

Diseño del sistema de instrumentación de la misión E3Tratos para medir concentración de gases atmosféricos mediante el método de espectroscopia láser de diodo sintonizable

Heiner Antonio Cayachoa García

Nelson Eduard Merchán Sánchez

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico

Director

Julián Gustavo Rodríguez Ferreira

Ph.D en Astronomía y Astrofísica

Codirector

David Eugenio Forero Martínez

M.sC en Ciencias de la Información y las Comunicaciones

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2018

Contenido

	Pág.
Introducción	24
1. Objetivos	26
1.1 Objetivo general	26
1.2 Objetivos específicos	26
2. La Misión E3Tratos	27
3. La Atmosfera	31
3.1 La atmosfera y sus capas	31
3.1.1 La troposfera.	32
3.1.2 La estratosfera.	33
3.1.3 La mesosfera o ionosfera.	33
3.1.4 La termosfera.	33
3.1.5 La exosfera.	33
3.2 Perfil atmosférico de temperatura	34
3.3 Perfil atmosférico de presión	34
4. Fundamentos de espectroscopia de absorción	35
4.1 Espectro de transmisión atmosférico	35
4.1.1. Razones físicas de absorción de los gases.	36
4.2 Espectroscopia	41

4.2.1 Espectros de absorción y transmisión.	42
4.3 Espectroscopia de absorción laser de diodo sintonizable	43
4.3.1 Espectroscopia directa.	43
4.3.2 Espectroscopia por modulación de longitud de onda WMS.	43
4.4 Las líneas espectrales	45
5. Diseño del instrumento	51
5.1 Diagrama general, principio básico y elementos principales	52
5.1.1 El diodo laser.	53
5.1.2 La celda óptica multipaso Herriott.	60
5.1.3 Fotodetector.	61
5.1.4 Procesamiento de la señal.	63
5.2 Diseño detallado del instrumento	64
5.2.1 Bloque 1: Generación de las señales para la modulación WMS.	65
5.2.2 Controlador de corriente de diodo.	70
5.2.3 Diseño de la celda óptica multipaso Herriott.	72
5.2.4 Detección de la señal.	78
5.2.5 Procesamiento de la señal.	79
5.2.6 Consumo de potencia del sistema.	82
6. Descripción del funcionamiento del instrumento	83
6.1 Diodo laser y controlador de corriente	83
6.2 Celda óptica multipaso	86
6.2.1 Absorción del haz de luz debido a su interacción con el gas.	87
6.2.2 Absorción del haz de luz debido a los espejos de la celda óptica multipaso.	87

6.2.3 Absorción del haz de luz debido a la fibra óptica.	88
6.3 Recepción de la señal	88
6.4 Procesamiento de la señal	89
7. Simulaciones y resultados obtenidos	89
7.1 Resultados del diseño de las interfaces mecánicas y recomendaciones para la construcción del instrumento	90
7.2 Procedimiento de la simulación	93
7.2.1 Bloque 1: Señales generadas para la modulación WMS.	93
7.2.2 Bloque 2: Diodo laser y controlador de corriente.	94
7.2.3 Bloque 3: Celda óptica multipaso.	95
7.2.4 Bloque 4: El fotodetector.	97
7.2.5 Obtención de la forma de la línea de absorción.	98
7.2.6 Obtención del segundo armónico de la señal, amplificador Lock-In.	99
7.2.7 Relación de la curva del segundo armónico con la concentración del gas.	100
7.3 Resultados de la simulación de la obtención del segundo armónico teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas a diferentes alturas y su relación con la concentración del gas.	101
7.3.1 Simulación del sistema a 0 m de altitud.	102
7.3.2 Simulación a 1 km de altitud.	103
7.3.3 Simulación a 5 km de altitud.	105
7.3.4 Simulación a 10 km de altitud.	106
7.3.5 Simulación a 15 km de altitud.	108
7.3.6 Simulación a 20 km de altitud.	109
7.3.7 Simulación a 25 km de altitud.	111

7.3.8 Simulación a 30 km de altitud.	112
7.3.9 Simulación a 35 km de altitud.	114
7.4 Variación del índice de modulación con la altitud.	116
7.5 Variación del ancho de banda a media altura debido a la altitud.	117
7.6 Variación de las características del segundo armónico con la altitud	118
7.7 Listado de elementos	120
8. Análisis de ruido	121
8.1 El ruido	121
8.2 Las derivas	122
8.3 Interferencias ópticas	122
8.4 Ruido de fondo de la celda	122
9. Conclusiones	123
Referencias Bibliográficas	125
Apéndices	129

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Sistema de interfaz mecánica de la misión E3Tratos: A) Globo sonda. B) Paracaídas. C) Góndola donde se encuentra albergada la carga útil del sistema.....	27
Figura 2. Vista interna de la góndola donde se encuentra la carga útil del globo sonda, en ella se encuentra: A) El sensor de CO ₂ . B) Las tarjetas de control del sensor de CO ₂ . C) La estación meteorológica y componentes del radio enlace. D) Baterías y electrónica de control del sistema. E) Antena del radio enlace.....	28
Figura 3. Perfil atmosférico de temperatura hasta 35 km de altura, correspondiente a la troposfera y gran parte de la estratosfera. En la cual se pueden visualizar valores de: 295 K a 0 km, 223.16 K entre 11 y 20 km, 224 a 235 K entre 20 y 32 km y 235 a 243 K entre 32 y 35 km de altura. Adaptado de (Minzner, Champion, & Pond, 1959).....	29
Figura 4. Perfil atmosférico de presión hasta 35 km de altura, correspondientes a la troposfera y gran parte de la estratosfera. En la imagen se puede visualizar que esta presión disminuye con respecto a la altura teniendo un valor de 1.1243 atm a 0 km y 0.0072 atm a 35 km de altura. Adaptado de (Minzner et al., 1959).	30
Figura 5. Distribución de las capas atmosféricas según el comportamiento de la temperatura en la altura, se divide en 5 capas que son: Troposfera, Estratosfera, Mesosfera o Ionosfera, Termosfera y Exosfera. Adaptado de: http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2500/2555/html/3_estructura.html	32

Figura 6. Perfil atmosférico de temperatura desde la superficie terrestre hasta 100 km de altitud, corresponde al comportamiento de la temperatura en las capas troposfera, estratosfera, mesosfera y parte de la termosfera. Adaptado de: (Minzner et al., 1959). 34

Figura 7. Perfil atmosférico de presión desde la superficie terrestre hasta 100 km de altitud, corresponde al comportamiento de la presión en las capas troposfera, estratosfera, mesosfera y parte de la termosfera. Adaptado de: (Minzner et al., 1959). 35

Figura 8. Espectro de transmisión atmosférico, muestra como la atmosfera permite el paso de la radiación a diferentes longitudes de onda. Adaptado de (Rodriguez Ferreira, 2015)..... 36

Figura 9. Transiciones de energía en las diferentes regiones del espectro electromagnético. Adaptado de Chen(2010). 37

Figura 10. Absorción de la luz luego de recorrer una distancia L donde hay presencia de moléculas de un gas. 39

Figura 11. Espectro de absorción de diferentes compuestos de la atmosfera, de abajo hacia arriba observamos: Vapor de agua (H₂O), Dióxido de carbono (CO₂), Oxigeno molecular (O₂) y Ozono (O₃) y por último el espectro que equivale a la absorción atmosférica total, el rectángulo azul indica la región del espectro infrarrojo cercano (NIR) y el recuadro rojo la absorción atmosférica debido al CO₂. Es de resaltar que esta banda se encuentra sola, no hay presencia de absorciones debido a otros gases atmosféricos. Adaptado de:
<http://www.eumetrain.org/data/3/359/navmenu.php?tab=2&page=3.0.0>. 42

Figura 12. a) Procedimiento de la espectroscopia directa. b) Procedimiento de la espectroscopia con modulación de longitud de onda WMS. Adaptado de Chen (2010). 44

Figura 13. Líneas espectrales: a) Espectro electromagnético continuo. b) Líneas de emisión. c) Líneas de absorción. La suma de los espectros b y c dan como resultado el espectro a. Adaptado de: https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_espectral. 46

Figura 14. Forma de la línea de absorción: La línea azul corresponde al perfil de tipo Lorentziano y la línea roja al perfil de tipo Gaussiano. Adaptado de <http://la-mecanica-cuantica.blogspot.com/2009/08/interaccion-con-un-campo.html>..... 47

Figura 15. Curvas del primer y segundo armónico de la función Lorentziana, la curva roja de línea discontinua corresponde al primer armónico y la línea azul de línea continua al segundo armónico. 50

Figura 16. Intensidad de la línea de absorción del CO₂ alrededor de los 2004 nm, esta es igual a la ecuación de la forma de la línea $g(\nu)$ multiplicada por la fuerza de línea $S(T)$, su amplitud y su ancho varia con las condiciones de presión y temperatura a las que se encuentre el gas. 51

Figura 17. Diagrama de bloques general del sistema de instrumentación, los elementos principales son: (1) El diodo laser. (2) La celda óptica multipaso. (3) El fotodetector. (4) El procesamiento de señal. Adaptado de Chen (2010)..... 53

Figura 18. Diodo laser EP 2004-DM-B el cual ha sido desarrollado para precisión en el sentido de CO₂ en la longitud de onda 2004 nm. Adaptado de hoja de datos diodo laser EP 2004-DM-B. 54

Figura 19. Espectro de emisión del diodo laser EP 2004-DM-B, utilizado en nuestro diseño del sistema de instrumentación para medir concentración de CO₂. Adaptado de hoja de datos diodo laser EP 2004-DM-B..... 55

Figura 20. Variación de la longitud de onda emitida por el diodo laser EP 2004-DM-B en función de la corriente de polarización. 56

Figura 21. Variación de la longitud de onda emitida por el diodo laser EP 2004-DM-B en función de la temperatura del dispositivo. 57

Figura 22. Característica P-I del diodo laser EP 2004-DM-B, la potencia emitida por el diodo laser varia al cambiar su corriente de polarización. Adaptado de hoja de datos diodo laser EP 2004-DM-B. Adaptado de hoja de datos diodo laser EP 2004-DM-B. 57

Figura 23. Tarjeta controladora de laser C150 la cual contiene un driver de control de temperatura TEC ideal para evitar calentamientos bruscos en el diodo laser es compatible con el diodo laser EP 2004-DM-B. Adaptado de hoja de datos controlador C150. 58

Figura 24. Numero de reflexiones en dos espejos esféricos de una celda Herriott. Adaptada de (Heard, 2006) 61

Figura 25. Patrón de puntos en unos de los espejos de una celda Herriott en la cual se hacen 82 reflexiones. Adaptada de (Dyroff, 2008). 61

Figura 26. Fotodetector S148C el cual recibe la señal que es detectada luego de la interacción con el haz de luz y los espejos. Este detector proporciona un rango de potencia óptica adecuado para el rango de potencia esperado de la señal. Adaptado de hoja de datos fotodetector S148C. 62

Figura 27. Responsividad del fotodetector InGaAs esfera integradora S148C, el recuadro rojo indica el rango de interés de nuestro sistema funcional es alrededor de los 2004 nm. Adaptado de hoja de datos fotodetector S148C. 63

Figura 28. Diagrama de bloques del modelo funcional del sensor de CO₂. Bloque 1: Generación de las señales rampa y senoidal necesarias para la modulación WMS. Bloque 2: Controlador de corriente de diodo láser y emisión del haz de luz. Bloque 3: Celda óptica multipaso donde el haz de luz interactúa con gas. Bloque 4: Detección de la señal. Bloque 5: Procesamiento de la señal. Adaptado de Chen (2010). 64

Figura 29. Circuito esquemático generador de onda rampa con el integrado ICL8038, la señal V_{RAMPA} presenta la forma de una onda rampa con 1.4 V de amplitud y 50 Hz de frecuencia..... 67

Figura 30. Onda rampa de 50 Hz de frecuencia y 1.4 V de amplitud generada con el integrado ICL8038 con el fin de variar la corriente del láser y muestrear la línea de absorción del CO₂ alrededor de 2004 nm..... 67

Figura 31. Interacción de la señal senoidal con la línea de absorción, mientras la señal rampa realiza un barrido, esta interactúa rápidamente con diferentes puntos. Adaptado de (Rodríguez Ferreira, 2015)..... 68

Figura 32. Circuito esquemático generador de onda seno con el integrado ICL8038, la señal V_{SENO} tiene la forma de una onda senoidal de 50 mV de amplitud y 10 kHz de frecuencia. 69

Figura 33. Onda senoidal de 10 kHz de frecuencia y 50 mV de amplitud generada con el integrado ICL8038 con el fin de interactuar rápidamente con la línea de absorción mientras la onda rampa realiza el muestreo de la línea de absorción del CO₂ alrededor de 2004 nm. 69

Figura 34. Forma de la señal que circula a través del diodo laser la cual da lugar a la modulación de longitud de onda del dispositivo, la forma de la señal corresponde a la suma de la onda rampa con la onda senoidal..... 70

Figura 35. Rango de trabajo de longitud de onda en el diodo laser generado por la variación de la corriente alrededor del punto de polarización $I_p = 80$ mA. 71

Figura 36 . Rango de trabajo de potencia emitida por el diodo laser generado por la variación de la corriente alrededor del punto de polarización $I_p = 80$ mA. 71

Figura 37. Proyección de ángulos θ : Los círculos en color negro representan los puntos reflejados en un espejo y los círculos en color blanco los puntos en el otro espejo. Recuperado de https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=8169. 73

Figura 38. Sistema de coordenadas entre dos espejos de una celda, en el cual el orificio está ubicado en eje X (posición X_0) y el eje Z se toma como eje central. Adaptado de (Altmann et al., 1981) 74

Figura 39. Distancias del espejo esférico utilizado, d_1 representa la distancia fuera del eje principal (off-axis) y d_2 el diámetro del orificio. 77

Figura 40. Celda óptica multipaso Herriott donde $d=f$ 78

Figura 41. Circuito esquemático amplificador de transimpedancia con el integrado LTC6268 para convertir en tensión la señal de corriente proveniente del fotodetector..... 79

Figura 42. Diagrama de bloques correspondiente a la simulación del dispositivo, la señal inicialmente sale del diodo laser, interactúa con el CO₂ en la celda óptica donde se absorbe, también se tiene en cuenta la absorción sufrida debido a los espejos que hacen parte de la celda óptica y la fibra óptica que conduce la señal, finalmente la salida del fotodetector y la adecuación antes de ser procesada. 83

Figura 43. Las señales rampa y senoidal se suman para ser inyectadas al controlador laser C150 donde a través de este opera el diodo laser en el rango indicado de longitud de onda. 85

Figura 44. Intensidad o irradiancia emitida por el diodo laser durante su operación en el modelo funcional desarrollado en el presente proyecto..... 86

Figura 45. Curva de transmisión de los espejos utilizados en el diseño de la celda óptica multipaso..... 88

Figura 46. Vista de perfil longitudinal de los componentes ópticos del instrumento. La figura muestra las ubicaciones y elementos en la celda. La distancia de separación entre los espejos es de 200 mm En el esquema se muestran las posiciones de los soportes tipo tornillo en los cuales se albergan los espejos. Estos soportes están montados sobre la base de aluminio a 36.26 mm El

plano de entrada del fotodetector S148C (2) está a una distancia de 244.54 mm Del plano del espejo perforado. El soporte (3) de la fibra que transmite la luz del diodo laser está sobre la base de aluminio a 21.44 mm..... 91

Figura 47. Espejos y soportes. Espejos cóncavos de 1” (25.4 mm) de diámetro referencias CM254-100EH3-M02 y CM254-100-M02 de ThorLabs con y sin orificio respectivamente, los cuales tienen un recubrimiento de oro altamente reflectivo que los hace más resistentes a la humedad y otros efectos ambientales. 2) Soporte tipo tornillo modelo POLARIS-B1S de la marca Polaris el cual está diseñado para las dimensiones de estos espejos..... 92

Figura 48. Componentes de soporte de la fibra del láser. 1) Soporte HCP en el cual se monta el respectivo acoplador de la fibra. 2) Acoplador PAF2-5D (colimador) montado sobre el soporte HCP con el objetivo de hacer pequeños cambios en las alineaciones de posición y salida del haz de luz. 3) Conector de la fibra 30126C3 el cual une el conector de salida de la fibra con la entrada del acoplador. 92

Figura 49. Diagrama de bloques del sistema de instrumentación para medir concentración de CO₂ atmosférico, las flechas rojas corresponden a las señales obtenidas de la simulación cuyo procedimiento se describe a continuación. V_i indica la señal de tensión que ingresa al controlador de corriente de diodo láser, I_{DL} indica la corriente que circula a través del diodo laser la cual es controlada por el controlador, I_0 indica la intensidad emitida por el diodo, I_R indica la intensidad recibida por el fotodetector, i_P indica la corriente del fotodetector, esta depende de la responsividad del dispositivo, V_0 indica el voltaje de salida del amplificador de transimpedancia, V_{AR2} indica la señal del segundo armónico del cual obtenemos la concentración del gas en estudio. Adaptado de Chen (2010)..... 93

Figura 50. Suma de las señales senoidal y rampa utilizadas para llevar a cabo la modulación de longitud de onda del diodo laser EP 2004-DM-B..... 94

Figura 51. Señal modulada de corriente que circula a través del diodo laser, la cual se controla por medio de la tarjeta C150 y genera el barrido de longitud de onda emitida por el dispositivo. 95

Figura 52. Intensidad emitida por el diodo láser en el rango de número de onda barrido por la modulación..... 95

Figura 53. Absorción del haz de luz en la celda óptica multipaso, la línea azul corresponde a la intensidad I_0 emitida por el diodo laser y la línea negra a la recibida I_R en el fotodetector, el haz de luz sufre atenuaciones por el gas, los espejos y la fibra óptica que lo conduce. 96

Figura 54. Forma de la corriente en el fotodetector, esta depende de la responsividad característica del dispositivo. 97

Figura 55. Señal de voltaje de salida del amplificador de transimpedancia. 98

Figura 56. Forma de la línea de absorción del CO₂ correspondiente a los 2004 nm. 99

Figura 57. Curva del segundo armónico de la función Lorentziana obtenido por la simulación de la absorción para el ejemplo de 15000 ppm, esta señal tiene características relacionadas con la concentración del gas en estudio..... 99

Figura 58. Resultados obtenidos del valor máximo del segundo armónico en relación con la concentración para el ejemplo de simulación correspondiente a diferentes valores de concentración desde 10 ppm a 450 ppm. 100

Figura 59. Resultados obtenidos del valor máximo del segundo armónico en relación con la concentración para el ejemplo de simulación correspondiente a diferentes valores de concentración desde 1000 ppm a 18000 ppm. 101

Figura 60. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 0m de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm,380 ppm, 450 ppm y 600 ppm..... 102

Figura 61. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 0 m de altitud. 103

Figura 62. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 1 km de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm..... 104

Figura 63. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 1 km de altitud. 104

Figura 64. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 5 km de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm..... 105

Figura 65. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 5km de altitud. 106

Figura 66. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 10 km de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm..... 107

Figura 67. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 10 km de altitud. 107

Figura 68. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 15 km de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm..... 108

Figura 69. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 15 km de altitud. 109

Figura 70. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 20 km de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm..... 110

Figura 71. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 20 km de altitud. 110

Figura 72. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 25 km de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm..... 111

Figura 73. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 25 km de altitud. 112

Figura 74. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 30 km de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm..... 113

Figura 75. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 30 km de altitud. 113

Figura 76. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 35 km de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm..... 114

Figura 77. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 35 km de altitud. 115

Figura 78. Variación del índice de modulación (m) con la altitud, los puntos rojos muestran los valores correspondientes de (m) para 0 m, 1 km, 5 km, 10 km, 15 km, 20 km, 25 km, 30 km y 35

km, la línea azul indica el comportamiento aproximado de (m) en todo el recorrido del vuelo del globo sonda. 116

Figura 79. Curva de máximos de la amplitud del segundo armónico, la línea azul indica la forma de la ecuación (19) evaluada en $x=0$ y $n=2$, los puntos rojos indican en qué valor se ubican los índices de modulación obtenidos en la simulación del sistema a diferentes valores de altitud.. 117

Figura 80. Variación del ancho de banda a media altura en función de la altitud recorrida por el globo sonda del proyecto E3Tratos, los puntos rojos indican los sitios de altitud simulados y la línea azul la forma aproximada del comportamiento de dicha variación. 118

Figura 82. Variación del ancho del segundo armónico debido al cambio del índice de modulación, la amplitud del armónico varía en función de los parámetros $S(T)$, P , χ , N , L , Δv_c , presentados en la sección 4.4. 119

Figura 83. Variación de la amplitud del segundo armónico con el aumento de la altitud, como se menciona en la sección 4.4 esta depende de $S(T)$, P , χ , N , L , Δv_c 119

Figura 81. Forma de ruido aleatorio que se presenta en cualquier banda del espectro y afecta el comportamiento del sistema. 121

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Rangos mínimos y máximos de la temperatura y presión durante el recorrido del globo sonda.	30
Tabla 2. Características electro-ópticas del diodo laser EP 2004-DM-B	54
Tabla 3. Características eléctricas del controlador C150.....	59
Tabla 4. Características de control de diodo laser, controlador C150	60
Tabla 5. Especificaciones del detector S148C utilizado en el desarrollo de este proyecto	62
Tabla 6. Características técnicas del circuito integrado generador de señales ICL8038.	67
Tabla 7. Características de los espejos utilizados en el diseño de la celda óptica Herriott.	76
Tabla 8. Datos obtenidos del diseño de la celda óptica multipaso Herriott.	76
Tabla 9. Valores para el comportamiento de la celda.....	77
Tabla 10. Características del amplificador de transimpedancia CI LTC 6268	79
Tabla 11. Características de las tarjetas para realizar el procesamiento de señal.	81
Tabla 12. Consumo de potencia de los elementos que forman el sistema de instrumentación. ..	82
Tabla 13. Masa de los elementos que componen el sistema de instrumentación.	82
Tabla 14. Características de operación del diodo laser en el funcionamiento del modelo funcional de sensor de CO ₂	85
Tabla 15. Listado de elementos necesarios para la construcción del modelo funcional de sensor de CO ₂ desarrollado en el presente proyecto.	120

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A Producción y aportes científicos	129

Resumen

TITULO: DISEÑO DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN DE LA MISIÓN E3TRATOS PARA MEDIR CONCENTRACIÓN DE GASES ATMOSFÉRICOS MEDIANTE EL MÉTODO DE ESPECTROSCOPIA LÁSER DE DIODO SINTONIZABLE*.

AUTORES: HEINER ANTONIO CAYACHOA GARCÍA
NELSON EDUARD MERCHÁN SÁNCHEZ**

PALABRAS CLAVE: ESPECTROSCOPIA, DIODO LÁSER, MODULACIÓN, GAS, EFECTO INVERNADERO, CELDA ÓPTICA, COEFICIENTE DE ABSORCIÓN, SEGUNDO ARMÓNICO, NÚMERO DE ONDA.

DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo de investigación trata sobre el diseño y la simulación del modelo funcional de un sistema de instrumentación para la misión E3Tratos, el modelo consiste en un sensor para medir concentración de gases atmosféricos, en nuestro caso se escogió dióxido de carbono CO₂, siendo este uno de los gases más importantes del efecto invernadero. El diseño del sensor se realiza utilizando la técnica de espectroscopia laser de diodo sintonizable (TDLS), con modulación de longitud de onda (WMS). Esta técnica consiste en modular la longitud de onda de emisión de un diodo laser por medio de la variación de la corriente que circula a través de este, el ancho de banda y la longitud de emisión central se seleccionan previamente con el fin de muestrear una banda de absorción atmosférica para asegurar que exclusivamente haya presencia del gas estudiado, el haz de luz emitido por el diodo láser interactúa con el gas en una celda óptica multipaso, finalmente la señal obtenida se descompone en armónicos, y con las características del segundo armónico podemos deducir la concentración de este gas. Este proyecto se enmarca dentro de la misión E3Tratos el cual es el primer proyecto de globos estratosféricos con carga útil científica que se está desarrollando en la Universidad Industrial de Santander (UIS). El objetivo de la misión es lanzar un globo con la instrumentación científica hacia la estratósfera y observar la superficie de la Tierra desde la estratósfera aproximadamente a 35 km de altura. El desplazamiento del globo y su carga útil permitirá medir variables meteorológicas y gases de efecto invernadero a lo largo de su recorrido. Para ello se diseñarán e implementarán los siguientes subsistemas: La instrumentación científica, la electrónica de control, un enlace radio e interfaces mecánicas.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Director Julián Gustavo Rodríguez Ferreira Ph.D en Astronomía y Astrofísica Codirector David Eugenio Forero
Martínez M.Sc en Ciencias de la Información y las Comunicaciones

Abstract

TITLE: DESIGN OF THE SYSTEM OF IMPLEMENTATION OF THE MISSION E3TRATOS TO MEASURE CONCENTRATION OF ATMOSPHERIC GASES USING THE METHOD OF TUNABLE DIODE LASER SPECTROSCOPY*.

AUTHORS: HEINER ANTONIO CAYACHOA GARCÍA
NELSON EDUARD MERCHÁN SÁNCHEZ**

KEYWORDS: SPECTROSCOPY, LASER DIODE, MODULATION, GAS, GREENHOUSE EFFECT, OPTICAL CELL, COEFFICIENT OF ABSORPTION, SECOND HARMONIC, WAVENUMBER.

DESCRIPTION:

The present research work focuses on the design and simulation of the functional model of a system of instrumentation for the mission E3Tratos, the model consists of a sensor for measuring the concentration of atmospheric gases, in our case was chosen carbon dioxide CO₂, being this one of the most important greenhouse gases the greenhouse effect. The design of the sensor is performed using the technique of tunable diode laser spectroscopy (TDLS), with wave length modulation (WMS). This technique is to modulate the emission wavelength of a laser diode by means of the variation of the current flowing through this, the band width and the length of central issuance are pre-selected with the purpose of sampling a band of atmospheric absorption to ensure that only the presence of the gas studied, the beam of light emitted by the laser diode interacts with the gas in a multipass optical cell, finally the signal obtained is decomposed into harmonics, and with the characteristics of the second harmonic imaging, we can deduce the concentration of this gas. This project is part of the mission E3Tratos which is the first project of stratospheric balloons with scientific payload that is developing in the Industrial University of Santander. The objective of the mission is to launch a globe with scientific instrumentation towards the stratosphere and observe the surface of the Earth from the stratosphere at approximately 35 km in height. The displacement of the balloon and its payload will make it possible to measure meteorological variables and greenhouse gases along its route. To do this will be designed and implemented the following subsystems: The scientific instrumentation, control electronics, a radio link and mechanical interfaces.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones Director Julián Gustavo Rodríguez Ferreira Ph.D en Astronomía y Astrofísica Codirector David Eugenio Forero Martínez M.sC en Ciencias de la Información y las Comunicaciones

Introducción

La necesidad de medir concentraciones de gases atmosféricos crece con el paso del tiempo, hoy en día la contaminación ambiental nos aqueja en todo el mundo, trayendo consigo enfermedades respiratorias presentadas principalmente en niños y adultos mayores, la quema de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo en empresas industriales hacen que las emisiones de agentes contaminantes crezcan sin llevar a cabo un control, a esto también se suma la cría de animales y la tala de árboles que además de aumentar las emisiones de gases le hacen un daño enorme a los ecosistemas (Li, Deng, Mu, Xing, & Du, 2014) (Tyler, Acevedo, Juan, & Juan, 2013).

Este proyecto de grado trata sobre el diseño y simulación del modelo funcional de un sistema de instrumentación capaz de medir concentración de CO₂ atmosférico, el diseño del dispositivo se realiza basado en la técnica de espectroscopia de absorción de diodo laser sintonizable TDLS (Tunable Diode Laser Spectroscopy) con modulación de longitud de onda WMS (Wavelength Modulation Spectroscopy), la técnica consiste en cambiar la longitud de onda de un diodo laser a través de la modulación de su corriente, esto a su vez dará lugar a una modulación de potencia debido a la característica P-I del diodo laser, con un controlador de corriente de diodo laser se lleva a cabo el control de la longitud de onda del haz de luz monocromática que este emitirá, el haz de luz emitido interactúa con el gas en una celda óptica multipaso, la celda óptica multipaso es una cavidad que está formada por espejos y elementos ópticos, cuyo fin es aumentar el recorrido del haz de luz. Luego de su paso por la celda óptica, el haz de luz se detecta mediante un fotodiodo, utilizando un amplificador de transimpedancia se convierte la señal recibida nuevamente a tensión, con un amplificador Lock-In se hace la descomposición en armónicos y finalmente en una tarjeta

de procesamiento de señal se extraen las características del gas, las cuales están codificadas en el espectro, principalmente en su segundo armónico. (Reid & Labrie, 1981) (Muñoz Closa, 2009)(Jia Chen, 2010).

El sensor diseñado en el presente proyecto hace parte de un proyecto grande de globos sonda estratosféricos que se está desarrollando en la Universidad Industrial de Santander (UIS) llamado misión **E3Tratos**.

E3Tratos es el primer proyecto de investigación de globos estratosféricos con carga útil científica que se está desarrollando en la UIS, su misión es observar la superficie de la tierra desde la estratosfera aproximadamente a 35 km de altura y medir variables meteorológicas y gases de efecto invernadero a lo largo de su recorrido, para ello se diseñaran e implementaran 3 subsistemas: La instrumentación científica basada en: cámaras de alta resolución en el visible, una estación meteorológica portátil, un sensor de CO₂ y la electrónica de control; un enlace radio que junto a una estación en Tierra permitirán realizar el seguimiento de la posición del globo sonda y recibir los datos de telemetría; una góndola que servirá como interfaz mecánica para albergar la carga útil y un sistema de propulsión-recuperación basados en un globo sonda estratosférico y un paracaídas.

El modelo funcional presentado en este trabajo de investigación es solo una parte del sistema de instrumentación científica del proyecto E3Tratos y también servirá para ser implementado en una red de monitoreo ambiental en la ciudad de Bucaramanga, en busca de realizar estudios de polución atmosférica y calidad del aire en la ciudad.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de instrumentación capaz de medir concentración de dióxido de carbono CO₂, basado en la técnica TDLS (Tunable Diode Laser Spectroscopy) con modulación de longitud de onda WMS (Wavelength Modulation Spectroscopy).

1.2 Objetivos específicos

- Conocer los fundamentos de la técnica TDLS (Tunable Diode Laser Spectroscopy) y la modulación de longitud de onda WMS (Wavelength Modulation Spectroscopy) en la determinación de parámetros principalmente la concentración de los gases atmosféricos.
- Realizar un diseño detallado, seleccionando los componentes a utilizar en el desarrollo del sensor teniendo en cuenta los requerimientos de cada subsistema y sistema general.
- Llevar a cabo el estudio detallado de cada bloque que compone el instrumento, obteniendo las simulaciones de los resultados esperados en una futura implementación.

2. La Misión E3Tratos

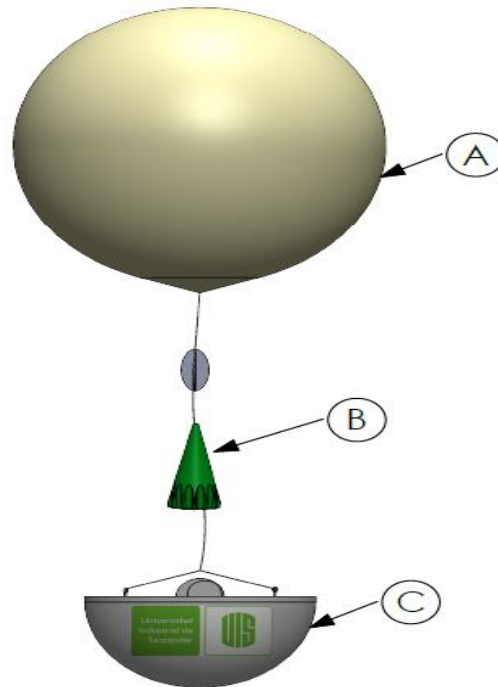


Figura 1. Sistema de interfaz mecánica de la misión E3Tratos: A) Globo sonda. B) Paracaídas. C) Góndola donde se encuentra albergada la carga útil del sistema.

La misión “E3Tratos” (Figura 1) es un proyecto del Grupo de Investigación CEMOS¹ de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) con el apoyo de los grupos de Investigación RadioGis (E3T) y GIEMA² de la escuela de Ingeniería Mecánica (EIM) de la Universidad Industrial de Santander (UIS). E3Tratos es el primer proyecto de investigación de globos estratosféricos con carga útil científica que se está desarrollando en la UIS, su misión es observar la superficie de la tierra en las bandas del espectro visible e infrarrojo cercano (VIS-NIR)

¹ CEMOS: Grupo de Investigación en Control, Electrónica, Modelado y Simulación.

² GIEMA: Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente.

desde la estratosfera, aproximadamente a 35 km de altitud, medir variables meteorológicas y concentración de gases de efecto invernadero a lo largo de su recorrido. Para ello se diseñan e implementan los 4 subsistemas mostrados en la Figura 2 los cuales son: 1) Una estación meteorológica para medir variables atmosféricas (presión, temperatura, humedad relativa) radiación solar, medición de material particulado y un sensor para medir la concentración de diversos gases. 2) Un enlace radio que junto a una estación en Tierra permitirán realizar el seguimiento de la posición del globo sonda y recibir los datos de telemetría. 3) Una góndola que servirá como interfaz mecánica para albergar la carga útil, la cual tendrá un sistema de propulsión-recuperación basados en un globo sonda estratosférico y un paracaídas. 4) La electrónica del control de todo el sistema.

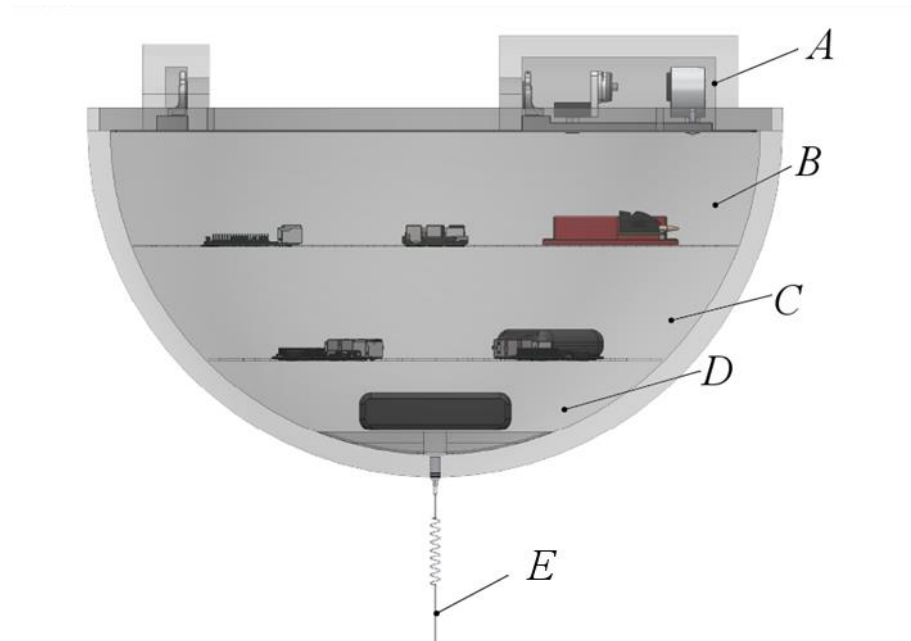


Figura 2. Vista interna de la góndola donde se encuentra la carga útil del globo sonda, en ella se encuentra: A) El sensor de CO₂. B) Las tarjetas de control del sensor de CO₂. C) La estación meteorológica y componentes del radio enlace. D) Baterías y electrónica de control del sistema. E) Antena del radio enlace.

El recorrido de la misión E3Tratos va a lo largo de las dos primeras capas atmosféricas, la troposfera y la estratosfera, los perfiles de temperatura y presión de su recorrido se muestran en la Figura 3 y Figura 4 respectivamente.

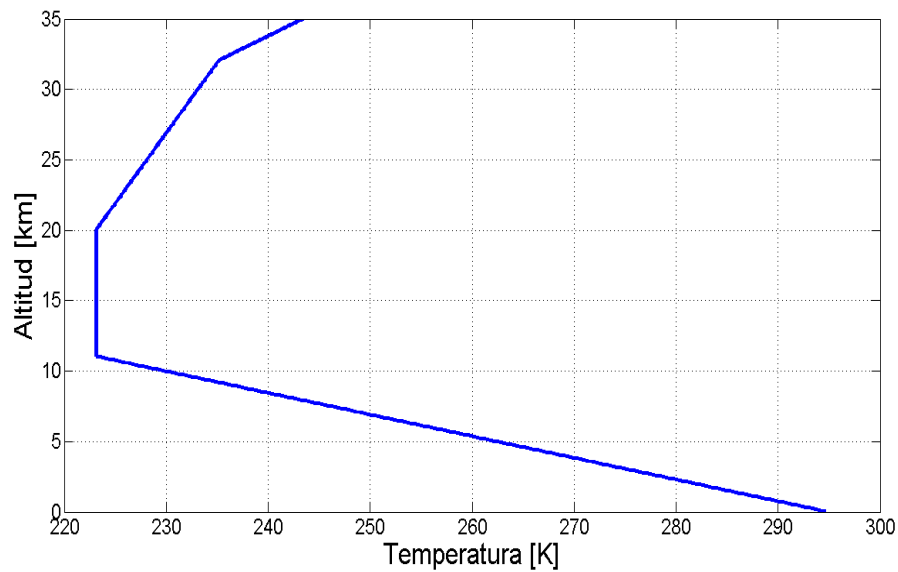


Figura 3. Perfil atmosférico de temperatura hasta 35 km de altura, correspondiente a la troposfera y gran parte de la estratosfera. En la cual se pueden visualizar valores de: 295 K a 0 km, 223.16 K entre 11 y 20 km, 224 a 235 K entre 20 y 32 km y 235 a 243 K entre 32 y 35 km de altura. Adaptado de (Minzner, Champion, & Pond, 1959).

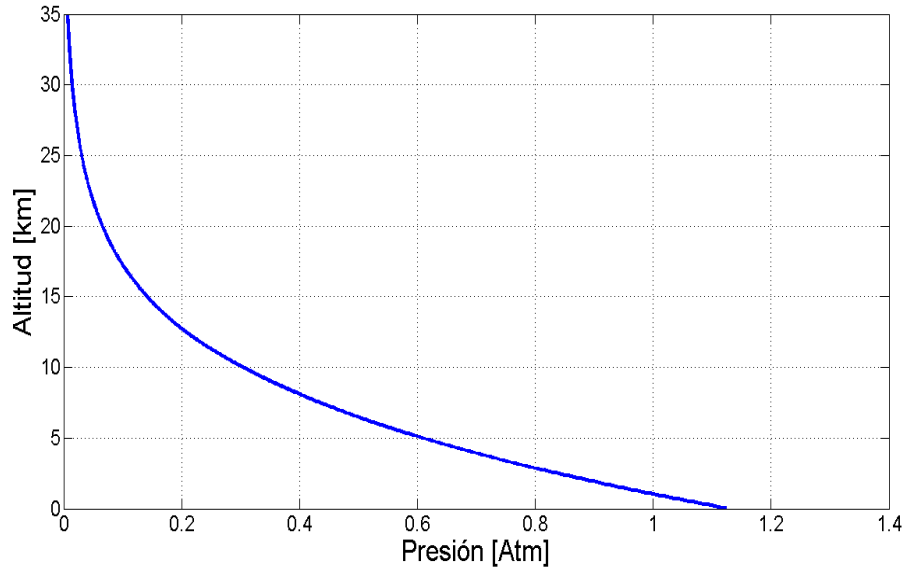


Figura 4. Perfil atmosférico de presión hasta 35 km de altura, correspondientes a la troposfera y gran parte de la estratosfera. En la imagen se puede visualizar que esta presión disminuye con respecto a la altura teniendo un valor de 1.1243 atm a 0 km y 0.0072 atm a 35 km de altura. Adaptado de (Minzner et al., 1959).

De acuerdo con el comportamiento de los perfiles atmosféricos de temperatura (Figura 3) y presión (Figura 4), el instrumento opera en los rangos mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1.

Rangos mínimos y máximos de la temperatura y presión durante el recorrido del globo sonda.

Temperatura [K]		Presión [Atm]	
T _{min}	T _{max}	P _{min}	P _{max}
223.16	294.6	0.0072	1,1243

Nota: La tabla muestra los valores de los rangos mínimo y máximo de temperatura y presión a los cuales opera el modelo funcional del instrumento durante el recorrido del globo en la atmósfera.

3. La Atmosfera

La atmosfera es la capa gaseosa que rodea la tierra, gracias a ella es posible la vida en el planeta, esta actúa como un filtro impidiendo el paso de los rayos ultravioleta gracias a la absorción de sus compuestos principalmente el ozono en diferentes bandas del espectro electromagnético, también reduce las diferencias de temperatura entre el día y la noche y actúa como escudo protector contra los meteoritos (Escamilla Canales, 2010).

3.1 La atmosfera y sus capas

Considerando la variación de la temperatura en la altura, la atmosfera se divide en 5 capas las cuales se muestran en la Figura 5, estas son: Troposfera, Estratosfera, Mesosfera o Ionosfera, Termosfera y Exosfera (Escamilla Canales, 2010).

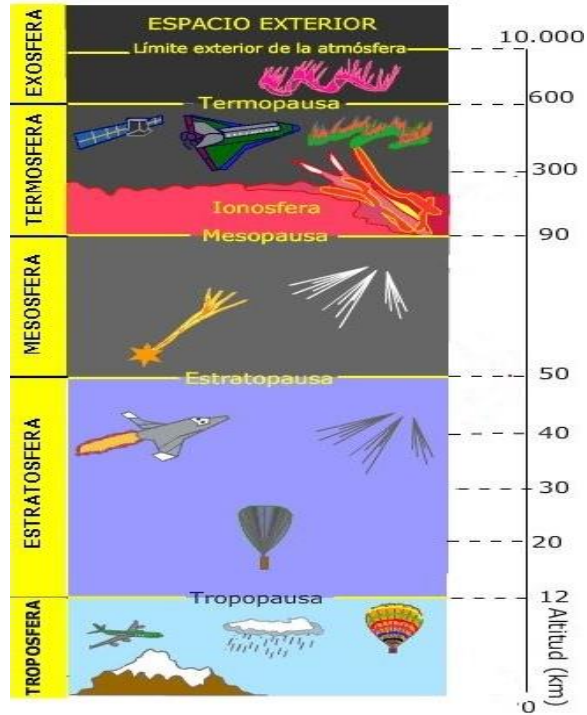


Figura 5. Distribución de las capas atmosféricas según el comportamiento de la temperatura en la altura, se divide en 5 capas que son: Troposfera, Estratosfera, Mesosfera o Ionosfera, Termosfera y Exosfera. Adaptado de: http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2500/2555/html/3_estructura.html

3.1.1 La troposfera. Es la primera capa de la atmósfera, situada desde la superficie hasta una altitud de 12 km aproximadamente (19 km en el ecuador y 9 km en los polos), en ella la temperatura disminuye a una tasa de 6.5 °C/km de altura, teniendo así un rango desde temperaturas ambiente hasta -50°C, la capa límite entre la troposfera y la estratosfera es conocida como tropopausa, allí la temperatura se mantiene constante a -50 °C, en Colombia la tropopausa alcanza una altura de 16 km aproximadamente (Pabón et al., 2000). En la troposfera se encuentra el 80% de la masa de la atmósfera, es allí donde ocurren los más relevantes fenómenos meteorológicos, también en ella se concentra la mayor parte de oxígeno (O) y vapor de agua (H₂O) (Escamilla Canales, 2010).

3.1.2 La estratosfera. Es la segunda capa de la atmósfera, va desde la tropopausa hasta unos 45-50 km de altura aproximadamente, en esta capa la temperatura aumenta con la altura hasta los 0°C, el aumento de temperatura se debe a que es allí donde se encuentra la capa de ozono (O₃), las moléculas de ozono absorben la radiación solar y la convierten en calor, al contrario de la troposfera su fuente de calor se encuentra en su límite superior a 50 km de altura, la estratopausa (Escamilla Canales, 2010) (Pabón et al., 2000).

3.1.3 La mesosfera o ionosfera. Es la tercera capa de la tierra, tiene un espesor de 35 km aproximadamente, en ella la temperatura nuevamente disminuye con la altura hasta llegar a -95°C aproximadamente a 80 km en la mesopausa, allí se mantiene nuevamente constante hasta un nivel superior no bien definido donde se encuentra la termosfera (Escamilla Canales, 2010)(Pabón et al., 2000).

3.1.4 La termosfera. La termosfera ubicada entre la mesosfera y la exosfera, va desde los 80 km hasta los 500 km de altitud, se caracteriza por alcanzar temperaturas extremadamente altas, en esta capa la radiación ultravioleta y los rayos gamma que provienen del sol provocan la ionización de átomos y moléculas, debido a esto los gases allí presentes aumentan su temperatura (Escamilla Canales, 2010)(Pabón et al., 2000).

3.1.5 La exosfera. Finalmente se encuentra la exosfera, es la capa límite entre la atmósfera y el espacio a una altura mayor a 500 km, es la región atmosférica más lejana de la superficie terrestre, allí la temperatura no varía ya que la densidad del aire es prácticamente despreciable y los gases pierden sus cualidades fisicoquímicas (Escamilla Canales, 2010).

En la Figura 6 se presenta de manera detallada el perfil de temperatura y en la Figura 7 el perfil de presión en las capas atmosféricas hasta 100 km de altitud (Minzner et al., 1959).

3.2 Perfil atmosférico de temperatura

La temperatura en la atmosfera varía en función de la altitud debido a las características de cada capa, dichas variaciones se presentan en la Figura 6.

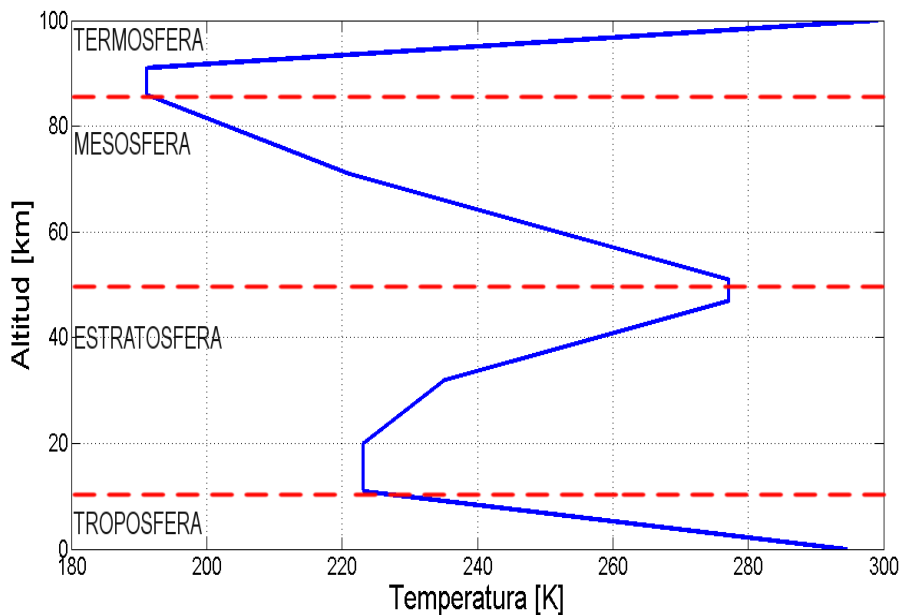


Figura 6. Perfil atmosférico de temperatura desde la superficie terrestre hasta 100 km de altitud, corresponde al comportamiento de la temperatura en las capas troposfera, estratosfera, mesosfera y parte de la termosfera. Adaptado de: (Minzner et al., 1959).

3.3 Perfil atmosférico de presión

La presión en la atmosfera disminuye en función de la altura, el perfil de presión atmosférico se muestra en la Figura 7.

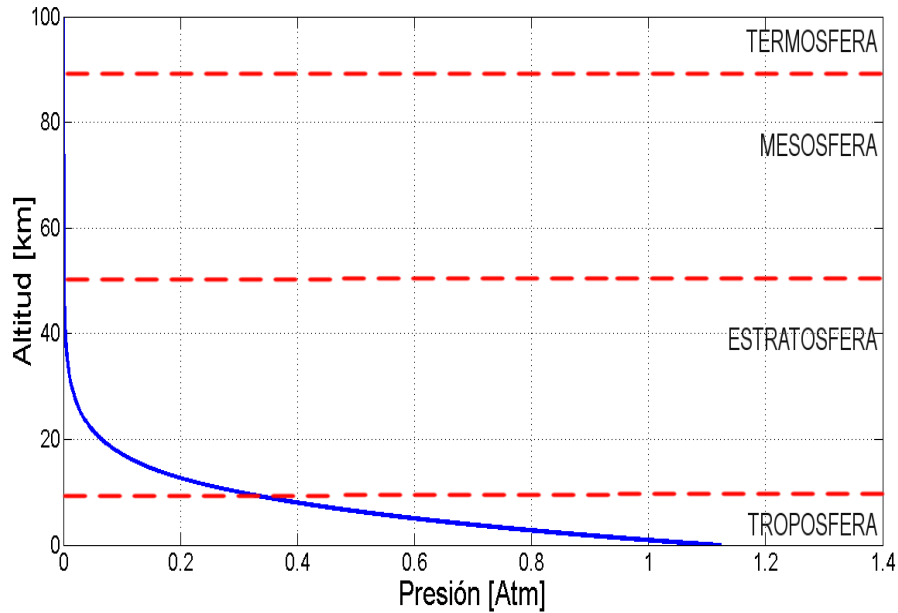


Figura 7. Perfil atmosférico de presión desde la superficie terrestre hasta 100 km de altitud, corresponde al comportamiento de la presión en las capas troposfera, estratosfera, mesosfera y parte de la termosfera. Adaptado de: (Minzner et al., 1959).

4. Fundamentos de espectroscopia de absorción

4.1 Espectro de transmisión atmosférico

El espectro de transmisión atmosférico de la Figura 8 muestra como los componentes atmosféricos permiten el paso de algunas radiaciones a diferentes longitudes de onda hacia la superficie terrestre, los principales absorbentes de radiación son: El vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el oxígeno (O₂) y el ozono (O₃), siendo el CO₂ el principal responsable del

mantenimiento de la temperatura terrestre y causante del efecto invernadero (Sastre Zamora, 2015).

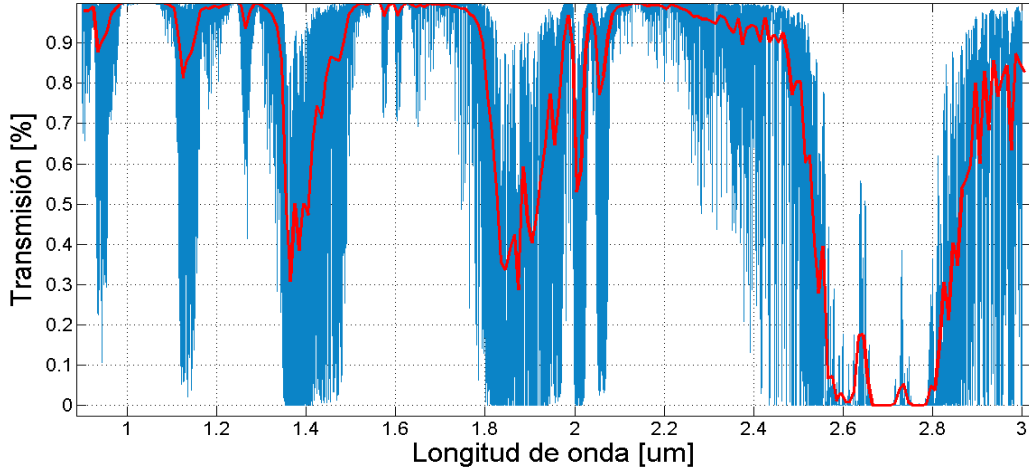


Figura 8. Espectro de transmisión atmosférico, muestra como la atmosfera permite el paso de la radiación a diferentes longitudes de onda. Adaptado de (Rodriguez Ferreira, 2015)

4.1.1. Razones físicas de absorción de los gases. Los gases absorben la radiación debido a distintos fenómenos físicos, los más característicos se nombran a continuación.

4.1.1.1 Absorción por moléculas. La absorción y la emisión dependen de la transición entre los diferentes estados de la molécula de gas. Un fotón permite la transición a un nivel de energía superior llamado absorción. Cuando una molécula de gas está en el estado inferior i , con estados i, j y niveles de energía E_i, E_j un fotón de longitud de onda (λ), número de onda (ν) o frecuencia (f) puede ser absorbido (Muñoz Closa, 2009)(Jia Chen, 2010).

$$E_j - E_i = hf = \frac{hc}{\lambda} = hc\nu \tag{1}$$

Donde h representa la constante de Planck, c la velocidad de la luz, f la frecuencia, λ la longitud de onda y ν el número de onda. Cada molécula de gas posee diferentes niveles de energía y presenta

distintas transiciones de energía, debido a esto las líneas de absorción son característicos para cada molécula (Jia Chen, 2010).

4.1.1.2 Transiciones de energía de las moléculas. Existen tres clases de transiciones de energía, y se presentan en diferentes regiones del espectro electromagnético como lo muestra la Figura 9 (Jia Chen, 2010).

- Transiciones de rotación (Infrarrojo lejano y Radiofrecuencia)
- Transiciones de rotación-vibración (Infrarrojo cercano e infrarrojo medio)
- Transiciones de electrón-vibración-rotación (Visible y Ultravioleta)

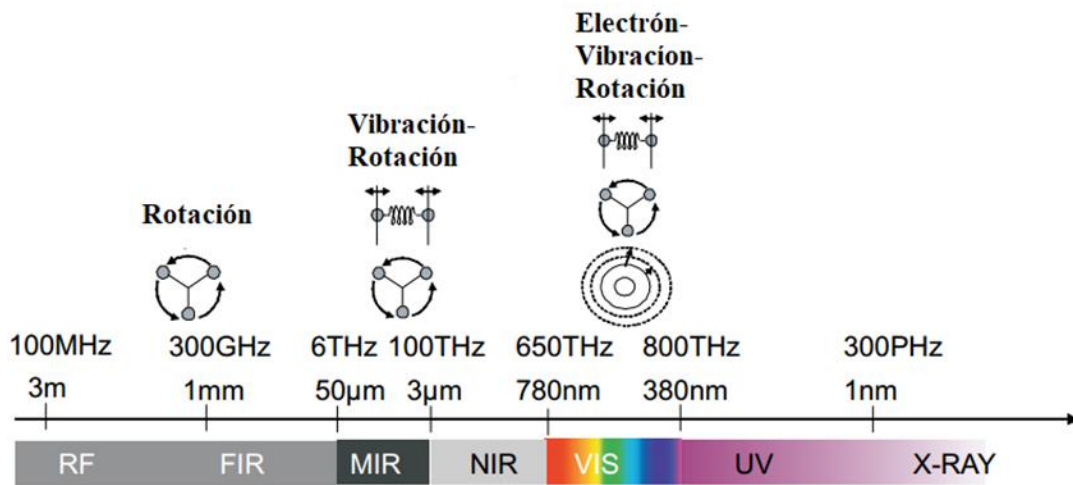


Figura 9. Transiciones de energía en las diferentes regiones del espectro electromagnético. Adaptado de Chen(2010).

4.1.1.2.1 Transición de electrones. Se llama transición electrónica al paso de un electrón en una molécula o átomo de un estado de energía a otro, a su vez ocurre una absorción o emisión de energía, lo cual corresponde a la diferencia de energía de los dos estados. Un átomo individual no presenta estados de vibración o rotación, solo transiciones electrónicas (Jia Chen, 2010).

4.1.1.2.2 Transición vibracional. Corresponde al cambio en la energía vibratoria de los átomos de una molécula de gas. Para determinar los estados de una molécula, se aproxima el modelo y se describe como un oscilador armónico, la ecuación de Schrödinger se soluciona suponiendo el potencial de energía parabólico $V(x) = \frac{1}{2}kx^2$ y se obtienen los siguientes estados de energía:

$$E_j = \frac{h\sqrt{k}}{2\pi\sqrt{m}} \left(j + \frac{1}{2} \right) \quad j = 0, 1, \dots, n \quad (2)$$

Donde k representa la constante de resorte que describe la fuerza intermolecular, m la masa de los átomos de las moléculas, (Modelo valido para moléculas con dos átomos y baja excitación vibratoria) (Jia Chen, 2010).

4.1.1.2.3 Transición rotacional. Corresponde al movimiento rotatorio de las moléculas de gas debido a la distribución de su masa. Dicha rotación posee un momento angular el cual se puede modelar para determinar los estados de energía por la ecuación de Schrödinger mediante el modelo de rotador rígido sin asociar un valor en su energía potencial $V=0$.

$$E_j = \frac{h^2}{8\pi^2 I} j(j + 1), j = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

Donde j son los niveles de energía, h es la constante de Planck e I es el momento de inercia dado por $I = mr_0^2$ (m = masa molecular, r_0 es la distancia entre las moléculas) (Jia Chen, 2010)(Dyroff, 2008).

4.1.1.3 Ley de Beer-Lambert

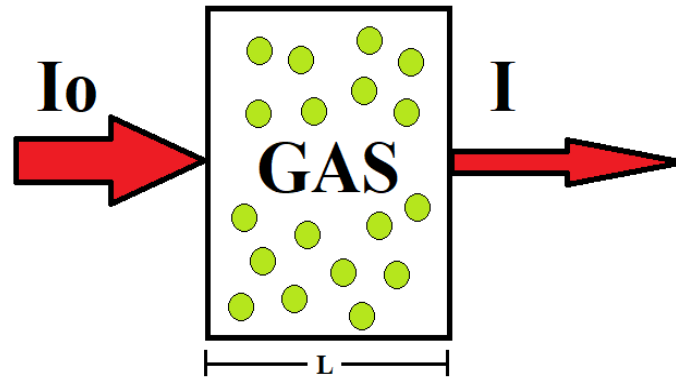


Figura 10. Absorción de la luz luego de recorrer una distancia L donde hay presencia de moléculas de un gas.

La transmisión de un haz de luz al que atraviesa un material, como se puede observar en la Figura 10 se define como:

$$T = \frac{I}{I_0} \tag{4}$$

Donde I_0 corresponde a la intensidad incidente e I a la intensidad detectada luego de atravesar la muestra donde hay presencia del gas (Heard, 2006). La absorción (A) sufrida por un haz de luz monocromática que atraviesa una sustancia en una trayectoria (L) se describe mediante la **ley de Beer-Lambert**:

$$A = \varepsilon(\nu) \cdot c \cdot L \tag{5}$$

Donde A representa la absorbancia, $\varepsilon(\nu)$ corresponde a la absorptividad molar, unidades [$L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$], c la concentración del gas unidades [mol/L] y L la longitud recorrida por el haz de luz al atravesar la muestra unidades [cm], (Jia Chen, 2010). A su vez la transmitancia se define como la inversa de la absorbancia y se relacionan mediante:

$$A = -\text{Log}(T) \quad (6)$$

Por lo tanto, las ecuaciones (5) y (6) se pueden combinar de la siguiente manera:

$$\text{Log}\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\varepsilon(\nu) \cdot c \cdot L \quad (7)$$

Recordemos que $\ln(x) = 2.303\text{Log}(x)$, entonces:

$$\text{Ln}\left(\frac{I}{I_0}\right) = -2.303 \cdot \varepsilon(\nu) \cdot c \cdot L \quad (8)$$

Lo que equivale a:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-2.303 \cdot \varepsilon(\nu) \cdot c \cdot L} \quad (9)$$

Por lo tanto, podemos expresar la transmitancia como:

$$T(\nu) = e^{-2.303 \cdot \varepsilon(\nu) \cdot c \cdot L} \quad (10)$$

El coeficiente de absorción, $\alpha(\nu)$ unidades [cm^{-1}], se define como:

$$\alpha(\nu) = 2.303 \cdot \varepsilon(\nu) \cdot c \quad (11)$$

Por último, la transmisión queda definida de la siguiente manera:

$$T(\nu) = \frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} = e^{-\alpha(\nu) \cdot L} \quad (12)$$

Siendo $\alpha(\nu)$ con unidades en [cm^{-1}], el coeficiente de absorción y L con unidades en [cm] la longitud recorrida por el haz de luz durante su interacción con el gas (Heard, 2006) (Jia Chen, 2010).

4.2 Espectroscopia

La espectroscopia es la técnica que estudia la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, se divide en dos: Espectroscopia de absorción y espectroscopia de emisión, el presente proyecto solo trata la espectroscopia de absorción ya que en ella está basada la técnica utilizada para el diseño del modelo funcional de sensor de concentración de CO₂. La espectroscopia de diodo láser sintonizable (TDLS) es una técnica utilizada para medir concentración de gases mediante las líneas del espectro de absorción, consiste en enviar un haz de luz monocromática, (diodo láser), a la longitud de onda de una de las bandas de mayor absorción según el espectro del gas a medir, el haz de luz es reflejado varias veces en una celda óptica multipaso mediante espejos y elementos ópticos, el gas interactúa con el haz de luz en la celda óptica, luego mediante un fotodetector se recupera la señal y se analiza la absorción sufrida durante el recorrido debido a la interacción con el gas, finalmente mediante un procesamiento de señal se obtiene la concentración del gas, la cual se presenta en una característica del segundo armónico (Muñoz Closa, 2009). Se escogió esta técnica pues los sensores TDLS presentan mejores resultados como estabilidad a largo plazo y menor sensibilidad cruzada posible a otros gases respecto a sensores de óxidos metálicos o combustión catalítica, los cuales en ocasiones dan lugar a falsas alarmas (Jia Chen, 2010)(Bin & Lei, 2015).

4.2.1 Espectros de absorción y transmisión. El espectro de transmisión de una molécula o sustancia muestra como esta permite el paso de la radiación electromagnética en diferentes regiones de longitudes de onda, el espectro de absorción indica como esta bloquea el paso de radiación en diferentes regiones de longitudes de onda, la absorción y la transmisión se relacionan mediante la ecuación (6).

4.2.1.1 Espectro de absorción atmosférico en el infrarrojo cercano. El infrarrojo cercano está comprendido entre los 800 nm y 2500 nm del espectro electromagnético, rango que se visualiza dentro del rectángulo rojo en la Figura 11, nuestro rango de interés es una de las bandas de absorción del CO₂ atmosférico alrededor de los 2004 nm.

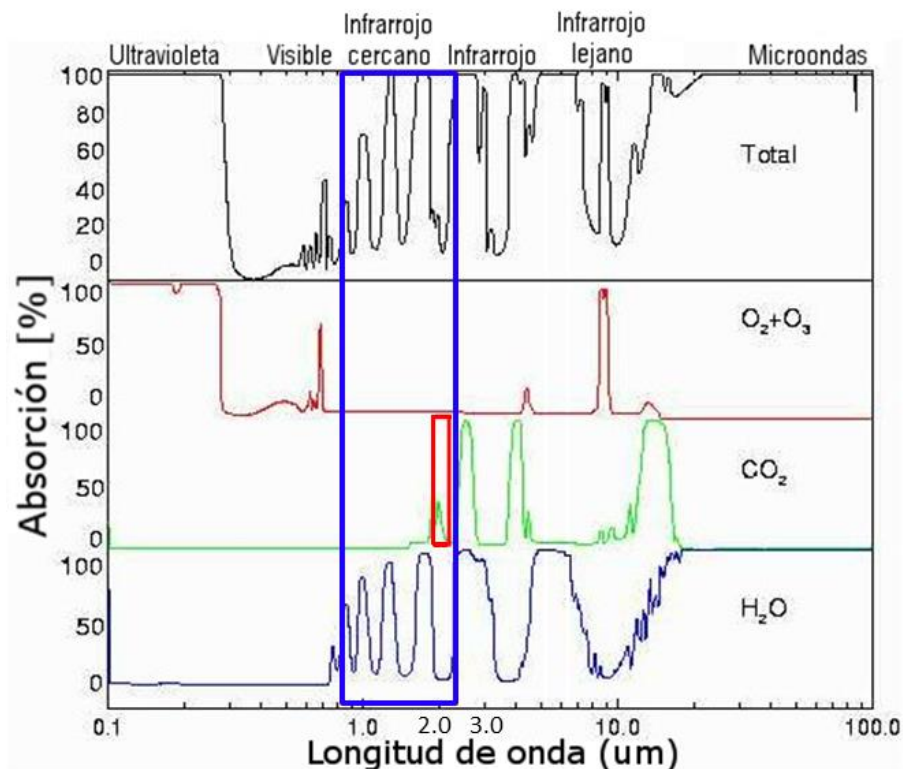


Figura 11. Espectro de absorción de diferentes compuestos de la atmosfera, de abajo hacia arriba observamos: Vapor de agua (H₂O), Dióxido de carbono (CO₂), Oxígeno molecular (O₂) y Ozono (O₃) y por último el espectro que equivale a la absorción atmosférica total, el rectángulo azul indica

la región del espectro infrarrojo cercano (NIR) y el recuadro rojo la absorción atmosférica debido al CO₂. Es de resaltar que esta banda se encuentra sola, no hay presencia de absorciones debido a otros gases atmosféricos. Adaptado de: <http://www.eumetrain.org/data/3/359/navmenu.php?tab=2&page=3.0.0>.

4.3 Espectroscopia de absorción laser de diodo sintonizable

TDLS (Tunable Diode Láser Spectroscopy) es una técnica utilizada para medir concentración de gases mediante las líneas de absorción de gas, utilizando una fuente de luz monocromática como un diodo láser emitiendo a la longitud de onda de una banda de absorción del espectro del gas a medir, el haz de luz interactúa con una muestra de gas en una celda óptica multipaso donde a través de espejos la luz se refleja varias veces para aumentar la longitud de su recorrido y por medio de la absorción sufrida después de su paso por la celda óptica mediante un procesamiento de señal al espectro de la señal recibida se obtiene la concentración (ppm) del gas. La técnica se divide en dos: Espectroscopia directa y espectroscopia por modulación de longitud de onda (WMS) (Jia Chen, 2010) (Kluczynski, Gustafsson, Lindberg, & Axner, 2001).

4.3.1 Espectroscopia directa. El proceso de espectroscopia directa se puede ver detalladamente en la Figura 12a, mediante una rampa de corriente, el diodo láser se sintoniza linealmente en una línea de absorción del espectro del gas a medir, este procedimiento también se puede llevar a cabo variando la temperatura del dispositivo pero no es recomendado debido a la lentitud con que esta cambia, por lo tanto en la práctica no se utiliza (Keitz, 2014)(Jia Chen, 2010).

4.3.2 Espectroscopia por modulación de longitud de onda WMS. La espectroscopia de absorción por modulación de longitud de onda mostrada en la Figura 12b es utilizada para realizar

mediciones de absorbancia sensibles, tiene ventajas respecto a la espectroscopia directa ya que esta permite interactuar con más detalle las líneas de absorción, además del barrido de corriente se aplica una modulación de señal sinusoidal pequeña pero más rápida en frecuencia, del orden de los kHz (Kluczynski et al., 2001), en el proceso de absorción durante el paso por la celda óptica, la modulación de frecuencia se convierte en modulación de intensidad, debido a que el espectro de absorción del gas no es una función lineal la señal resultante ya no es sinusoidal sino una señal compuesta por armónicos en múltiplos de la frecuencia de modulación (Muñoz Closa, 2009), la señal se descompone en sus primeros armónicos para su procesamiento (Liu, Jeffries, & Hanson, 2004).

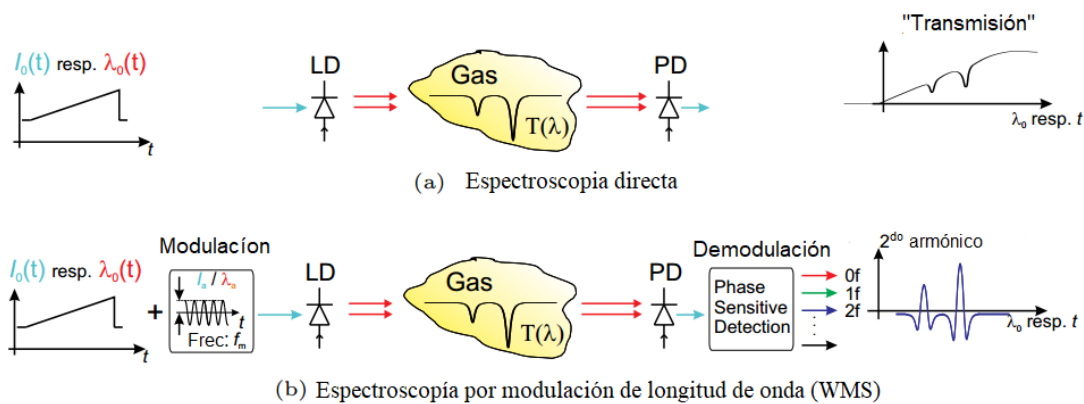


Figura 12. a) Procedimiento de la espectroscopia directa. b) Procedimiento de la espectroscopia con modulación de longitud de onda WMS. Adaptado de Chen (2010).

4.3.2.1 Proceso de modulación. Además de la señal rampa que realiza un barrido en la corriente del diodo laser, este se modula aplicando una pequeña señal senoidal con frecuencia de modulación f , la corriente de inyección del diodo laser queda de la siguiente forma:

$$i_{ic}(t) = i_c + i_a \cos(2\pi ft) \tag{13}$$

Donde i_c representa la corriente de inyección central e i_a la amplitud de la corriente de modulación. Por conveniencia es más sencillo tratar el proceso de modulación en términos de frecuencia, la frecuencia del haz de luz emitido por el diodo laser se puede representar como:

$$v(t) = v_c + v_a \cos(2\pi ft) \quad (14)$$

Donde v_c es la frecuencia central del láser y v_a la amplitud de la frecuencia de modulación. Recordemos que cuando el láser es modulado en longitud de onda, ocurre también una modulación en su potencia correspondiente a la característica P-I del dispositivo, la cual se considera lineal con la corriente de inyección (Kluczynski et al., 2001).

4.4 Las líneas espectrales

Las líneas espectrales son líneas oscuras o brillantes en un rango de frecuencias del espectro electromagnético, estas se producen por carencia (línea de absorción) o exceso de fotones (línea de emisión), la Figura 13 muestra gráficamente su efecto en el espectro electromagnético continuo. Las líneas espectrales tienen un ancho de línea diferente de cero, su ensanchamiento varía en función de la temperatura y la presión (Jia Chen, 2010)(Muñoz Closa, 2009).

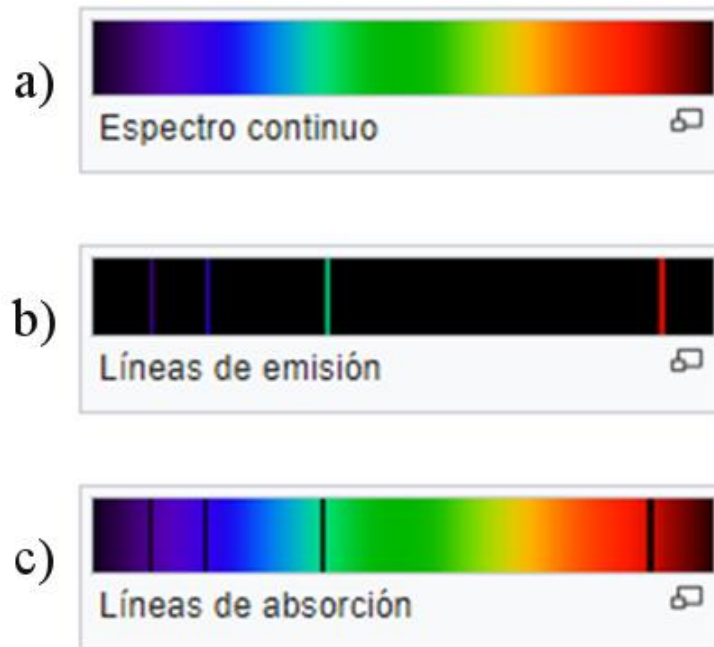


Figura 13. Líneas espectrales: a) Espectro electromagnético continuo. b) Líneas de emisión. c) Líneas de absorción. La suma de los espectros b y c dan como resultado el espectro a. Adaptado de: https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_espectral.

A lo largo del espectro electromagnético podemos observar que cada gas, y en nuestro caso particular el CO₂, producen una gran cantidad de líneas de espectrales. Este trabajo trata únicamente la banda de absorción del CO₂ alrededor de los 2004 nm debido a que ningún otro gas atmosférico hace aportes en la misma banda como se observó en la Figura 11.

El análisis de las líneas espectrales se lleva a cabo mediante estudios de espectroscopia utilizando la teoría de la física atómica y molecular, existen bases de datos como HITRAN (Rothman et al., 2009), dedicadas a suministrar información detallada para estudios de líneas del CO y CO₂. HITRAN fue creada por el departamento de física molecular y atómica del centro Harvard- Smithsonian (Muñoz Closa, 2009).

Las líneas de absorción tienen forma de un perfil tipo Voigt, un híbrido entre un perfil Lorentziano y uno Gaussiano, en algunas condiciones se asemeja a la forma Lorentziana y en otras a la forma Gaussiana, en el caso de un gas a presiones ambientales se utiliza la forma del perfil tipo Lorentziano, cuando la presión de un gas es elevada respecto a su temperatura se utiliza la forma del perfil tipo Gaussiano (Muñoz Closa, 2009). La forma Lorentziana de la línea de absorción está dada por la ecuación (15) (Heard, 2006), esta es la misma ya sea de absorción o de emisión.

$$g(\nu) = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\nu_c}{(\nu - \nu_0) + \frac{(\Delta\nu_c)^2}{2}} \quad (15)$$

Donde ν_0 es la frecuencia central de la línea de absorción y $\Delta\nu_c$ corresponde a la mitad del ancho de banda del valor máximo de la línea de absorción, la ecuación (15) presenta la forma de línea de tipo Lorentziano y su comparación con la de tipo Gaussiano se muestra en la Figura 14.

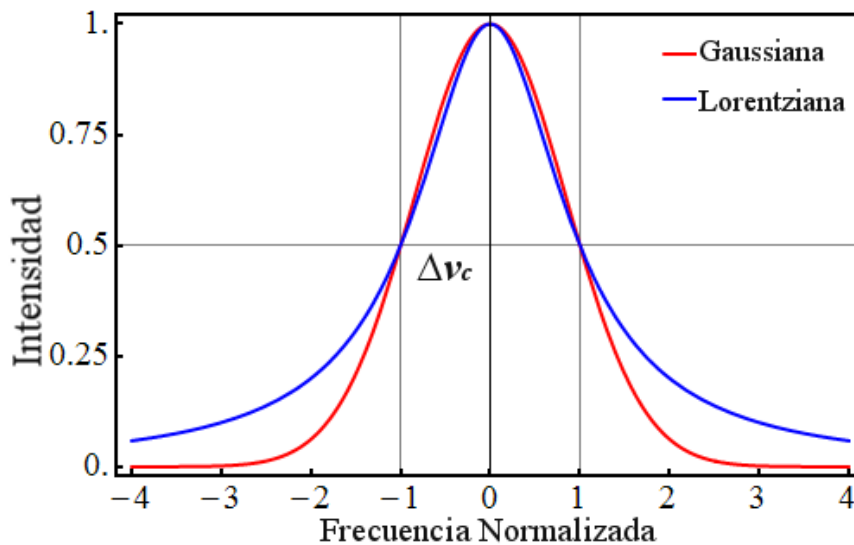


Figura 14. Forma de la línea de absorción: La línea azul corresponde al perfil de tipo Lorentziano y la línea roja al perfil de tipo Gaussiano. Adaptado de <http://la-mecanica-cuantica.blogspot.com/2009/08/interaccion-con-un-campo.html>.

La frecuencia central normalizada corresponde a:

$$x = \frac{\nu_L - \nu_0}{\Delta\nu} \quad (16)$$

Donde ν_L es la frecuencia central de emisión del diodo laser y ν_0 la frecuencia central de la línea de absorción.

El índice de modulación se define como:

$$m = \frac{a}{\Delta\nu_c} \quad (17)$$

Donde a es la amplitud de la frecuencia de modulación y $\Delta\nu_c$ la mitad del ancho de banda a la mitad del valor máximo de la línea de absorción.

Aplicando la ley de Beer-Lambert mostrada en la ecuación (12) podemos llegar a la forma de la línea de absorción mostrada en la Figura 14 y a partir de ella obtener el segundo armónico el cual contiene la información de interés.

$$I(\nu) = I_0 e^{-\alpha(\nu)L}$$

El coeficiente de absorción $\alpha(\nu)$, está dado por (Heard, 2006):

$$\alpha(\nu) = S(\nu)P\chi N = S(T)g(\nu)P\chi N \quad (18)$$

Entonces la ley de Beer-Lambert es equivalente a:

$$I(\nu) = I_0(\nu) e^{(-S(T)g(\nu)P\chi NL)}$$

Dónde:

$S(T)$ es la fuerza de la línea espectral (*cm/molécula*)

$g(\nu)$ es la forma de línea Lorentziana (*cm*)

P es la presión de la muestra (*atm*)

χ es la concentración (*ppm*)

N es la densidad numérica total en el volumen de la muestra (*moléculas cm⁻³ atm⁻¹*)

Despejando χ tenemos:

$$\chi = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I_t}\right)}{S(T)g(\nu)PNL}$$

La señal obtenida se puede descomponer en series de Fourier:

$$I_t = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(\nu) \cos(n\theta)$$

$$\begin{aligned} A_n(\nu) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp(S(T)g(\nu)P\chi NL) \cos(n\theta) d\theta, \quad \text{donde } \theta = \omega t \\ &= \frac{2I_0}{\pi} \int_0^{\pi} \exp(S(T)g(\nu)P\chi NL) \cos(n\theta) d\theta \end{aligned}$$

Como $\alpha(\nu) \ll 1$ entonces:

$$\begin{aligned} A_n(\nu) &= \frac{2I_0}{\pi} \int_0^{\pi} (1 - S(T)g(\nu)P\chi NL) \cos(n\theta) d\theta \\ &= \frac{-2I_0S(T)P\chi NL}{\pi} \int_0^{\pi} g(\nu) \cos(n\theta) d\theta \end{aligned}$$

La fórmula de Arndt mostrada en la ecuación (19) permite obtener los coeficientes de la serie de Fourier de la función Lorentziana (Arndt, 1965).

$$S_n(x) = \frac{1}{2} \frac{1}{m^n} \epsilon_n i^n \frac{\{[(1 - ix)^2 + m^2]^{\frac{1}{2}} - (1 - ix)\}^n}{[(1 - ix)^2 + m^2]^2} + c. c. \quad (19)$$

Donde $\epsilon_0 = 1, \epsilon_n = 2$ ($n = 1 \dots \infty$).

Con la parte real de la ecuación (19) y teniendo en cuenta las características del gas a estudiar podemos hallar el segundo armónico de la función Lorentziana cuya amplitud viene dada por la ecuación (20)(21) (Bin & Lei, 2015)(Heard, 2006).

$$A_2(\nu) = I_0 \frac{2S(T)P\chi NL}{\pi\Delta\nu_c} \quad (20)$$

Con la ecuación (19) se obtienen las curvas mostradas en la Figura 15 las cuales corresponden al primer armónico ($n=1$) y segundo armónico ($n=2$) (Arndt, 1965).

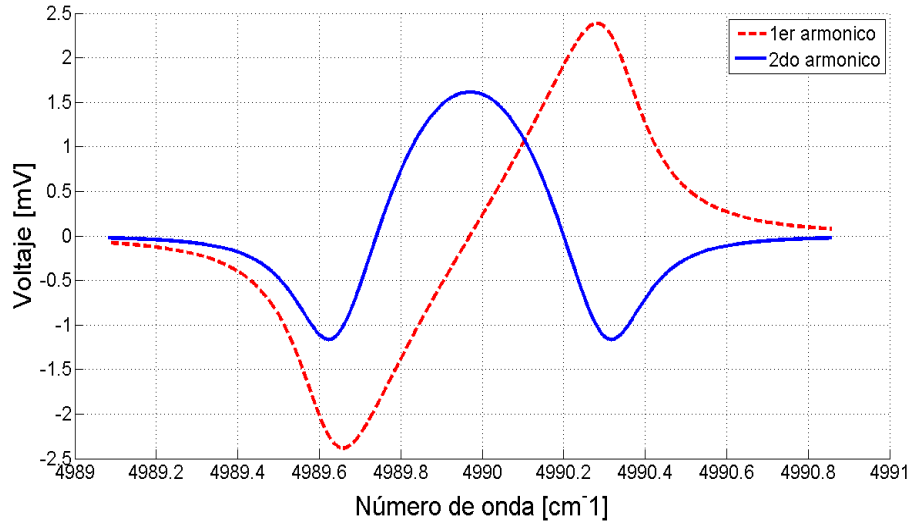


Figura 15. Curvas del primer y segundo armónico de la función Lorentziana, la curva roja de línea discontinua corresponde al primer armónico y la línea azul de línea continua al segundo armónico.

Según (Heard, 2006) la fuerza de la línea $S(T)$ se relaciona con la intensidad de la línea $S(\nu)$ mediante:

$$S(\nu) = S(T)g(\nu) \quad (21)$$

La forma de la intensidad de la línea se muestra en la Figura 16, la mayor intensidad se presenta en 4989.97 cm^{-1} (2004.02 nm), la cual concuerda con la longitud de onda de emisión central de diodo laser (2004 nm).

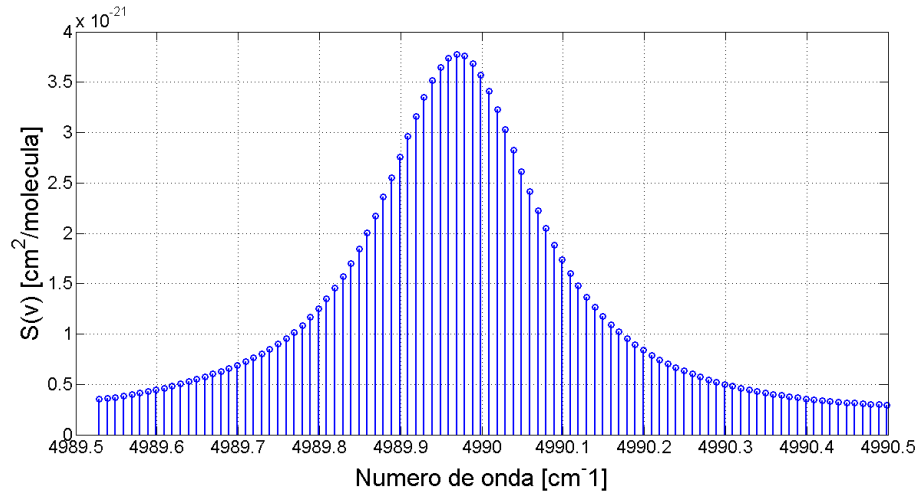


Figura 16. Intensidad de la línea de absorción del CO₂ alrededor de los 2004 nm, esta es igual a la ecuación de la forma de la línea $g(v)$ multiplicada por la fuerza de línea $S(T)$, su amplitud y su ancho varía con las condiciones de presión y temperatura a las que se encuentre el gas.

5. Diseño del instrumento

El sistema de instrumentación diseñado en el presente trabajo de investigación consiste en el diseño de un modelo funcional de sensor de concentración de CO₂, el cual debe operar durante el recorrido del vuelo del globo de la misión E3Tratos. Utilizando el método de espectroscopia laser de diodo sintonizable (TDLS) con modulación de longitud de onda (WMS) el sensor interactúa con el dióxido de carbono y realiza un barrido de una de las líneas de absorción del CO₂ alrededor de los 2004 nm.

5.1 Diagrama general, principio básico y elementos principales

El funcionamiento del modelo funcional está basado en la técnica TDLS con WMS, su funcionamiento general es el siguiente: Una señal rampa característicamente gran señal baja frecuencia (del orden de los Hz) se suma con una pequeña señal senoidal de frecuencia mayor (del orden de los kHz), el resultado se inyecta a un controlador de corriente de diodo laser donde la longitud de onda emitida es modulada (Supplee, Whittaker, & Lenth, 1994) (Muñoz Closa, 2009), la longitud de onda de emisión central y el ancho de banda se seleccionan con el fin de muestrear una banda de absorción atmosférica del gas en estudio (J. Chen, Hangauer, Strzoda, & Amann, 2010), el haz de luz emitido interactúa con el gas en una celda óptica multipaso donde esta se absorbe (Jia Chen, 2010), finalmente se recupera la señal por medio de un fotodetector para un posterior análisis con el fin de obtener información sobre las características del gas (Muñoz Closa, 2009).

La Figura 17 muestra el diagrama de bloques general del instrumento indicando los elementos principales, el sistema se compone de 4 elementos principales que son: El diodo laser, la celda óptica, el fotodetector y el procesamiento de señal.

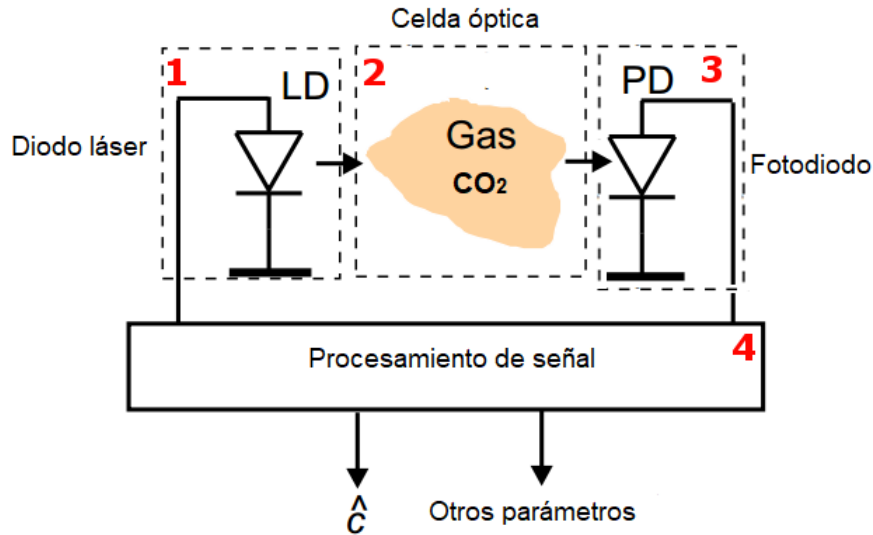


Figura 17. Diagrama de bloques general del sistema de instrumentación, los elementos principales son: (1) El diodo láser. (2) La celda óptica multipaso. (3) El fotodetector. (4) El procesamiento de señal. Adaptado de Chen (2010).

5.1.1 El diodo láser. Desde la creación del diodo láser semiconductor en el año 1962, debido a sus características hizo que la espectroscopia tomara fuerza como técnica en la detección, identificación y medición de especies moleculares y atómicas gaseosas, en la actualidad la espectroscopia de diodo láser moderna se está convirtiendo en una herramienta importante para la detección de especies de gases traza, puesto que ahora su fabricación ha llegado a que estos emitan luz en un mayor rango de longitudes de onda. (Schilt, Tittel, & Petrov, 2011).

Sus características principales lo hacen adecuado para que permita explorar transiciones atómicas y moleculares de tal manera que la forma y la intensidad de la línea de absorción pueden ser medidas con rapidez, ofreciendo de esta manera una capacidad única de ajuste, potencia de salida, capacidad de modulación y tamaño pequeño, esto lo hace más cómodo para trabajar que otras fuentes, quizá la característica más importante es que su longitud de onda y potencia emitida dependen de la corriente de una forma casi lineal y sensible a pequeños cambios, lo que lo hace adecuado para ser utilizado en espectroscopia. (Schilt et al., 2011).

5.1.1.1 Diodo laser EP 2004-DM-B y sus características. El diodo laser EP 2004 DMB mostrado en la Figura 18 está diseñado especialmente para la medición de CO₂, su longitud de onda central se encuentra en 2004 nm, sus características electro-ópticas se presentan en la Tabla 2 y su espectro de emisión en la Figura 19.

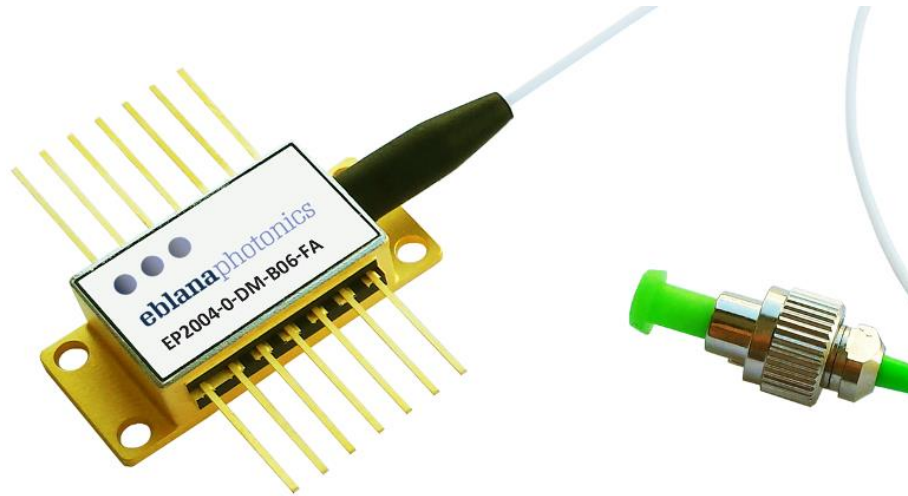


Figura 18. Diodo laser EP 2004-DM-B el cual ha sido desarrollado para precisión en el sensado de CO₂ en la longitud de onda 2004 nm. Adaptado de hoja de datos diodo laser EP 2004-DM-B.

Tabla 2.

Características electro-ópticas del diodo laser EP 2004-DM-B

Parámetro	Símbolo	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo	Unidades
Rango de longitud de onda	λ	1970	2004	2051	nm
Corriente de umbral	I_{th}	-	20	40	mA
Potencia de salida en fibra	P_f	-	3	-	mW
Ancho de línea óptico	Δf	-	-	2	MHz
Coefficiente de ajuste de	T_λ	-	0.1	-	nm/°C

Parámetro	Símbolo	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo	Unidades
Temperatura					
Coefficiente de ajuste de corriente	I_{λ}	3	7	-	pm/mA
Corriente máxima	I_f	-	-	140	mA

Nota: Características eléctricas y ópticas del diodo laser EP 2004-DM-B las cuales se tienen en cuenta para el diseño del sistema de instrumentación, información tomada de la hoja de datos suministrada por el fabricante.

El espectro de emisión del dispositivo se presenta en la Figura 19, donde podemos ver que presenta una longitud central de emisión a 2004 nm.

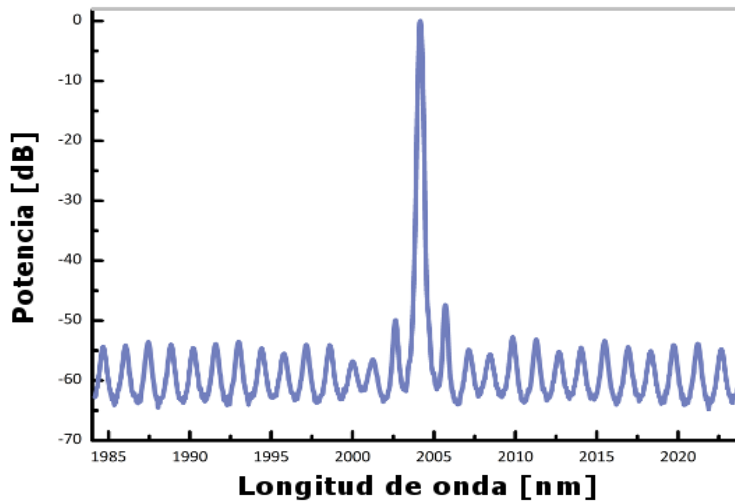


Figura 19. Espectro de emisión del diodo laser EP 2004-DM-B, utilizado en nuestro diseño del sistema de instrumentación para medir concentración de CO₂. Adaptado de hoja de datos diodo laser EP 2004-DM-B.

La variación de longitud de onda del haz de luz que emite el diodo laser, depende de la corriente que circula a través de este, su coeficiente de ajuste I_λ es igual a 7 pm/mA, su comportamiento se muestra en la Figura 20.

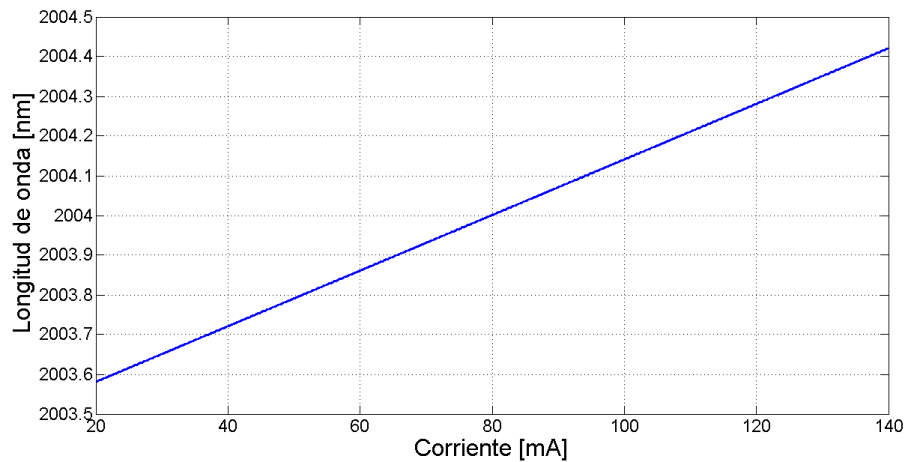


Figura 20. Variación de la longitud de onda emitida por el diodo laser EP 2004-DM-B en función de la corriente de polarización.

La temperatura del diodo laser también afecta la longitud de onda que este emite, dicha variación se presenta con un factor $T_\lambda = 0.1 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ y su comportamiento se muestra en la Figura 21, este parámetro debe ser controlado para mitigar su efecto, esto se hace mediante el TEC de la tarjeta controladora de corriente del diodo laser mostrada en la sección 0.

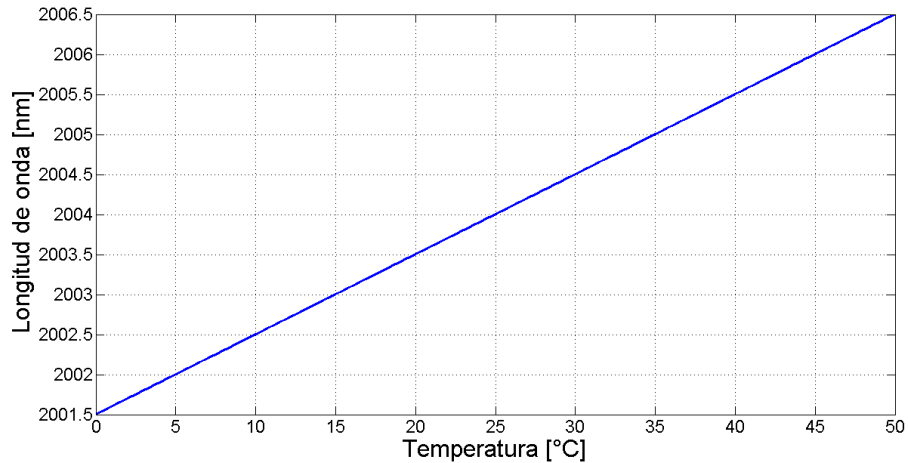


Figura 21. Variación de la longitud de onda emitida por el diodo laser EP 2004-DM-B en función de la temperatura del dispositivo.

La variación de la longitud de onda con la corriente genera una variación en la salida de potencia del diodo láser, esta se conoce como característica P-I del dispositivo y su forma se muestra en la Figura 22.

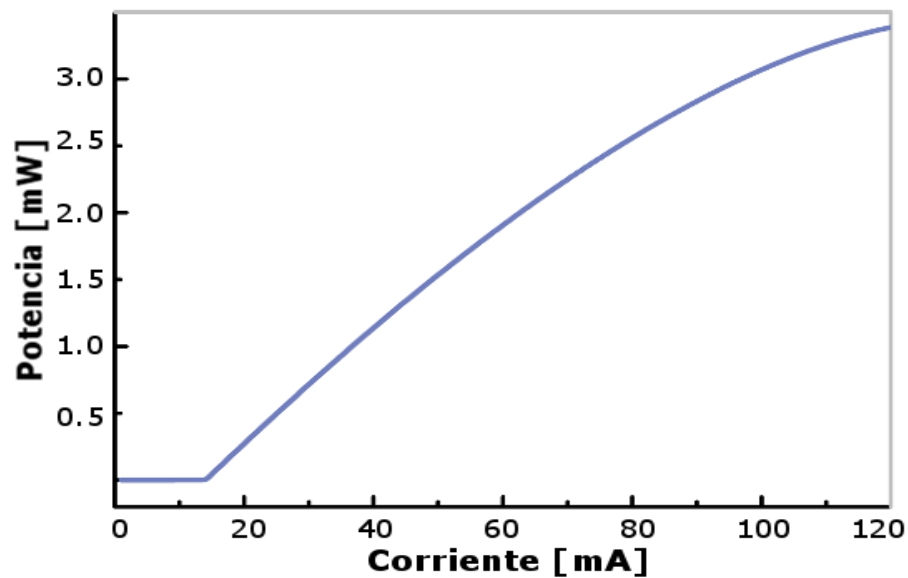


Figura 22. Característica P-I del diodo laser EP 2004-DM-B, la potencia emitida por el diodo laser varía al cambiar su corriente de polarización. Adaptado de hoja de datos diodo laser EP 2004-DM-B. Adaptado de hoja de datos diodo laser EP 2004-DM-B.

5.1.1.2 Controlador laser C150. El controlador de corriente C150 (Figura 23), está diseñado específicamente para trabajar con el diodo laser EP 2004 DM-B, este se encarga de transformar las señales de tensión seno y rampa generadas por el circuito integrado ICL8038 en corriente con un factor de conversión de 20 mA/V, las señales de corriente son inyectadas al diodo laser, el cual se encuentra incrustado en la tarjeta, los límites de corriente para llevar a cabo la polarización y modulación de longitud de onda del diodo laser se llevan a cabo teniendo en cuenta las características presentadas en la Figura 20 y Figura 21, en la practica la variación de temperatura es demasiado lenta, por lo tanto se polariza el diodo laser en un valor de temperatura determinado, se mantiene fija y se realiza el cambio de longitud de onda variando la corriente alrededor del punto de polarización. La variación de la potencia de salida emitida por el diodo laser depende de la corriente que circule a través de este, la cual a su vez varia la potencia de salida del dispositivo, su comportamiento corresponde a la característica P-I del láser y se muestra en la Figura 22.



Figura 23. Tarjeta controladora de laser C150 la cual contiene un driver de control de temperatura TEC ideal para evitar calentamientos bruscos en el diodo laser es compatible con el diodo laser EP 2004-DM-B. Adaptado de hoja de datos controlador C150.

El controlador láser C150 viene con control de temperatura integrado y controlador láser en un solo paquete. El control de la temperatura es totalmente lineal y tiene la capacidad de utilizar una

fuente de alimentación separada para el TEC láser. El control TEC puede realizarse a través de lazo interno PI (Control proporcional e integral) o señal externa. El controlador láser tiene un ancho de banda analógico de 250 kHz y una conmutación TTL rápida independiente separada. La corriente láser tiene un límite de hardware de 250 mA que no se puede superar en ningún caso.

Tabla 3.

Características eléctricas del controlador C150

PARAMETRO	VALOR	COMENTARIO
Vd1 Voltaje de alimentación positivo/ Controlador láser y TEC	12 V	Voltaje de alimentación positivo para controlador láser, todo el circuito de control y TEC. 2A mínimo es requerido para una fuente de alimentación única
Vdd2 Voltaje de alimentación positiva/ Solamente para TEC	5 V	Tensión de alimentación positiva para TEC solamente. 2A Se requiere capacidad mínima. Diseñado para usar el riel de 5V para minimizar el consumo general de energía y la disipación de calor.
Vee Voltaje de alimentación negativa	-12 V	Voltaje de alimentación negativo para el controlador de láser, todo el circuito de control y TEC

Nota: Las características mostradas en la tabla corresponden a encontradas en el manual de uso de la tarjeta controlador C150.

Tabla 4.

Características de control de diodo laser, controlador C150

PARAMETRO	VALOR	COMENTARIO
ILD Límite de corriente laser	250 mA	Límite de hardware láser, se puede modificar para versiones personalizadas.
Vcomp Tensión de cumplimiento del laser	4V	Voltaje mínimo a través del diodo láser, puede ser modificado para versiones personalizadas
Rango de corriente de láser	250 mA	Máxima corriente de láser
Voltaje de la corriente de láser	0-10 V	Rango funciones de transferencia externas
Impedancia de voltaje de la corriente de láser.	10 kΩ	
Coefficiente de modulación de la corriente del láser.	20 mA/V	Función de transferencia para la corriente de modulación del láser.

Nota: Las características mostradas en la tabla corresponden a encontradas en el manual de uso de la tarjeta controlador C150.

5.1.2 La celda óptica multipaso Herriott. La celda óptica es el contenedor donde se tiene la respectiva interacción entre el gas y el haz de luz emitido, su desarrollo parte de la necesidad de extender el recorrido óptico dado por las múltiples reflexiones que se dan sobre los espejos en la celda (Jia Chen, 2010).

En este tipo de celda hay dos espejos esféricos los cuales están separados una distancia que está directamente relacionada con los radios de curvatura de los espejos, allí, se inyecta un rayo láser a través del orificio de uno de los espejos como se muestra en la Figura 24, este se encuentra situado ligeramente fuera del eje (Herriott, Kogelnik, & Kompfner, 1964). Una vez el haz de luz ingresa por el respectivo orificio, se refleja entre los espejos de forma periódica generando un patrón de puntos de forma circular en cada uno de los espejos (ver Figura 25). Luego de cierto número de

reflexiones el haz de luz sale a través del hueco por el que ingresó, pero en dirección contraria. Esta forma de celda da como resultado una longitud de recorrido total dada aproximadamente por el número de reflexiones y la distancia de separación de los espejos (Silver, 2005).

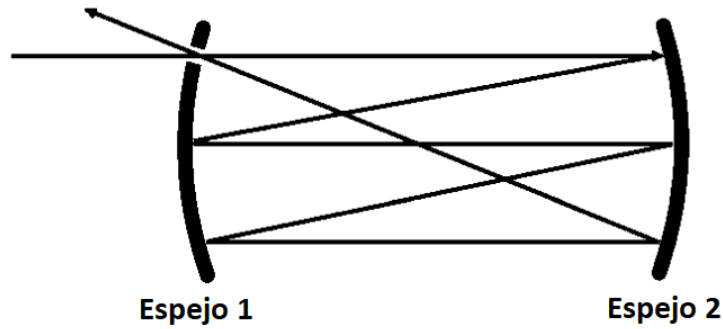


Figura 24. Numero de reflexiones en dos espejos esféricos de una celda Herriott. Adaptada de (Heard, 2006)

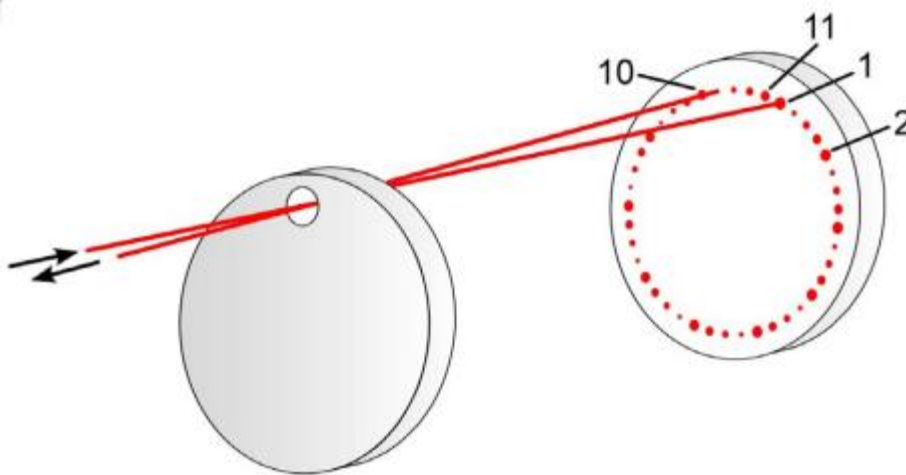


Figura 25. Patrón de puntos en unos de los espejos de una celda Herriott en la cual se hacen 82 reflexiones. Adaptada de (Dyoff, 2008).

5.1.3 Fotodetector. El fotodetector es un dispositivo utilizado para recoger la intensidad del haz de luz, luego del paso por la celda óptica multipaso donde tuvo interacción con el gas que se está analizando, sus características principales son: Rango de detección de longitud de onda, rango de potencia óptica y responsividad.

5.1.3.1 Esfera integradora con Detector InGaAs S148C. El fotodetector S148C de la Figura 26 es el dispositivo seleccionado para trabajar en este trabajo de investigación, es un detector esfera integradora con detector de InGaAs, diseñado para medir potencia óptica de un haz entrante independientemente de la divergencia y forma de la luz, sus principales características se detallan en la Tabla 5.



Figura 26. Fotodetector S148C el cual recibe la señal que es detectada luego de la interacción con el haz de luz y los espejos. Este detector proporciona un rango de potencia óptica adecuado para el rango de potencia esperado de la señal. Adaptado de hoja de datos fotodetector S148C

Tabla 5.

Especificaciones del detector S148C utilizado en el desarrollo de este proyecto

Esfera integradora S148C	
Tipo de detector	Fotodiodo InGaAs
Rango de longitud de onda	1200 - 2500 nm
Rango de potencia óptica	1 μW – 1000 mW
Linealidad	± 0.5%
Resolución	1nW
Tiempo de respuesta	<1μs
Dimensiones	Ø45 x 30.5 mm
Área activa de detección	Ø1 mm
Apertura de entrada	Ø5 mm
Peso	0-2 kg

Nota: Las especificaciones mostradas en esta tabla son las que se tuvieron en cuenta para el diseño del sistema de instrumentación de este proyecto, las restantes especificaciones se encuentran en la hoja de datos dada por el fabricante.

Quizá la característica más importante a tener en cuenta en el desarrollo del sistema es la responsividad del fotodetector, esto con el fin de saber cuál es su respuesta en el rango de longitud de onda en el que se está trabajando, la Figura 27 muestra el comportamiento de la responsividad del dispositivo fotodetector S148C.

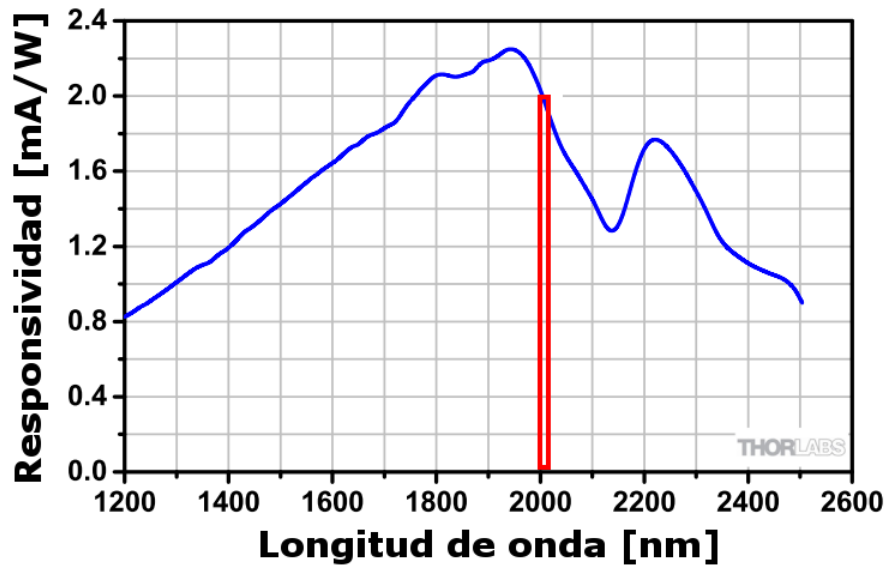


Figura 27. Responsividad del fotodetector InGaAs esfera integradora S148C, el recuadro rojo indica el rango de interés de nuestro sistema funcional es alrededor de los 2004 nm. Adaptado de hoja de datos fotodetector S148C.

El fotodetector nos arroja un valor de corriente dependiendo del valor de responsividad mostrado en la Figura 27, este valor se lleva a su equivalente en voltaje mediante un amplificador de transimpedancia.

5.1.4 Procesamiento de la señal. Este bloque se encarga de analizar la señal recibida y obtener información útil que se encuentra en ella y que es de interés en nuestro proyecto, la señal recibida equivale al barrido de la línea de absorción, por lo tanto, teniendo en cuenta las señales utilizadas

inicialmente en la polarización y control de la corriente de diodo láser, podemos afirmar que esta corresponde a la línea de absorción muestreada, equivalente al espectro de absorción del CO₂ en la banda de los 2004 nm.

5.2 Diseño detallado del instrumento

Los bloques generales están compuestos por elementos necesarios para poder llevar a cabo su función, a continuación, en la Figura 28 se presenta el diseño detallado del sistema.

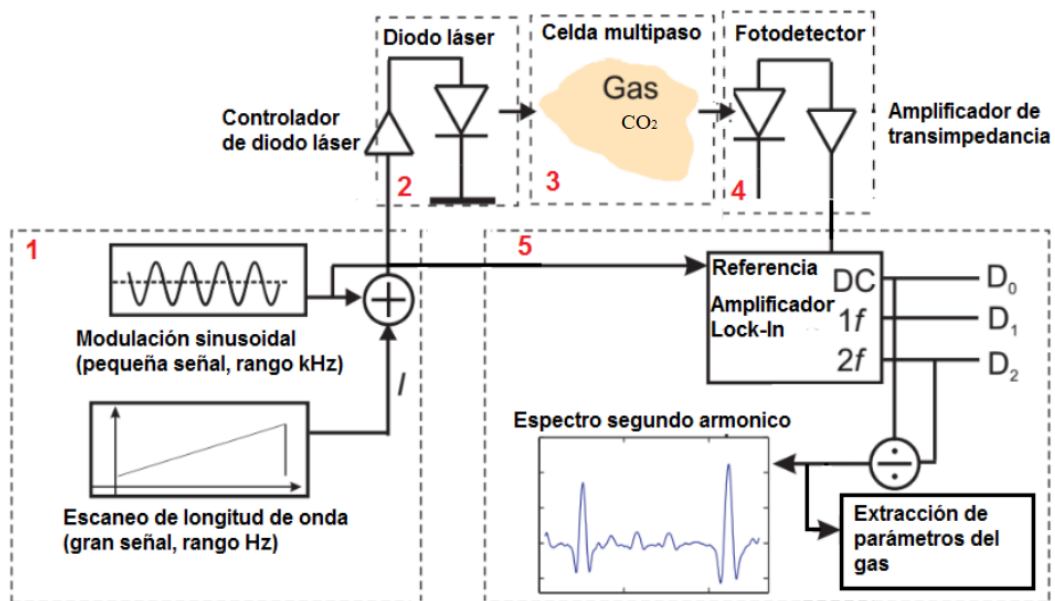


Figura 28. Diagrama de bloques del modelo funcional del sensor de CO₂. Bloque 1: Generación de las señales rampa y senoidal necesarias para la modulación WMS. Bloque 2: Controlador de corriente de diodo láser y emisión del haz de luz. Bloque 3: Celda óptica multipaso donde el haz de luz interactúa con gas. Bloque 4: Detección de la señal. Bloque 5: Procesamiento de la señal. Adaptado de Chen (2010).

A continuación, se muestra en detalle el funcionamiento de cada bloque y los dispositivos o elementos que lo componen.

5.2.1 Bloque 1: Generación de las señales para la modulación WMS. Teniendo en cuenta las características del diodo laser EP 2004-DM-B mostradas en la sección 0, partiendo de la curva de variación de la longitud de onda con respecto a la corriente inyectada mostrada en la Figura 20 procedemos a diseñar los circuitos necesarios con el fin de realizar un barrido en el rango de longitudes de onda de interés, para llevar a cabo este procedimiento, polarizamos el diodo laser en un valor medio de corriente y variamos la longitud de onda alrededor de este sin pasar los límites de corriente de umbral ($I_{th} = 20$ mA) y corriente máxima ($I_{max} = 140$ mA), esto se lleva a cabo por medio de una señal rampa de baja frecuencia, adicional a esto aplicamos una señal pequeña señal senoidal de frecuencia más alta, la cual interactúa rápidamente con diferentes puntos de la línea de absorción dando origen a la modulación WMS.

La polarización del diodo laser se hace teniendo en cuenta la Figura 20, la longitud central del diodo laser es de 2004 nm, por lo tanto nuestro diseño se lleva a cabo polarizando en el punto $I_p = 80$ mA, el controlador C150 tiene un coeficiente de modulación de la corriente de diodo laser de 20 mA/V (ver

Tabla 4), la longitud de onda varía también con la temperatura según la Figura 21, debido a que la variación de temperatura es demasiado lenta, en la práctica mantenemos la temperatura del láser constante y variamos la longitud de onda únicamente cambiando la corriente (Jia Chen, 2010).

5.2.1.1 Generación señal rampa. La función de la señal rampa es hacer un barrido de corriente en el diodo con el fin de muestrear la línea de absorción del CO₂ alrededor de 2004 nm, según la Figura 21, se mantiene la temperatura en 25 °C, teniendo en cuenta la Figura 20 cambiamos los valores de corriente alrededor de ($I_P = 80$ mA) y llevamos a cabo la variación de la longitud de onda de emisión del láser desde 2003.8 nm hasta 2004.2 nm (en número de onda equivale a $4989.518 \text{ cm}^{-1} - 4990.522 \text{ cm}^{-1}$), por lo tanto es necesario variar la corriente desde 50 mA hasta 108 mA, en base a lo anterior la señal rampa tendrá las siguientes características:

- Amplitud: 1.4 V
- Frecuencia: 50 Hz

El circuito esquemático para generar esta señal utilizando el integrado IC8038 se muestra en la Figura 29, las características técnicas del dispositivo se encuentran en la TABLA 6

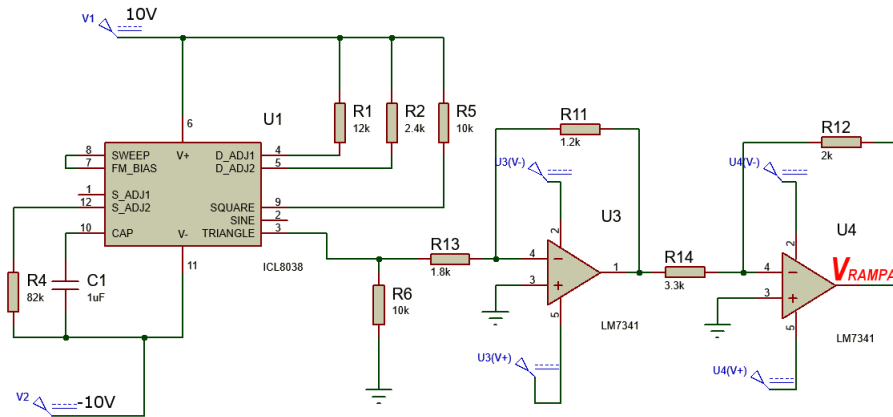


Figura 29. Circuito esquemático generador de onda rampa con el integrado ICL8038, la señal V_{RAMPA} presenta la forma de una onda rampa con 1.4 V de amplitud y 50 Hz de frecuencia.

La salida señal de salida V_{RAMPA} del circuito mostrado en la Figura 29 se muestra en la Figura 30.

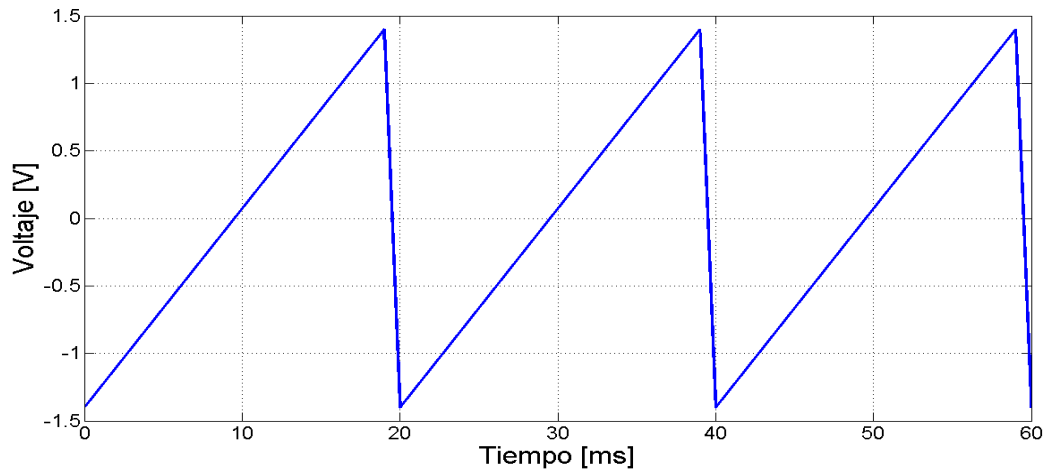


Figura 30. Onda rampa de 50 Hz de frecuencia y 1.4 V de amplitud generada con el integrado ICL8038 con el fin de variar la corriente del láser y muestrear la línea de absorción del CO₂ alrededor de 2004 nm.

Tabla 6.

Características técnicas del circuito integrado generador de señales ICL8038.

Características	Valores
Rango de temperatura	0 – 70°C
Rango de frecuencia	0.001 Hz – 300 kHz
Potencia	250 mW

Nota: La tabla muestra características técnicas del generador de señales ICL8038 tomados de la hoja de datos del dispositivo.

5.2.1.2 Generación señal seno. La función de la señal seno en el sistema de instrumentación es llevar a cabo una interacción rápida con diferentes puntos de la línea de absorción como se observa en la Figura 31, el valor de la amplitud se escoge teniendo en cuenta el coeficiente de ajuste de corriente del diodo laser mostrado en la Tabla 2 ($I_\lambda = 7 \text{ pm/mA}$), la señal senoidal tendrá las siguientes características:

- Amplitud: 50 mV
- Frecuencia: 10 kHz

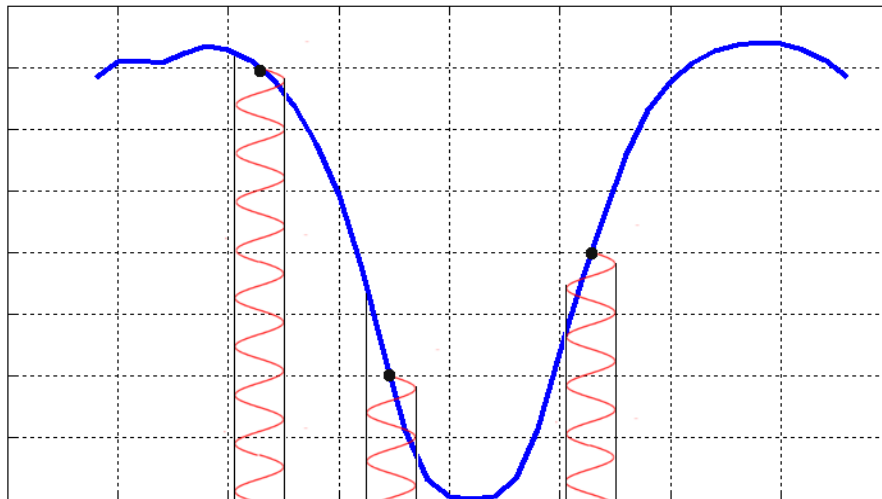


Figura 31. Interacción de la señal senoidal con la línea de absorción, mientras la señal rampa realiza un barrido, esta interactúa rápidamente con diferentes puntos. Adaptado de (Rodríguez Ferreira, 2015).

Las características son pequeña señal y frecuencia en el orden de los kHz, la Figura 32 muestra el circuito generador de esta señal con el integrado ICL8038.

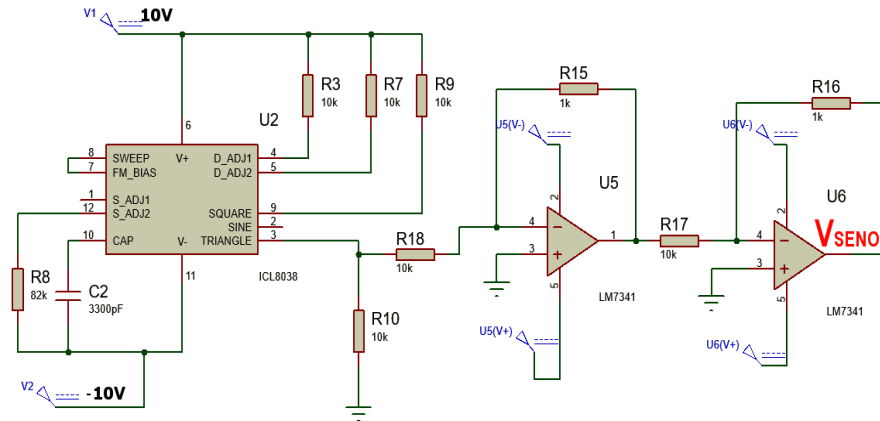


Figura 32. Circuito esquemático generador de onda seno con el integrado ICL8038, la señal V_{SENO} tiene la forma de una onda senoidal de 50 mV de amplitud y 10 kHz de frecuencia.

La señal resultante V_{SENO} mostrada en el circuito esquemático de la Figura 32 corresponde a la curva de la Figura 33.

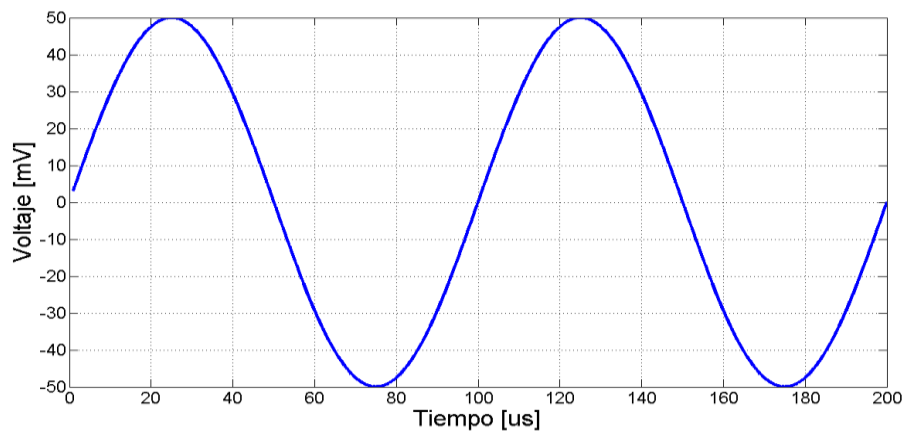


Figura 33. Onda senoidal de 10 kHz de frecuencia y 50 mV de amplitud generada con el integrado ICL8038 con el fin de interactuar rápidamente con la línea de absorción mientras la onda rampa realiza el muestreo de la línea de absorción del CO₂ alrededor de 2004 nm.

5.2.2 Controlador de corriente de diodo. El controlador de corriente del diodo laser se encarga de convertir las señales de tensión rampa (Figura 30) la cual se suma con la señal senoidal (Figura 33) en corriente con un coeficiente de modulación de corriente igual a 20 mA/V, mantenido la temperatura constante la corriente que circula por el diodo laser tiene la forma presentada en la Figura 34.

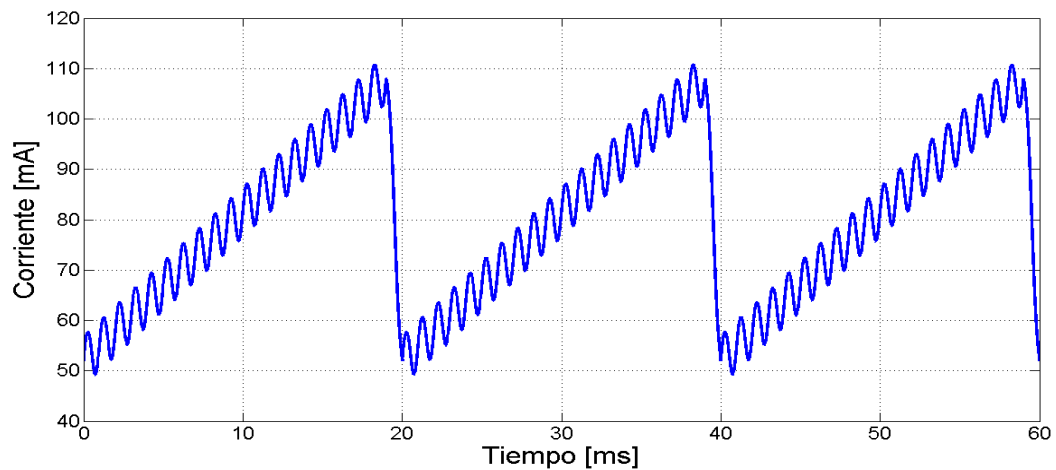


Figura 34. Forma de la señal que circula a través del diodo laser la cual da lugar a la modulación de longitud de onda del dispositivo, la forma de la señal corresponde a la suma de la onda rampa con la onda senoidal.

El rango de trabajo o variación de la longitud de onda emitida por el diodo laser, la cual es producida por la corriente aplicada se muestra detalladamente en la Figura 35.

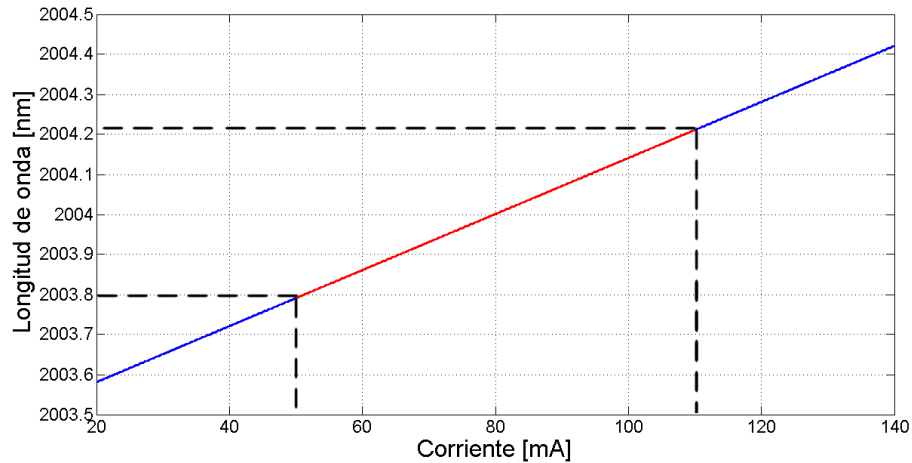


Figura 35. Rango de trabajo de longitud de onda en el diodo láser generado por la variación de la corriente alrededor del punto de polarización $I_p = 80$ mA.

La variación de longitud de onda producida por el rango de corriente aplicado al diodo láser, produce un cambio en la potencia emitida debido a la característica P-I del dispositivo, el rango de trabajo en potencia se muestra en la Figura 36.

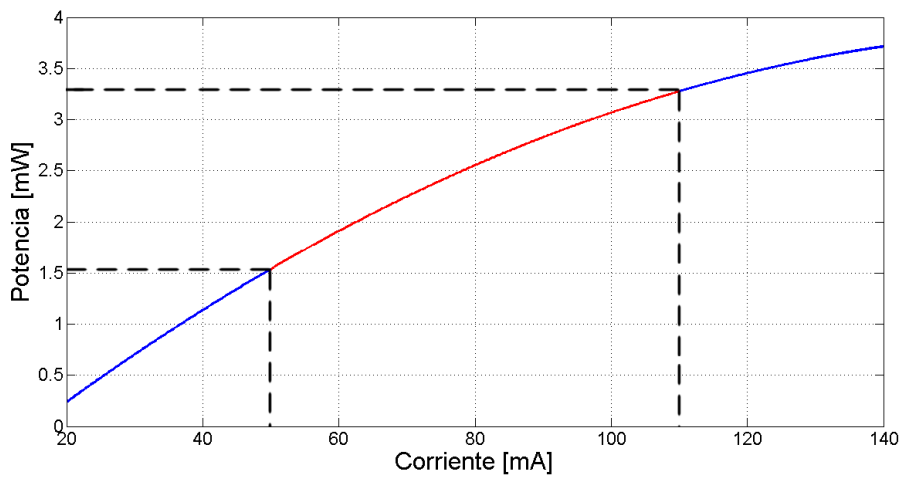


Figura 36 . Rango de trabajo de potencia emitida por el diodo láser generado por la variación de la corriente alrededor del punto de polarización $I_p = 80$ mA.

Por tratarse de un diodo láser no ideal, la potencia emitida cambia con la longitud de onda (Jia Chen, 2010).

5.2.3 Diseño de la celda óptica multipaso Herriott. Para que este tipo de celda sea lo más estable posible la distancia entre los espejos debe ser menor a cuatro veces la distancia focal de estos de acuerdo a la ecuación (22), por lo tanto se debe garantizar que los dos espejos tengan igual distancia focal (Herriott et al., 1964).

$$0 < \frac{d}{f} < 4 \quad (22)$$

Donde d es la distancia entre los espejos y f la distancia focal. Este tipo de celda utiliza espejos esféricos, los cuales su superficie interior es reflectante, por esta razón son conocidos como espejos cóncavos, donde la longitud focal es la mitad del radio de curvatura (R) (Serway & Beichner, 2002).

$$f = \frac{R}{2} \quad (23)$$

El número de reflexiones (N) este dado por:

$$N = 2(2j + 1), j = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (24)$$

Este número de reflexiones tendrá un comportamiento periódico en cada uno de los espejos moviéndose con un ángulo de avance de proyección angular θ como se indica en la Figura 37, (Altmann, Baumgart, & Weitkamp, 1981) y está dado por:

$$\theta = \frac{N - 2}{2N} \pi \quad (25)$$

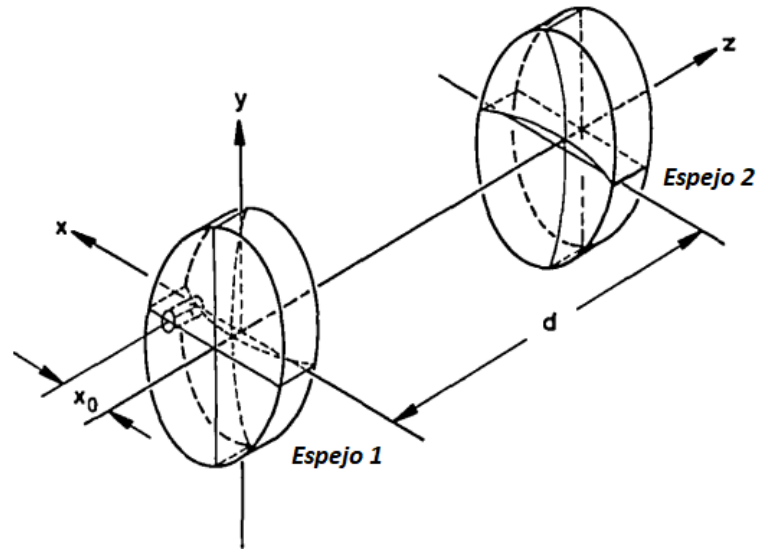


Figura 38. Sistema de coordenadas entre dos espejos de una celda, en el cual el orificio está ubicado en eje X (posición X_0) y el eje Z se toma como eje central. Adaptado de (Altmann et al., 1981)

5.2.3.2 Resultados del diseño. Teniendo en cuenta las características propias del espejo a utilizar mostrados en la

Tabla 7 se proceden a hacer los respectivos cálculos.

Tabla 7.

Características de los espejos utilizados en el diseño de la celda óptica Herriott.

CARACTERÍSTICAS DEL ESPEJO	
Diámetro	25.4 mm
Distancia focal	100 mm
Off – Axis	7 mm
Diámetro spot	3 mm

Nota: Las características aquí presentadas son tomadas de un espejo cóncavo comercial diseñado para celdas Herriott el cual tiene un recubrimiento de oro que lo hace más resistente a la humedad y otros efectos ambientales.

Para que este sistema sea estable, la distancia entre los espejos no debe superar 4 veces la distancia focal y utilizando las ecuaciones (24) y (25) se hallan los datos de número de reflexión y ángulo de proyección angular como también la longitud de recorrido total (L), los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8.

Datos obtenidos del diseño de la celda óptica multipaso Herriott.

j	N	d [mm]	L [mm]	θ [°]
1	6	100	600	60
2	10	200	2000	72
3	14	300	4200	77.1428
4	18	400	7200	80

Nota: Los datos representan los valores del número de reflexiones, ángulo de proyección angular, distancia entre espejos y recorrido total de la celda óptica para cuatro diferentes posiciones en cuanto a la ubicación de los espejos, teniendo en cuenta la estabilidad del sistema.

Con los datos mostrados en la Tabla 9 se decide tomar una distancia entre espejos $d=2f$ correspondiente a un tipo de celda confocal la cual fue implementada en (Khan et al., 2012).

Tabla 9.

Valores para el comportamiento de la celda

N	d [mm]	L [mm]	θ [°]
10	200	2000	72

Nota: Los valores acá representados son los valores escogidos en el diseño y comportamiento de la celda.

Como ya se mencionó, la ubicación del diodo laser y el fotodetector dependen de (x_0, y_0) y (x_n, y_n) . Teniendo en cuenta lo anterior y basados en el eje de coordenadas mostrado en la Figura 38 se escoge las siguientes posiciones:

$$(x_0, y_0) = (0, 7) \rightarrow \text{Espejo 1}$$

$$(x_n, y_n) = (0, -7) \rightarrow \text{Espejo 2}$$

Donde la posición en el eje y corresponde al valor off-axis del espejo 1 (orificio ubicado a 7 mm fuera del eje principal, mostrado en la Figura 39, esta posición garantiza que el haz de luz pase por la distancia de los focos de los espejos (100 mm).

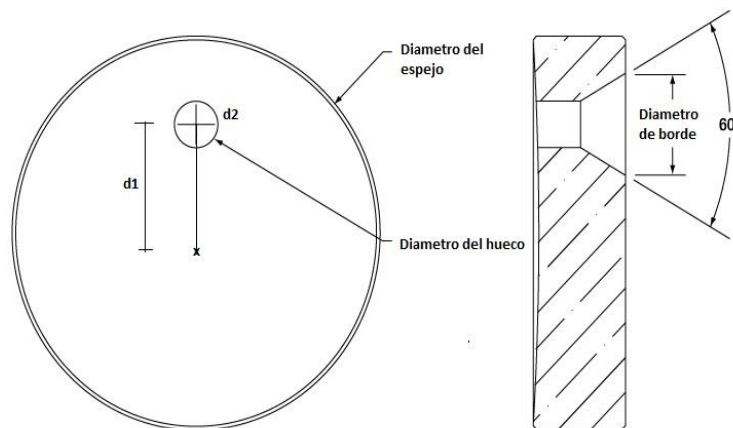


Figura 39. Distancias del espejo esférico utilizado, d1 representa la distancia fuera del eje principal (off-axis) y d2 el diámetro del orificio.

Adaptado de https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=8169

El cruce por la distancia focal garantiza otro punto ahora en el eje de coordenadas (x,z) donde x es igual a 7 mm (espejo 1) y z corresponde a la distancia focal.

$$(x, z) = (7, 100)$$

Con este punto se halla un ángulo α con respecto al eje z (ver Figura 40) que es el eje principal del sistema. Este ángulo sirve para hallar la respectiva ubicación (x,z) del diodo laser y el fotodetector.

$$\tan(\alpha) = \frac{x}{z} \rightarrow \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{7}{100}\right) = 4^\circ$$

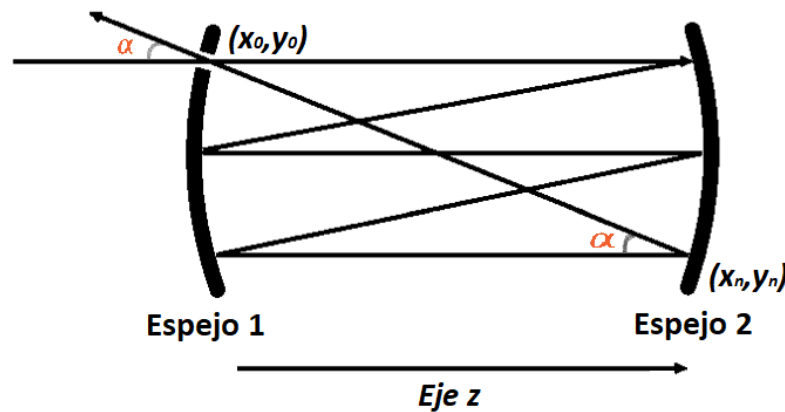


Figura 40. Celda óptica multipaso Herriott donde d=f.

5.2.4 Detección de la señal. La señal recibida en el fotodetector debe tener una adecuación antes de llevarla al procesamiento final, a la salida del fotodetector tenemos un valor de corriente que depende de la potencia detectada a la entrada del dispositivo, el cual corresponde a la responsividad del fotodetector en el rango de longitud de onda de trabajo y se obtiene de la Figura 27.

5.2.4.1 Amplificador de transimpedancia LTC6268. El dispositivo seleccionado para llevar a cabo la conversión de la señal de corriente que proviene del fotodetector a tensión es el integrado

LTC6268, el circuito esquemático necesario para su funcionamiento se detalla en la Figura 41 y sus características técnicas se encuentran en la Tabla 10.

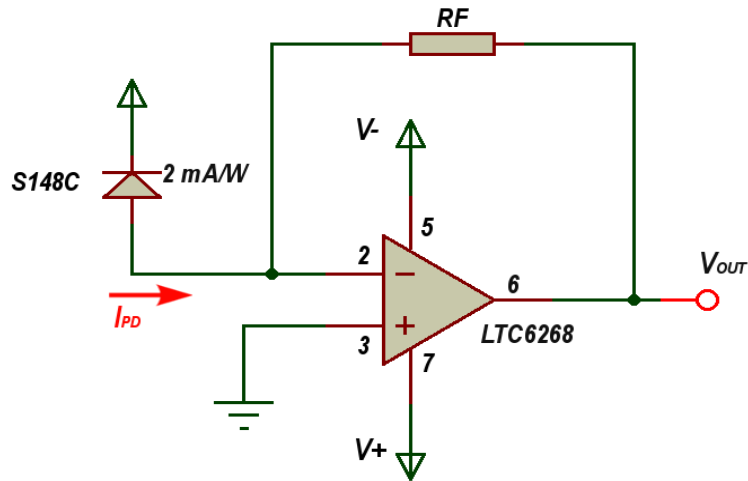


Figura 41. Circuito esquemático amplificador de transimpedancia con el integrado LTC6268 para convertir en tensión la señal de corriente proveniente del fotodetector.

$$V_{OUT} = R_F I_{PD}$$

Tabla 10.

Características del amplificador de transimpedancia CI LTC 6268

Características	Valores
Rango de temperatura	-40 a 125°C
Potencia	90.75 mW

Nota: La tabla muestra características técnicas del circuito integrado LTC6268 tomados de la hoja de datos del elemento.

5.2.5 Procesamiento de la señal. La señal recibida es procesada para obtener la concentración del gas en estudio, dicha información se encuentra en el segundo armónico, la extracción de los armónicos de la señal se lleva a cabo mediante un amplificador Lock-In.

5.2.5.1 Amplificador Lock-In. Son detectores utilizados para la medición de señales cuyas intensidades son muy débiles en relación con el ruido presente (Bond & Flego, 1975). Para la detección de los respectivos armónicos el Lock-In funciona de la siguiente manera (Muñoz Closa, 2009).

A partir de una señal de entrada S_{ent} de frecuencia w_0 , definida como: $S_{ent} = A \cos(w_0 t)$, la cual se utiliza como señal de excitación de un sistema. Este sistema tiene una señal de salida S_{sal} formada por factores de frecuencia w_0 y sus armónicos correspondientes, siendo esta señal:

$$S_{sal} = B \cos(\theta) + C \cos(2\theta) + \sum_{n=3}^{\infty} D_n \cos(n\theta) , \text{ donde } \theta = w_0 t \quad (26)$$

Para obtener los valores de las amplitudes de los armónicos se multiplica la señal de entrada por la señal de salida y luego se realizar un filtrado paso bajas para obtener el valor de continua de la señal (Liu et al., 2004).

$$S_{final1} = S_{ent} * S_{sal} \rightarrow \text{Para el primer armónico}$$

$$S_{final2} = S_{ent} * S_{ent} * S_{sal} \rightarrow \text{Para el segundo armónico}$$

Primer armónico:

$$\begin{aligned} S_{final1} &= A \cos(\theta) \left(B \cos(\theta) + C \cos(\theta) + \sum_{n=3}^{\infty} D_n \cos(n\theta) \right) \\ &= \frac{AB}{2} + \frac{AB}{2} \cos(2\theta) + \frac{AC}{2} \cos(\theta) + \frac{AC}{2} \cos(3\theta) + A \cos(\theta) \sum_{n=3}^{\infty} D_n \cos(n\theta) \end{aligned}$$

Luego del filtrado de continua se obtiene $S_{final1} = \frac{AB}{2}$

Segundo armónico:

$$S_{ent2} = S_{ent} * S_{ent} = A \cos(\theta) * A \cos(\theta) = \frac{A^2}{2} + \frac{A^2}{2} \cos(2\theta)$$

$$\begin{aligned}
 S_{final2} &= \left(\frac{A^2}{2} + \frac{A^2}{2} \cos(2\theta) \right) \left(B \cos(\theta) + C \cos(2\theta) + \sum_{n=3}^{\infty} D_n \cos(n\theta) \right) \\
 &= \frac{A^2 B}{2} \cos(\theta) + \frac{A^2 C}{2} \cos(2\theta) + \frac{A^2}{2} \sum_{n=3}^{\infty} D_n \cos(n\theta) + \frac{A^2 B}{4} \cos(\theta) + \frac{A^2 B}{4} \cos(3\theta) + \frac{A^2 C}{4} \\
 &\quad + \frac{A^2 C}{4} \cos(4\theta) + \frac{A^2}{2} \cos(2\theta) \sum_{n=3}^{\infty} D_n \cos(n\theta)
 \end{aligned}$$

Luego del filtrado de continua se obtiene $S_{final2} = \frac{A^2 C}{4}$

La utilización del segundo armónico radica principalmente en que al detectar el comportamiento de este armónico, tiene una proporción igual a la curvatura del perfil de absorción (Dyroff, 2008), sensibilidad a características espectrales (Rieker et al., 2007), mejor relación señal a ruido (Reid & Labrie, 1981) y un valor máximo en el centro de la línea de absorción (Heard, 2006).

La Tabla 11 indica las características de las tarjetas seleccionadas para llevar a cabo la futura implementación del sistema.

Tabla 11.

Características de las tarjetas para realizar el procesamiento de señal.

Características	Valores T1	Valores T2
Rango de temperatura	-55 a 125°C	0 a 50°C
Potencia	600 mW	1.8 W

Nota: En esta tabla se muestra las características de las tarjetas seleccionadas para llevar a cabo el procesamiento donde T1 corresponde a la tarjeta Lock-In AD630 y T2 a la tarjeta Raspberry Pi 3 (datos tomados de la hoja de datos de los respectivos dispositivos).

5.2.6 Consumo de potencia del sistema. La Tabla 12 muestra el resumen del consumo de potencia de los elementos seleccionados en el presente diseño del sistema de instrumentación y la masa de los mismos aparece en la Tabla 13.

Tabla 12.

Consumo de potencia de los elementos que forman el sistema de instrumentación.

Elemento	Consumo de potencia
Generador de señales ICL8038	250 [mW]
Diodo Laser	3000 [mW]
Controlador Laser	7500 [mW]
Fotodetector	1000 [mW]
Amplificador LTC6268	90.75 [mW]
Amplificador Lock-In AD630	600 [mW]
Raspberry Modelo Pi 3	1820 [mW]
TOTAL	14.5 W

Nota: La tabla muestra los valores de consumo de potencia de los elementos que forman el sistema de instrumentación diseñado en el presente proyecto, estos se encuentran en las respectivas hojas de datos.

Tabla 13.

Masa de los elementos que componen el sistema de instrumentación.

Elemento	Cantidad	Masa [kg]
Generador de señales ICL8038	2	0.026
Diodo Laser	1	0.10
Controlador Laser	1	0.35
Espejo	2	0.007
Soporte espejo	2	0.028
Acoplador fibra	1	0.09
Soporte Montura Fibra	1	0.10
Fotodetector	1	0.2
Amplificador LTC6268	1	0.026
Amplificador Lock-In AD630	1	0.05
Raspberry Modelo Pi 3	1	0.45
TOTAL		1.44

Nota: Masa de los elementos escogidos para la construcción del sensor de CO₂.

6. Descripción del funcionamiento del instrumento

Las respectivas simulaciones se llevaron a cabo utilizando el software Matlab, para esto se crean las señales necesarias teniendo en cuenta las características de cada dispositivo, la simulación describe el comportamiento del sistema de instrumentación desde el diodo laser hasta el procesamiento de la señal, la absorción del haz de luz debido a la presencia del gas se halla simulando el comportamiento de la Ley de Beer-Lambert mostrada en la ecuación (12).

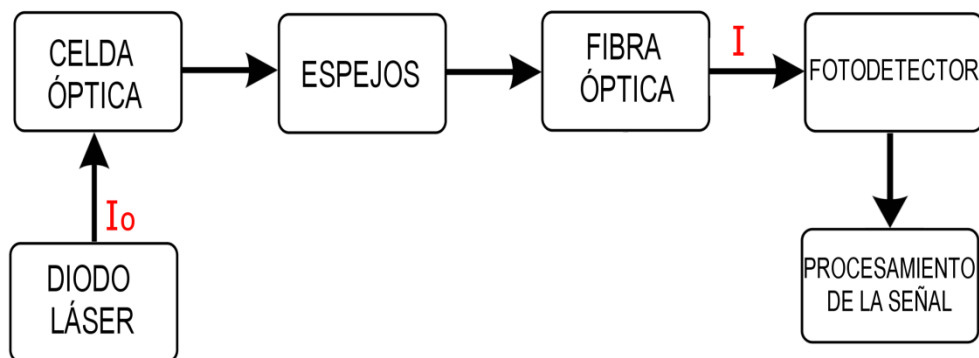


Figura 42. Diagrama de bloques correspondiente a la simulación del dispositivo, la señal inicialmente sale del diodo laser, interactúa con el CO₂ en la celda óptica donde se absorbe, también se tiene en cuenta la absorción sufrida debido a los espejos que hacen parte de la celda óptica y la fibra óptica que conduce la señal, finalmente la salida del fotodetector y la adecuación antes de ser procesada.

6.1 Diodo laser y controlador de corriente

La señal rampa se genera mediante el circuito mostrado en la Figura 29 y la señal senoidal a través del circuito mostrado en la Figura 32, estas tienen las características mostradas en la Figura 43,

(señal rampa: frecuencia de 50 Hz y amplitud de 1.4 V, señal senoidal: frecuencia de 10 kHz y amplitud de 20 mV), las señales se generan teniendo en cuenta las características del diodo laser EP 2004-DM-B mostradas en la Figura 20, Figura 21 y Figura 22 para tener el rango de emisión de longitud de onda mostrado en la Figura 35 y el rango de potencia Figura 36, las señales son inyectadas al controlador laser C150 cuyas características eléctricas se muestran en la Tabla 3 y características de control en la

Tabla 4.

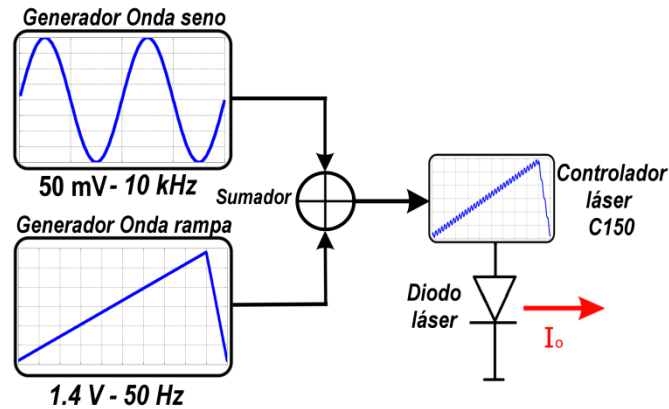


Figura 43. Las señales rampa y senoidal se suman para ser inyectadas al controlador laser C150 donde a través de este opera el diodo laser en el rango indicado de longitud de onda.

La corriente que circula en el diodo laser tendrá la forma mostrada en la Figura 34, lo cual hace que este opere con las características mostradas en la Tabla 14

Tabla 14.

Características de operación del diodo laser en el funcionamiento del modelo funcional de sensor de CO₂.

	Valor mínimo	Valor máximo	Unidades
Corriente	51.8303	108.1697	mA
Longitud de onda	2003.802811	2004.197188	nm
Potencia de salida	1.6070	3.2399	mW

Nota: Valores mínimos y máximos correspondientes al rango de trabajo del diodo laser en longitud de onda y potencia emitida, generados como consecuencia de la modulación.

La intensidad o irradiancia emitida por el diodo laser, corresponde a la potencia emitida por el diodo laser por unidad de superficie, ($I = P/A$) sus unidades son W/m^2 , la Figura 44 muestra la intensidad emitida por el diodo laser EP 2004-DM-B en la operación del modelo funcional desarrollado en el presente trabajo.

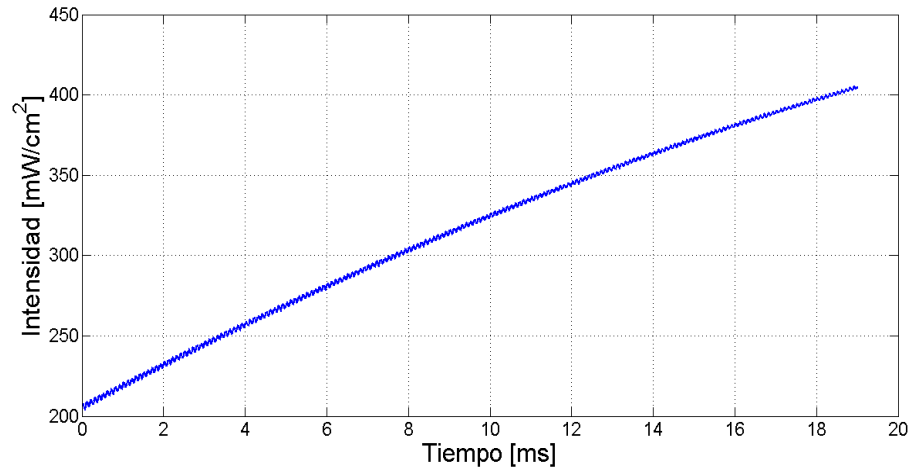


Figura 44. Intensidad o irradiancia emitida por el diodo láser durante su operación en el modelo funcional desarrollado en el presente proyecto.

6.2 Celda óptica multipaso

La celda óptica es la parte del dispositivo donde interactúa el haz de luz emitido por el diodo láser con el CO₂. La señal de entrada es la intensidad luminosa del diodo láser, por su parte la salida será la parte de la señal de entrada, reducida por la absorción del medio, en este caso la absorción atmosférica. Debido a que la banda de detección se escogió de tal manera que sea exclusivamente por la interacción con el CO₂ y por su parte, el diodo láser es cuasi monocromático (o más bien de una banda muy estrecha) entorno a esta banda central de absorción. Uno esperaría encontrar a la salida los efectos exclusivos a la interacción de la señal del diodo láser con el medio. El asunto es que se deben tener en cuenta en el balance radiométrico todas las pérdidas que se producen durante el largo del recorrido, desde la salida del haz del láser hasta su recepción en el fotodiodo, pasando por la celda óptica. Durante esta etapa debemos cuantificar entonces las pérdidas de señal debido a la absorción de la fibra óptica, la absorción de las superficies reflectoras de los espejos y la

cuantificación del fotodiodo receptor en la banda de trabajo. A continuación, se presenta un análisis de este estudio.

6.2.1 Absorción del haz de luz debido a su interacción con el gas. La simulación se realiza con la ley de Beer-Lambert la cual se muestra en la ecuación (12), la cual recordamos en esta sección:

$$T(\nu) = \frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} = e^{-\alpha(\nu)L}$$

Donde L corresponde al valor de la distancia recorrida por el haz de luz según el diseño de la celda óptica multipaso mostrado en la sección 0. El coeficiente de absorción $\alpha(\nu)$ es único para cada valor de temperatura y presión, la información necesaria de las características de la línea fue suministrada por la base de datos de HITRAN³, esta permite simular el comportamiento de la molécula de CO₂ bajo condiciones de presión y temperatura definidas y obtener valores como intensidad de línea $S(\nu)$ y fuerza de línea $S(T)$, en el rango de número de onda de interés, el cual va desde 4989.529 [cm⁻¹] hasta 4990.511 [cm⁻¹], en longitudes de onda equivale al rango mostrado en la Tabla 14.

6.2.2 Absorción del haz de luz debido a los espejos de la celda óptica multipaso. Debido a las múltiples reflexiones en los espejos estos tienden a absorber cierta cantidad de intensidad de luz, por lo tanto, la transmisión del haz de luz debido a su recorrido viene dado por la reflectividad

³ La cual se puede acceder a su versión online en la dirección web: <http://hitran.iao.ru/molecule/>

(R) del espejo y el número de reflexiones (N) de acuerdo con la ecuación (27) (Jia Chen, 2010)(Richard et al., 2002)(Rodríguez Ferreira, 2015).

$$T = R^N \tag{27}$$

Según la Figura 45, en la longitud de onda de nuestro interés (2004 nm), se transmite el 80.5% de la luz emitida.

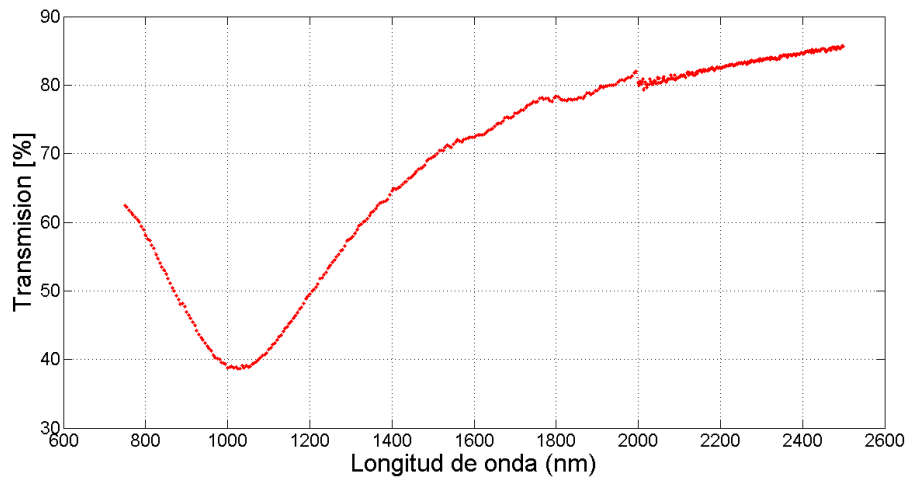


Figura 45. Curva de transmisión de los espejos utilizados en el diseño de la celda óptica multipaso.

6.2.3 Absorción del haz de luz debido a la fibra óptica. Las pérdidas de señal debido a la absorción en fibras comerciales típicamente esta entre 2 a 3 dB/km, debido al corto recorrido que la señal tiene en la fibra óptica en nuestro diseño, podemos decir que la absorción sufrida es despreciable (Tomasi, 2003).

6.3 Recepción de la señal

El funcionamiento del fotodetector se simula teniendo en cuenta las características mostradas en la Tabla 5, la curva de responsividad mostrada en la Figura 27 para el rango de 2000 nm presenta

un valor de $R = 2 \text{ mA/W}$, (2 mA de corriente por cada Watt de potencia detectado por el fotodetector), esta señal de corriente obtenida, se convierte en tensión mediante el amplificador de transimpedancia, el cual se muestra en la Figura 41, la ganancia de este viene dada por el valor de R_F .

6.4 Procesamiento de la señal

El procedimiento del procesamiento de señal y extracción de parámetros del gas consiste en encontrar las características de la línea de absorción del CO₂ en la banda de los 2004 nm presentes en la señal adquirida por el fotodetector y por medio del amplificador Lock-In obtener el segundo armónico de la línea de absorción del cual podemos hallar la concentración del gas.

7. Simulaciones y resultados obtenidos

El trabajo presentado hasta aquí nos sirvió para poder validar la selección de dispositivos y cumplir la verificación de los requisitos del sistema a diseñar. A continuación, se resumirán los parámetros de diseño que, según su área de implementación, permiten asegurar que el diseño definitivo permitirá cumplir los objetivos científicos para los cuales fue realizado este proyecto.

7.1 Resultados del diseño de las interfaces mecánicas y recomendaciones para la construcción del instrumento

Teniendo en cuenta los valores de ángulo y la posición inicial de los espejos se ubican los elementos que componen la celda óptica, estos son:

- Dos soportes tipo tornillo los cuales se visualizan en la Figura 47, estos están diseñados para albergar los espejos cóncavos con el diámetro correspondiente de 25.4 mm como se mencionó en la

- Tabla 7 de la sección 0.
- Un soporte tipo HCP donde se monta la fibra del láser, en este se coloca un micro posicionador o colimador de fibra PAF2-5D el cual garantiza pequeñas alineaciones de la posición, conexión de la fibra (conector 30126C3) e intensidad en la emisión del haz de luz, estos elementos se visualizan en la Figura 48.
- El fotodetector S148C garantiza la detección de potencia en su totalidad ya que el rango de señales recibidas está entre 1.6 mW y 3 mW, este detector tiene un rango de potencia óptica de 1 μ W a 1000 mW con una resolución de 1 nW como se mencionó en la Tabla 5 de la sección 0. La Figura 46 muestra las ubicaciones de los elementos que componen la celda

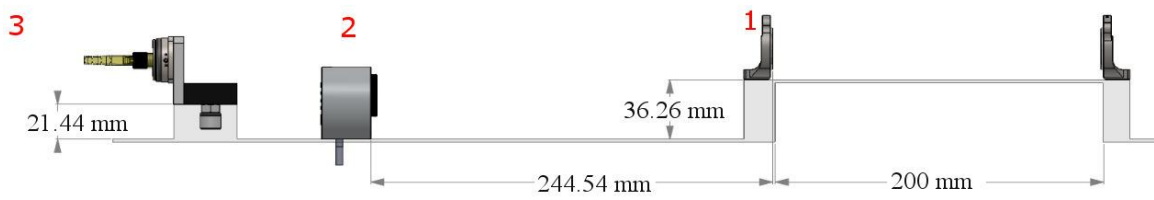


Figura 46. Vista de perfil longitudinal de los componentes ópticos del instrumento. La figura muestra las ubicaciones y elementos en la celda. La distancia de separación entre los espejos es de 200 mm. En el esquema se muestran las posiciones de los soportes tipo tornillo en los cuales se albergan los espejos. Estos soportes están montados sobre la base de aluminio a 36.26 mm. El plano de entrada del fotodetector S148C (2) está a una distancia de 244.54 mm del plano del espejo perforado. El soporte (3) de la fibra que transmite la luz del diodo láser está sobre la base de aluminio a 21.44 mm.



Figura 47. Espejos y soportes. Espejos cóncavos de 1” (25.4 mm) de diámetro referencias CM254-100EH3-M02 y CM254-100-M02 de ThorLabs con y sin orificio respectivamente, los cuales tienen un recubrimiento de oro altamente reflectivo que los hace más resistentes a la humedad y otros efectos ambientales. 2) Soporte tipo tornillo modelo POLARIS-B1S de la marca Polaris el cual está diseñado para las dimensiones de estos espejos.

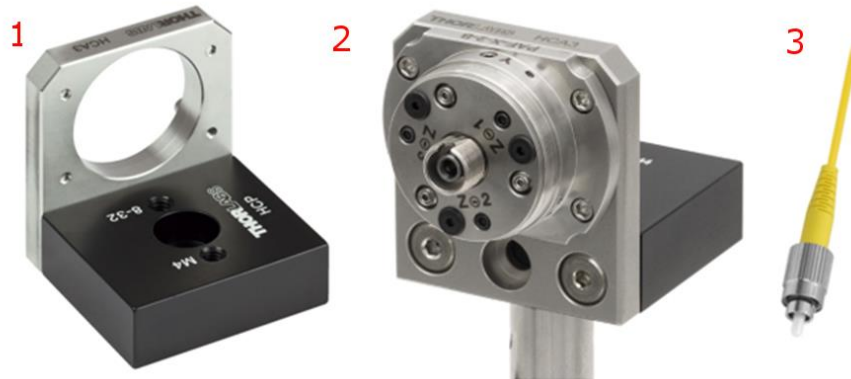


Figura 48. Componentes de soporte de la fibra del láser. 1) Soporte HCP en el cual se monta el respectivo acoplador de la fibra. 2) Acoplador PAF2-5D (colimador) montado sobre el soporte HCP con el objetivo de hacer pequeños cambios en las alineaciones de posición y salida del haz de luz. 3) Conector de la fibra 30126C3 el cual une el conector de salida de la fibra con la entrada del acoplador.

7.2 Procedimiento de la simulación

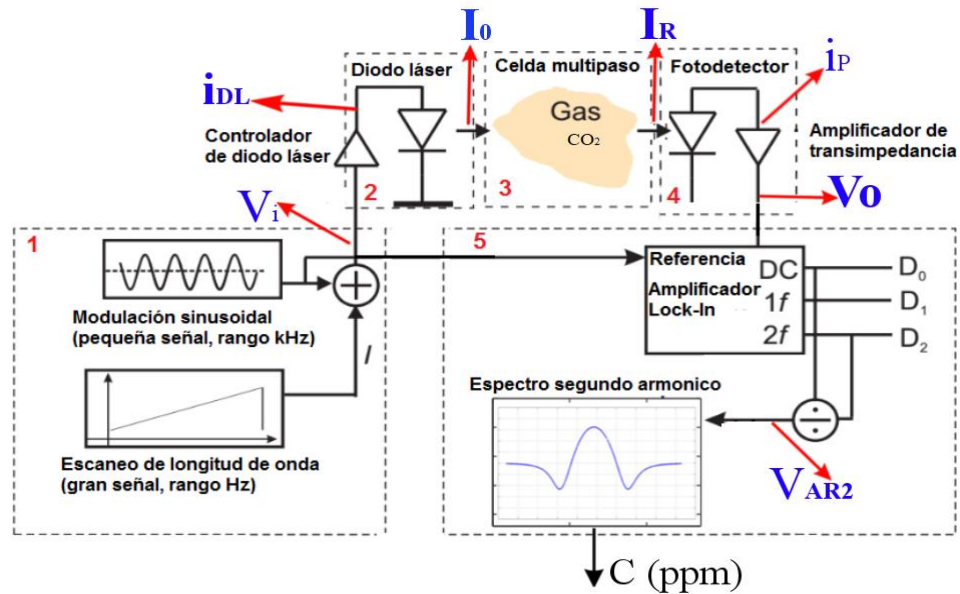


Figura 49. Diagrama de bloques del sistema de instrumentación para medir concentración de CO₂ atmosférico, las flechas rojas corresponden a las señales obtenidas de la simulación cuyo procedimiento se describe a continuación. Vi indica la señal de tensión que ingresa al controlador de corriente de diodo láser, I_{DL} indica la corriente que circula a través del diodo laser la cual es controlada por el controlador, I₀ indica la intensidad emitida por el diodo, I_R indica la intensidad recibida por el fotodetector, i_p indica la corriente del fotodetector, esta depende de la responsividad del dispositivo, V₀ indica el voltaje de salida del amplificador de transimpedancia, V_{AR2} indica la señal del segundo armónico del cual obtenemos la concentración del gas en estudio. Adaptado de Chen (2010).

A continuación, se describe el procedimiento llevado a cabo para obtener las señales que se indican en la Figura 49.

7.2.1 Bloque 1: Señales generadas para la modulación WMS. Las señal Vi mostrada en el bloque 1 de la Figura 49 corresponde a la suma de las salidas de los circuitos generadores de rampa y senoidal mostrados en la Figura 29 y Figura 32 respectivamente en la sección 0, la señal toma la

forma que se muestra en la Figura 50, la simulación del circuito se lleva a cabo en el software Proteus Design Suite.

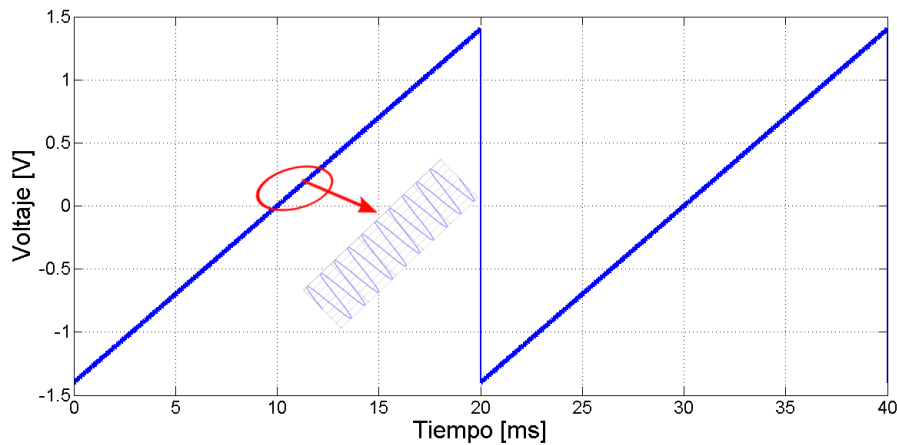


Figura 50. Suma de las señales senoidal y rampa utilizadas para llevar a cabo la modulación de longitud de onda del diodo laser EP 2004-DM-B

7.2.2 Bloque 2: Diodo laser y controlador de corriente. Teniendo en cuenta las características del controlador de corriente de diodo laser C150 mostrado en la sección 0 e inyectando a este la señal mostrada en la Figura 50, llevamos a cabo la modulación de longitud de onda del diodo laser en los rangos de trabajo de longitud de onda y potencia mostrados en la Figura 35 y Figura 36 respectivamente, teniendo en cuenta las características del diodo laser EP 2004-DM-B mostrado en la sección 0, la señal de corriente modulada I_{DL} que circula a través del diodo laser se muestra en la Figura 51 y la intensidad de luz emitida I_0 que se indica en la Figura 49 se puede ver en la Figura 52.

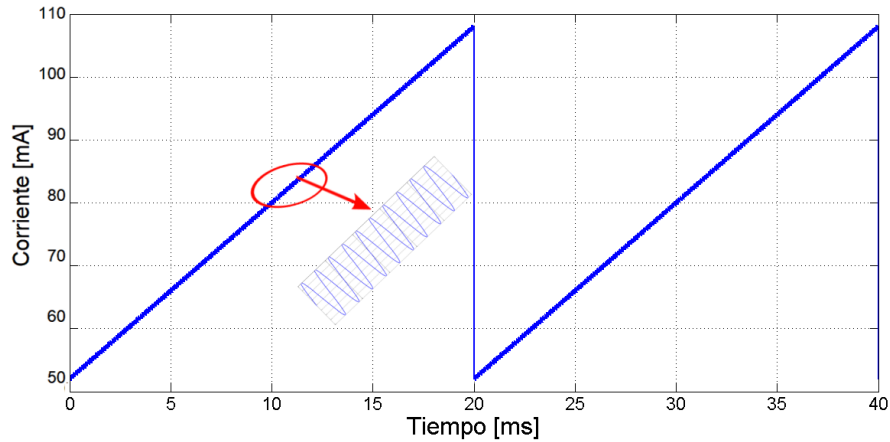


Figura 51. Señal modulada de corriente que circula a través del diodo laser, la cual se controla por medio de la tarjeta C150 y genera el barrido de longitud de onda emitida por el dispositivo.

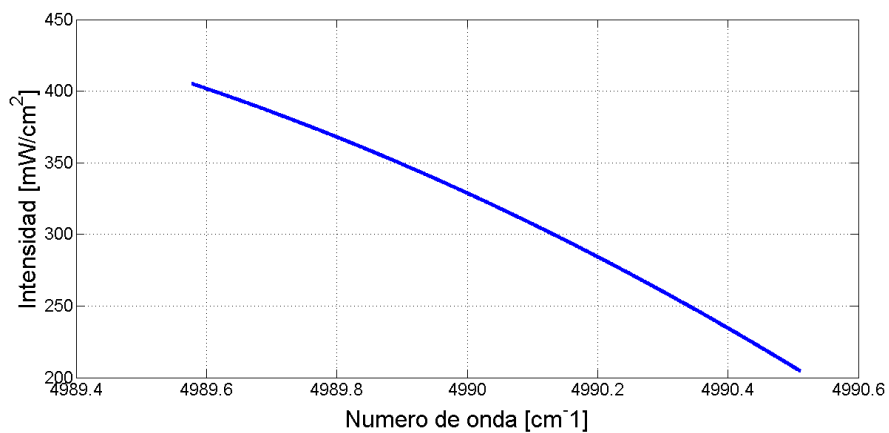


Figura 52. Intensidad emitida por el diodo láser en el rango de número de onda barrido por la modulación.

7.2.3 Bloque 3: Celda óptica multipaso. En la celda óptica multipaso el gas interactúa con el haz de luz emitido por el diodo laser, este procedimiento se llevó a cabo simulando la ley de Beer-Lambert mostrada en la ecuación (12) en la sección 0, teniendo en cuenta los parámetros que forman el coeficiente de absorción de la ecuación (18), los valores de temperatura (T) y presión (P) fueron tomados de los perfiles atmosféricos mostrados en la Figura 3 y Figura 4 respectivamente, los valores de la fuerza de línea ($S(T)$) corresponden a los suministrados por la

base de datos HITRAN, los valores de la forma de la línea ($g(\nu)$) de la ecuación (15) dependen de sus características de ancho de banda a media altura ($\Delta\nu_c$) y número de onda central (ν_0) los cuales son propios de cada línea de absorción y dependen de las condiciones a las que se encuentre el gas, la intensidad recibida en el fotodetector para un valor de concentración de $\chi = 15000$ ppm se muestra en la Figura 53, la intensidad sufre atenuaciones debido a la presencia del gas, absorción de los espejos que forman la celda óptica multipaso y la fibra óptica que conduce el haz de luz. Cabe aclarar que se toma un valor concentración demasiado grande para hacer evidente la absorción sufrida y poder visualizar en la Figura 53 dicho efecto.

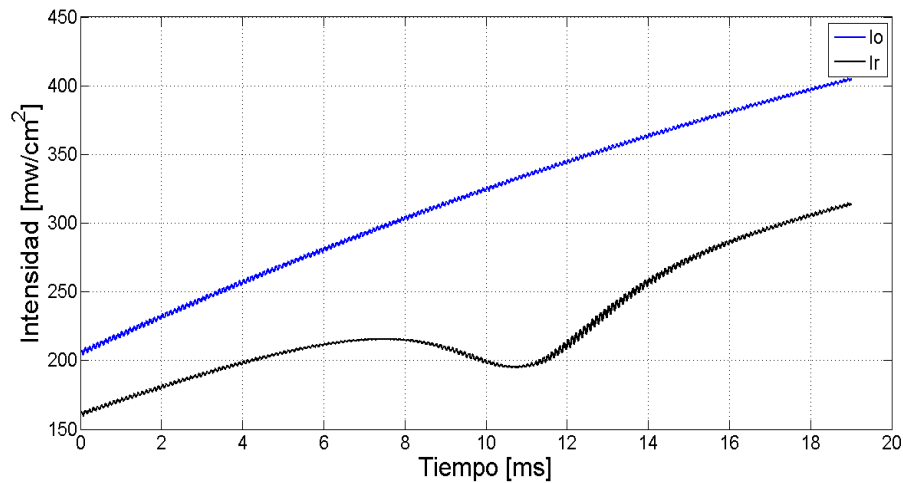


Figura 53. Absorción del haz de luz en la celda óptica multipaso, la línea azul corresponde a la intensidad I_0 emitida por el diodo láser y la línea negra a la recibida I_R en el fotodetector, el haz de luz sufre atenuaciones por el gas, los espejos y la fibra óptica que lo conduce.

Las características de los espejos que rigen la transmisión y absorción del haz de luz se muestran en la sección 0 y la transmisión correspondiente en el rango de longitud de onda de trabajo se muestra en la Figura 45 en la sección 0, la absorción por la fibra óptica se explica en la sección 0.

7.2.4 Bloque 4: El fotodetector. La simulación del comportamiento del fotodetector se lleva a cabo teniendo en cuenta sus características mostradas en la sección 0, el valor de responsividad para llevar a cabo la simulación, se toma de la Figura 27 en el rango de longitud de onda de trabajo, en este caso para 2004 nm es igual a 2 mA/W, en la Figura 54 se muestra el comportamiento de la corriente en el fotodetector correspondiente al comportamiento dado por el valor de concentración $\chi = 15000$ ppm.

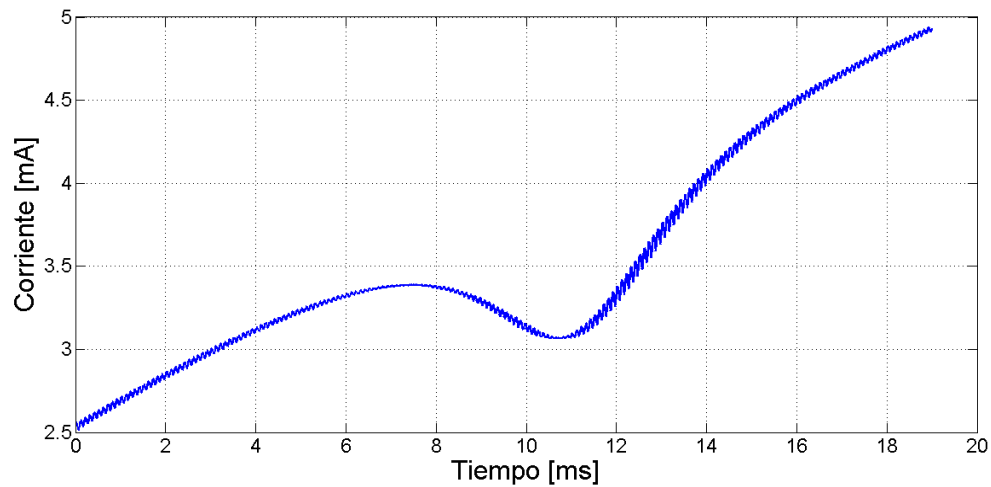


Figura 54. Forma de la corriente en el fotodetector, esta depende de la responsividad característica del dispositivo.

7.2.4.1 El amplificador de transimpedancia. Teniendo en cuenta las características del circuito amplificador de transimpedancia mostrado en la Figura 41, se convierte a tensión la señal de corriente del fotodetector de nuestro sistema, la ganancia se elige teniendo en cuenta la amplitud de la señal de corriente que proviene del fotodetector, en este caso se seleccionó una ganancia de 820 la cual corresponde al valor de la resistencia R_F . La Figura 55 muestra el resultado de la conversión a tensión de la señal de la Figura 54.

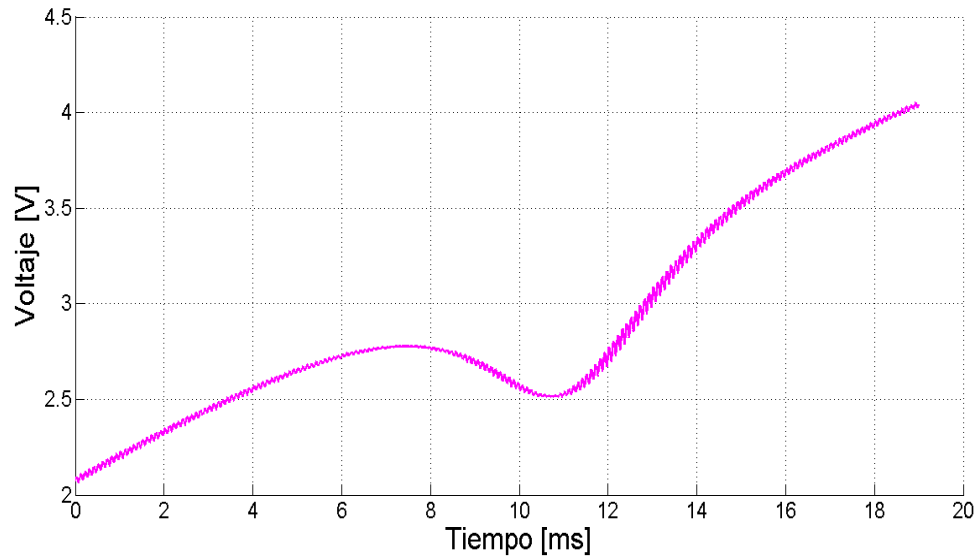


Figura 55. Señal de voltaje de salida del amplificador de transimpedancia.

7.2.5 Obtención de la forma de la línea de absorción. Podemos observar que de las señales anteriores, se puede obtener la forma de la línea de absorción, restando la rampa de modulación del diodo laser y teniendo en cuenta que cada valor de corriente genera un cambio en la longitud de onda, relacionando las características de las señales con las que se llevó a cabo la modulación podemos obtener la forma de la señal Lorentziana correspondiente a la línea de absorción del CO₂ alrededor de 2004 nm, por lo tanto la señal mostrada en la Figura 56 representa dicha forma de la línea de absorción.

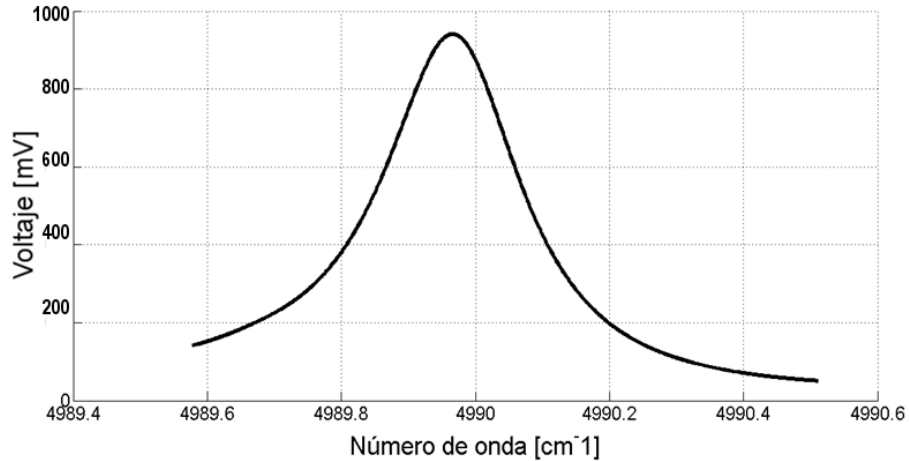


Figura 56. Forma de la línea de absorción del CO₂ correspondiente a los 2004 nm.

7.2.6 Obtención del segundo armónico de la señal, amplificador Lock-In. El procedimiento matemático realizado para simular la obtención del segundo armónico se muestra en la sección 0, con las características de la línea de absorción obtenida anteriormente utilizando las ecuaciones (19) y (20) se obtiene la forma del segundo armónico correspondiente a la señal en estudio, el cual se muestra en la Figura 57

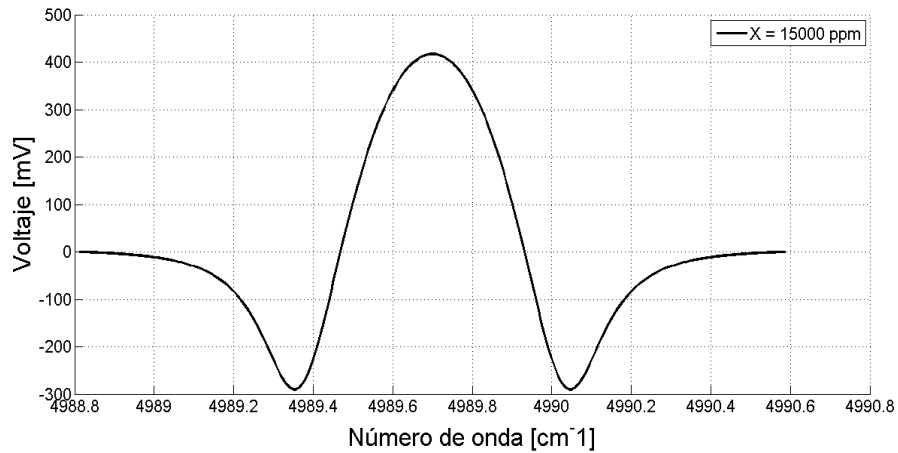


Figura 57. Curva del segundo armónico de la función Lorentziana obtenido por la simulación de la absorción para el ejemplo de 15000 ppm, esta señal tiene características relacionadas con la concentración del gas en estudio.

7.2.7 Relación de la curva del segundo armónico con la concentración del gas. El valor máximo de amplitud del segundo armónico, es directamente proporcional y varía de forma lineal con la concentración del gas (Huo & Fan, 2017)(Zhu, Cheng, & Zhang, 2017)(Luo, Ouyang, Wu, Li, & Song, 2015), de esta manera podemos caracterizar el sistema de instrumentación para diferentes valores de concentración como se muestra en la Figura 58 y Figura 59.

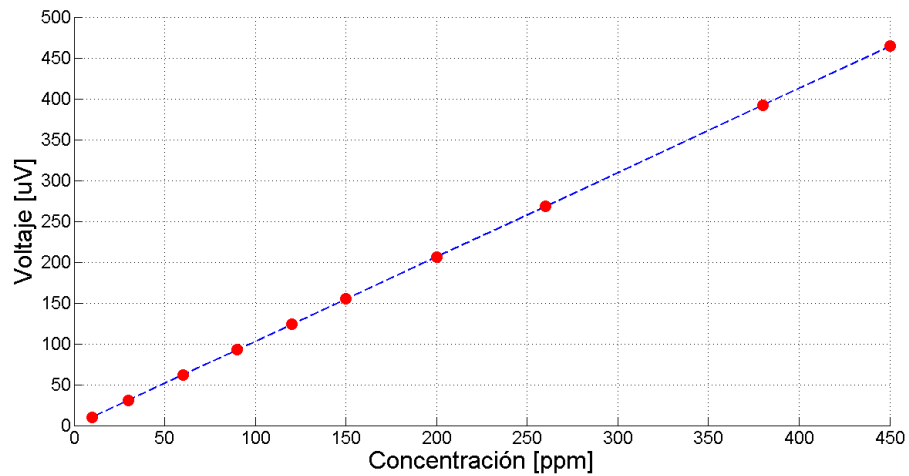


Figura 58. Resultados obtenidos del valor máximo del segundo armónico en relación con la concentración para el ejemplo de simulación correspondiente a diferentes valores de concentración desde 10 ppm a 450 ppm.

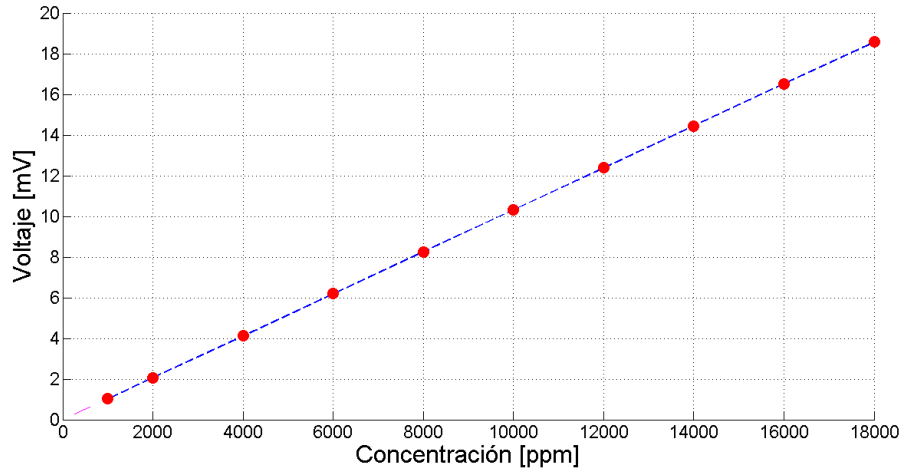


Figura 59. Resultados obtenidos del valor máximo del segundo armónico en relación con la concentración para el ejemplo de simulación correspondiente a diferentes valores de concentración desde 1000 ppm a 18000 ppm.

7,3 Resultados de la simulación de la obtención del segundo armónico teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas a diferentes alturas y su relación con la concentración del gas.

Según el recorrido del globo sonda de la misión E3Tratos, durante su vuelo a través de la troposfera y estratosfera se realiza la simulación del comportamiento del sistema de instrumentación para diferentes puntos de altitud, teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas que allí se presentan, los datos de temperatura y presión corresponden a los mostrados en la Figura 3 y Figura 4 de la sección 00, los parámetros característicos de las líneas de absorción para cada valor específico de temperatura y presión en cada posición de altitud simulado fueron suministrados por la base de datos HITRAN, siguiendo el procedimiento descrito en la sección 0, se obtiene resultados de la forma del segundo armónico y su amplitud para altitudes de 0 m, 1 km, 5 km, 10 km, 15 km, 20 km, 25 km, 30 km y 35 km y valores de concentración de y un rango de valores de concentración desde 25 ppm hasta 600 ppm.

El proceso de la simulación mostrado a continuación es importante para determinar los resultados esperados en una futura implementación o para evaluar posibles mejoras del diseño.

7.3.1 Simulación del sistema a 0 m de altitud. Condiciones atmosféricas:

$$T = 294.6535 \text{ K}$$

$$P = 1,1243 \text{ Atm}$$

Valores de concentración simulados: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

Los resultados obtenidos del segundo armónico bajo estas condiciones atmosféricas se muestran en la Figura 60

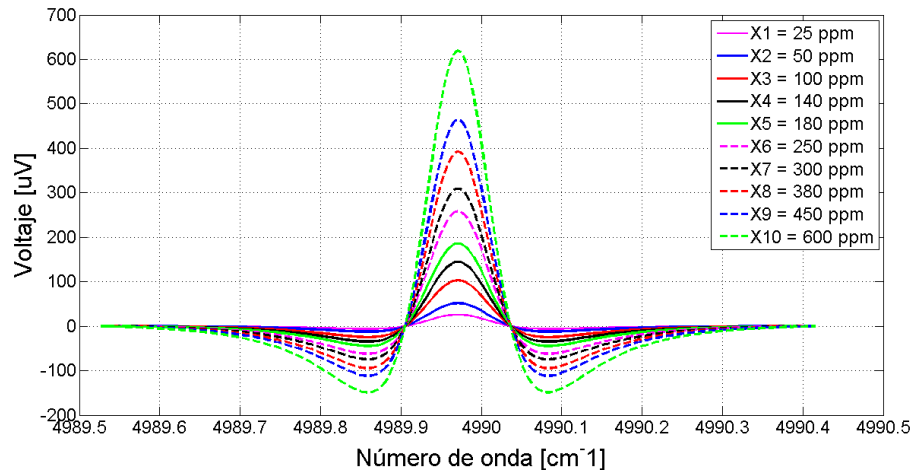


Figura 60. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 0m de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

La relación de los valores simulados de concentración con la amplitud del segundo armónico se muestra en la Figura 61.

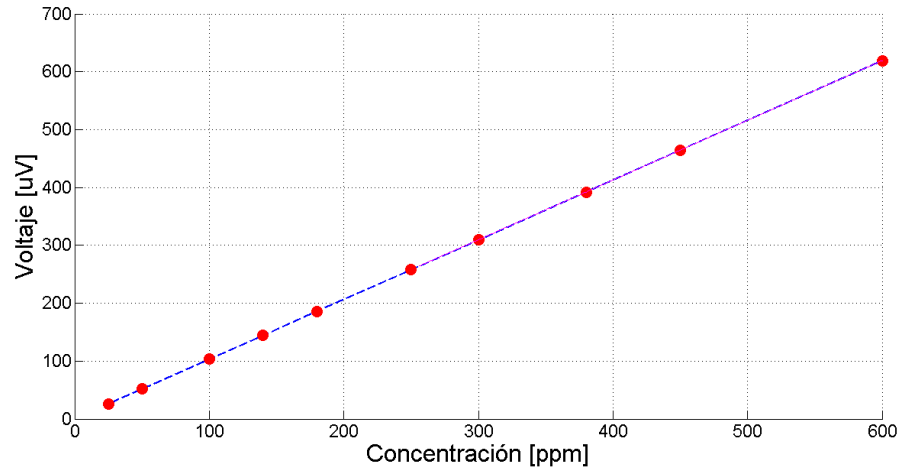


Figura 61. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 0 m de altitud.

7.3.2 Simulación a 1 km de altitud. Condiciones atmosféricas:

$$T = 288.1535 \text{ K}$$

$$P = 0.9999 \text{ Atm}$$

Valores de concentración simulados: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

Los resultados obtenidos del segundo armónico bajo estas condiciones atmosféricas se muestran en la Figura 62.

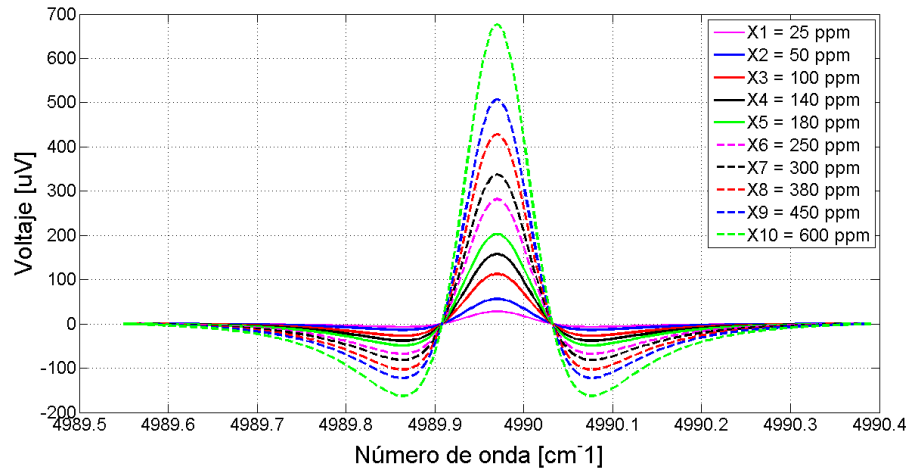


Figura 62. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 1 km de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

La relación de los valores simulados de concentración con la amplitud del segundo armónico correspondientes a la simulación a condiciones atmosféricas a 1 km de altitud se muestra en la Figura 63.

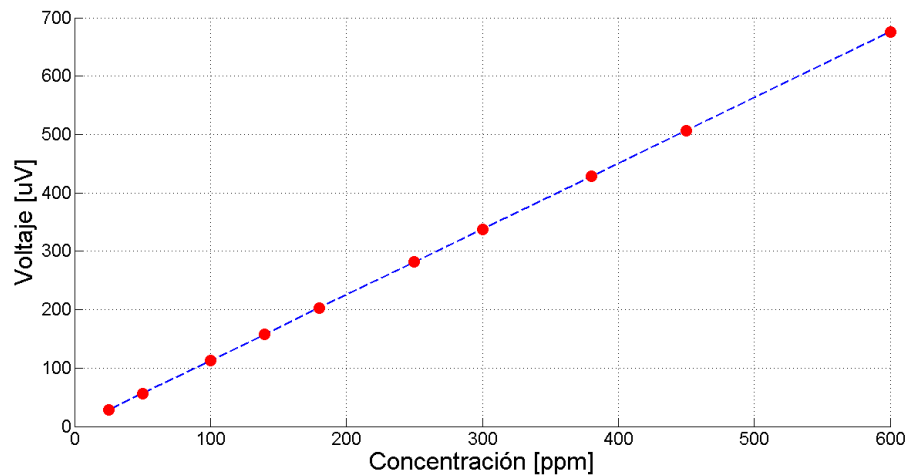


Figura 63. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 1 km de altitud.

7.3.3 Simulación a 5 km de altitud. Condiciones atmosféricas:

T = 262.1535 K

P = 0.6082 Atm

Valores de concentración simulados: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

Los resultados obtenidos del segundo armónico bajo estas condiciones atmosféricas se muestran en la Figura 64.

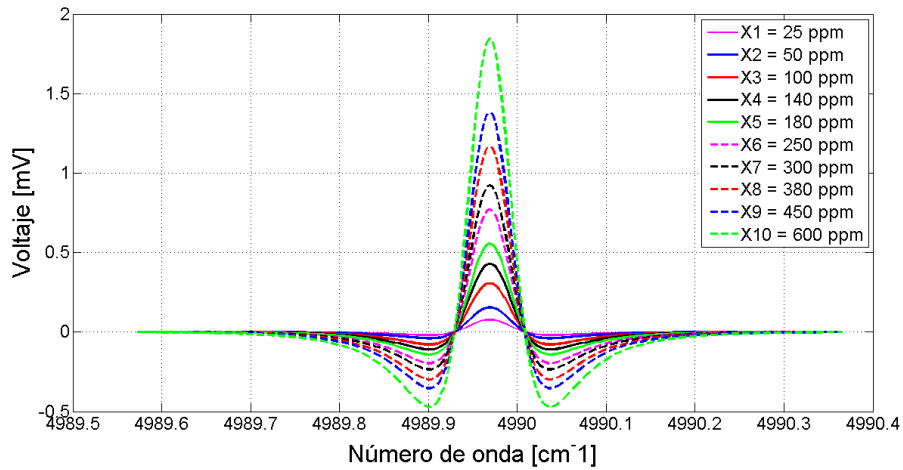


Figura 64. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 5 km de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

La relación de los valores simulados de concentración con la amplitud del segundo armónico correspondientes a la simulación a condiciones atmosféricas a 5 km de altitud se muestra en la Figura 65.

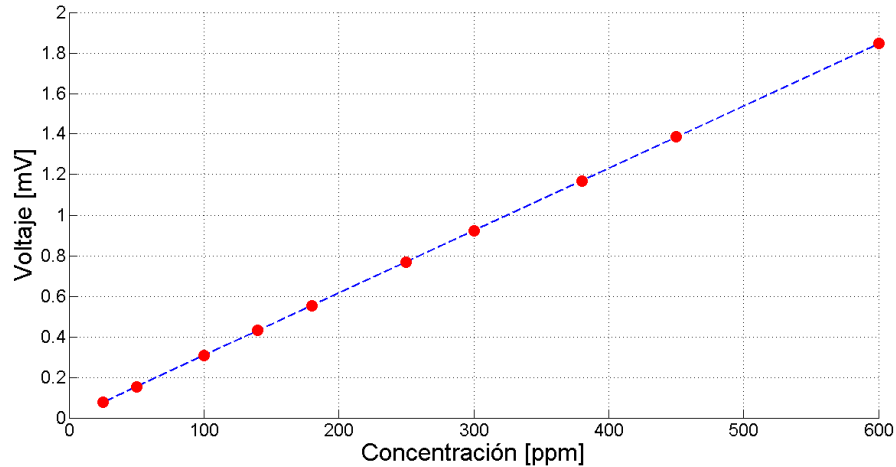


Figura 65. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 5km de altitud.

7.3.4 Simulación a 10 km de altitud. Condiciones atmosféricas:

$$T = 229.6535 \text{ K}$$

$$P = 0.3032 \text{ Atm}$$

Valores de concentración simulados: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

Los resultados obtenidos del segundo armónico bajo estas condiciones atmosféricas se muestran en la Figura 66.

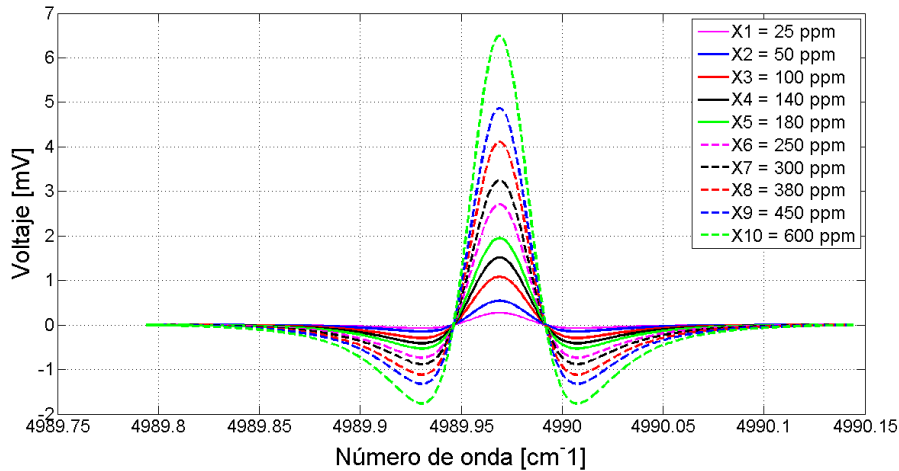


Figura 66. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 10 km de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

La relación de los valores simulados de concentración con la amplitud del segundo armónico correspondientes a la simulación a condiciones atmosféricas a 10 km de altitud se muestra en la Figura 67.

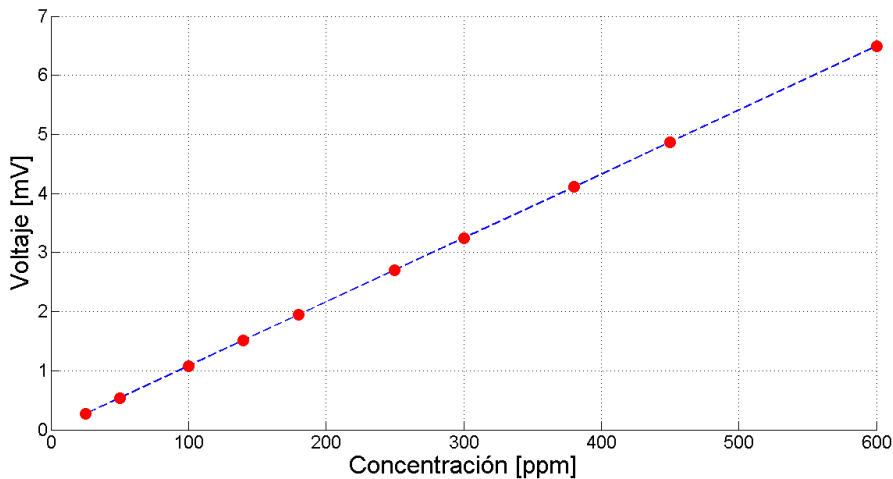


Figura 67. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 10 km de altitud.

7.3.5 Simulación a 15 km de altitud. Condiciones atmosféricas:

$T = 223.1600 \text{ K}$

$P = 0.1413 \text{ Atm}$

Valores de concentración simulados: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

Los resultados obtenidos del segundo armónico bajo estas condiciones atmosféricas se muestran en la Figura 68.

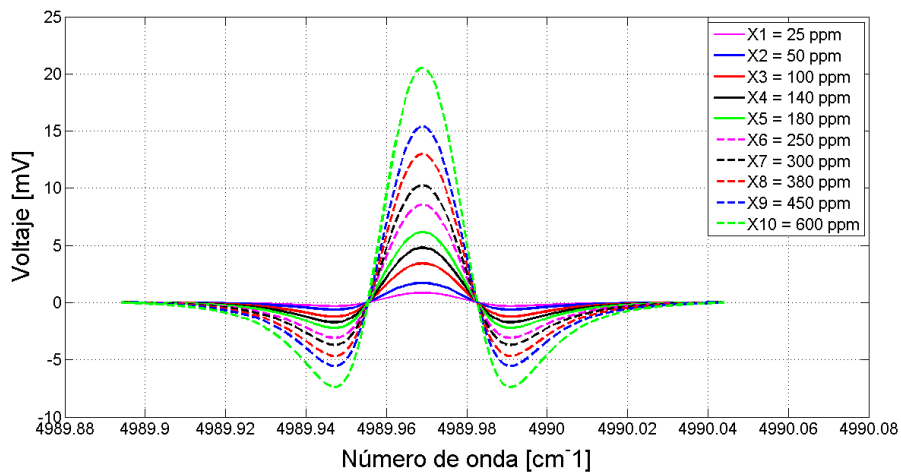


Figura 68. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 15 km de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

La relación de los valores simulados de concentración con la amplitud del segundo armónico correspondientes a la simulación a condiciones atmosféricas a 15 km de altitud se muestra en la Figura 69.

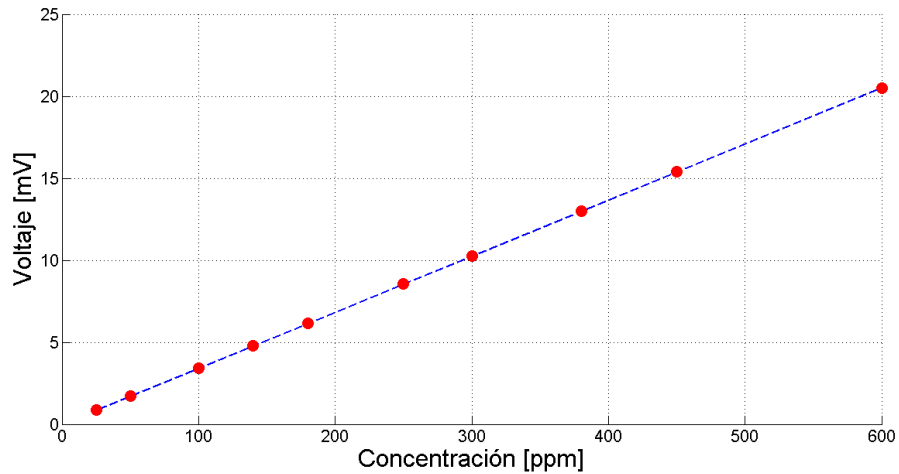


Figura 69. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 15 km de altitud.

7.3.6 Simulación a 20 km de altitud. Condiciones atmosféricas:

$$T = 223.1610 \text{ K}$$

$$P = 0.0657 \text{ Atm}$$

Valores de concentración simulados: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

Los resultados obtenidos del segundo armónico bajo estas condiciones atmosféricas se muestran en la Figura 70.

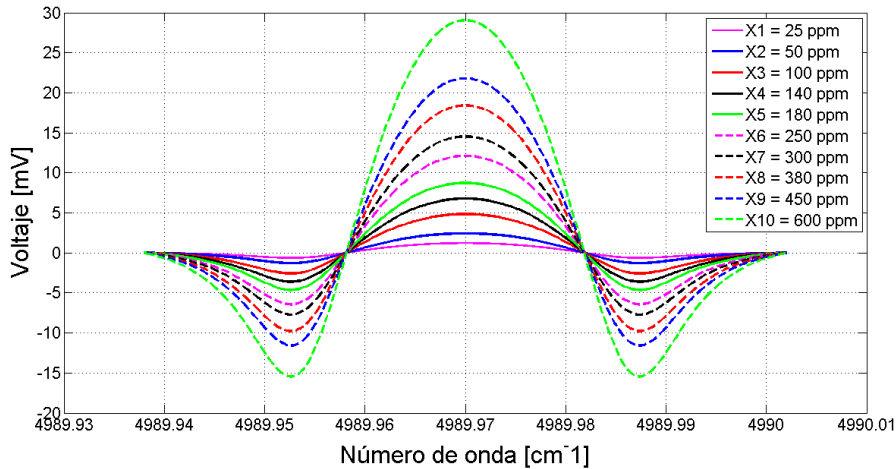


Figura 70. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 20 km de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

La relación de los valores simulados de concentración con la amplitud del segundo armónico correspondientes a la simulación a condiciones atmosféricas a 20 km de altitud se muestra en la Figura 71.

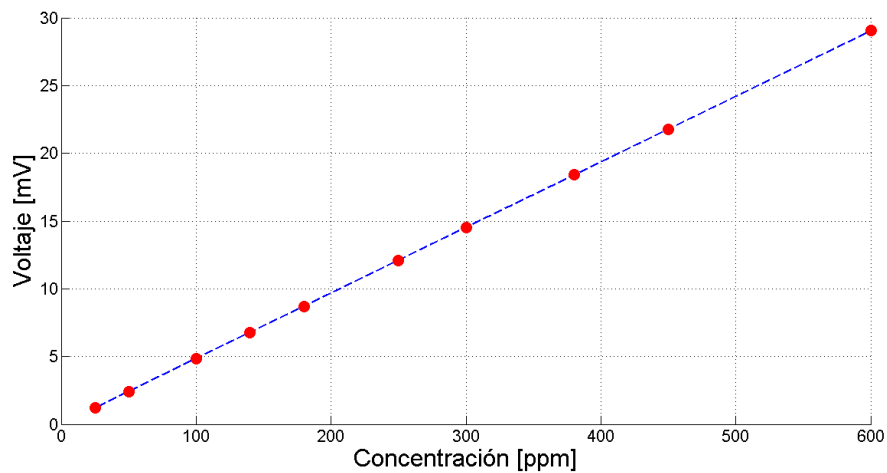


Figura 71. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 20 km de altitud.

7.3.7 Simulación a 25 km de altitud. Condiciones atmosféricas:

$$T = 228.1610 \text{ K}$$

$$P = 0.0308 \text{ Atm}$$

Valores de concentración simulados: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

Los resultados obtenidos del segundo armónico bajo estas condiciones atmosféricas se muestran en la Figura 72.

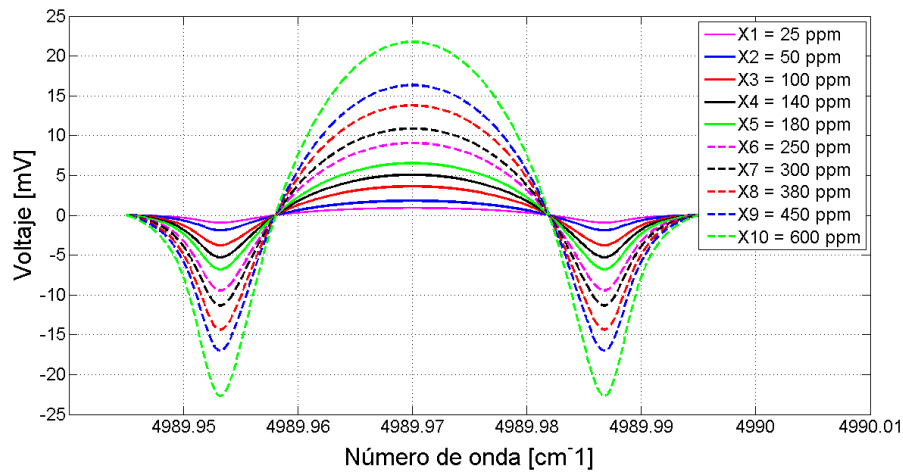


Figura 72. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 25 km de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

La relación de los valores simulados de concentración con la amplitud del segundo armónico correspondientes a la simulación a condiciones atmosféricas a 25 km de altitud se muestra en la Figura 73.

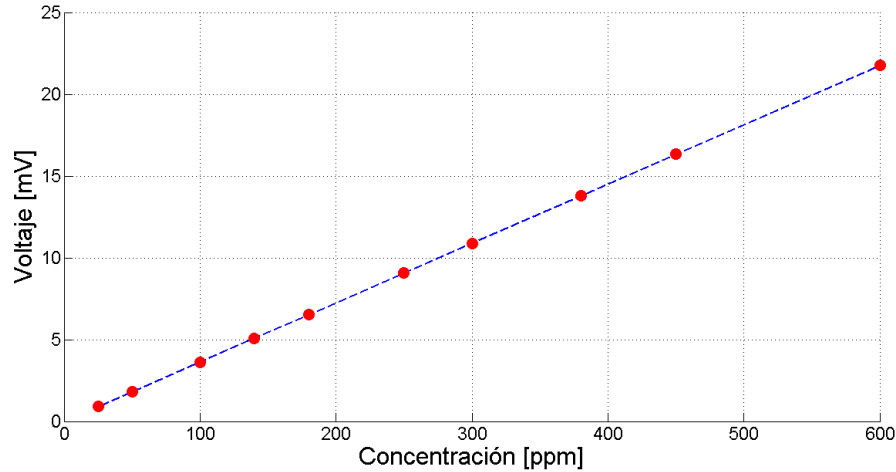


Figura 73. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 25 km de altitud.

7.3.8 Simulación a 30 km de altitud. Condiciones atmosféricas:

$$T = 233.1610 \text{ K}$$

$$P = 0.0147 \text{ Atm}$$

Valores de concentración simulados: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

Los resultados obtenidos del segundo armónico bajo estas condiciones atmosféricas se muestran en la Figura 74.

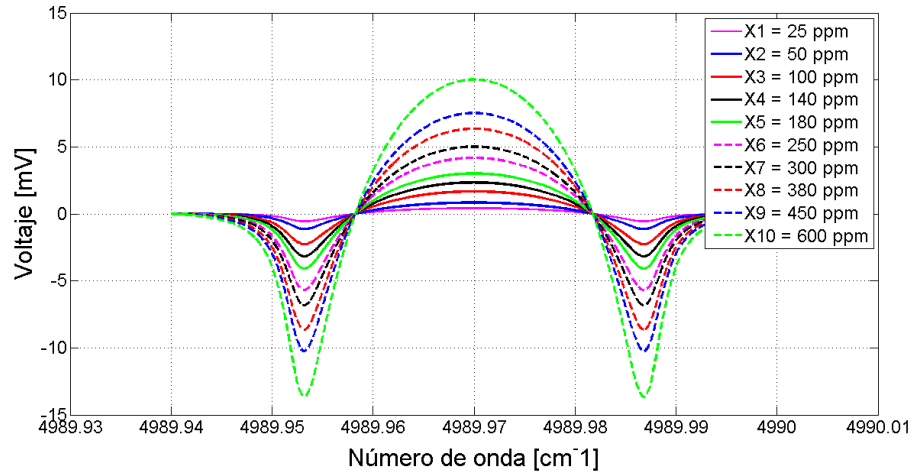


Figura 74. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 30 km de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

La relación de los valores simulados de concentración con la amplitud del segundo armónico correspondientes a la simulación a condiciones atmosféricas a 30 km de altitud se muestra en la Figura 75.

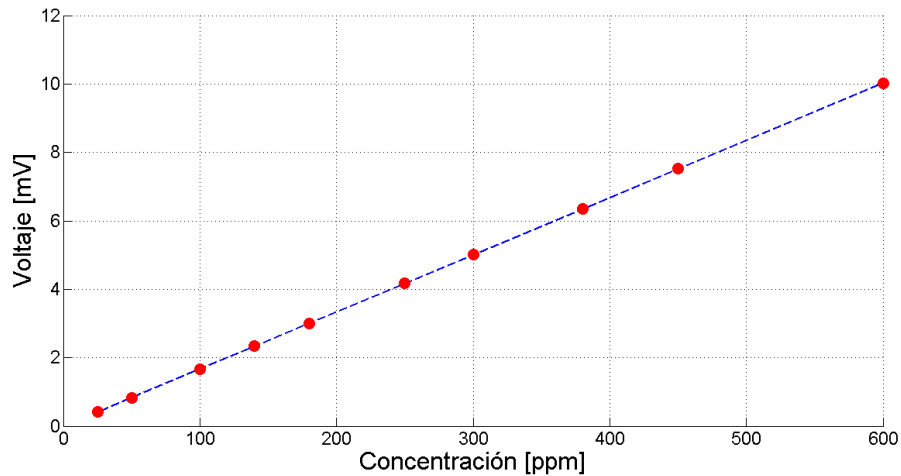


Figura 75. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 30 km de altitud.

7.3.9 Simulación a 35 km de altitud. Condiciones atmosféricas:

$$T = 243.4228 \text{ K}$$

$$P = 0.0072 \text{ Atm}$$

Valores de concentración simulados: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

Los resultados obtenidos del segundo armónico bajo estas condiciones atmosféricas se muestran en la Figura 76.

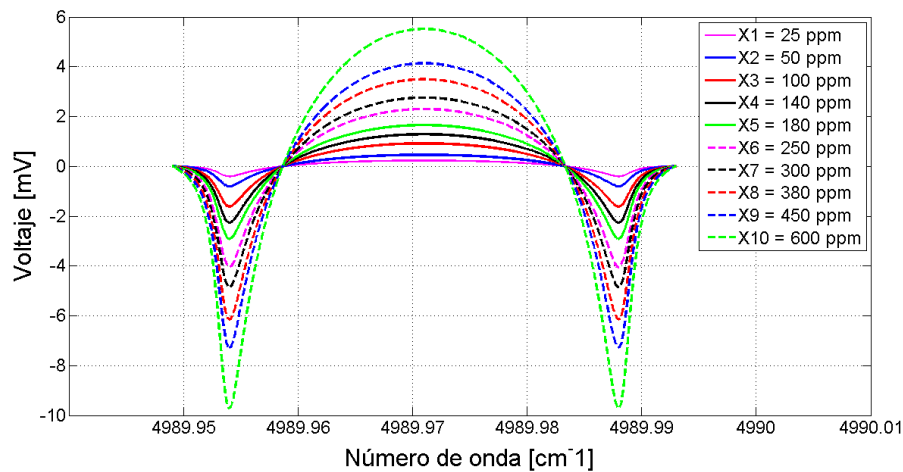


Figura 76. Segundo armónico obtenido de la simulación del dispositivo en condiciones atmosféricas a 35 km de altitud para valores de concentración de: 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 140 ppm, 180 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 380 ppm, 450 ppm y 600 ppm.

La relación de los valores simulados de concentración con la amplitud del segundo armónico correspondientes a la simulación a condiciones atmosféricas a 35 km de altitud se muestra en la Figura 77.

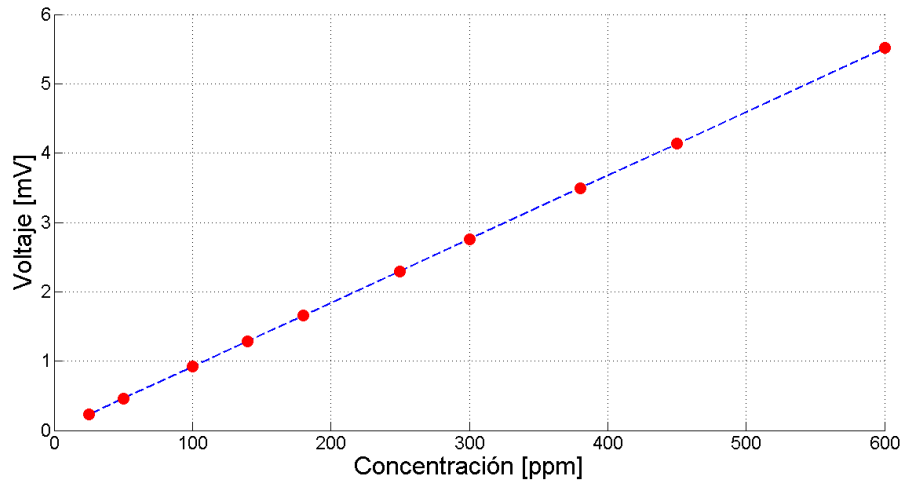


Figura 77. Valores máximos del segundo armónico para diferentes valores de concentración, los puntos rojos indican los valores de concentración simulados y su correspondiente valor máximo del segundo armónico, la línea azul representa la característica de la relación lineal del valor de concentración con el máximo del segundo armónico a 35 km de altitud.

El comportamiento del ancho de las líneas espectrales detallado en la sección 0, es clave en los resultados obtenidos de las simulaciones anteriores, el ancho de la línea de absorción varía en función de la presión, durante el recorrido del globo sonda en las capas atmosféricas, según el perfil de presión mostrado en la Figura 4 hace que el medio ancho de línea ($\Delta\nu_c$) disminuya con la altitud, esta variación afecta directamente el coeficiente de modulación m , el cual está definido por la expresión mostrada en la ecuación (17), este efecto se ve a simple vista en como la forma del segundo armónico se hace más ancha a mayor altitud, la variación de $\Delta\nu_c$ hace también que el rango de requerido por el diodo laser para escanear las líneas espectrales, sea menor cuando la altitud es mayor.

7.4 Variación del índice de modulación con la altitud.

El índice de modulación (m) depende de la amplitud de la modulación (a) y el ancho de banda a media altura de la línea de absorción ($\Delta\nu_c$) como lo indica la ecuación (17), el ancho de la línea de absorción varía en función de la presión, en nuestro sistema el valor de a permanece constante y la presión disminuye con la altitud (Figura 7), por lo tanto el índice de modulación aumenta con la altitud como se observa en la Figura 78.

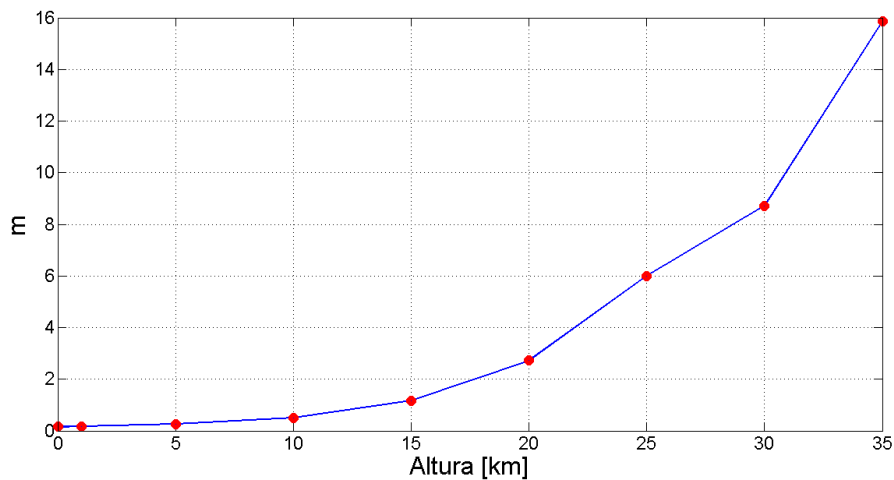


Figura 78. Variación del índice de modulación (m) con la altitud, los puntos rojos muestran los valores correspondientes de (m) para 0 m, 1 km, 5 km, 10 km, 15 km, 20 km, 25 km, 30 km y 35 km, la línea azul indica el comportamiento aproximado de (m) en todo el recorrido del vuelo del globo sonda.

La curva de máximos de la amplitud del segundo armónico mostrada en la corresponde a la ecuación (19) de la sección 0 evaluada en $x = 0$ y $n = 2$.

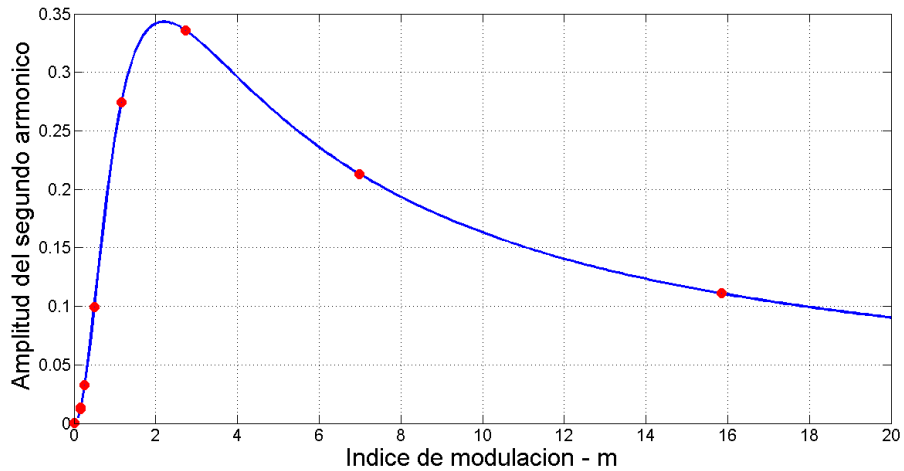


Figura 79. Curva de máximos de la amplitud del segundo armónico, la línea azul indica la forma de la ecuación (19) evaluada en $x=0$ y $n=2$, los puntos rojos indican en qué valor se ubican los índices de modulación obtenidos en la simulación del sistema a diferentes valores de altitud.

En base a la curva de máximos de amplitud del segundo armónico de la Figura 79 y la curva de variación del índice de modulación con la altitud, mostrada en la Figura 78, podemos concluir que el índice máximo de modulación m_{max} se encuentra en $m = 2.2$, por lo tanto, la zona óptima de modulación del sistema, está entre 15 km y 20 km de altitud.

7.5 Variación del ancho de banda a media altura debido a la altitud.

El ancho de banda a media altura ($\Delta\nu_c$) es una de las características principales de las líneas de absorción (ver Figura 14, sección 0), de ella depende el índice de modulación m , al aumentar la altitud disminuye la presión, el ancho de las líneas de absorción disminuye y el índice de modulación aumenta como observa en los resultados obtenidos en la secciones 0 y 0, el comportamiento de la variación de $\Delta\nu_c$ con la altitud se puede ver en la Figura 80, como la amplitud

de modulación a (ecuación (17)) permanece constante, el ancho de banda a media altura de la línea de absorción es la variable que me define el cambio del índice de modulación con la altitud.

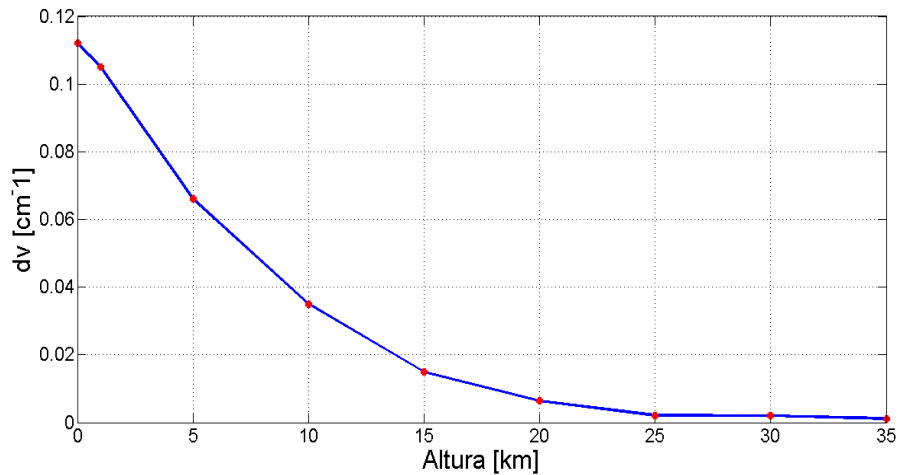


Figura 80. Variación del ancho de banda a media altura en función de la altitud recorrida por el globo sonda del proyecto E3Tratos, los puntos rojos indican los sitios de altitud simulados y la línea azul la forma aproximada del comportamiento de dicha variación.

Según los resultados obtenidos de la curva del segundo armónico para las diferentes alturas simuladas en la sección 0 podemos observar que este se hace cada vez más ancho a la vez que aumenta la altura, por lo tanto, el ancho del segundo armónico varía proporcionalmente con el índice de modulación m .

7.6 Variación de las características del segundo armónico con la altitud

El comportamiento de las características del segundo armónico con la altitud, está sujeto a los cambios del índice de modulación m , presentados en la sección 0 y del ancho de banda a media altura $\Delta\nu_c$ presentados en la sección 0, estas variaciones se pueden ver en detalle en la Figura 82 y Figura 83.

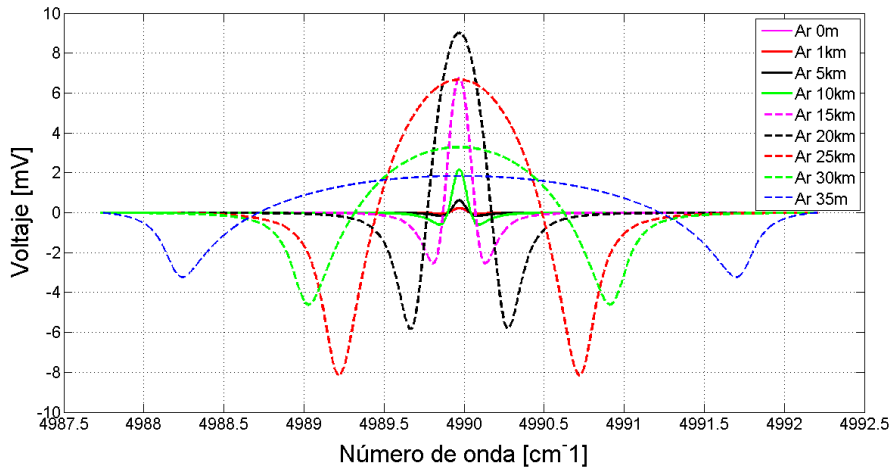


Figura 82. Variación del ancho del segundo armónico debido al cambio del índice de modulación, la amplitud del armónico varía en función de los parámetros $S(T)$, P , χ , N , L , Δv_c , presentados en la sección 0.

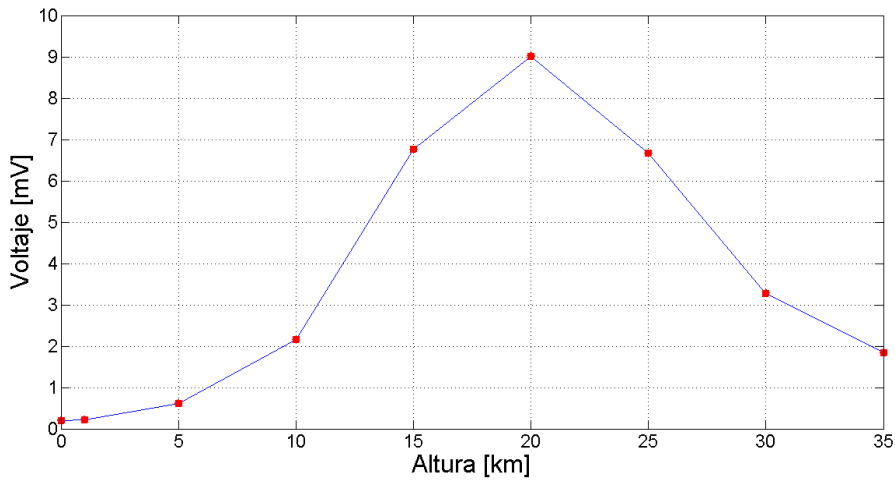


Figura 83. Variación de la amplitud del segundo armónico con el aumento de la altitud, como se menciona en la sección 4.4 esta depende de $S(T)$, P , χ , N , L , Δv_c .

Cabe resaltar, que para observar la variación del segundo armónico con la altitud, se simuló todo el procedimiento mostrado en la sección 0 para las diferentes alturas, manteniendo constante el valor de la concentración del gas en estudio.

7.7 Listado de elementos

Los elementos necesarios para la construcción del modelo funcional de sensor de CO₂ se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15.

Listado de elementos necesarios para la construcción del modelo funcional de sensor de CO₂ desarrollado en el presente proyecto.

Elemento	Cant	Referencia	Proveedor (URL)	Precio unidad (USD)	Precio total (USD)
Diodo laser	1	EP 2004-DM-B	www.laserdiodesource.com	3,850	3,850
Controlador laser	1	C150	www.laserdiodecontrol.com	790,00	790,00
Generador de señal	2	ICL8038	www.mactronica.com.co	7,06	14,12
Espejo 1	1	CM254 - 100EH3 - M02	www.thorlabs.com	184,00	184,00
Espejo 2	1	CM254-100-M02	www.thorlabs.com	174,00	174,00
Soporte Espejos	2	POLARIS-B1S	www.thorlabs.com	83,39	166,78
Soporte Montura fibra	1	HCP	www.thorlabs.com	82,11	82,11
Acoplador fibra	1	PAF2-5D	www.thorlabs.com	504,90	504,90
Conector Fibra	1	30126C3	www.thorlabs.com	7,65	7,65
Fotodetector	1	S148C	www.thorlabs.com	831,00	831,00
Amplificador de transimpedancia	1	LTC6268	www.analog.com	4,66	4,66
Amplificador Lock-In	1	AD630	es.aliexpress.com	43,99	43,99
Tarjeta de procesamiento de señal	1	Raspberry PI Model B	es.aliexpress.com	55,04	55,04
Batería	1	CPS1	www.thorlabs.com	35,45	35,45
				Total (USD)	6,843.70

Nota: El precio de los elementos puede variar debido al cambio que a diario sufre el dólar, además es posible que para su implementación se desee utilizar otros elementos.

8. Análisis de ruido

8.1 El ruido

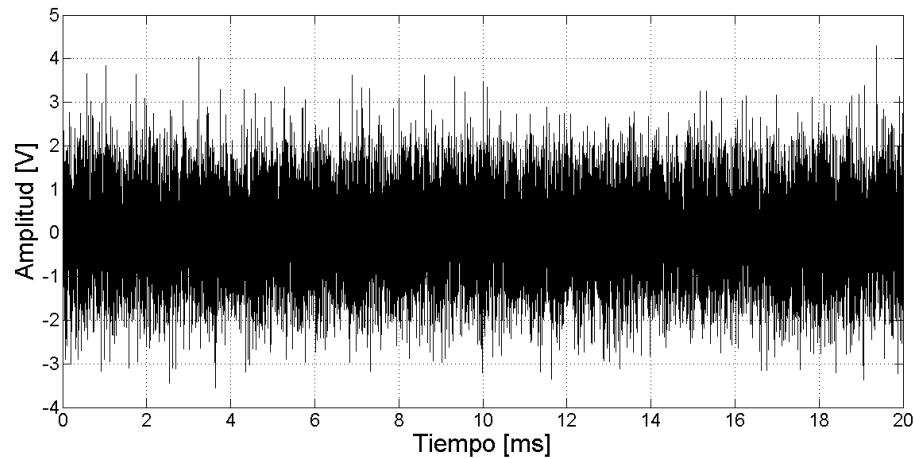


Figura 81. Forma de ruido aleatorio que se presenta en cualquier banda del espectro y afecta el comportamiento del sistema.

Se denomina ruido a todas aquellas señales no deseadas e interferencias que están presentes en cualquier sistema experimental, produciendo efectos que pueden ser perjudiciales para las señales que contienen información útil, el ruido se puede disminuir, pero jamás eliminar completamente. Existen varios tipos de ruido con su respectivo modelo asociado, las fuentes de ruido van desde los elementos utilizados para la implementación hasta las condiciones del ambiente donde se lleve a cabo el experimento, el ruido se elimina mediante filtrado en las bandas de frecuencia donde la señal de interés no tiene información útil

8.2 Las derivas

Las derivas se definen como el error causado por los instrumentos que se utilizan para llevar a cabo el experimento, desde los elementos del montaje del sistema hasta los instrumentos de medida, la manera de disminuir este error es utilizar elementos e instrumentos de buena calidad que garanticen estabilidad durante todo el tiempo de funcionamiento del sistema (Muñoz Closa, 2009)

8.3 Interferencias ópticas

Otra de las fuentes de ruido a tener en cuenta en la implementación del sistema, es la interferencia óptica causada por los elementos que componen la celda óptica multipaso (espejos, lentes, etc.) las señales indeseadas producidas por interferencias óptica no son fácilmente solucionables, la manera de disminuirlas es utilizar elementos ópticos de calidad que garanticen un buen funcionamiento estable de la celda óptica.

8.4 Ruido de fondo de la celda

También conocido como fenómeno “background”, es uno de los errores más importantes que afecta este sistema de instrumentación, corresponde a la señal de fondo que se encuentra en el canal donde se transmite la señal de láser, este error es independiente de si se transmite o no algo por él, es decir siempre está presente, puede haber imperfecciones complicadas de definir como interferencias naturales dadas por las condiciones ambientales donde se esté trabajando ya que este

sistema va a estar expuesto a un espacio abierto. La solución que propone (Muñoz Closa, 2009) es estudiar el canal cada vez que se vaya a realizar la emisión del haz de luz del láser para conocer dicho comportamiento.

En las simulaciones realizadas en el presente trabajo, no se tuvo en cuenta el efecto de ningún tipo de ruido, simplemente se modeló el procedimiento teórico para analizar y observar su comportamiento.

9. Conclusiones

Se logró diseñar y simular un sistema de instrumentación para medir concentración de CO₂ atmosférico, mediante la técnica TDLS con WMS teniendo en cuenta los requerimientos de la misión E3Tratos, con los elementos que cumplen las características técnicas necesarias para su funcionamiento en una futura implementación.

De acuerdo con los fundamentos de la técnica TDLS con WMS, la concentración de un gas presenta un comportamiento lineal con respecto a la amplitud de su segunda componente de Fourier o segundo armónico de la señal obtenida, cuyo comportamiento se asemeja a la forma de la línea de absorción.

Teniendo en cuenta que el diseño del sensor se realizó en una banda de absorción débil del espectro del CO₂ y su funcionamiento será para una gran variación de condiciones atmosféricas, fue simulado con parámetros reales y los componentes seleccionados para el diseño cumplen con los requerimientos necesarios para su implementación.

El ancho de la línea de absorción presenta una variación descendiente a medida que aumenta la altitud, esto trae consigo una pérdida en el rango de trabajo de escaneo de longitud de onda, puesto que se estaría barriendo una zona que no presenta absorción, la solución propuesta es reducir la amplitud de la señal rampa con la altura

Referencias Bibliográficas

- Altmann, J., Baumgart, R., & Weitkamp, C. (1981). Two-mirror multipass absorption cell. *Applied Optics*, 20(6), 995–999. <https://doi.org/10.1364/AO.20.000995>
- Arndt, R. (1965). Analytical line shapes for Lorentzian signals broadened by modulation. *Journal of Applied Physics*, 36(8), 2522–2524. <https://doi.org/10.1063/1.1714523>
- Bin, Z., & Lei, W. (2015). The Simulation and Analysis of Gas Detection System in Infrared Absorption Spectrum Based on LabVIEW, 168–171. <https://doi.org/10.1109/ICIICII.2015.125>
- Bond, M., & Flego, U. S. (1975). Forms of Sinusoidal , Sawtooth , Square Wave , Triangular Wave , and White Noise. *Analytical Chemistry*, 47(13), 2321–2324.
- Chen, J. (2010). *Compact Laser-Spectroscopic Gas Sensors using Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*. Technische Universität München.
- Chen, J., Hangauer, A., Strzoda, R., & Amann, M. C. (2010). Tunable diode laser spectroscopy with optimum wavelength scanning. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 100(2), 331–339. <https://doi.org/10.1007/s00340-010-3973-2>
- Dyroff, C. (2008). *Tunable Diode-Laser Absorption Spectroscopy for Trace-Gas Measurements with High Sensitivity and Low Drift. Karlsruhe Series in Photonics & Communications* (Vol. 5).
- Escamilla Canales, R. (2010). Modelo atmosférico y de radiación solar para reconocimiento de firmas espectrales. *Proyecto Final de Carrera*, 133. Retrieved from http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/9992/PFC_Raul_Escamilla.pdf
- Heard, D. E. (2006). *Analytical Techniques for Atmospheric Measurement*.
- Herriott, D., Kogelnik, H., & Kompfner, R. (1964). Off-Axis Paths in Spherical Mirror Interferometers. *Applied Optics*, 3(4), 523. <https://doi.org/10.1364/AO.3.000523>

- Huo, Y., & Fan, W. (2017). Application of harmonic detection technology in methane telemetry. *Journal of Physics: Conference Series*, 887(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/887/1/012020>
- Keitz, J. von. (2014). *Application of Diode Laser Molecular Absorption Spectroscopy for Studies of Gas Concentrations in Food Packages*. Lund University.
- Khan, A., Schaefer, D., Tao, L., Miller, D. J., Sun, K., Zondlo, M. A., ... Lary, D. J. (2012). Low power greenhouse gas sensors for unmanned aerial vehicles. *Remote Sensing*, 4(5), 1355–1368. <https://doi.org/10.3390/rs4051355>
- Kluczynski, P., Gustafsson, J., Lindberg, Å. M., & Axner, O. (2001). Wavelength modulation absorption spectrometry - An extensive scrutiny of the generation of signals. *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*, 56(8), 1277–1354. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(01\)00248-8](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(01)00248-8)
- Li, Y., Deng, J., Mu, C., Xing, Z., & Du, K. (2014). Vertical distribution of CO₂ in the atmospheric boundary layer: Characteristics and impact of meteorological variables. *Atmospheric Environment*, 91, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.067>
- Liu, J. T. C., Jeffries, J. B., & Hanson, R. K. (2004). Wavelength modulation absorption spectroscopy with 2f detection using multiplexed diode lasers for rapid temperature measurements in gaseous flows. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 78(3–4), 503–511. <https://doi.org/10.1007/s00340-003-1380-7>
- Luo, Y., Ouyang, X., Wu, H., Li, F., & Song, H. T. (2015). Methane Detection at Low Concentration Based on 2f Harmonic Signal, (8), 1375–1378.
- Minzner, R. A., Champion, K. S. W., & Pond, H. L. (1959). The ARDC model atmosphere, 1959. *Afmc*, 99. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(71\)90105-2](https://doi.org/10.1016/0022-460X(71)90105-2)
- Muñoz Closa, S. (2009). *Medida de la concentración de gases mediante la técnica WMS*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Pabón, J. D., Zea, J., León, G., Hurtado, G., González, O. C., & Montealegre, J. É. (2000). La atmósfera, el tiempo y el clima, 113.
- Reid, J., & Labrie, D. (1981). Second-harmonic detection with tunable diode lasers - Comparison of experiment and theory. *Applied Physics B*, 26(3), 203–210.

<https://doi.org/10.1007/BF00692448>

- Richard, E. C., Kelly, K. K., Winkler, R. H., Wilson, R., Thompson, T. L., McLaughlin, R. J., ... Tuck, A. F. (2002). A fast-response near-infrared tunable diode laser absorption spectrometer for in situ measurements of CH₄ in the upper troposphere and lower stratosphere. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 75(2–3), 183–194. <https://doi.org/10.1007/s00340-002-0935-3>
- Rieker, G. B., Li, H., Liu, X., Liu, J. T. C., Jeffries, J. B., Hanson, R. K., ... Takatani, S. (2007). Rapid measurements of temperature and H₂O concentration in IC engines with a spark plug-mounted diode laser sensor. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31 II, 3041–3049. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.158>
- Rodriguez Ferreira, J. (2015). *Étalonnage au sol de l'instrument SIMBIO-SYS à bord de la mission ESA/BEPICOLOMBO*.
- Rothman, L. S., Gordon, I. E., Barbe, A., Benner, D. C., Bernath, P. F., Birk, M., ... Vander Auwera, J. (2009). The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 110(9–10), 533–572. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2009.02.013>
- Sastre Zamora, B. (2015). *Transferencia radiativa atmosférica. La Resistencia a Las Actuaciones De La Administración Tributaria Como Conducta Infractora*. Universidad de Valladolid.
- Schilt, S., Tittel, F. K., & Petrov, K. P. (2011). Diode Laser Spectroscopic Monitoring of Trace Gases Update based on original article by Frank K. Tittel and Konstantin P. Petrov, Encyclopedia of Analytical Chemistry, © 2000, John Wiley & Sons Ltd. In *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a0707.pub2>
- Serway, R., & Beichner, R. (2002). SERWAY - VOL 2 - FISICA.pdf.
- Silver, J. A. (2005). Simple dense-pattern optical multipass cells. *Applied Optics*, 44(31), 6545–6556. <https://doi.org/10.1364/AO.44.006545>
- Supplee, J. M., Whittaker, E. A., & Lenth, W. (1994). Theoretical description of frequency modulation and wavelength modulation spectroscopy. *Applied Optics*, 33(27), 6294. <https://doi.org/10.1364/AO.33.006294>

Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas* (4th ed.). Phoenix, Arizona.

Tyler, N., Acevedo, J., Juan, B., & Juan, V. (2013). *Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia. Universidad de los Andes.*

Zhu, G., Cheng, Y., & Zhang, Y. (2017). Parametric Simulation and Analysis of Oxygen Detection Based on Wavelength Modulation Spectroscopy, 4–7. <https://doi.org/10.1109/ICISCE.2017.226>

Apéndices

Apéndice A Producción y aportes científicos

“Misión E3Tratos, observando el oriente Colombiano desde la estratosfera”**Julián RODRIGUEZ FERREIRA¹**

¹ Profesor Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones,
Universidad Industrial de Santander.
Director Grupo de Investigación CEMOS

H. Cayachoa, N. Merchán, H. Navarro-Moya, S. Carrillo-Gómez, D. Amaranto,
J. Rodríguez-Ferreira, D. Forero-Martínez, H. Ortega, A. Pitta-Carvajal, S. Esteban-
Cudriz, M. Martínez

V Congreso Colombiano de Astronomía y Astrofísica, COCOA
Pereira, 27 de Octubre 2017



Capítulo 11

Presentaciones Orales

11.1 Misión E3Tratos, observando el oriente Colombiano desde la estratósfera

Julian Rodriguez-Ferreira¹; David Forero²; Heiner Cayachoa³; Nelson Merchan⁴; Homero Ortega⁵
^{1,2,3,4,5}Universidad Industrial de Santander
jgrodrif@uis.edu.co

En este trabajo presentamos la misión E3Tratos de las Escuelas de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones y de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander (UIS). E3Tratos es el primer proyecto de investigación de globos estratosféricos con carga útil científica que se está desarrollando en la Universidad Industrial de Santander, su misión es observar la superficie de la Tierra en las bandas del VIS-NIR desde el límite superior de la atmósfera, aproximadamente a 35 Km de altura y medir variables meteorológicas y concentración de gases de efecto invernadero a lo largo de su recorrido. Para ello se diseñaron e implementaron los siguientes subsistemas: La instrumentación científica basada en cámaras de alta resolución en el visible e infrarrojo cercano, una estación meteorológica portátil, un sensor de concentración de gases (CO₂), la electrónica de control de todo el globo; un enlace radio que junto a una estación en Tierra permitirán realizar el seguimiento de la posición del globo sonda y recibir los datos de telemetría; una góndola que servirá como interfaz mecánica para albergar la carga útil y un sistema de propulsión-recuperación basados en un globo sonda estratosférico y un paracaídas. Dentro de la carga útil de E3Tratos se destaca la realización de un instrumento pionero en Colombia para el estudio de concentración de gases de efecto invernadero. Este se divide en 4 subsistemas que son: Una estación meteorológica para medir variables atmosféricas (presión, temperatura, humedad relativa) radiación solar, medición de material particulado y un sensor para medir la concentración de diversos gases. Para el desarrollo del demostrador del instrumento se ha es-

cogido medir las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2), esto con el fin de construir el perfil atmosférico y analizar el comportamiento desmesurado de la concentración de gases de efecto invernadero en nuestra región. La construcción del sensor de dióxido de carbono CO_2 se llevará a cabo usando la técnica de la espectroscopia de láser de diodo sintonizable TDLS (Tunable Diode Laser Spectroscopy) y la modulación de longitud de onda WMS (Wavelength Modulation Spectroscopy), la cual consiste en modular una señal sinusoidal y escanearla con una señal rampa para ser inyectada a un controlador de corriente de diodo láser. El diodo láser enviará un haz de luz monocromática a la misma longitud de onda de la principal línea de absorción del gas estudiado, la cual tendrá interacción con una muestra del gas a medir en una celda óptica multipaso, luego con un fotodiodo se detecta el haz de luz a la salida de la celda para finalmente por medio de una detección síncrona y algoritmos implementados en una tarjeta de procesamiento de señal se analiza la absorción sufrida del haz de luz debido a la presencia del gas y finalmente se obtiene la concentración del gas en partes por millón (ppm).

Palabras Clave

Instrumentación, globo sonda, estratósfera, espectroscopía.

ISBN 978-958-722-288-3

42nd COSPAR Scientific Assembly 2018

Panels (P)

Scientific Ballooning: Recent Developments in Technology and Instrumentation (PSB.1)

E3TRATOS MISSION MONITORING CO₂ FROM THE GROUND TO THE STRATOSPHERE IN COLOMBIA

Julian Rodriguez-Ferreira, jgrodrif@uis.edu.co
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
David Forero, dforero@radiogis.uis.edu.co
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
Heiner Cayachoa, h_cayachoa@hotmail.com
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
Nelson Merchan-Sanchez, merchanelson92@hotmail.com
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
Andrés Pitta-Carvajal, acamilopittac@gmail.com
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
Sergio Esteban-Cudriz, zirduc@hotmail.com
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
Douglas Amaranto, douglas.amaranto@gmail.com
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
Hugo Navarro-Moya, huginamo32@hotmail.com
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
Sergio Carrillo, sergio.carrillo@correo.uis.edu.co
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

CO₂ is one of the most common and important trace gases in the atmosphere-ocean-Earth system, is the most important greenhouse gas (GHG) associated with human activities and the second most important gas in global warming after the water vapor. This gas has anthropogenic and natural sources. Monitor the spatial and temporal variation of the CO₂ concentration on both, global and local scale is a main duty concerned to the environmental authorities. The global monitoring of CO₂ has been achieved by the use of space missions like NASA's Orbiting Carbon Observatory-2 and local scale measurements are assured by the exploding number of scientific stations. In developing countries, like Colombia, accessing these measurements is a quite difficult task. If satellite data repositories are not open, local authorities have budget issues to obtain the required data. Otherwise, local measurements are more difficult to obtain because the high costs of the required instrumentation and logistics fees that are proportional to the number of measuring stations. In Colombia we found a very weak network of scientific stations monitoring atmospheric variables with less than 3000 weather stations covering a surface of 1,142 million of square kilometers. Here we present the status of the "E3Tratos"

mission, which is the first stratospheric balloon research project with scientific payload that is being developed at the Universidad Industrial de Santander in Colombia, South America and that will be launched by the fall of 2018. The main objective of the mission is to launch low-cost and autonomous scientific instrumentation towards the stratosphere and thus observe the surface of the Earth from the upper limit of the atmosphere at approximately 35 km in height. The displacement of the balloon and its payload will allow measuring meteorological variables and GHGs along its ascending route. The portability capabilities of the instrumentation seek to validate future low-price high efficiency scientific stations that will serve to ameliorate the local monitoring of GHGs in developing countries. We will show the final design as well as the characterization of some of the implemented subsystems that includes: Scientific instrumentation based on high resolution cameras in the visible, a portable meteorological station, an atmospheric CO₂ concentration sensor, control electronics based on reduced-board computers that control the entire experiment, a radio link that, together with a station on the ground, will allow monitoring the position of the probe balloon and receive the telemetry data, The mechanical interfaces composed of a gondola that will serve as a mechanical interface to house the payload (< 3500 g) and a propulsion-recovery system based on a stratospheric probe balloon (3000 gram) and a parachute. We present the final design of the instrument capable of measuring in-situ the concentration of GHGs. The design of the CO₂ concentration sensor is based on the tunable diode laser spectroscopy technique TDLS that consists of varying the emission wavelength of a near-infrared room temperature laser diode through the modulation of the current signal that polarizes the laser diode. This variation of the current allows changing the wavelength of the laser diode over a bandwidth of less than one nanometer. The bandwidth and the central wavelength of emission of the laser diode are previously selected (2004 nm for CO₂) in order to be able to sample a strong atmospheric absorption band that is due to the exclusive presence of CO₂. A two-mirror multipass absorption cell that is operated open to the atmosphere receives the modulated beam, absorption on the beam due to the atmospheric gases is then measured at the multipass cell output with In-GAs photodiode. Direct-differential detection in conjunction with the cell to record the atmospheric spectra in situ, give us access to the molecular line shape with no distortions. Then, by reconstructing the full molecular line shape with a nonlinear least-squares fit to retrieve the mixing ratios, atmospheric CO₂ concentration will be monitored over large ranges in pressure, temperature, and concentration with an achieved precision error within a few percents. The instrument will be capable to work under hard environment conditions. Future works will focus on monitor of other GHGs. This will be achieved changing the central emission of the selected diode laser.



Mr Nelson Merchan-Sanchez
Universidad Industrial de Santander
Universidad Industrial de Santander - Carrera 27 Calle 9 - Ciudad Universitaria - Escuela de
Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de telecomunicaciones
680002 Bucaramanga
Colombia

May 21, 2018

**Notice of Acceptance and Schedule, 42nd COSPAR Scientific Assembly, 14 - 22 July 2018,
Pasadena, CA, United States of America**

Dear *Mr Merchan-Sanchez*,

On behalf of the Council of the Committee on Space Research, I am pleased to inform you that your contribution to the 42nd COSPAR Scientific Assembly entitled: "**E3Tratos mission monitoring CO2 from the ground to the stratosphere in Colombia**" has been accepted and scheduled for an oral presentation in scientific event **PSB.1**, Lecture Room SR 32 (SH) - Justine's Ballroom Central on Tuesday, July 17, 2018, 11:50-12:10 (20 min).

For the overall program and details of your scientific event, please consult the Assembly website at:
<https://www.cospar-assembly.org>.

Inclusion of your paper in the conference program carries with it the obligation for you, for the main author or for one of your fellow co-authors as the case may be, to display and/or to present the paper at the times and in the mode indicated.

In June the organizers will send authors instructions for oral presentations. These instructions will be posted in due time on the web at: <https://www.cospar-assembly.org>. Please be sure to read these instructions very carefully in order to facilitate preparation of your presentation and to help ensure that each event runs smoothly during the Assembly.

Presenters are encouraged to submit their completed manuscripts to one of COSPAR's journals, *Advances in Space Research* or *Life Sciences in Space Research*. There are no deadlines for submission as *ASR* and *LSSR* are regular journals. The web sites with instructions for authors and for submissions are <http://ees.elsevier.com/asr> and <http://ees.elsevier.com/lssr>. Information is also available on the COSPAR web site and at the Istanbul Assembly.

Your COSPAR Assembly presentation number is **PSB.1-0014-18**. This is the final number for your presentation. Papers submitted to *ASR* or *LSSR* will be assigned a journal number that will be different from the COSPAR presentation number.

Please feel free to volunteer as chairperson for one of the sub-sessions of your event where you are not a speaker if the web indicates this position is not yet filled by the Main Scientific Organizer. If you wish to volunteer, kindly inform the event organizers (MSO/DO) by 4 June 2018.

If you have questions concerning visas, please refer to the website of the Local Organizing Committee (<http://cospar2018.org/registration-accommodation-travel/visa-information/>) and if necessary contact cospar2018-

registration@icsevents.com. All participants who need visas are reminded to apply for their travel documents as soon as possible.

If you need this message in letter format, please print this PDF file.

We wish you a pleasant journey to Istanbul and are looking forward to seeing you at the Assembly.

Yours sincerely,

The image shows two handwritten signatures in black ink on a light background. The signature on the left is 'Tom Prince' and the signature on the right is 'L. A. Fisk'.

Tom Prince Chair, COSPAR 2018 Program Committee; Len Fisk, COSPAR President

COSPAR Executive Director
L. A. Fisk (lafisk@umich.edu) COSPAR Executive Director
Thomas Prince (prince@caltech.edu)



Mr Heiner Cayachoa
Universidad Industrial de Santander
Universidad Industrial de Santander - Carrera 27 Calle 9 - Ciudad Universitaria - Escuela de
Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de telecomunicaciones
680002 Bucaramanga
Colombia

May 21, 2018

**Notice of Acceptance and Schedule, 42nd COSPAR Scientific Assembly, 14 - 22 July 2018,
Pasadena, CA, United States of America**

Dear *Mr Cayachoa*,

On behalf of the Council of the Committee on Space Research, I am pleased to inform you that your contribution to the 42nd COSPAR Scientific Assembly entitled: "**E3Tratos mission monitoring CO2 from the ground to the stratosphere in Colombia**" has been accepted and scheduled for an oral presentation in scientific event **PSB.1**, Lecture Room SR 32 (SH) - Justine's Ballroom Central on Tuesday, July 17, 2018, 11:50-12:10 (20 min).

For the overall program and details of your scientific event, please consult the Assembly website at:
<https://www.cospar-assembly.org>.

Inclusion of your paper in the conference program carries with it the obligation for you, for the main author or for one of your fellow co-authors as the case may be, to display and/or to present the paper at the times and in the mode indicated.

In June the organizers will send authors instructions for oral presentations. These instructions will be posted in due time on the web at: <https://www.cospar-assembly.org>. Please be sure to read these instructions very carefully in order to facilitate preparation of your presentation and to help ensure that each event runs smoothly during the Assembly.

Presenters are encouraged to submit their completed manuscripts to one of COSPAR's journals, *Advances in Space Research* or *Life Sciences in Space Research*. There are no deadlines for submission as *ASR* and *LSSR* are regular journals. The web sites with instructions for authors and for submissions are <http://ees.elsevier.com/asr> and <http://ees.elsevier.com/lssr>. Information is also available on the COSPAR web site and at the Istanbul Assembly.

Your COSPAR Assembly presentation number is **PSB.1-0014-18**. This is the final number for your presentation. Papers submitted to *ASR* or *LSSR* will be assigned a journal number that will be different from the COSPAR presentation number.

Please feel free to volunteer as chairperson for one of the sub-sessions of your event where you are not a speaker if the web indicates this position is not yet filled by the Main Scientific Organizer. If you wish to volunteer, kindly inform the event organizers (MSO/DO) by 4 June 2018.

If you have questions concerning visas, please refer to the website of the Local Organizing Committee (<http://cospar2018.org/registration-accommodation-travel/visa-information/>) and if necessary contact cospar2018-

registration@icsevents.com. All participants who need visas are reminded to apply for their travel documents as soon as possible.

If you need this message in letter format, please print this PDF file.

We wish you a pleasant journey to Istanbul and are looking forward to seeing you at the Assembly.

Yours sincerely,

The image shows two handwritten signatures in black ink on a light background. The signature on the left is 'Tom Prince' and the signature on the right is 'L. A. Fisk'.

Tom Prince Chair, COSPAR 2018 Program Committee; Len Fisk, COSPAR President

COSPAR Executive Director
L. A. Fisk (lafisk@umich.edu) COSPAR Executive Director
Thomas Prince (prince@caltech.edu)