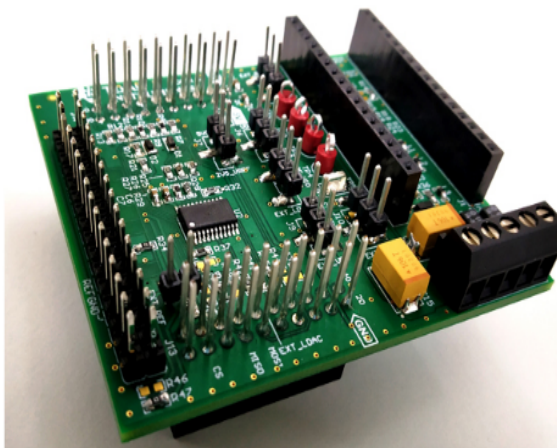
El módulo DAC53608EVM y el BOOSTXL-DAC-PORT son dos dispositivos de Texas Instruments, los cuales al igual que el BOOSTXL-BASSENSORS poseen una fácil integración con el Launchpad. Este DAC cumple la función de realizar el barrido de  $V_{bias}$  que le permita al láser cambiar la longitud de onda a la cual se emite el haz de luz, además de fijar el valor  $V_{tec}$  para mantener el módulo DX1 a una temperatura fija.

Figura 33:

*Módulo del DAC.*



(a)  
DAC53608EVM



(b) BOOSTXL-DAC-PORT

*Nota. Imagen de los módulos DAC53608EVM y BOOSTXL-DAC-PORT producidos por Texas Instruments.*

El DAC53608EVM funciona en conjunto con el BOOSTXL-DAC-PORT, por lo tanto,

al comprobar el funcionamiento del primero se confirma que el segundo funciona correctamente, las pruebas en este caso se realizan estableciendo un valor de salida de voltaje con el programa DAC53608EVM 1.0.1 de Texas Instruments el cual se muestra en la figura 34 y se procede a medir la tensión en los diferentes puertos del DAC mediante un multímetro.

Figura 34:

Software DAC53608EVM 1.0.1 utilizado para comunicarse con el DAC y escribir los niveles de voltaje deseados.

Register Name	Address	Value	Bits															
			15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
<b>▼ DACx3608 CONFIG AND STATUS REGISTERS</b>																		
NOP	0x00	0x0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DEVICE_CONFIG	0x01	0x0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
STATUS_TRIGGER	0x02	0x0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>▼ DACx3608 OUTPUT REGISTERS</b>																		
BRDCAST	0x03	0x0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DACA_DATA	0x08	0x0668	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0
DACB_DATA	0x09	0x0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DACC_DATA	0x0A	0x0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DACD_DATA	0x0B	0x0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DACE_DATA	0x0C	0x0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DACF_DATA	0x0D	0x0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DACG_DATA	0x0E	0x0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DACH_DATA	0x0F	0x0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

El resultado esperado se toma de la ecuación:  $Voltaje_{DAC} = 2.44 * DAC\_DATA_{mV}$ , se muestra en la tabla 14, donde los valores de DAC\_DATA son 80, 100 y 410 respectivamente.

Tabla 14:

*Resultados del diagnóstico del DAC medidos mediante la utilización de un multímetro*

Parámetro	Resultado obtenido	Resultado esperado	Unidad
Voltaje DAC A	196	195.2	mV
Voltaje DAC A	245	244	mV
Voltaje DAC A	0.999	1.0004	V

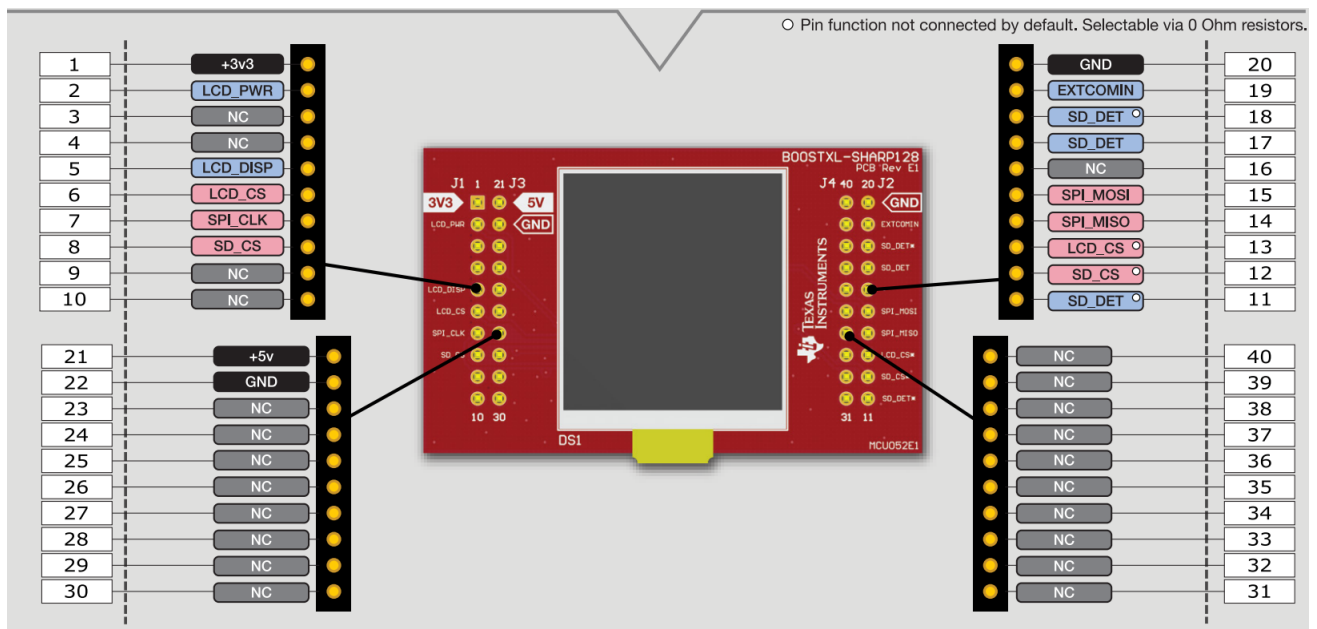
Los módulos DAC53608EVM y BOOSTXL-DAC-PORT se acoplan en conjunto y se comunican mediante protocolo I2C con la tarjeta del MSP432E401Y con lo cual mediante el código ejecutado por la tarjeta se establecen los voltajes de salida del DAC estableciendo los valores de  $V_{tec}$  y realizando el barrido  $V_{bias}$  ajustando la temperatura del láser y variando la longitud de onda del láser.

### 7.8 Almacenamiento en Memoria - BOOSTXL-SHARP128

Esta etapa comprende el guardado de los datos recopilados por los demás sensores. Se selecciona el dispositivo BOOSTXL-SHARP128 de Texas Instruments que es un módulo BoosterPack que se acopla al Launchpad utilizando el protocolo SPI para comunicarse con el puerto microSD y la pantalla LCD, los puertos referentes a este protocolo pueden observarse en la figura 35..

Figura 35:

Distribución de pines BOOSTXL-SHARP128 (Fuente: Texas Instruments)



Nota. Imagen extraída del datasheet del modulo BOOSTXL-SHARP128.



una vez usada esta microSD se logró la correcta ejecución del proceso como se puede observar en la figura 37.

Figura 37:

Documento de ejemplo guardado en la microSD durante el diagnóstico del proceso de escritura

```
Drive 0 is mounted
Using existing copy of "fat:0:input.txt"
Starting file copy
File "fat:0:input.txt" (518 B) copied to "fat:0:output.txt" (Wrote 518 B)
*****
0          1          2          3          4          5          6          7
0123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
This is some text to be inserted into the inputfile if there isn't
already an existing file located on the media.
If an inputfile already exists, or if the file was already once
generated, then the inputfile will NOT be modified.
*****
Drive 0 unmounted
```

Debido al funcionamiento del BOOSTXL-SHARP128 no es posible mostrar datos en el display y escribir en la SD de forma inmediata. El procedimiento entonces para lograr un correcto funcionamiento es el siguiente: Encender el display, detener la comunicación con este con el comando "DISPLAY\_CMD\_TRANSPORT\_CLOSE", iniciar la SD, escribir en ella, cerrar la escritura y finalmente reactivar comunicación con la LCD.

Para la implementación final se establece el formato FAT16 en que se guardan los datos en el archivo *CO2\_XX.txt* en la memoria microSD, el cual incluye un encabezado donde se realiza una descripción de las variables, las cuales se encuentran separadas por medio de una tabulación y las mediciones separadas por medio de un salto de línea, resultando en un archivo como el que se observa en la figura 38.

Figura 38:

*Resultado del guardado de los datos medidos en el archivo CO2\_XX.txt*

```

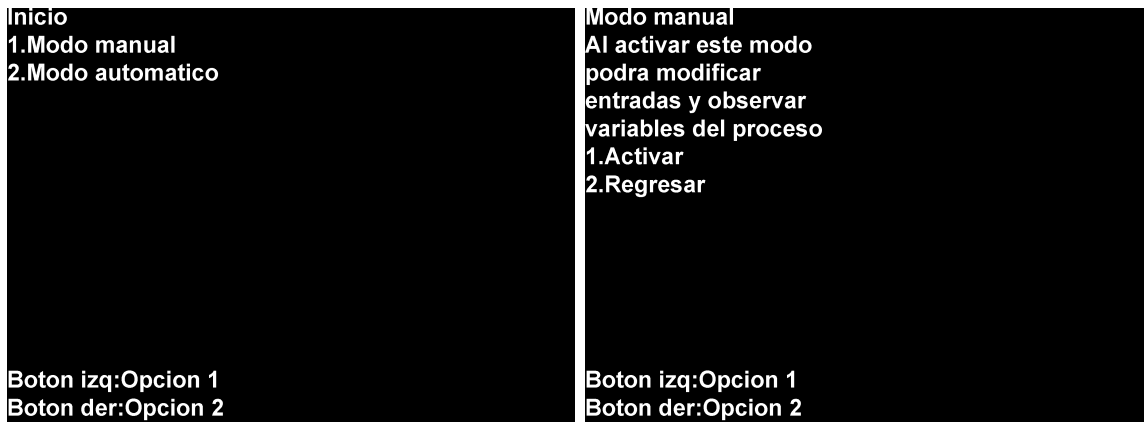
CO2_01.TXT: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
*****
Sensor CO2 - Datos de Medicion para PostProcesado
Autores: Kevin Andres Tautiva Salazar
        Harley Fernando Garcia Robles
*****
Fecha: Informacion del momento de medicion (hora:minuto:segundo)
Flag:  Numero de barrido realizado (0.2V a 1.1V, pasos de 0.01V)
Vtec:  Tension Vtec del DX1[V]
Vbias: Tension VBias del DX1[V]
Text:  Temperatura externa del sistema (Fuera de la gondola)[c]
Press: Presion atmosferica a la que se encuentra el sistema[psi]
Alt:   Altura del instrumento a partir de la presion[m]
CO2COM: Valor de CO2 leido por el sensor comercial[ppm]
PM:   Potencia medida por el Power Meter[w]

Fecha  Flag  Vtec      Vbias      Text      Press      Alt      CO2COM  PM
17:0:18 1      1.325641  1.005714   23.671875 12.191261  1548    1951    1.14571428600000e-07
17:0:18 2      1.320806  1.024249   23.671875 12.173539  1560    1949    1.77571428600000e-07
17:0:19 3      1.316777  1.040366   23.687500 12.164677  1566    1949    2.29000000000000e-07
17:0:20 4      1.315971  1.046007   23.687500 12.182401  1554    1949    3.18642857100000e-07
17:0:20 5      1.315971  1.043590   23.679688 12.155815  1572    1949    3.74357142900000e-07
17:0:21 6      1.317582  1.047619   23.671875 12.173539  1560    1948    4.50928571400000e-07
17:0:22 7      1.316777  1.037143   23.671875 12.155815  1572    1948    5.38214285700000e-07
17:0:22 8      1.317582  1.043590   23.679688 12.142523  1581    1948    5.94642857100000e-07
17:0:23 9      1.318388  1.042784   23.679688 12.142523  1581    1948    6.45142857100000e-07
17:0:23 10     1.315165  1.044396   23.671875 12.111507  1601    1947    6.99285714300000e-07
17:0:24 11     1.320000  1.041172   23.671875 12.138093  1584    1947    7.58428571400000e-07
17:0:25 12     1.318388  1.044396   23.679688 12.098215  1610    1947    8.24857142900000e-07
17:0:25 13     1.317582  0.932381   23.695312 11.344985  2130    1947    8.97142857100000e-07
17:0:26 14     1.306300  1.024249   23.703125 12.098215  1610    1948    9.81857142900000e-07
17:0:27 15     1.310330  1.031502   23.695312 12.120369  1596    1948    1.03614285700000e-06
17:0:27 16     1.307912  1.033114   23.687500 12.107078  1604    1948    1.11428571400000e-06
    
```

Para facilitar el uso del sistema se diseña una interfaz gráfica para que el usuario pueda acceder a los diferentes modos de operación disponibles, donde se tiene una ventana de confirmación para prevenir el inicio de forma accidentada de alguno de los modos, esta interfaz se observa en la figura 39.

Figura 39:

*Pantallas de interfaz gráfica encontradas en la implementación final del sistema*



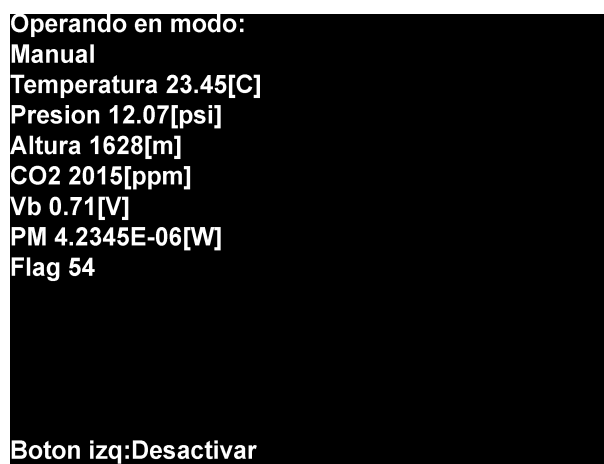
(a) Interfaz de inicio

(b) Confirmación modo manual



(c) Confirmación modo automático

(d) Operación automática



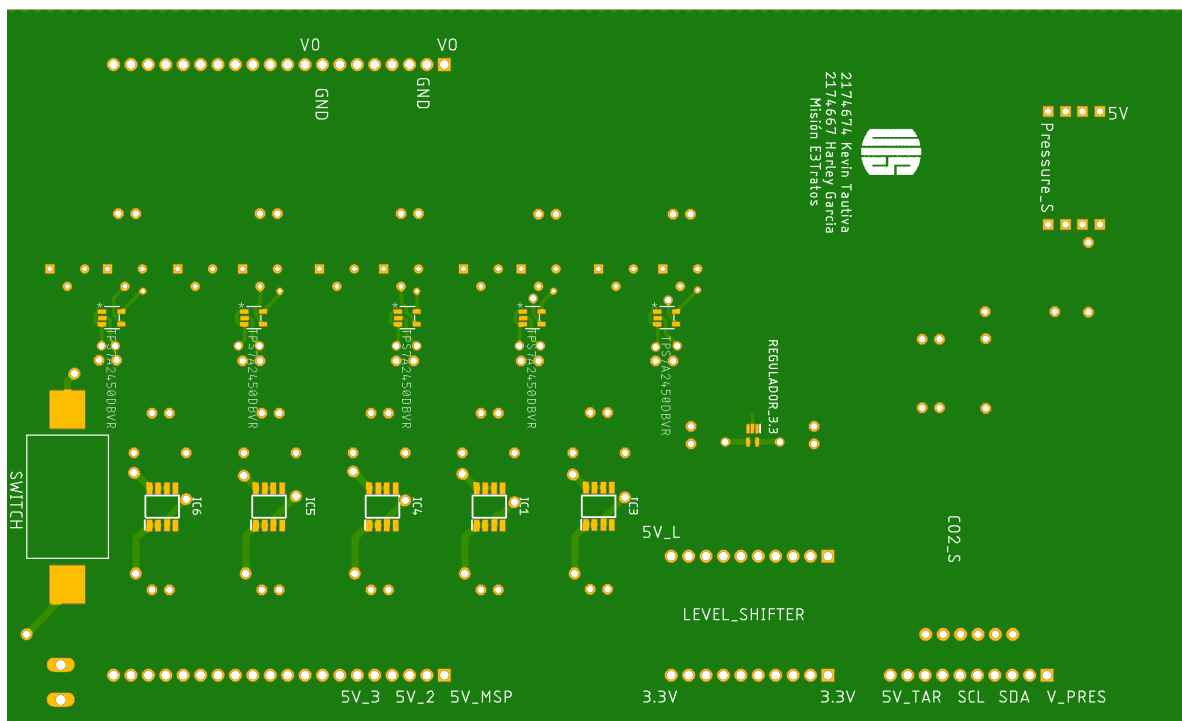
(e) Operación manual

## 7.9 Etapa de Potencia - PCB y level shifter

La etapa de potencia se basa en el diseño de una Printed Circuit Board (PCB) cuya función se reduce a proveer energía a las demás etapas del sistema, logrando generar los diferentes niveles de tensión y corriente necesarios para cada componente, disminuyendo la carga al microcontrolador, y facilitando las conexiones de los diferentes dispositivos.

Figura 40:

*Diagrama de la PCB diseñada, incluyendo los reguladores, level shifter y sensores a utilizar en el proyecto.*

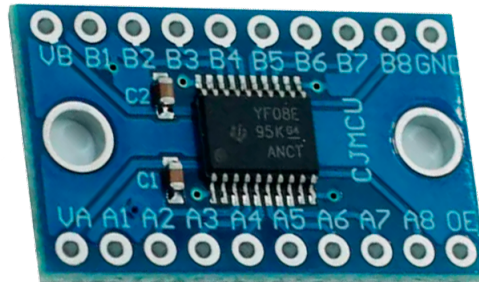


Para conseguir que dicha PCB logre suministrar los diferentes niveles de tensión, se requiere el uso de 5 reguladores ajustables TPS7A2401DBVR, 5 reguladores de 5V LP2954AIM, 1 regulador de 3V TPS71401DCKR y un level shifter de referencia TXS0108E encargado de convertir niveles de tensión de 5V a 3.3V para la comunicación entre dispositivos.

El diagnóstico de funcionamiento se realiza mediante el uso de un multímetro realizando mediciones de voltaje y continuidad en diferentes puntos de la PCB.

Figura 41:

*Level shifter necesario para establecer comunicación entre el PM101 y el Launchpad.*



*Nota: Imagen del level shifter TXS0108E de Texas Instruments.*

Tabla 15:

*Condiciones de operación del level shifter TXS0108E (Fuente: Texas Instruments)*

Parámetro	Valor Min	Valor Nominal	Valor Max	Unidad
$V_{CCA}$ - Supply Voltage A	1.4	-	3.6	V
$V_{CCB}$ - Supply Voltage B	1.65	-	5.5	V
$V_{INA}$ - Input Voltage A	$V_{CCA}-0.4$	-	$V_{CCA}$	V
$V_{INB}$ - Input Voltage B	$V_{CCB}-0.4$	-	$V_{CCB}$	V
$V_{OUTA}$ - Output Voltage A	-0.5	-	$V_{CCA}+0.5$	V
$V_{OUTB}$ - Output Voltage B	-0.5	-	$V_{CCB}+0.5$	V

*Nota: Datos extraídos del datasheet del level shifter TXS0108E.*

De esta forma se tiene que los elementos electrónicos funcionan de forma correcta, teniendo mayor incertidumbre con el láser DX1, se asume que el paso del tiempo ha generado cambios en la capacidad del láser de emitir potencia, pero que el mismo sigue operando al rededor de la longitud de onda esperada y se procede con el proyecto, los elementos descritos a continuación no poseen una prueba de funcionamiento individual.

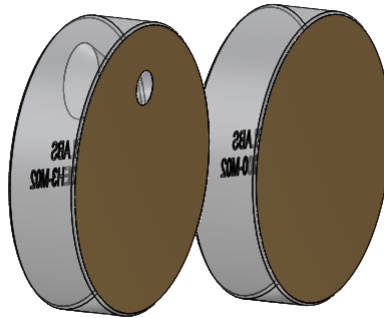
## 7.10 Módulo Electro-Óptico - Elementos Varios

En esta sección se muestran los instrumentos ópticos destinados a amplificar el recorrido óptico o instrumentos utilizados con el fin de contrarrestar las pérdidas de potencia experimentados por el láser los cuales limitan el recorrido óptico.

- **Celda de Espejos**

Figura 42:

*Espejos de referencia CM254-100EH3-M02 y CM254-100-M02.*



*Nota: Imagen del diseño 3d en solid works de los espejos CM254-100EH3-M02 y CM254-100-M02 obtenidos del sitio de ventas de THORLABS.*

Esta celda hace referencia a la celda de Herriott la cual fue explicada y se mostró su respectiva simulación en la sección 6.3.1, está compuesta por 2 espejos, uno con apertura de referencia CM254-100EH3-M02 y uno sin apertura de referencia CM254-100-M02, con los cuales se busca extender el recorrido óptico al realizar una serie de rebotes entre ellos. Estos poseen un diámetro exterior de 1 pulgada, una longitud focal de 100 mm, reflectancia del 98% y una apertura de  $\phi 22.86$  mm.

- **Colimador**

El colimador F028APC-2000 se selecciona para disminuir las posibles pérdidas de potencia del láser al permitir direccionar el haz de luz generado por el controlador láser,

se elige este modelo debido a que es apto para utilizarse alrededor de los 2  $\mu\text{m}$  y es compatible con la fibra óptica que incluye el módulo DX1 de tipo SMF (Single Mode Fiber) con un conector FC/APC.

Figura 43:

*Colimador F028APC-2000.*



*Nota. Imagen del Colimador F028APC-2000 producido por THORLABS.*

Sin embargo, debido a limitaciones en cuanto a tiempos de entrega, se hace uso de dos lentes infra rojos de referencia LB1676-ML, el cual se puede observar en la figura 44, cada uno posee una longitud focal de 100.0 mm, estos se utilizan para concentrar la potencia del haz de luz al punto en que se ubica el sensor del fotorreceptor, el uso de dos lentes se debe a no tener la disposición de uno de menor longitud focal, por lo tanto, se unen ambos lentes para crear un lente equivalente de  $f = 50.0$  mm.

Figura 44:

*Lente biconvexo de referencia LB1676-ML.*



*Nota. Imagen del Lente LB1676-ML producido por THORLABS.*

### 7.11 Base estructural - Componentes

Esta etapa hace referencia a los diferentes elementos necesarios para el soporte del sistema, es decir, las diferentes bases, soportes y monturas utilizados para posicionar los diferentes elementos ópticos que comprenden el sistema, los cuales se embarcarán en la góndola del globo estratosférico.

- **Breadboard de Aluminio**

La base de aluminio de referencia MB3060/M de Thorlabs de dimensiones 300 mm x 600 mm x 12.7 mm, fue elegida con el fin de facilitar la implementación y el transporte del montaje pues en esta se pueden anclar las monturas y soportes de los diferentes elementos ópticos, lo cual a su vez no solo facilita el embarque del sistema en el globo sonda, sino que también permite realizar mediciones fuera del laboratorio.

Figura 45:

*MB3060/M*



*Nota. Imagen de la base de Aluminio de referencia MB3060/M producida por THORLABS.*

- **Postes Óptico, Post Holders y Clamps**

Se seleccionan los postes ópticos de referencia TR100/M y sus respectivos posts holders de referencia PH100/M ambos con una longitud de 100mm, con los cuales se podrá ajustar la altura a la que se posicionará cada instrumento óptico. Además de esto se realizó la compra de los clamps de referencia CF125C/M los cuales permiten el anclaje de los post holders con la base de aluminio añadiendo dos grados de libertad para

los ejes x,y, lo cual se traduce en una mayor flexibilidad a la hora de posicionar los diferentes instrumentos ópticos que componen el montaje, como los espejos, la salida láser, el fotorreceptor o los espejos.

Figura 46:

*Instrumentos de anclaje*



(a) Poste óptico con su respectivo post holder.



(b) Clamps CF125C/M.

*Nota. Imagen de los instrumentos de anclaje producidos por THORLABS.*

- **Soporte Para Espejos**

Los soportes KS1T-SM1 de Thorlabs fueron seleccionados debido a su diseño mecánico de gran estabilidad orientado a espejos delgados de 1 pulgada de diámetro, lo que los hace compatibles con los espejos previamente seleccionados.

Figura 47:

*Soporte KS1T escogido para los espejos de oro.*



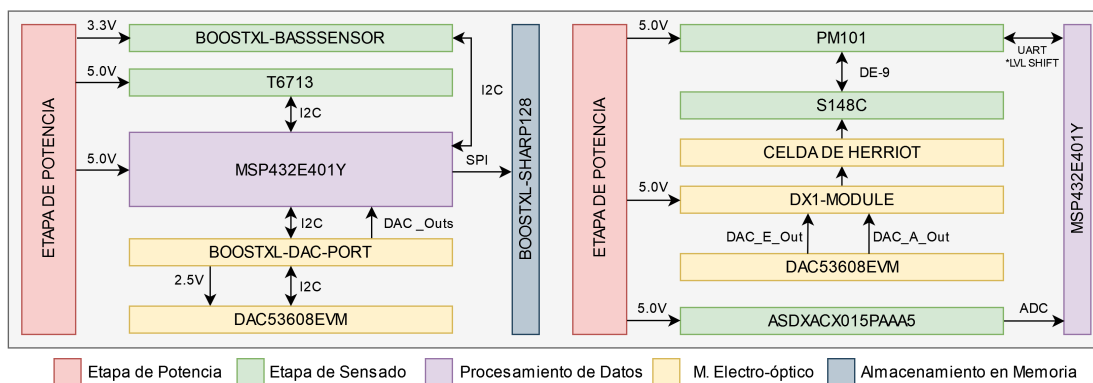
*Nota. Imagen del soporte de espejos producido por THORLABS.*

### 7.12 Diagramas de Interacciones

Tomando los subsistemas y componentes planteados previamente, se realiza la definición de las etapas que integran todo el desarrollo de la arquitectura del sistema y las interacciones entre estas, esto se puede observar en la figura 48 donde el sensor comercial de CO<sub>2</sub> T6713 solo forma parte del sistema en las pruebas de laboratorio.

Figura 48:

*Diagrama de interacciones de las etapas del sistema de sensado de CO<sub>2</sub>*



## 8 Integración de los Subsistemas

Una vez diagnosticado el correcto funcionamiento de cada subsistema, se procede a realizar la conexión y programación de los mismos como un sistema completo único.

### 8.1 Conexión Física de los Subsistemas del Sensor de $CO_2$

Para realizar la conexión de los sistemas se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- La funcionalidad de los pines del Launchpad viene predefinida y algunos poseen múltiples funciones.
- La distribución de pines del BOOSTXL-128SHARP hace que este no sea compatible con otros módulos en la misma interfaz de BoosterPack haciendo que los otros dos módulos deban ir juntos.
- El cable del sensor de temperatura es unidireccional, por lo tanto, su ubicación se ve limitada a la parte inferior de la tarjeta.
- El sensor TMP116 y el DAC poseen la misma dirección I2C, y es necesario ponerlos en la misma interfaz BoosterPack, por lo tanto, se debe alterar la dirección de esclavo del DAC.
- Debido a las conexiones extras que posee el BOOSTXL-DAC-PORT este no puede ir debajo de otro módulo BoosterPack.
- Se hace uso de las I/O en el borde de la tarjeta para tener un sistema más limpio y ordenado.

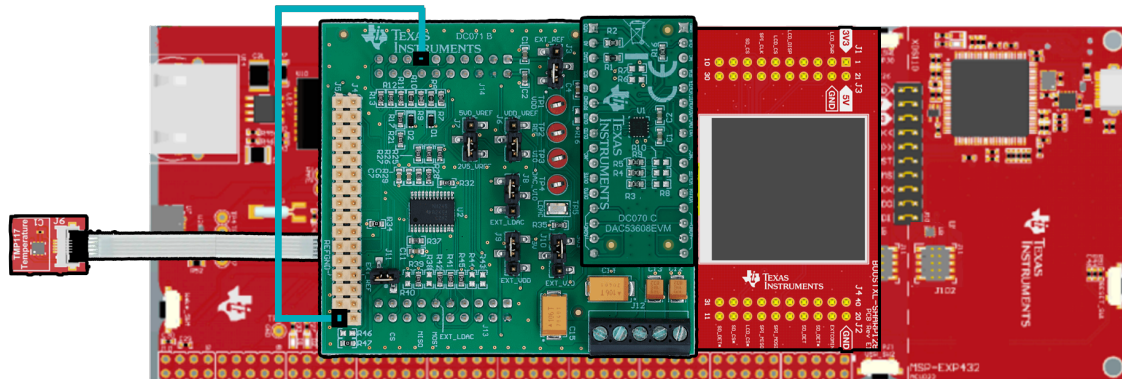
Para facilitar la visualización de todos los elementos conectados directamente al Launchpad se divide en diferentes niveles el montaje.



SHARP128, estos se ubican en interfaces diferentes debido a que, como se puede observar en las figuras 27 y 35 el pin 6 posee diferentes funciones que se ven afectadas entre sí.

Figura 51:

*Conexiones Nivel 0, 1, 2 - BOOSTXL-DAC-PORT y DAC53608EVM, vista superior final de la tarjeta.*



El nivel 2 se corresponde al módulo BOOSTXL-DAC-PORT donde la conexión azul se corresponde a la selección de la dirección de esclavo del DAC.

Las conexiones se realizan entre el Launchpad que posee headers numerados de 1 al 98 y la PCB que posee headers con sus respectivos nombres en la capa de silkscreen mediante el uso de jumpers hembra-hembra, los pines usados y su conexión respecto a cada elemento individual se observa en las tablas 16 a 18.

Tabla 16:

*Pines de conexión entre el DAC53608EVM - BOOSTXL-DAC-PORT y el Controlador Láser DX1.*

<b>Función</b>	<b>Pin BOOSTXL-DAC-PORT</b>	<b>Puerto Controlador Láser DX1</b>
DAC - $V_{bias}$	j4 - 1	4
DAC - $V_{Tec}$	15 - 4	1
GND	j14 - 22	2

Tabla 17:

*Conexiones entre los pines del Launchpad y los diferentes dispositivos utilizados.*

<b>Función</b>	<b>Pin Launchpad</b>	<b>Puerto dispositivo</b>
SWITCH 1 (Izquierdo)	82	x
SWITCH 2 (Derecho)	84	x
LED D1	87	x
GND	96	x
5v	97	x
<b>DAC53608EVM BOOSTXL-DAC-PORT (Módulo Electro-Óptico)</b>		
Analog Input - $V_{bias}$	14	j4 - 1
Analog Input - $V_{Tec}$	16	15 - 4
I2C SDA	81	j14 - 9
I2C SCL	83	j14 - 10
<b>BOOSTXL-128SHARP (Etapa de Almacenamiento en Memoria)</b>		
SD CS (SD Chip Select Pin)	17	8
LCD PWR (LCD Power Source)	22	2
SPI CLOCK	46	7
SPI MOSI	48	15
SPI MISO	50	14
<b>ASDXACX015PAAA5 (Etapa de Sensado)</b>		
Conexión Analog Input - Vout	20	2
<b>BOOSTXL-BASSENSORS (Etapa de Sensado)</b>		
TMP116 V+ Supply Pin	32	28
I2C SDA (OPT3001/TMP116/HDC2010)	81	10
I2C SCL (OPT3001/TMP116/HDC2010)	83	9
<b>PM101 (Etapa de Sensado)</b>		
UART RX	54	A1
UART TX	56	A8
<b>T6713 (Etapa de Sensado)</b>		
I2C SDA	75	1
I2C SCL	77	2

Tabla 18:

*Pines de conexión entre el Level Shifter y el Power Meter 101.*

<b>Función</b>	<b>Pin del level shiter</b>	<b>Puerto del PM101</b>
UART RX	B1	8
UART TX	B8	7

## 8.2 Programación del Sistema de Sensado de CO<sub>2</sub>

Teniendo en cuenta los diversos elementos seleccionados en cada una de las etapas del sistema, se diseña una lista de características del algoritmo de programación desarrollado para llevar a cabo todo el control del proceso, que se muestran a continuación:

- Permitir seleccionar entre el modo de operación automático y el modo de operación manual, antes de ejecutar cualquier otra opción dentro del sistema.
- Establecer todas las variables del sistema y definir cuáles de ellas corresponden a entradas o salidas del código en la programación.
- Desarrollar una interfaz gráfica sencilla y amigable para el usuario en la que se visualicen las lecturas de las variables y se pueda pausar el sistema durante la ejecución del código (si se seleccionó el modo manual).
- El sistema desarrollado comenzará a ejecutarse en modo manual/automático en el instante que se le dé una orden para hacerlo (pulsador).
- Los tiempos de respuesta de toda la instrumentación definirán la latencia del sistema, con ello, se puede saber qué tan rápido se tiene un dato estable para poder comenzar con la lectura del siguiente.

Figura 52:

Algoritmo ejecutado en el inicio del sistema y algoritmo escritura I2C al DAC.

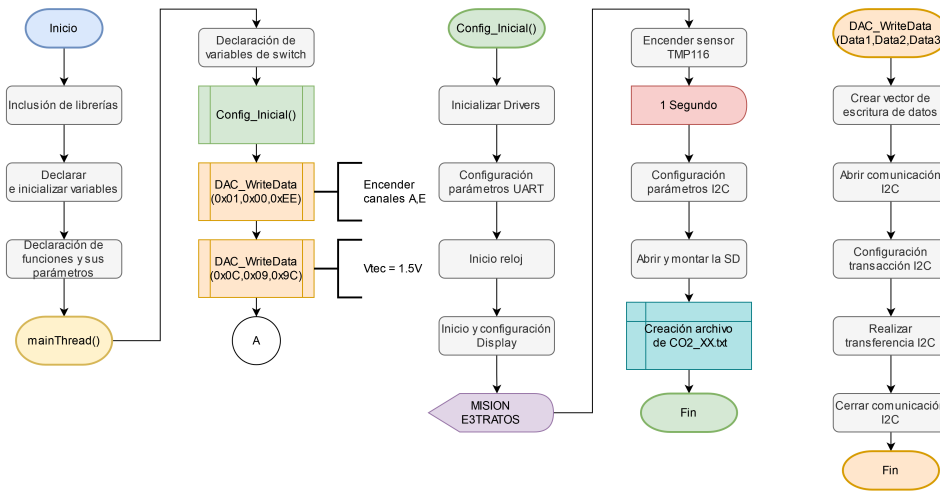


Figura 53:

Algoritmo de los diferentes subprocesos encargados del sensado de variables y escritura en la SD.

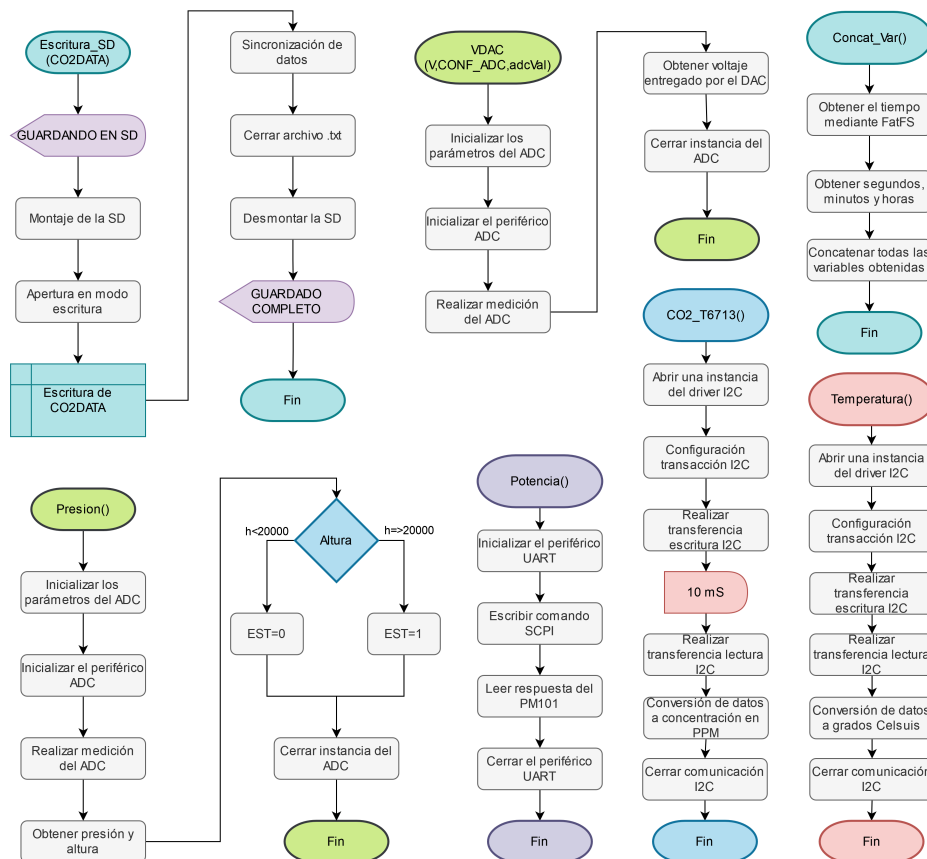


Figura 54:

Algoritmo de interfaz gráfica encargado de iniciar los diferentes modos de ejecución.

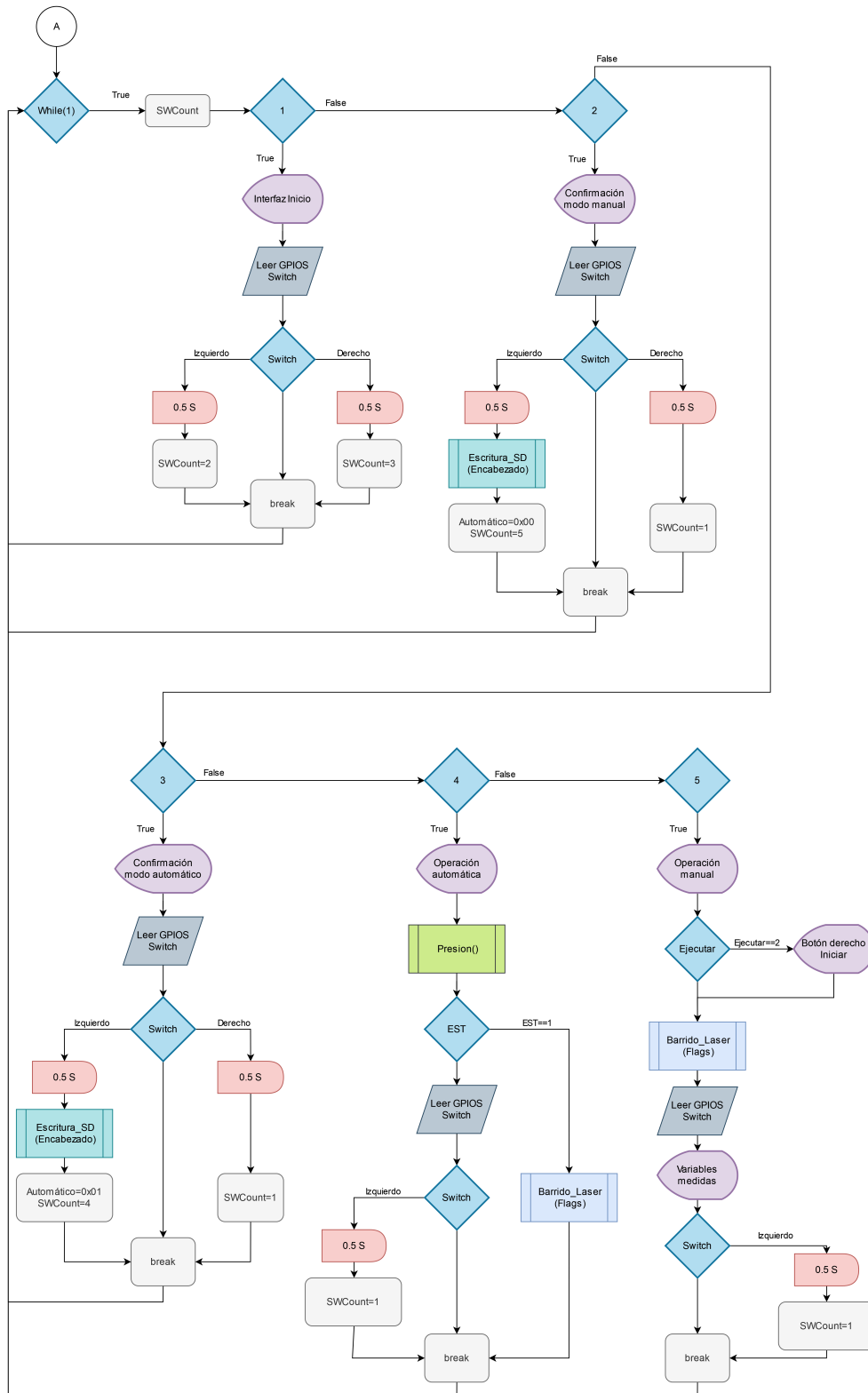
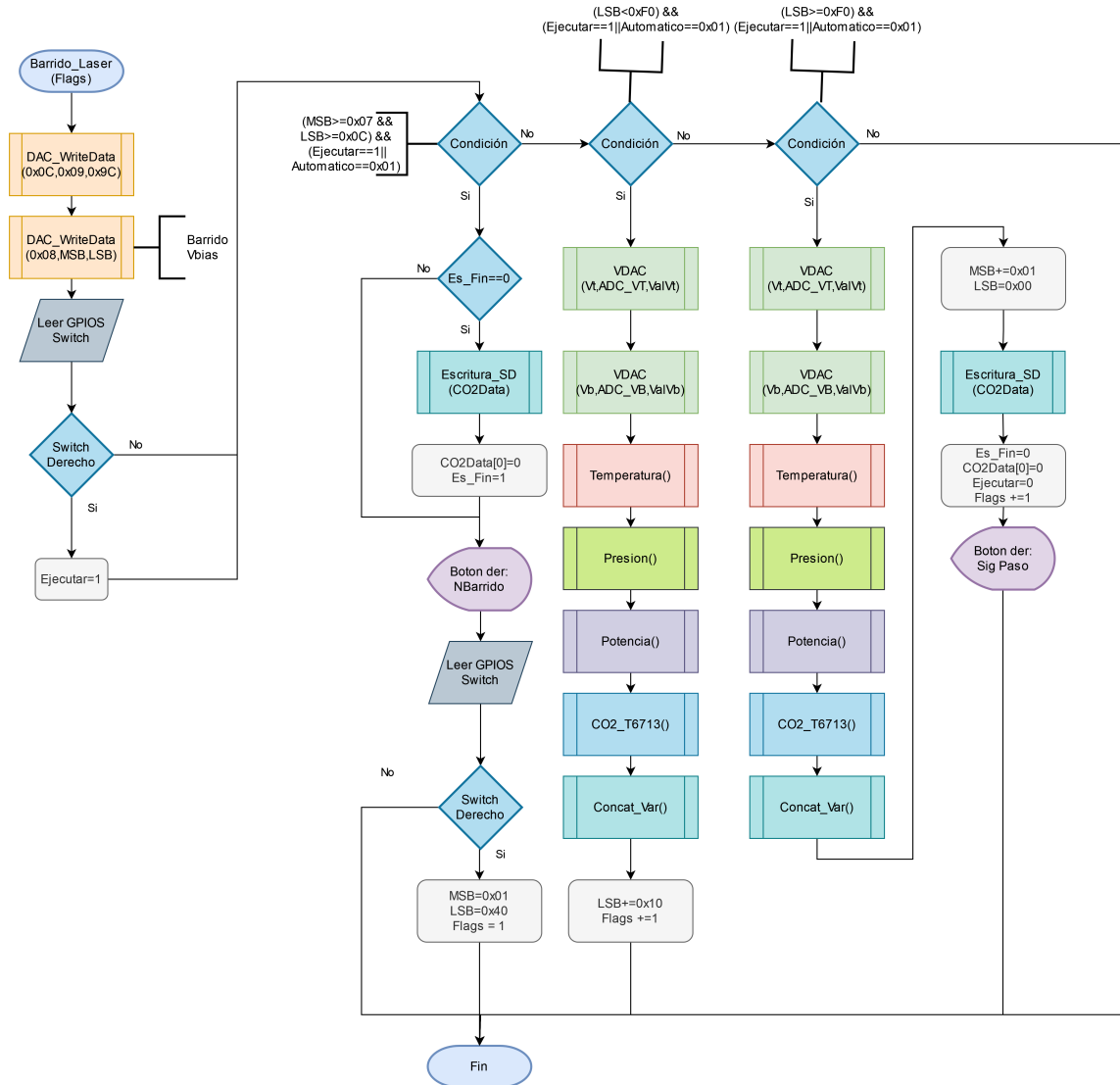


Figura 55:

Algoritmo encargado del barrido láser y de la llamada a los diferentes subprocesos del sistema.



De forma general, el algoritmo de funcionamiento del sistema se describe de la siguiente forma:

Se ejecuta el inicio del sistema de la figura 53 con la inclusión de las librerías necesarias para la ejecución del código y se declaran todas las funciones y variables necesarias para el funcionamiento del mismo, en el hilo principal se procede a realizar las configuraciones preliminares como iniciar los drivers UART, I2C, SPI y del ADC, además de configurar sus

parámetros y de crear el archivo de texto donde se registrarán las mediciones, luego de esto se encienden los canales del DAC que entregarán las tensiones  $V_{tec}$  y  $V_{bias}$  al módulo DX1.

Luego de esto se pasa a un ciclo que se ejecuta de forma continua, el cual se observa en la figura 59 en el cual se encuentran las interfaces como fueron definidas en la sección 7.04 figura 39, se navega a través de la interfaz, hasta llegar al método que se desea ejecutar donde dependiendo de la elección, algunas variables alterarán su valor, después de esto se procede a realizar el barrido láser que funcionará de diferente forma dependiendo del modo de ejecución seleccionado.

El barrido láser de la figura 55 comienza estableciendo el valor de  $V_{tec}$  fijo a utilizar y el valor de  $V_{bias}$ , el cual va cambiando dependiendo de la ejecución del programa, pues este depende de los parámetros LSB y MSB, los cuales se corresponden al bit menos y más significativo de la trama de datos a enviar,  $V_{bias}$  inicia con un valor equivalente a 0.2V y termina en 1.11V. Se procede a comprobar varios condicionales, los cuales se encargan de realizar el aumento de la tensión de polarización del láser hasta un valor determinado.

El primer condicional comprueba si se llegó al límite máximo establecido de tensión, en caso de ser así se comprueba si se está en el último paso del barrido, si esto es correcto se escriben todos los datos a la memoria SD y si no lo es se procede a realizar un paso más para llegar al punto final, luego de esto si se está en modo manual se comprueba por medio de los switch si el usuario desea realizar otro barrido.

En caso de no estar en el límite máximo se procede a comprobar el bit menos significativo a escribir al DAC, si este se encuentra en un valor menor al máximo se procede a enviar el valor de tensión que debe entregar el DAC y se ejecutan los subprocesos de la figura 53 encargados de realizar las mediciones necesarias para obtener las variables del proyecto, como lo son la temperatura, presión, potencia y concentración de  $CO_2$ , además de concatenar estos datos en un string llamado CO2Data, luego de esto se aumenta el valor de la variable LSB en un valor correspondiente al paso de tensión deseado.

En caso de estar en el límite del valor máximo de LSB se procede a realizar el mismo procedimiento descrito anteriormente con la diferencia de que en lugar de aumentar el valor de LSB se aumenta el valor de MSB en 1, se reinicia el valor de LSB, se guarda en la memoria el string CO2Data y luego se vacía para evitar saturarlo, en caso de estar en modo manual se comprueba si se quiere realizar otra medición.

Según se termina de hacer la secuencia de subprocesos de algún condicional, se vuelve al inicio de ciclo infinito donde se entra al punto de interfaz que se eligió y, por lo tanto, se ejecuta el siguiente paso del barrido láser con el nuevo valor de tensión Vbias que debe entregar el DAC, continuando así hasta que el usuario presione el switch izquierdo con el cual se sale de la interfaz de ejecución.

## 9 Pruebas en laboratorio del sistema

### 9.1 Sensor Usado Para la Comparación

Para evaluar el correcto funcionamiento del sensor planteado e implementado se comparan sus características con los del sensor comercial, las cuales se presentan en la tabla 19

Tabla 19:

*Características del sensor de CO<sub>2</sub> comercial T6713 a comparar con el sensor implementado*

<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>
Rango de medición	400-2000 ppm
Precisión	25 ppm $\pm$ 3% de la medida
Tiempo de respuesta	3 minutos (90%)
Tiempo de calentamiento	2 minutos
Condiciones de operación	-10°C a 60°C

### 9.2 Metodología de Los Experimentos Realizados en Laboratorio.

Las mediciones se realizan en el laboratorio de óptica HDSP donde se efectúa la conexión de los dispositivos utilizados como lo son el Power Meter, el fotorreceptor y el láser DX1 con los demás subsistemas del sensor. Una vez todos los subsistemas se encuentran conectados correctamente, se realiza el barrido presionando el pulsador derecho del Launchpad con lo que se inicializa el algoritmo planteado de la sección 8.2, variando el valor de Vbias, lo que se traduce en un barrido de longitud de onda alrededor de los 2004nm.

Simultáneamente, se registran en el módulo de memoria las mediciones de los sensores externos y se utiliza el software de Optical Power Monitor para registrar los valores de potencia medidos por el fotorreceptor y visualizarlos en tiempo real, permitiendo observar si se tiene un resultado esperado.

### 9.3 Experimentos Utilizando el Sistema de Sensado

#### 9.3.1 Montaje del Sistema Planteado

Primeramente, se realiza el montaje en laboratorio de los elementos ópticos disponibles, se ensambla la celda de Herriott basándose en la simulación de la sección 6.3.1, donde se utiliza un láser visible para la alineación del haz de luz como se observa en la figura 56, pues el haz del sistema de sensado al operar a los 2004nm es invisible al ojo humano.

Figura 56:

*Elementos utilizados en el montaje inicial orientado en el uso de la celda de Herriot.*

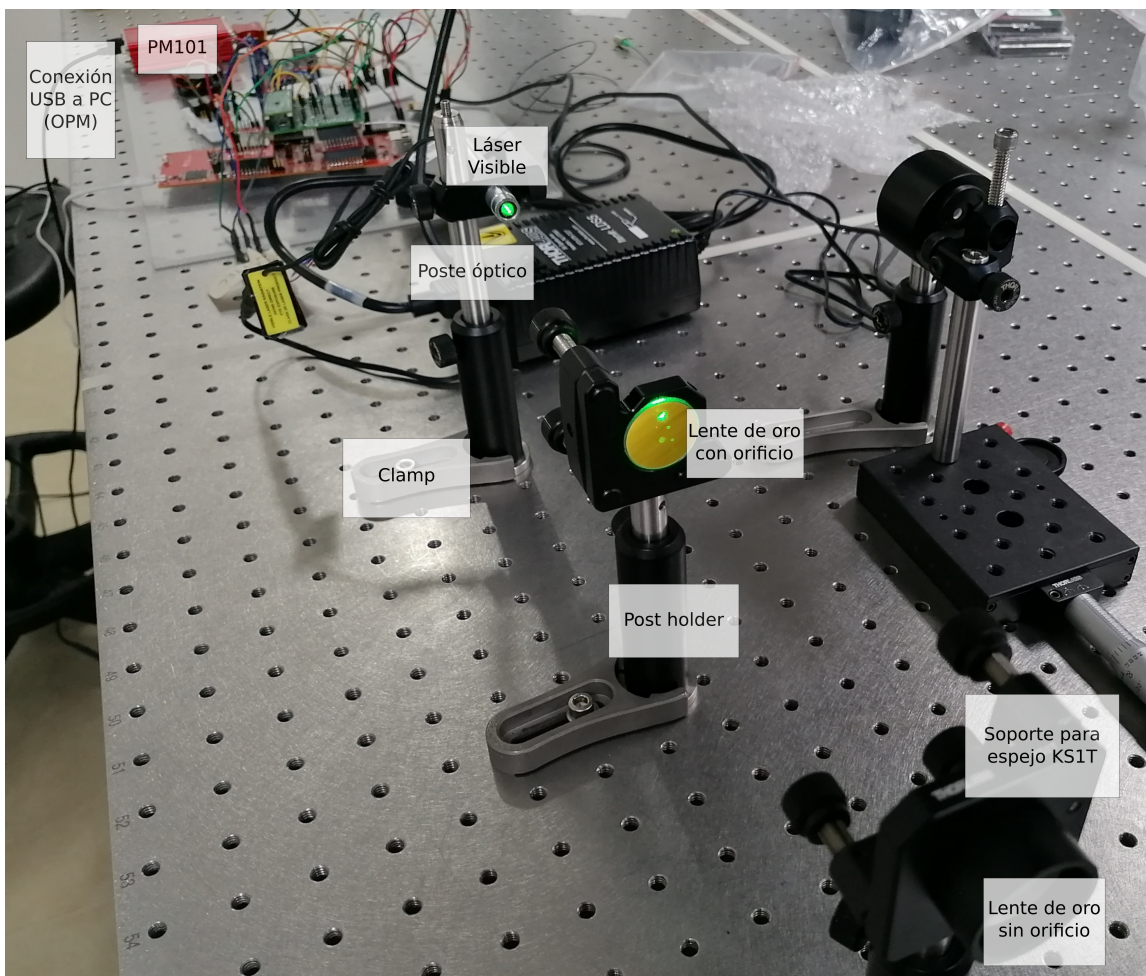
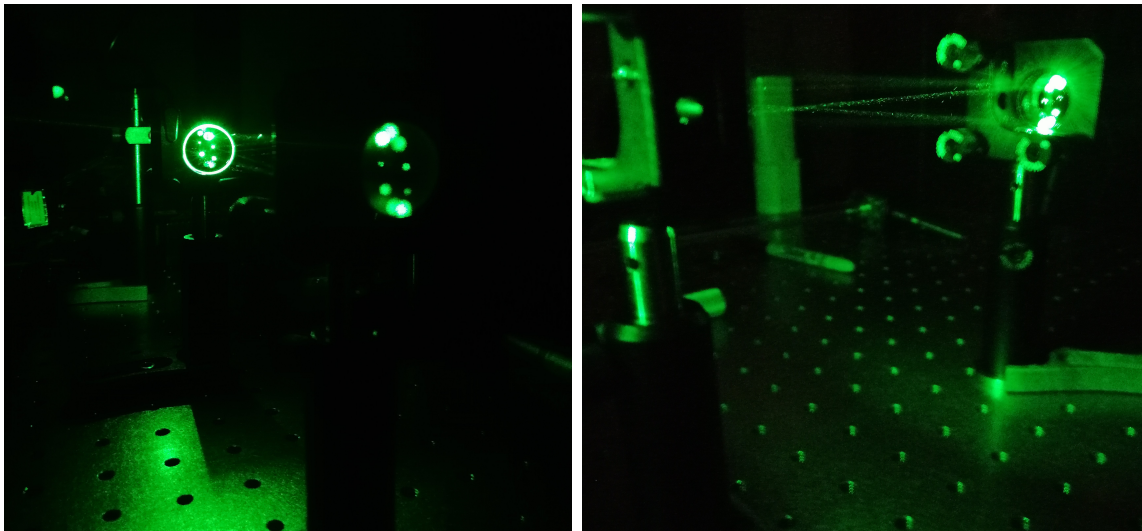


Figura 57:

*Alineación con láser visible en el sistema implementado en laboratorio.*



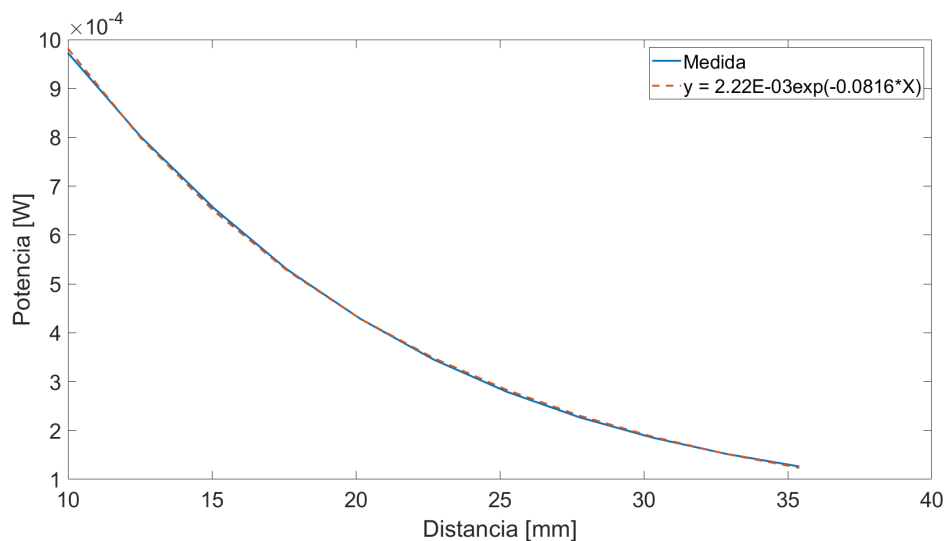
(a) Vistra trasera

(b) Vista frontal

Después de realizar el montaje con la fuente de luz visible, esta se reemplaza por el láser EP2004-0-DM-DX1-FA, sin embargo, en el fotorreceptor se observaba una señal de ruido, para analizar la posible causa de esto se posiciona el fotorreceptor frente al láser y se observan las mediciones obtenidas variando la distancia entre los dos elementos obteniendo los resultados de la figura 58.

Figura 58:

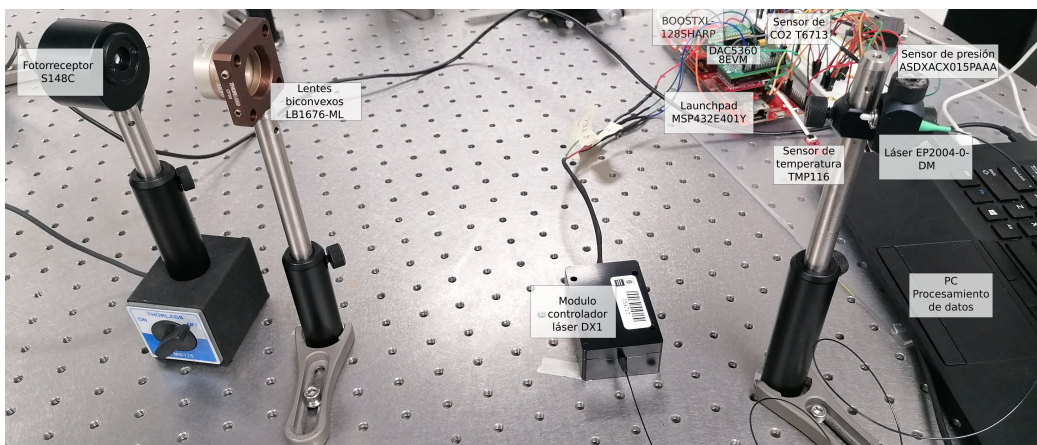
*Gráfica de Potencia obtenida al incrementar la distancia entre el fotorreceptor y el láser.*



La medición de un valor de ruido se debe a las pérdidas de carácter exponencial que experimenta el láser, lo cual desemboca en la necesidad de usar un colimador o usar los lentes de referencia LB1676-M para concentrar la potencia del haz de luz en la abertura del fotorreceptor, además de requerir disminuir la distancia total recorrida por el láser, debido a esto se modifica el montaje inicial con el fin de poder incluir estos cambios.

Figura 59:

*Elementos utilizados en el montaje final con una distancia de 34cm entre el fotorreceptor y el láser.*



Las concentraciones obtenidas para este proyecto se realizan utilizando un montaje como el que se muestra a continuación, en el cual se tiene una distancia entre la salida de la fibra óptica del láser y el fotorreceptor de 181cm.

Figura 60:

*Diagrama del montaje final realizado en SolidWorks.*

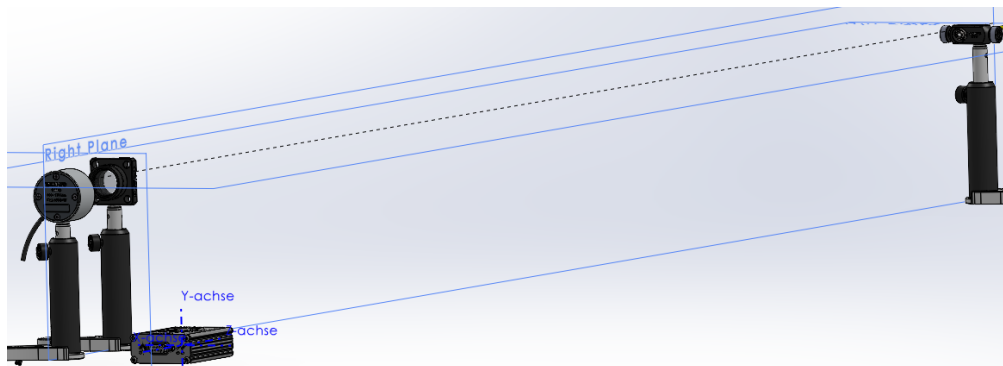
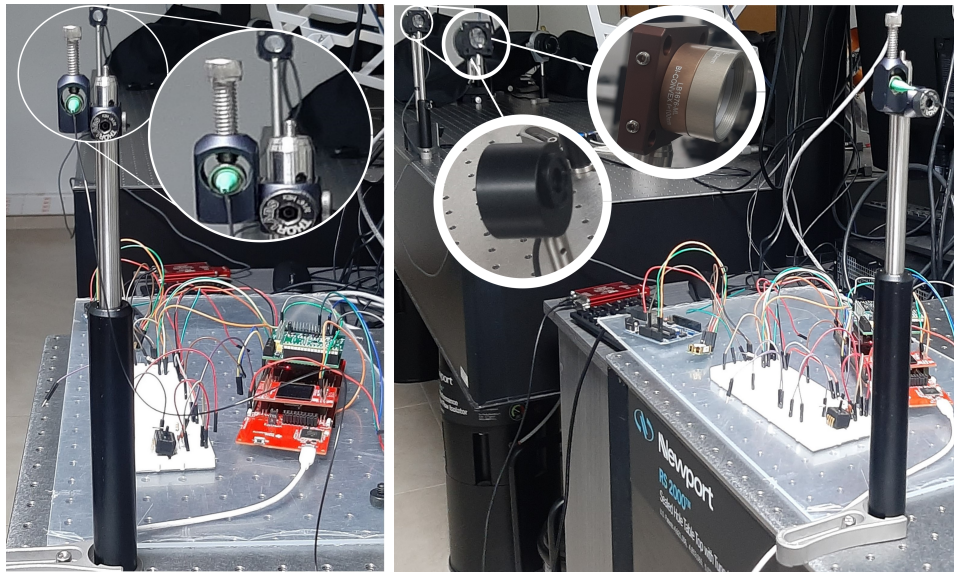


Figura 61:

*Fotografías del montaje final implementado con el cual se realizaron las últimas mediciones.*



(a) Vista trasera.

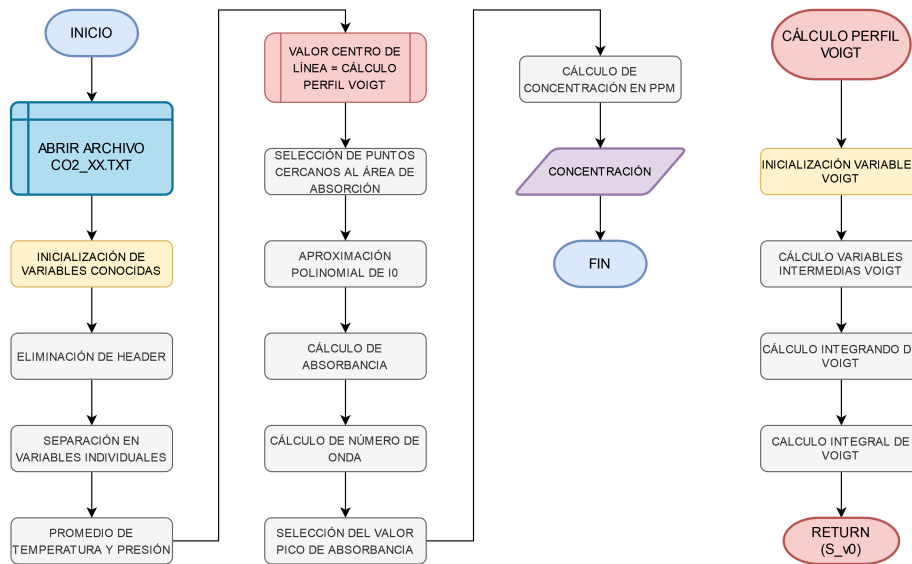
(b) Vista diagonal.

### ***9.3.2 Procesamiento de los Datos Reales Obtenidos en Laboratorio.***

Una vez concluido el barrido y cuando se han almacenado las mediciones realizadas por los sensores externos (presión, temperatura y concentración de  $CO_2$ ) y las mediciones de potencia capturadas por el fotorreceptor, se procede a procesar los datos obtenidos con el fin de calcular la concentración de  $CO_2$ , donde las muestras de potencia fueron suavizadas por medio de un filtro promedio móvil usando una versión robusta de un método de mínimos cuadrados lineales ponderados y un modelo polinomial de segundo grado. Para ello se realiza el procedimiento mostrado en el diagrama de la figura 62, el cual al igual que el mostrado en la sección 6.3.2 está basado en las ecuaciones expuestas en las secciones 4.3 y 4.5.

Figura 62:

Algoritmo de post procesamiento en MATLAB de los datos reales obtenidos en laboratorio.

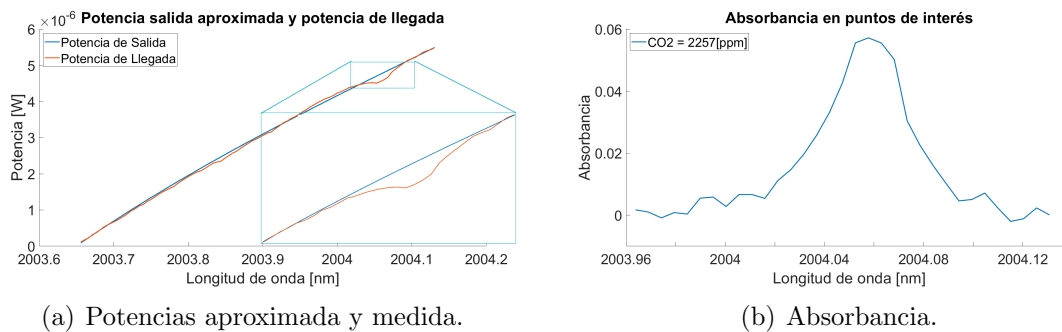


### 9.4 Resultados Obtenidos de las Mediciones en Laboratorio.

Después de procesar las mediciones se obtienen las gráficas de potencia de salida aproximada mediante un polinomio y de llegada medidas, en la figura 63 se muestra la curva de absorbanza que se corresponde a una concentración de 2257 [ppm].

Figura 63:

Curvas resultantes a partir del procesamiento de datos de una curva de potencia.



(a) Potencias aproximada y medida.

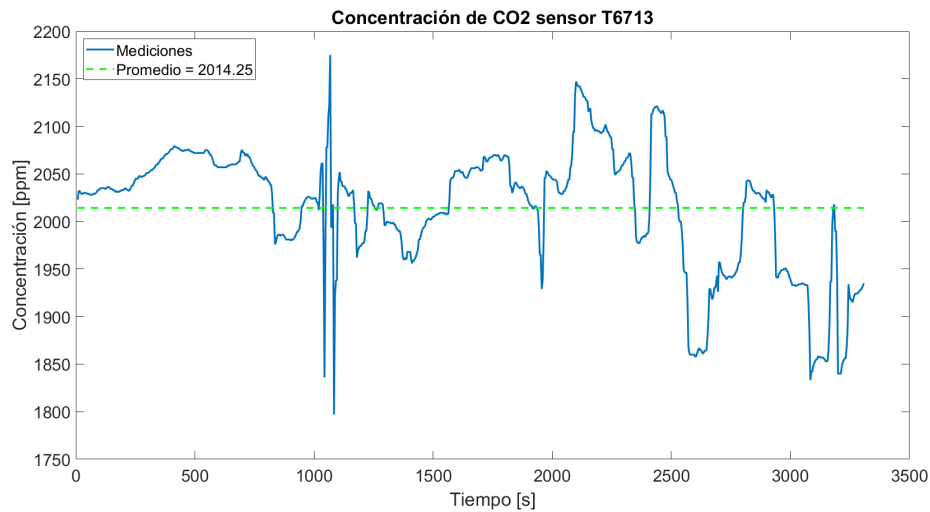
(b) Absorbancia.

Durante el proceso de obtención de datos se posee el siguiente registro de las mediciones entregadas por el sensor comercial, se presenta una disminución de los niveles de  $CO_2$

debido a la ventilación que se produce en el laboratorio al entrar y salir del mismo, lo cual disminuye la concentración de dióxido de carbono presente.

Figura 64:

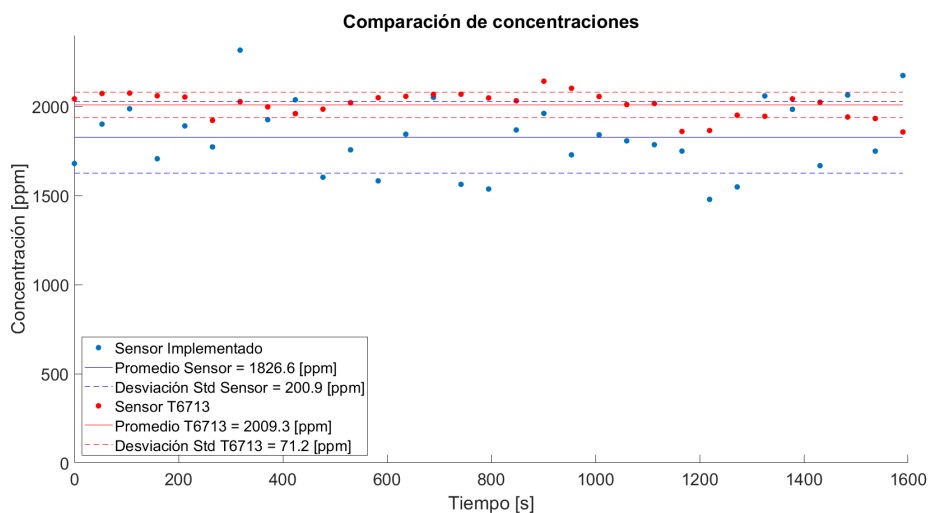
*Mediciones de concentración de CO<sub>2</sub> a lo largo del tiempo obtenidas del sensor comercial.*



Siguiendo la metodología explicada en la subsección anterior, se realizaron 31 mediciones en el laboratorio de óptica de la Universidad Industrial de Santander, que concluyeron en los resultados de la figura 65

Figura 65:

*Comparación de mediciones reales en laboratorio entre los dos sensores.*



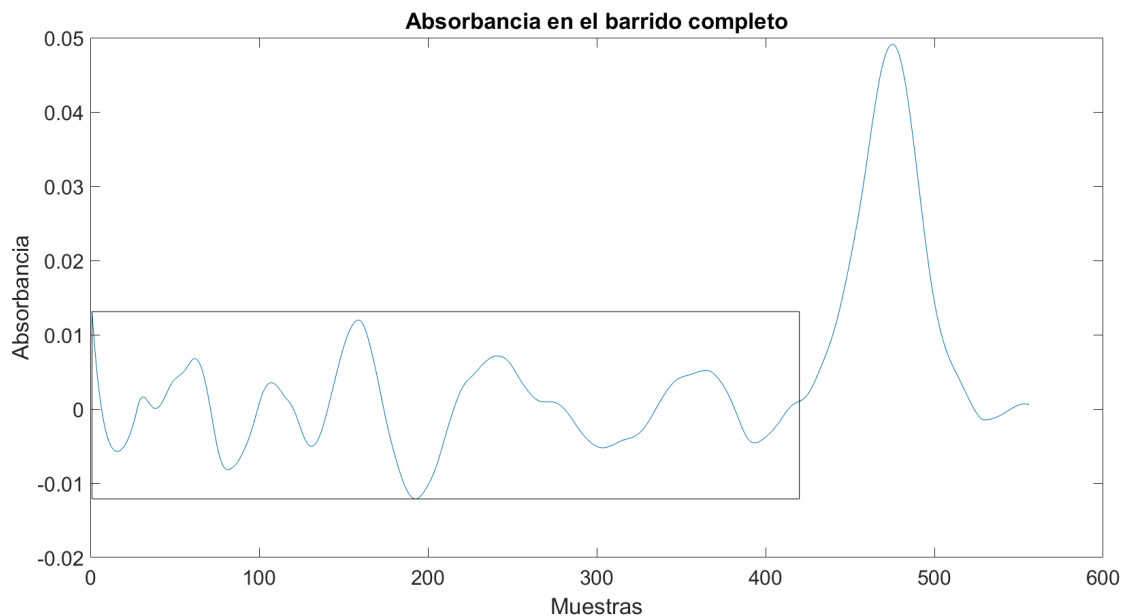
### 9.4.1 Análisis de los Resultados Medidos en el Laboratorio.

Desviación estándar: Se realiza un análisis a los valores obtenidos por el sensor implementado en el cual se obtiene una desviación estándar  $\sigma = 200.9$  [ppm] la cual se corresponde a la precisión del instrumento, donde cabe destacar que este es un resultado aproximado, pues no se posee un valor de concentración fijo, por lo tanto, en este cálculo se incluye la variación de concentración ambiente al tomar las mediciones.

Esta desviación en gran parte se debe a incertidumbres obtenidas al realizar la aproximación polinómica y el ruido presente en la medición, de forma más específica al analizar una única medición, como se puede observar en la figura 66.

Figura 66:

*Curva de absorbancia completa obtenida al realizar un solo barrido necesaria para obtener un valor de concentración de CO<sub>2</sub>.*



Se eligen los puntos donde no se debe presentar absorción por CO<sub>2</sub> (rectángulo negro) de los cuales se obtiene una desviación estándar de 0.0051 unidades de absorbancia, lo cual se corresponde a una concentración de aproximadamente 202.37 [ppm] esto se asume como ruido de fondo, además de ser consistente con la variación obtenida de las medidas.

Debido al amplio tiempo en que se realizan las mediciones, se realiza un análisis dividiendo las muestras en grupos de 10 y realizando un análisis de las mismas para intentar mitigar el efecto del cambio de concentración debido a la influencia humana en el laboratorio, el promedio de estos grupos de 10 se muestra en la figura 67, donde se tienen los resultados de la tabla 20.

Figura 67:

*Curva obtenida al dividir las mediciones en grupos de 10 para disminuir el efecto de la variación de concentración en el tiempo.*

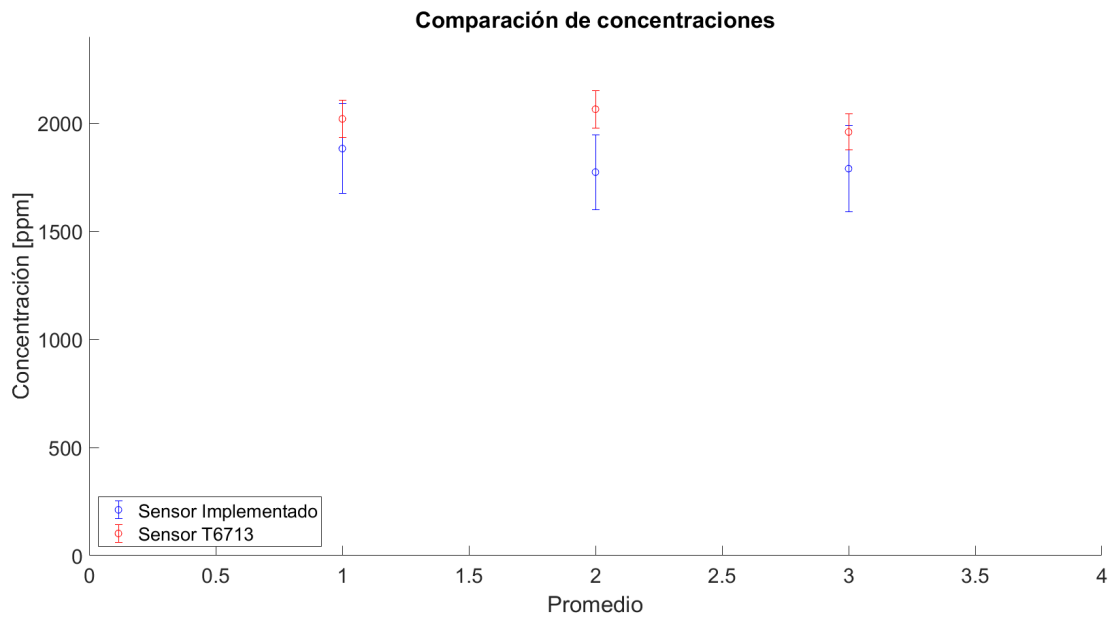


Tabla 20:

*Comparación de características entre el sensor T6713 y el sensor implementado en el presente proyecto.*

Promedios	Sensor comercial	Sensor implementado.
1 a 10	2019.6 ± 85.59 ppm	1882.2 ± 207.45 ppm
11 a 20	2064.4 ± 86.93 ppm	1773.41 ± 173.24 ppm
21 a 30	1959 ± 83.77 ppm	1789.43 ± 199.76 ppm

Los resultados del sensor comercial se toman aplicando la ecuación de la precisión que se observa en la tabla 19 entregada por Amphenol, esta diferencia en la precisión de la medición no se tuvo en cuenta en el cálculo de la desviación de la figura 65 esto hace que la desviación total sea mayor al valor de 71.2 mostrado. Al analizar los promedios, los resultados del sensor implementado demuestran ser consistentes con el análisis realizado anteriormente.

Límite de detección: El límite de detección del instrumento se calcula como 3 veces la desviación estándar, dando así un resultado de 602.7[ppm], por lo tanto, el sistema no posee la suficiente sensibilidad para la aplicación a futuro de ser enviado en el globo estratosférico, pues se esperan concentraciones al rededor de las 400[ppm] o menores, haciendo que sea necesario incrementar la sensibilidad del sistema.

Relación señal a ruido: En el caso de la figura 66 se obtiene una relación señal a ruido de 9.630 o 19.673 [dB] mediante la relación entre el máximo del pico de absorción, el cual se utiliza en el cálculo de la concentración y el ruido de fondo aproximado, por lo tanto, es correcto asumir que la medición obtenida se corresponde efectivamente a la señal.

Error: Tomando los promedios obtenidos de ambas mediciones se obtiene un error relativo del 9.091%, además de esto al analizar cada medición individual se obtiene un RRMS (error relativo promedio cuadrado) del 13.794%, estos valores son bastante altos para las aplicaciones que se esperan realizar con el instrumento.

Debido a no tener disponibles diferentes elementos como una cámara de vacío, no es posible evaluar la repetitividad con buena exactitud debido al carácter cambiante de las condiciones ambiente en el laboratorio.

## 9.5 Comparación de Características Entre el Sensor Comercial y el Sensor Implementado.

Tabla 21:

*Tabla de comparación de características entre los sensores.*

<b>Especificación</b>	<b>Sensor comercial</b>	<b>Sensor implementado.</b>
Rango de medición	400-2000 ppm	602.7-78000 ppm
Precisión	25 ppm $\pm$ 3% de la medida	$\pm$ 200.9 ppm
Tiempo de respuesta	3 minutos (90%)	54 segundos
Tiempo de calentamiento	2 minutos	4 segundos
Condiciones de operación	-10°C a 60°C	0°C a 85°C

Rango de medición: El límite inferior se toma del límite de detección del sistema, para calcular límite superior se asume que el único parámetro a alterar es la concentración de  $CO_2$  presente, teóricamente este rango de medición es infinito, sin embargo, debido a que este es un sistema real se tiene como límite detectable una medición distinguible del ruido de la potencia recibida.

De esta forma se asume que debido al fenómeno de absorción se presenta una pérdida que llega a un valor de  $8.529e-07$  W, el cual es 3 veces el valor del ruido obtenido mediante el cálculo de la desviación estándar de la señal de llegada al fotorreceptor en una longitud de onda fija, asumiendo el mismo comportamiento de la forma de onda de la potencia de salida se posee un pico de absorbancia de 1.99174 el cual se corresponde a 78804 ppm.

Precisión: Se corresponde al valor obtenido de la desviación estándar del sistema, debido a que no se posee acceso a un valor exacto de concentración, el límite de este valor será  $\pm 25$  [ppm] en caso de mejorar la sensibilidad del sistema debido a la validación por comparación con el sensor T6713.

Tiempo de respuesta: Se define como el tiempo necesario para realizar una medición, en el caso de este sistema es el tiempo en que se realiza un barrido completo en frecuencia y se guardan los datos en la memoria.

Tiempo de calentamiento: Este se define como el tiempo necesario para poder empezar a realizar mediciones desde que se enciende el sistema, en este caso se compone de un tiempo de 3 segundos en que se muestra la pantalla de presentación más 1 segundo en que se enciende el sensor de temperatura, cabe aclarar que la pantalla de presentación se puede remover disminuyendo el tiempo de calentamiento a aproximadamente 1 segundo.

Condiciones de operación: Esta característica se toma del elemento con la condición de operación que posee los límites menos extremos que compone al sistema completo, el cual es el sensor de presión. Estos valores no son aptos para realizar balonismo científico, sin embargo, se puede usar una cámara de recubrimiento que permita actuar en las condiciones atmosféricas esperadas al cubrir los elementos sensibles, donde a la salida de la misma se encuentre el sensor de temperatura extraíble y la fibra óptica del láser.

## 10 Conclusiones

Los subsistemas planteados que componen el sistema de sensado funcionan correctamente mostrando una buena sensibilidad y robustez de forma individual, lo cual hace que estos sean la elección correcta para el objetivo de la misión E3Tratos.

La implementación de todos los subsistemas del instrumento de sensado requiere haber realizado un correcto diseño de forma anticipada, para que estos interactúen entre sí como fue previsto, al realizar un análisis correcto se tiene un menor número de errores al intentar unirlos y una mayor facilidad al intentar diagnosticar y corregir estos errores. En este trabajo de investigación se logró que todos los sistemas interactúen entre sí correctamente, sin embargo, el resultado total puede ser mejorado al añadir el colimador F028APC-2000.

Al someter el sistema a diferentes pruebas se puede observar como es capaz de realizar mediciones de concentración de  $CO_2$ , lo que permite comprobar lo planteado en el marco teórico en referencia a la ley de Beer-Lambert y abre una puerta a la misión E3Tratos de utilizar la técnica TDLS para medir concentraciones de diferentes compuestos y de utilizar el montaje para construir un perfil atmosférico.

El error presente en las mediciones y las pérdidas experimentadas por el láser son parámetros críticos a los cuales se les debe dar gran consideración a la hora de implementar este tipo de sensores, debido a que resultan en efectos adversos con gran influencia en los resultados obtenidos como lo son la generación de variaciones en el cálculo de la concentración de  $CO_2$  y la limitación de la distancia óptica recorrida respectivamente.

## 11 Recomendaciones

Debido a las dificultades encontradas en este proyecto, se recomienda mejorar la SNR del sistema al integrar el colimador y buscar formas de disminuir el efecto del ruido en las mediciones, como lo pueden ser el uso de zero-air background subtraction, sweep integration, o por medio de un haz balanceado realizando la substracción del ruido de fondo usando un beam-splitter y enviando un láser a un área con  $CO_2$  y otra sin este, una vez conseguida una buena SNR realizar la implementación con la celda de Herriott.

Se recomienda conseguir cámaras de vacío e implementos capaces de alterar de forma considerable las condiciones a las que se encuentra expuesto el sistema, tales como la presión, temperatura o concentración de  $CO_2$  de forma similar a las condiciones encontradas en la atmósfera para realizar mejores pruebas de robustez.

En caso de ser necesario, en etapas finales del proyecto se pueden utilizar perfiles de línea más sofisticados que posean una resolución aún más alta que el perfil de Voigt para experimentos de sensado muy demandantes Ngo et al. (2013).

## 12 Trabajo Futuro

La etapa de procesamiento de datos es capaz de funcionar de forma autónoma correctamente, sin embargo, el guardado de los datos se realiza en una memoria microSD, para trabajos posteriores se recomienda establecer una comunicación con otros sistemas de la misión E3Tratos como lo es el de telemetría, para enviar a este dispositivo por medio del protocolo UART los datos durante el vuelo y que este los envíe a tierra para su visualización en tiempo real.

El trabajo logrado hasta el momento permite una correcta aplicación de las técnicas planteadas en el marco teórico logrando medir concentraciones de  $CO_2$  mediante la ley de Beer-Lambert, aun así este no es apto para ser embarcado en un globo estratosférico debido a su tamaño y sensibilidad, debido a esto será necesario realizar el montaje mediante la celda de Herriott para disminuir la escala total del sistema de sensado y aumentar la distancia efectiva del haz de luz incrementando así la sensibilidad del sistema.

Una vez se tenga un montaje compacto, es necesario diseñar una estructura robusta que sea posible de embarcarse en un globo estratosférico. Con el sistema ya sujetado en la base, realizar pruebas a diferentes alturas para observar la efectividad del sistema y realizar las respectivas mejoras en caso de ser necesarias.

### Referencias Bibliográficas

- Altmann, J., Baumgart, R., and Weitkamp, C. (1981). Two-mirror multipass absorption cell. *Applied Optics*, 20(6):995–999.
- Andrés, C. P. and Sergio, A. E. (2019). In *Diseño y construcción de la estructura mecánica, escudo térmico, sistema de elevación y sistema de descenso de un globo sonda estratosférico*. UIS.
- De Caro, C. and Haller, C. (2015). Uv/vis spectrophotometry-fundamentals and applications. *Mettler-Toledo International*, pages 4–14.
- Douglas, A. A. (2019). Misión e3tratos. In *ADQUISICION, TRANSMISION Y VISUALIZACION DE LA TELEMETRIA DEL GLOBO SONDA ESTRATOSFERICO DE LA MISIÓN E3TRATOS*, pages 21–58–59–60–61. UIS.
- Dufour, E. and Breon, F.-M. (2003). Spaceborne estimate of atmospheric co2 column by use of the differential absorption method: Error analysis. *Applied optics*, 42:3595–609.
- Durry, G., Amarouche, N., Zéninari, V., Parvitte, B., Lebarbu, T., and Ovarlez, J. (2004). In situ sensing of the middle atmosphere with balloonborne near-infrared laser diodes. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 60(14):3371–3379.
- Fu, B., Zhang, C., Lyu, W., Sun, J., Shang, C., Cheng, Y., and Xu, L. (2022). Recent progress on laser absorption spectroscopy for determination of gaseous chemical species. *Applied Spectroscopy Reviews*, 57(2):112–152.
- Godish, T., Davis, W. T., and Fu, J. S. (2014). *Air quality*. CRC Press.
- Heard, D. (2008). *Analytical techniques for atmospheric measurement*. John Wiley & Sons.
- Heiner, A. C. and Nelson, E. M. (2018). Espectroscopía láser de diodo sintonizable. In *Diseño del sistema de instrumentación de la misión E3Tratos para medir concentración*

*de gases atmosféricos mediante el método de espectroscopia láser de diodo sintonizable.*  
UIS.

Huang, X. and Yung, Y. L. (2004). A common misunderstanding about the voigt line profile. *Journal of the atmospheric sciences*, 61(13):1630–1632.

Jairo, A. C. G. and Leandro, S. R. R. (2021). In *Implementación de los módulos electrónicos de un sensor de concentración de CO2 atmosférico basado en espectroscopía láser de diodo sintonizable embarcado como carga útil en el globo sonda estratosférico E3Tratos*. UIS.

Jane, H. and Ralph, P. T. (2012). Optical gas sensing: a review. volume 24, page 012004. Measurement Science and Technology, IOP Publishing.

Kitchin, C. (1995). Spectrophotometry. In *Optical Astronomical Spectroscopy*, pages 214–216. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia.

Lan, L., Ghasemifard, H., Yuan, Y., Hachinger, S., Zhao, X., Bhattacharjee, S., Bi, X., Bai, Y., Menzel, A., and Chen, J. (2020). Assessment of urban co2 measurement and source attribution in munich based on tdlas-wms and trajectory analysis. *Atmosphere*, 11(1):58.

Lin, S., Chang, J., Sun, J., and Xu, P. (2022). Improvement of the detection sensitivity for tunable diode laser absorption spectroscopy: A review. *Frontiers in Physics*, page 136.

Liu, H., Tao, S., Yang, B., and Deng, H. (2015). Gas concentration measurement based on the integral value of absorptance spectrum. *Guang pu xue yu Guang pu fen xi= Guang pu*, 35(12):3490–3494.

Luis, E. P. (2018). ¿que es un globo estratosférico? un resumen sobre su funcionamiento, construcción y mecánica de vuelo. In <http://stratocat.com.ar/artics/globos0.htm>. STRATOCAT.

Manahan, S. (2017). *Environmental chemistry*. CRC press.

- Ngo, N., Lisak, D., Tran, H., and Hartmann, J.-M. (2013). An isolated line-shape model to go beyond the voigt profile in spectroscopic databases and radiative transfer codes. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 129:89–100.
- Osseiran, N. and Lindmeier, C. (2018). Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado. Retrieved from Organización Mundial de la Salud (OMS) website: <https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>.
- Ritchie, H., Roser, M., and Rosado, P. (2020). Co and greenhouse gas emissions. *Our world in data*.
- Rodriguez-Ferreira, J., Amaranto, D., Esteban-Cudriz, S., Pitta-Carvajal, A., and del Jesús Mat3n3z, M. (2021). The e3tratos mission, a colombian scientific platform based on a meteorological balloon probe. *43rd COSPAR Scientific Assembly. Held 28 January-4 February*, 43:2314.
- Tkachenko, N. V. (2006). *Optical spectroscopy: methods and instrumentations*. Elsevier.
- UNESCO and WMO (1992). Absorption band. In *International Glossary of Hydrology (2nd revised edition)*. UNESCO, WMO.
- US Department of Commerce, N. (2005). Global monitoring laboratory - trends in atmospheric carbon dioxide.
- Xia, J., Zhu, F., Bounds, J., Aluauee, E., Kolomenskii, A., Dong, Q., He, J., Meadows, C., Zhang, S., and Schuessler, H. (2022). Spectroscopic trace gas detection in air-based gas mixtures: Some methods and applications for breath analysis and environmental monitoring. *Journal of Applied Physics*, 131(22):220901.
- Xin, F., Li, J., Guo, J., Yang, D., Wang, Y., Tang, Q., and Liu, Z. (2021). Measurement of atmospheric co2 column concentrations based on open-path tdlas. *Sensors*, 21(5):1722.

Yadav, L. D. S. (2013). *Organic spectroscopy*. Springer Science & Business Media.

Apéndices

Apéndice A. Mapa de GPIOs disponibles en el Launchpad MSP432E401Y

Figura 68:

Mapa de Periféricos Disponibles en el Launchpad MPS432E401Y (Fuente: Texas Instruments)

