



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
OPCIÓN EN AUTOMATIZACIÓN

**“Semiautomatización de la operación de un espectrómetro
fotoacústico” ***

T E S I S

Presentada para obtener el título de:

Maestro en Ciencias de la Electrónica, Opción en Automatización

Presenta:

Ing. David Ferreiro Piñero**

Directores:

Dra. María Aurora Diozcora Vargas Treviño (FCE-BUAP)

Dr. José Fernando Reyes Cortés (FCE-BUAP)

Dra. Marcela Dolores Grether González (FC-UNAM)

Puebla, México

JULIO 2020

* Investigación financiada por proyecto VIEP-BUAP 2019 PAPIIT-DGAPA-UNAM IN120920.

** Becario CONACYT.

BUAP[®]

Agradecimientos

A Dios todopoderoso y a la Virgen de la Caridad del Cobre, patrona de los cubanos, por darme las fuerzas para afrontar todas las dificultades.

A mami, papi y nené por su dedicación, preocupación constante; así como por su apoyo en los momentos más complejos a pesar de las distancias.

A E.I.G.M por permitirme entrar en su vida y por hacerme una mejor persona.

A mi familia materna por estar pendiente de cada detalle e impulsarme a nuevas metas.

A Yami, Cano e Hirán por ser los principales incitadores de lo que hoy se ha logrado.

A la familia Vargas-Treviño, en especial a doña Concha y doña Mine, por la acogida y sus atenciones.

A mis asesores: Dra. Aurora, Dr. Sergio, Dr. Fernando, Dra. Marcela y la Dra. Amparo por su constante preocupación, atención y confianza en la realización de este proyecto.

A los Difusos: Pastor, Jasid y Mitzi; por estar siempre al pendiente y ayudar en cada ocasión.

A mis amigos y compañeros, así como a todas aquellas personas que de una forma u otra contribuyeron a mi desarrollo personal y profesional.

A la MCEA, a la BUAP, a la UNAM y a México por darme la oportunidad de superarme profesionalmente.

A CONACYT y PAPIIT-DGAPA-UNAM (México) IN 120920 por su apoyo, sin el cual no hubiese sido posible realizar los presentes estudios de posgrado.

Dedicatoria

*A mis abuelos Ana Luisa Hernández,
Oscar Ramón García Castellanos, y a
mis padres Dangelá Piñeiro
Hernández, David Ferreiro
Fernández, por las horas dedicadas a
mi formación y por su preocupación
constante.*

Resumen

Se presenta una propuesta para automatizar parcialmente el funcionamiento de un espectrómetro fotoacústico ubicado dentro del Taller de Resonancia y Luminiscencia Magnética (TRLM) en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). El proceso de semiautomatización fue concebido en 3 sistemas de control: 1 sistema para regular la temperatura de operación de un espectrómetro, 1 sistema de control de nivel para acciones de llenado-drenaje de los recipientes de agua y un sistema para controlar la frecuencia de un pulsador mecánico externo que permita modular la radiación láser incidente a una cavidad fotoacústica y de esta manera observar el efecto fotoacústico.

El espectrómetro, diseñado en el taller, permite realizar procesos de detección fotoacústica. El componente más importante del sistema es un láser gaseoso de CO₂ de flujo axial que alcanza potencias de emisión de hasta 15 W en el infrarrojo medio (longitudes de onda de emisión comprendidas entre 1 μ m y 10 μ m). El sistema de enfriamiento propuesto tiene como objetivo disipar la potencia interna del láser; esta potencia alcanza valores próximos a los 2 kW y representa un peligro potencial para la seguridad e integridad física del personal que trabaja dentro del laboratorio, a la vez que compromete la calidad de los resultados obtenidos.

El sistema de control de nivel se diseña para garantizar la disponibilidad y las condiciones adecuadas del agua utilizada como refrigerante en la realización del experimento, así como un flujo constante que permita la obtención de mejores resultados prácticos. La detección de nivel emplea corriente alterna para disminuir los efectos corrosivos de la descomposición química del agua sobre los electrodos y sensores utilizados, ocasionados por la utilización de corriente directa, de esta manera se dotará al sistema desarrollado de una mayor confiabilidad.

Para observar el efecto fotoacústico, la radiación incidente es modulada a determinada frecuencia. El láser disponible dentro del TRLM emite radiación de forma continua, por tanto, para su empleo en el experimento se utiliza un dispositivo que permita interrumpir de manera periódica la radiación y de esta manera realizar su modulación. Con ese objetivo se desarrolla y presenta un robot tipo chopper (interruptor utilizado en drivers de frecuencia variable) con un control de frecuencia de pulsado que trabaja en un rango de frecuencias de modulación comprendidas entre los 300 Hz y los 1986 Hz, cubriendo de esa manera los requerimientos experimentales.

Se presenta el firmware desarrollado para cada sistema y se realiza la integración utilizando un sistema embebido sobre una tarjeta FPGA en la cual se emula un microprocesador. La programación de los algoritmos de control se ejecuta utilizando un lenguaje de programación desarrollado dentro de la Maestría en Ciencias de la Electrónica, Opción en Automatización (MCEA) denominado “Código D”, que permite utilizar de manera eficiente los recursos disponibles; la propuesta resulta novedosa y no se encontró en la literatura consultada alguna propuesta similar a la que se presenta.

Se realiza la implementación y evaluación práctica de los sistemas diseñados y se presentan los principales resultados experimentales obtenidos, así como las conclusiones, recomendaciones y trabajo a futuro.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1 : Descripción general del sistema	12
1.1. Espectrómetro fotoacústico.....	12
1.2. Desarrollo del experimento.....	16
1.2.1. Modos de operación del experimento	19
1.3. Propuestas para semiautomatizar el experimento.....	24
1.4. Sistema embebido.....	27
1.4.1. Código de programación “D”	29
1.4.2. Interfaz de usuario básica.....	31
1.4.3. Tarjeta de desarrollo.....	34
1.4.4. Módulo de comunicación inalámbrica WIFI	36
1.5. Conclusiones del capítulo	39
Capítulo 2 : Firmware	40
2.1. Modificaciones al sistema embebido.....	40
2.1.1. Bloque de Decoder	41
2.1.2. Bloque de PWM	42
2.1.3. Bloque One-Wire	45
2.1.4. Bloque de Flujo	47
2.1.5. Bloques de actuadores de entrada y actuadores de salida.	47
2.1.6. Conversor digital-analógico.	48
2.2. Puertos de entrada/salida y mapa de memoria RAM.....	49
2.3. Conclusiones del capítulo	50
Capítulo 3 : Sistema de control de nivel de agua	51
3.1. Efectos corrosivos del agua en metales	52
3.1.1. Tipos de corrosión y factores ambientales	52
3.2. Sistema para la detección de nivel.....	54
3.2.1. Actuadores. Caracterización y hardware.....	55
3.3. Algoritmos para el control de llenado.....	57
3.3.1. Software	61
3.4. Conclusiones del capítulo	64
Capítulo 4 : Sistema de control de temperatura	65

4.1. Lazos de control de temperatura	65
4.1.1. Sensor de temperatura ds18b20.....	66
4.1.2. Sensor de flujo Yf-s201.....	68
4.2. Caracterización inicial del sistema de enfriamiento	70
4.3. Algoritmo para el control de temperatura.....	72
4.3.1. Software	73
4.4. Conclusiones del capítulo	75
Capítulo 5 : Robot de 1 GDL que funcione como chopper	76
5.1. Robot para el pulsado mecánico de la radiación láser	76
5.1.1. Requerimientos experimentales	77
5.1.2. Modelo dinámico.....	77
5.2. Esquema de control.....	81
5.2.1. Hardware	82
5.2.2. Caracterización del motor de DC JGB37-555B.....	83
5.2.3. Algoritmo de control.....	87
5.2.4. Software	88
5.3. Conclusiones del capítulo	90
Capítulo 6 : Integración general del sistema.....	91
6.1. Integración del sistema	91
6.2. Programación de las alarmas	97
6.3. Interfaz de usuario	99
6.3.1. Interfaz para el envío de parámetros de configuración	99
6.3.2. Interfaz para la visualización de parámetros.....	102
6.4. Conclusiones del capítulo	108
Capítulo 7 : Resultados experimentales.....	109
7.1. Evaluación experimental del sistema de control de nivel de agua.....	109
7.2. Evaluación experimental del sistema de control de temperatura.....	112
7.2.1. Modificación del esquema de control de temperatura	114
7.2.2. Estructura de disipación con serpentín de cobre	115
7.2.3. Estructura de disipación con celdas Peltier.	117
7.2.4. Estructura de disipación con arreglo de enfriadores comerciales	119
7.3. Evaluación experimental del pulsador mecánico.....	123

7.3.1. Comparación de los resultados experimentales y del modelo dinámico.....	130
7.4. Conclusiones del capítulo	133
Conclusiones Generales.....	134
Referencias	136
Anexo A: Constancia XVIII Simposio Internacional de Ingeniería Eléctrica SIE2019	142
Anexo B: Constancia Congreso Internacional Academia Journal Hidalgo 2019.....	143
Anexo C: Acreditación TOEFL.....	144
Anexo D: Artículos publicados.....	144
Propuesta de automatización del sistema de enfriamiento de un láser de CO2 utilizado en espectroscopía.....	145
SEMIAUTOMATIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UN ESPECTRÓMETRO FOTOACÚSTICO	158

Índice de figuras

Figura 1.1: Experimento de descomposición de la luz por Newton.	1
Figura 1.2: Espectro solar con líneas de Fraunhofer.	1
Figura 1.3: Espectroscopio de Kirchhoff y Bunsen (fuente [3, 4]).	2
Figura 1.4: Espectrófono diseñado por Bell para el estudio del efecto fotoacústico.....	3
Figura 1.5: Trabajos en el primer láser que funcionó en modo continuo.....	4
Figura 1.6: Detectores de gases industriales por absorción infrarroja.....	5
Figura 1.7: Caracterización de partículas en superficies.	5
Figura 1.8: Equipo experimental en el TRLM.	6
Figura 1.9: Láser de CO ₂ de flujo axial.	8
Figura 1.10: Líneas de emisión del láser de CO ₂ disponible en el TRLM [fuente [29]].	8
Figura 1.11: Sintonización y operación manual del experimento por los investigadores.	9
Figura 1.12: Distribución instrumental sobre la mesa óptica.	10
Figura 1.13: Comportamiento del flujo de agua en el laboratorio.....	10
Figura 1.1: Distribución instrumental sobre la mesa óptica y fuentes de alto voltaje.....	12
Figura 1.2: Diagrama inicial instrumental.....	13
Figura 1.3: Conexión inicial del sistema de enfriamiento.	14
Figura 1.4: Celda fotoacústica.	15
Figura 1.5: Pulsador mecánico comercial.....	15
Figura 1.6: Procedimiento para la limpieza de la línea de flujo.	17
Figura 1.7: Procedimiento para la generación del plasma.....	18
Figura 1.8: Procedimiento para la generación del láser.....	18
Figura 1.9: Diagrama instrumental. Modo de operación 1.....	19
Figura 1.10: Diagrama instrumental. Modo de operación 2.....	20
Figura 1.11: Determinación de la transmitancia con la celda fotoacústica vacía.....	23
Figura 1.12: Determinación de la transmitancia con la celda fotoacústica llena.	24
Figura 1.13:Diagrama general del sistema.	26
Figura 1.14: Arquitectura inicial del sistema embebido.....	27
Figura 1.15: Organización interna de la memoria RAM.....	29
Figura 1.16: Interfaz para la programación del microprocesador.	31
Figura 1.17: Interfaz para la descarga de parámetros a la RAM.	32
Figura 1.18: Interfaz de usuario. Envío de parámetros de configuración.....	33
Figura 1.19: Interfaz de usuario. Envío de parámetros en tiempo real.....	33
Figura 1.20: Interfaz de usuario. Lectura de datos.	34
Figura 1.21: Descripción física de la tarjeta de desarrollo DE0-CV.....	35
Figura 1.22: Distribución de los pines de expansión de la tarjeta de desarrollo DE0-CV. ...	36
Figura 1.23: Módulo de comunicación WiFi EZX RN-171.....	36
Figura 1.24: Interfaz gráfica del software Teraterm.....	38
Figura 1.25: Ventana de configuración.	38
Figura 2.1: Estructura interna lógico-funcional del sistema de adquisición.....	40
Figura 2.2: Señales en cuadratura provenientes del encoder del motor.	41

Figura 2.3: Diagrama de flujo para el diseño del decoder.....	42
Figura 2.4: Diagrama de flujo para modificar el ciclo de trabajo del PWM.	43
Figura 2.5: Diagrama de flujo para establecer la frecuencia de operación.....	44
Figura 2.6: Diagrama de flujo para la operación del sensor de temperatura.	45
Figura 2.7: Diagrama a bloques del firmware para la selección de los sensores de temperatura.	46
Figura 2.8: Diagrama de flujo para la detección de pulsos.	47
Figura 2.9: Diagrama a bloques del firmware implementado para la detección de flujo.	47
Figura 2.10: Diagrama a bloques del firmware para los actuadores de entrada.	48
Figura 2.11: Diagrama a bloques para el firmware de los actuadores de salida.....	48
Figura 3.1: Diagrama general para el control de llenado.	51
Figura 3.2: Efectos corrosivos del aluminio en las condiciones del laboratorio.	53
Figura 3.3: Coeficientes de corrosión vs frecuencia (fuente [43]).	55
Figura 3.4: Circuito de detección de nivel para cada tanque.	56
Figura 3.5: Implementación práctica del circuito para la detección de nivel en ambos tanques.	57
Figura 3.6: Ciclo de histéresis para el llenado de los tinacos.	58
Figura 3.7: Disposición espacial de los componentes del sistema de control de nivel.	58
Figura 3.8: Diagrama de flujo para el control de llenado del tanque auxiliar.	59
Figura 3.9: Diagrama de flujo para el control de llenado del tanque principal.	60
Figura 3.10: Ciclo de histéresis para el drenaje de los recipientes.	60
Figura 3.11: Diagrama de flujo para el control de drenaje del sistema.	61
Figura 3.12: Diagrama de flujo para determinar el nivel de agua en los tinacos.	62
Figura 3.13: Diagrama de flujo para accionar las electroválvulas de control.	63
Figura 4.1: Diagrama general para el control de temperatura.	65
Figura 4.2: Sensor de temperatura ds18b20.	66
Figura 4.3: Estructura interna del sensor ds18b20.	67
Figura 4.4: Formato del registro de temperatura.	67
Figura 4.5: Caracterización del sensor ds18b20 utilizando un Lm35.	68
Figura 4.6: Sensor de flujo Yf-s201.	68
Figura 4.7: Diagrama para determinar el flujo de agua por minuto.	69
Figura 4.8: Caracterización inicial del sistema de enfriamiento.	70
Figura 4.9: Algoritmo de control de temperatura.	72
Figura 4.10: Determinando temperatura actual y acciones de control.	74
Figura 4.11: Tolbox de LabView para el envío de la temperatura deseada.	75
Figura 5.1: Pulsador mecánico comercial.....	76
Figura 5.2: Motor de DC modelo JGB37-555B.	77
Figura 5.3: Esquema de un motor de CD	78
Figura 5.4: Diagrama esquemático para el análisis de los parámetros del sistema.	78
Figura 5.5: Diagrama esquemático para implementación en Simulink.....	80
Figura 5.6: Implementación de la ecuación de control en Simulink.	80
Figura 5.7: Evaluación del modelo dinámico.....	81
Figura 5.8: Esquema de control para la frecuencia del chopper.....	82

Figura 5.9: Vista frontal del pulsador mecánico implementado.....	83
Figura 5.10: Relación de Torque vs voltaje de alimentación.	84
Figura 5.11: Relación entre el torque y la frecuencia del PWM.	85
Figura 5.12: Respuesta del torque a la modificación del ciclo de trabajo.	86
Figura 5.13: Algoritmo para el control de velocidad.	87
Figura 5.14: Diagrama a flujo para determinar la velocidad del eje del motor.....	88
Figura 5.15: Envío de la frecuencia de trabajo deseada a través de LabView.	89
Figura 5.16: Diagrama a flujo del funcionamiento del robot.	89
Figura 6.1: Diagrama instrumental de la integración del sistema.	92
Figura 6.2: Diagrama general de la instrumentación.....	93
Figura 6.3: Sistema de adquisición, procesamiento y monitoreo de datos.....	95
Figura 6.4: Diagrama de flujo general.....	96
Figura 6.5: Electrónica del sistema integrado. Implementación práctica.....	97
Figura 6.6: Indicador visual y sonoro.....	98
Figura 6.7: Interfaz de usuario. Envío de los parámetros y acciones de configuración.	100
Figura 6.8: Envío de los parámetros y acciones de configuración.	101
Figura 6.9: Envío de los parámetros de control de llenado y de control de frecuencia.....	101
Figura 6.10: Conformación de la primera palabra para visualización.....	102
Figura 6.11: Procesamiento de datos en la interfaz de usuario para visualización.	103
Figura 6.12: Bloque decodificador de etiquetas.	104
Figura 6.13:Decodificador de frecuencia.	105
Figura 6.14: Decodificador de flujo.	105
Figura 6.15: Tolbox para el procesamiento de los valores de temperatura.	106
Figura 6.16: Control de los indicadores visuales de los valores de temperatura y el sistema auxiliar de alarmas.....	107
Figura 6.17: Interfaz de usuario. Visualización de variables	107
Figura 7.1: Distribución instrumental para el control de nivel.....	109
Figura 7.2: Resultados experimentales llenado del tanque auxiliar.	110
Figura 7.3: Resultados experimentales proceso de drenaje.....	111
Figura 7.4: Distribución instrumental del sistema de control de temperatura.....	113
Figura 7.5: Resultados experimentales con el esquema de control inicial propuesto.	114
Figura 7.6: Diagrama general modificado para el control de temperatura.....	115
Figura 7.7: Estructura disipadora con serpentín de cobre y aspás.....	116
Figura 7.8: Resultados experimentales con estructura disipadora de serpentín de cobre... 116	
Figura 7.9: Circuito equivalente del efecto Peltier.	117
Figura 7.10: Estructura disipadora con arreglo de celdas Peltier.	118
Figura 7.11: Evaluación experimental del sistema con celdas Peltier.....	119
Figura 7.12: Mini-enfriadores para control de temperatura.	120
Figura 7.13: Caracterización del mini enfriador Stc-200.	121
Figura 7.14: Conexión de los mini-enfriadores.	121
Figura 7.15: Evaluación experimental del arreglo de enfriadores.....	122
Figura 7.16: Disipación de energía con arreglos de mini-enfriadores de diferentes longitudes.	123

Figura 7.17: Integración del pulsador mecánico.	124
Figura 7.18: Obtención de la salida provenientes del canal A encoder del motor.	124
Figura 7.19: Respuesta del sistema, frecuencia deseada 300 Hz.....	125
Figura 7.20: Corrimiento en frecuencia del sistema a 300 Hz.	126
Figura 7.21: Respuesta del sistema, frecuencia deseada 600 Hz.....	127
Figura 7.22:Corrimiento en frecuencia del sistema a 600 Hz.	128
Figura 7.23: Respuesta del sistema, frecuencia deseada 720 Hz.....	128
Figura 7.24: Respuesta del sistema, frecuencia deseada 1200 Hz.....	129
Figura 7.25: Corrimiento en frecuencia del sistema a 1200 Hz.	129
Figura 7.26: Comportamiento del proceso transitorio para diferentes frecuencias.....	130
Figura 7.27: Comparación de los resultados experimentales con el modelo dinámico frecuencia de operación 600 Hz.	131
Figura 7.28: Comparación de los resultados experimentales con el modelo dinámico frecuencia de operación de 1200 Hz.....	131
Figura 7.29: Comportamiento del robot ante diferentes ganancias proporcionales.	132

Índice de tablas

Tabla 1.1: Distribución de puertos de entrada.....	28
Tabla 1.2: Distribución de puertos de salida.	28
Tabla 1.3: Instrucciones disponibles en Código D.....	30
Tabla 1.4: Resumen de especificaciones de la tarjeta de desarrollo DE0-CV.	35
Tabla 1.5: Principales características del módulo WIFly EZX RN-171.	37
Tabla 2.1: Estados lógicos de las señales en cuadratura del encoder.	41
Tabla 2.2: Mapa de puertos de entrada desarrollado.....	49
Tabla 2.3: Mapa de puertos de salida desarrollado.	49
Tabla 2.4: Distribución de localizaciones de memoria.....	50
Tabla 3.1: Significado lógico del nivel de agua a la salida del hardware.....	57
Tabla 4.1: Principales características del sensor ds18b20.....	66
Tabla 4.2: Características del sensor de flujo YF-S201.	69
Tabla 5.1: Determinación del voltaje nominal. Motor DC JGB37-555B.....	83
Tabla 5.2: Determinación de la frecuencia óptima Motor DC JGB37-555B.....	84
Tabla 5.3: Resultados experimentales al modificar el ciclo de trabajo del PWM a 240 Hz.	86
Tabla 6.1: Resumen de alarmas implementadas.....	98
Tabla 6.2: Etiquetas para visualización de parámetros en la interfaz gráfica de LabView.	103
Tabla 6.3: Estructura de la palabra para visualizar los valores de flujo y velocidad.....	104
Tabla 6.4: Estructura de la palabra para visualizar los valores de temperatura y de nivel de agua.....	105
Tabla 7.1: Características del mini-enfriador Stc-200.....	120

Introducción

El desarrollo de técnicas o tecnologías que permitan la detección de componentes variados de manera no invasiva, utilizando la espectroscopía, es una de las áreas de investigación actual con mayor potencial, con particular interés en la detección de metabolitos en el aliento humano como rama en desarrollo dentro de la medicina [1]. Las principales técnicas de detección operan en el rango espectral del infrarrojo medio (1-10 micras), donde grandes cantidades de moléculas exhiben fuertes líneas de absorción que corresponden a sus transiciones rotacionales fundamentales.

La historia de la espectroscopía se remonta al siglo XVII con los primeros avances en óptica, fundamentalmente con el empleo de los prismas, ver figura 1.1. Estos permitieron realizar observaciones sistemáticas del espectro del sol. La primera definición de espectro provino de Newton y se empleó para describir a los colores que se forman de la descomposición de la luz blanca [2].



Figura 1.1: Experimento de descomposición de la luz por Newton.

En 1800, Joseph Von Fraunhofer realizó importantes avances experimentales con espectrómetros dispersivos, convirtiendo a la espectroscopía en una técnica científica cuantitativa y precisa [2], dando el salto experimental al remplazar al prisma por una rejilla de difracción como instrumento de dispersión de las longitudes de onda, partió de teorías anteriores como la interferencia de la luz que fue desarrollada por Thomas Young, François Arango y Agustín Fresnel. En 1802 William Hyde Wollaston construyó un espectrómetro mejorando los modelos de Newton, su empleo demostró que los colores no se distribuyen de manera uniforme y aparecen bandas oscuras, figura 1.2.

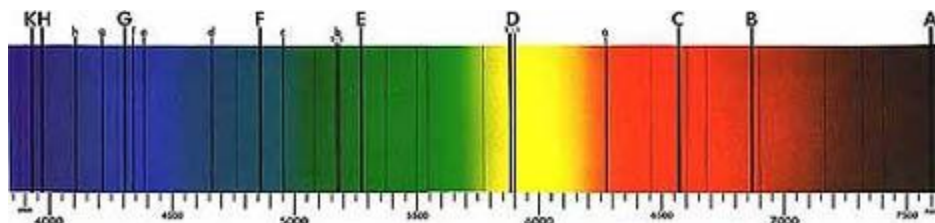


Figura 1.2: Espectro solar con líneas de Fraunhofer.

La escala absoluta de longitudes de onda establecida permitió las primeras comparaciones de los espectros obtenidos por los principales laboratorios europeos de la época [2]. Desde ese

punto los desarrollos han sido significativos y la espectroscopía se ha convertido en una herramienta importante para las ciencias químicas, físicas y en la astronomía.

En la década de 1820 los astrónomos John Herschel y William Fox comenzaron las observaciones espectroscópicas sistemáticas de diferentes sales químicas conocidas, mediante el análisis del color de sus llamas, una técnica denominada espectroscopía de llama. En 1835 Charles Wheatstone reportó la posibilidad de reconocer diferentes tipos de metales diluidos en sales gracias a las rayas de su espectro de emisión generado eléctricamente y en 1849 León Foucault demostró experimentalmente que las secuencias de las líneas de absorción y de emisión del mismo color provenían del mismo cuerpo químico, existiendo algunas diferencias en función de la temperatura de la fuente de luz [2].

En la década de 1860 se logra la compilación de un catálogo con los espectros de las diferentes especies químicas al tiempo que se desarrolla un protocolo experimental riguroso para estudiar detalladamente los espectros de los compuestos químicos. De esta manera se logra la fundamentación de la espectroscopía analítica como técnica científica. En 1860 se publican los resultados de las investigaciones sobre los espectros de 8 elementos y se demuestra su detección en diferentes compuestos químicos, manifestando de esta manera la posibilidad del empleo de esta técnica en la detección de componentes conocidos y para el reconocimiento de elementos aún desconocidos.

Kirchhoff y Bunsen lograron establecer utilizando un espectroscopio, figura 1.3, la relación entre las líneas de emisión y las de absorción de los compuestos, y ello llevó a atribuir la presencia de ciertas líneas de absorción del espectro solar a elementos químicos determinados [3].

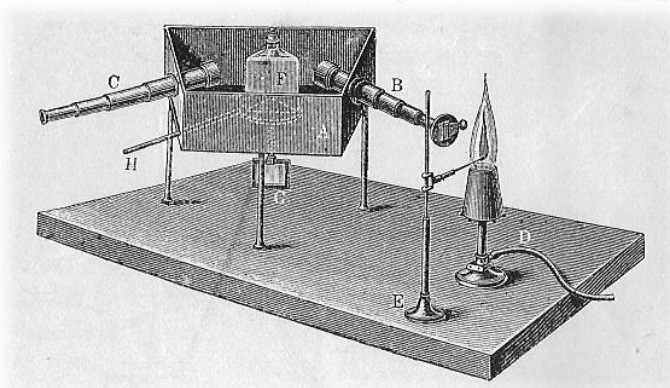


Figura 1.3: Espectroscopio de Kirchhoff y Bunsen (fuente [3, 4]).

En esos momentos Kirchhoff enuncia la denominada Ley de Kirchhoff de la radiación térmica, al aplicarse esta ley a la espectroscopía se obtienen las tres leyes siguientes [4]:

- 1- Un objeto caliente incandescente produce un espectro continuo.
- 2- Un gas produce un espectro de líneas de diferentes longitudes de ondas, dependiendo del nivel de energía de los átomos del gas.
- 3- Un objeto caliente rodeado de un gas frío, o un gas frío solo, produce un espectro casi continuo, presentando lagunas puntuales en ciertas longitudes de ondas bien

separadas que corresponden a los niveles de energía de los átomos que componen el gas.

Posteriormente, William Huggins utilizó la espectroscopía para demostrar que las estrellas estaban compuestas por los mismos elementos químicos que se encuentran en la tierra.

Los desarrollos continuaron de forma acelerada y en 1880 fue descubierto el efecto fotoacústico por Graham Bell [5, 6, 7], ver el instrumental desarrollado en la figura 1.4, siendo la base de la técnica que lleva su nombre y formando parte del conjunto de técnicas experimentales denominadas fototérmicas.

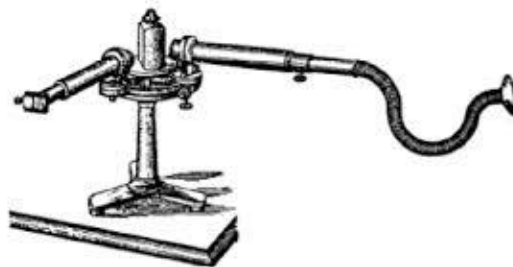


Figura 1.4: Espectrófono diseñado por Bell para el estudio del efecto fotoacústico.

En estas técnicas se hace incidir energía luminosa de forma periódica sobre la muestra que se investiga, parte de la energía es absorbida por la muestra y parcialmente transformada en calor. La temperatura de la muestra varía en función de la periodicidad con la cual incide la radiación. Este descubrimiento fue utilizado por poco tiempo, en sólidos y líquidos para luego ser abandonado por la falta de aplicaciones prácticas [8]; en 1930 fue reconsiderado por Viengerov para su aplicación en celdas fotoacústicas resonantes en la detección de presión. Se demostró que existe una relación entre el espectro y la concentración de las moléculas de gas absorbente, lo que puede ser considerado como el inicio de las aplicaciones de la espectroscopía por detección fotoacústica para el análisis de trazas de compuestos en estado gaseoso [9].

Gorelik planteó que la fase de la señal fotoacústica contiene información sobre las tasas de transferencia energética entre los grados de vibración y de libertad de traslación en los gases lo cual fue demostrado experimentalmente en 1948 por Slobodskaya. La primera teoría para aplicar este tipo de espectroscopía se produjo hasta 1973 con la introducción de la teoría de Rosencwaig-Gersho [9, 10] siendo una teoría para la generación y detección de la señal fotoacústica producida en una muestra que se coloca en una celda. En esta teoría se relacionan los procesos de generación de la señal, así como su dependencia con los factores de frecuencia de modulación, los tiempos de relajación de la radiación y la potencia óptica incidente.

Esta técnica, es mucho más simple, rápida y no destructiva que otras técnicas de detección calorímetras, tiene mayor sensibilidad y un tiempo de subida superior de los detectores [9, 11]. Su limitación está en la selección de las ventanas ópticas adecuadas que correspondan a la longitud de onda utilizable en las celdas fotoacústicas. Dado que se requiere la absorción de la luz en la generación de la señal fotoacústica es necesario considerar las propiedades de la fuente de radiación que se utiliza para obtener resultados óptimos.

Este tipo de detección requiere de dispositivos que emitan un tipo de radiación con características especiales y bien definidas: coherencia, monocromaticidad y alta direccionalidad; estas condiciones en sus comienzos representaron su principal limitación debido a la inexistencia de fuentes luminosas con las características de emisión necesarias. Fue posterior al surgimiento de los dispositivos láser que este tipo de técnicas cobró notoria importancia.

El principio de emisión estimulada fue enunciado por Albert Einstein en 1917 [12], no obstante, fue en 1953 cuando Townes realizó su demostración experimental con un dispositivo al cual denominó Máser, acrónimo del inglés *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* [13]. En 1960 se logra la emisión estimulada a frecuencias ópticas utilizando un cristal de Rubí [14, 15], a este dispositivo se le denominó láser, correspondiendo a *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, es decir, amplificación de luz mediante la emisión estimulada de radiación; en la figura 1.5 se presenta el primer láser que trabajó en modo continuo.

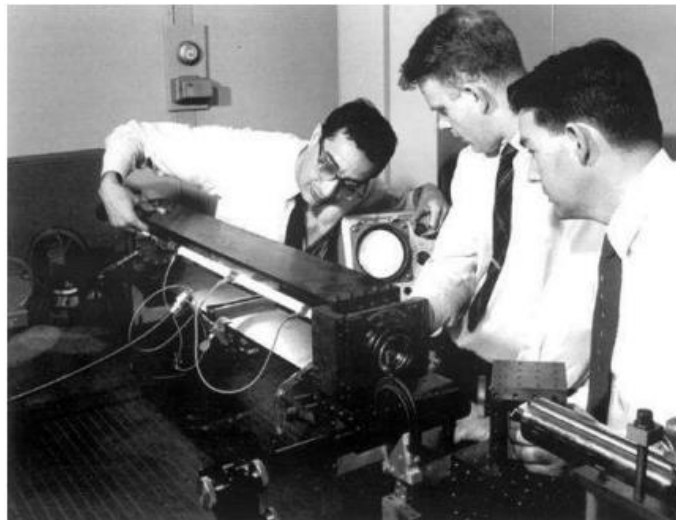


Figura 1.5: Trabajos en el primer láser que funcionó en modo continuo.

Desde ese punto, los desarrollos han sido incesantes y se han diversificado los tipos de láseres existentes. En la actualidad son utilizados en un sinnúmero de aplicaciones prácticas viabilizando la interdisciplinariedad entre las diversas áreas del conocimiento: ingenierías, ciencias biológicas, ciencias exactas, entre otras.

El desarrollo de la tecnología láser ha permitido aumentar el potencial científico de las técnicas de detección por espectroscopía. Existe un área de estudios creciente con relación al empleo de estas técnicas que brindan entre otras ventajas el análisis en tiempo real y no invasivo. Las principales investigaciones van dirigidas a la detección de contaminantes, figura 1.6, en el agua o en el aire [16].



Figura 1.6: Detectores de gases industriales por absorción infrarroja.

Este tipo de técnicas permiten detectar concentraciones de diversas sustancias monitoreadas por los órganos de control ambiental en todo el mundo: CO_2 , CO , NO_2 [17]; estas moléculas absorben fuertemente la radiación luminosa en la región infrarrojo del espectro coincidiendo con las regiones de emisión del láser utilizado en los diseños de este tipo de detectores. Además, se desarrollan estudios para permitir la caracterización de partículas finas en superficies variadas, figura 1.7, [18].



Figura 1.7: Caracterización de partículas en superficies.

Se desarrollan técnicas para la detección de trazas de etileno [19] en la floricultura, estas trazas revelan el estado de maduración y sirven como indicadores para determinar la contaminación por fertilizantes o maduradores en los productos de consumo. En la industria se desarrollan técnicas para la detección de fallas en transformadores de electricidad de alta potencia sumergidos en aceites [20]. Este tipo de técnicas permite determinar la composición

química del aceite, así como la presencia de gases disueltos tales como: el acetileno, el hidrógeno, el etano, entre otros; que pueden disminuir la eficiencia de los sistemas.

El área de estudio más sensible es sin dudas la medicina, con el desarrollo de detectores de glucosa en sangre [21, 22]. Estos permiten el diagnóstico de manera no invasiva y en tiempo real, de enfermedades metabólicas como la diabetes, una de las enfermedades que con mayor frecuencia afecta a la población mundial y cuyos métodos de detección resultan molestos y en gran medida disuaden a los afectados de acudir de manera temprana a los servicios de salud. Se ha detectado, además, rastros del elemento citocromo P-450 que es un indicador de daño renal, una de las principales afectaciones relacionadas a la diabetes.

Otra área de impacto resulta el estudio de las concentraciones de analgésicos en los trabajadores de los servicios médicos. Estos trabajadores, con frecuencia, se encuentran expuestos de manera prolongada a gases analgésicos, esta exposición genera náuseas, fatigas, dolores de cabeza, entre otros, [23] pudiendo desarrollar afecciones profesionales.

Se encuentran en fase de desarrollo los primeros dispositivos para analizar los gases provenientes del aliento humano, y a partir de estos realizar acciones de monitoreo y diagnósticos de posibles enfermedades o estudios de parámetros metabólicos [1, 24]. Estos dispositivos emplean los mismos principios que los detectores de gases industriales, procesamiento de alimentos entre otras áreas.

El experimento que se desarrolla en el interior del Taller de Resonancia y Luminiscencia Magnética tiene un carácter docente e investigativo, con el objetivo de lograr la caracterización adecuada de un láser gaseoso de CO₂ a partir de la evaluación de la transmitancia conocida de un gas de alcohol metílico, así como cuantificar las muestras e investigar la dinámica roto-vibracional resonante con los múltiples niveles de energía de las moléculas en fase gaseosa.

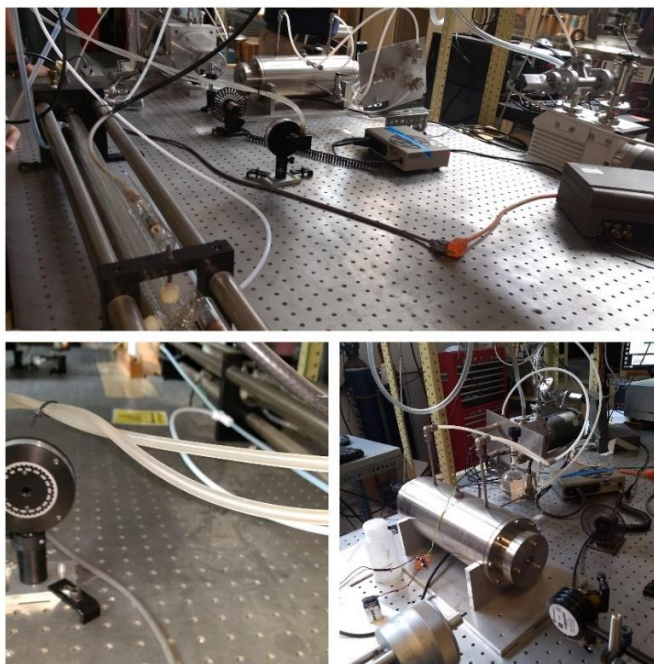


Figura 1.8: Equipo experimental en el TRLM.

El adecuado desarrollo del experimento necesita de la interacción de diferentes componentes: láser gaseoso de CO₂, celda fotoacústica, pulsador mecánico tipo chopper, atenuadores, espejos ópticos, entre otros, figura 1.8. Estos componentes tienen una estrecha interrelación para un adecuado funcionamiento experimental y en la obtención de los datos necesarios para su análisis y procesamiento.

La señal de voltaje fotoacústica detectada en la muestra gaseosa establece la existencia de la absorción resonante por sus niveles cuánticos y el porcentaje saliente de la energía láser luego de la cavidad permite cuantificar el coeficiente de absorción para la frecuencia de emisión del láser. El perfil de la forma de línea de la molécula en la cavidad puede obtenerse con una muy fina resolución, gracias a que podemos desplazar continuamente uno de los espejos del láser de manera controlada utilizando un cristal piezoeléctrico.

Un proceso de automatización general del experimento requiere realizar labores de control sobre diferentes sistemas y encargarse de los procesos de limpieza de la cavidad resonante, generación del plasma, control sobre la línea de emisión, adquisición de los datos experimentales y control sobre los diferentes sistemas auxiliares. En la presente investigación, debido a los alcances trazados no resulta posible realizar estos procesos, por ello el trabajo se enfoca en lograr el control sobre tres subsistemas auxiliares: control de nivel de agua, control de pulsado del haz incidente y control de temperatura de operación. Estos procesos son desarrollados como sistemas independientes, pero serán controlados desde un único dispositivo y el comportamiento de cada uno influirá de manera decisiva sobre el resto de las operaciones. Por ello se plantea realizar un proceso de semiautomatización inicial del experimento que incluya la operación de los procesos anteriormente señalados y su interrelación.

En la revisión bibliográfica realizada, se pudo constatar que existen algunos desarrollos de automatización de procesos similares o de sistemas complementarios [25, 26, 27, 28], pero estos desarrollos no se integran y son vistos como procesos independientes. Estos reportes incluyen los procesos de obtención de datos experimentales, el análisis de los resultados o sus aplicaciones específicas, pero ignoran el desarrollo de sistemas integrados que permitan realizar el control de los sistemas auxiliares involucrados, su funcionamiento, calibración o interrelación. Por tanto, la presente investigación resulta novedosa y de alto impacto.

La modernidad y los desarrollos tecnológicos han posibilitado el perfeccionamiento de nuevas técnicas de detección no invasivas y en tiempo real. Estos desarrollos presentan un amplio campo de aplicación en áreas diversas de las ciencias biológicas, médicas o ambientales. Estas técnicas requieren de dispositivos con características de emisión bien específicas.

El láser gaseoso disponible en el TRLM es de tipo axial, figura 1.9, consta de una cavidad resonante, donde se produce la emisión estimulada, enfriada al circular agua a su alrededor. En los extremos de la cavidad resonante se colocan los espejos del resonador. La mezcla gaseosa se hace circular al mismo tiempo que se excita eléctricamente utilizando dos electrodos [29]. Con este láser se garantizan las características necesarias de radiación para excitar a una celda fotoacústica. En el interior de la celda se encuentra la mezcla de alcohol metílico que se quiere estudiar. De esta manera se realiza la detección de las señales fotoacústicas provenientes del interior de la celda. Este experimento se desarrolla con fines

docentes e investigadores y a lo largo del proyecto se ampliará este tipo de técnicas a la detección de moléculas de tipo general, con interés físico, biológico o médico.

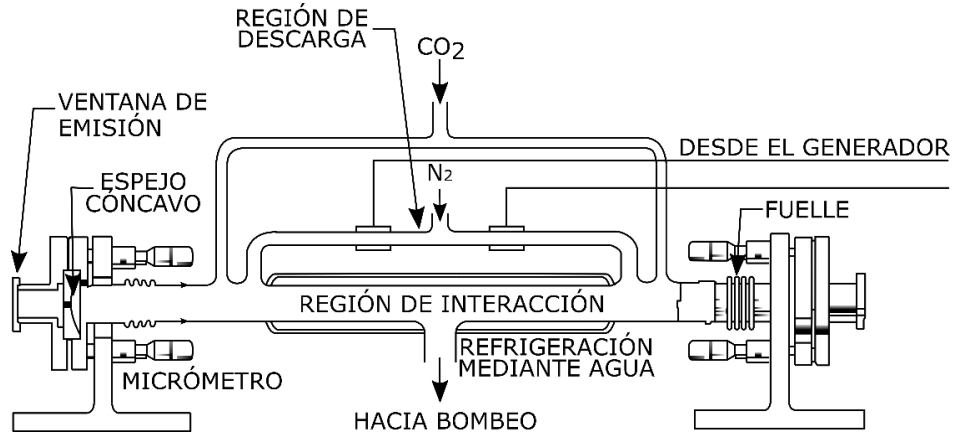


Figura 1.9: Láser de CO₂ de flujo axial.

En este tipo de láser, los niveles de energía se deben al movimiento oscilatorio de la molécula de carbono y no por la distribución de los electrones. La molécula de dióxido de carbono se representa como un arreglo lineal de átomos O-C-O que vibran cada uno respecto a los demás. Los diferentes modos de vibración originan niveles de energía con transiciones que se ubican en el infrarrojo profundo. Pueden generar potencias de salida de varios kilowatts, por tanto, normalmente es utilizado en aplicaciones de procesamiento de materiales, cortes, recocido o soldaduras. En la figura 1.10 se presentan las líneas de emisión del láser gaseoso de CO₂. Fueron determinadas de forma experimental al variar un tornillo micrométrico y evaluar la potencia de emisión en cada uno de los puntos [29]. La longitud de onda principal de este láser es de 10.6 μm con eficiencias típicas del 10% al 15%.

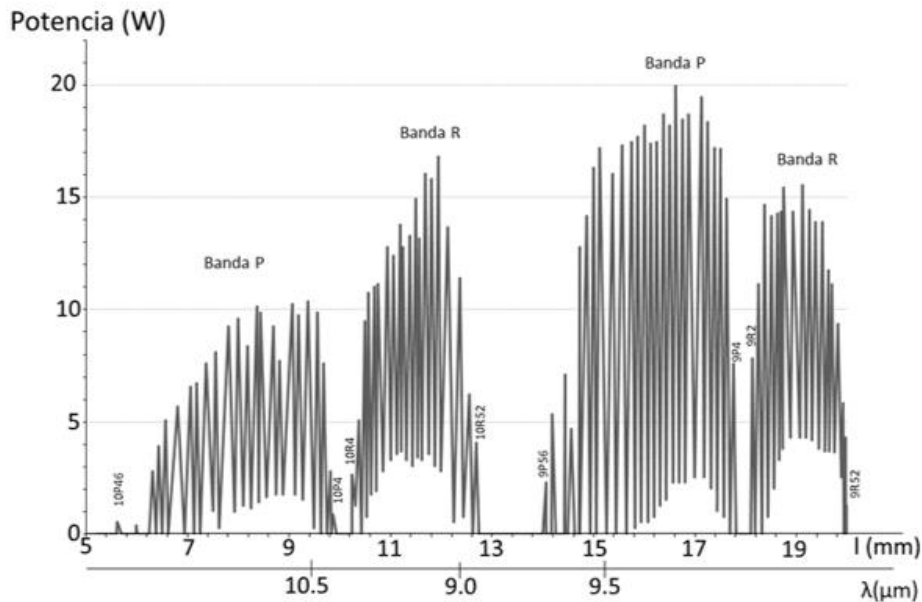


Figura 1.10: Líneas de emisión del láser de CO₂ disponible en el TRLM [fuente [29]].

Este láser entrega toda su energía de salida por dominancia cuántica en el proceso de emisión estimulada a un solo nivel de transición, dando por tanto luz coherente con características superiores en sus posibilidades experimentales en contraste con cualquier otro tipo de fuente luminosa.

El desarrollo actual del experimento se encuentra limitado en sus características técnicas; todo el proceso se desarrolla con la intervención humana, figura 1.11, generando problemas de orden subjetivo que pueden comprometer la calidad de los resultados obtenidos. Aprovechar los avances tecnológicos en el empleo y desarrollo del instrumental controlado por computadora permitiría la automatización de estos procesos excluyendo al factor subjetivo (humano) y por tanto se disminuirían los posibles errores que se cometen; aumentando la calidad de los resultados experimentales.

Los procesos de detección fotoacústica que se desarrollan en el interior del taller dependen en gran medida de la estabilidad del comportamiento del láser gaseoso, así como del pulsado de la radiación incidente a la celda fotoacústica. Este láser por su naturaleza resulta muy sensible a variaciones de su temperatura interna; modificaciones leves en este parámetro redundan en cambios en la longitud de la cavidad resonante que se traducen en variaciones de las condiciones de resonancia, incidiendo sobre la estabilidad y la potencia de emisión del dispositivo.

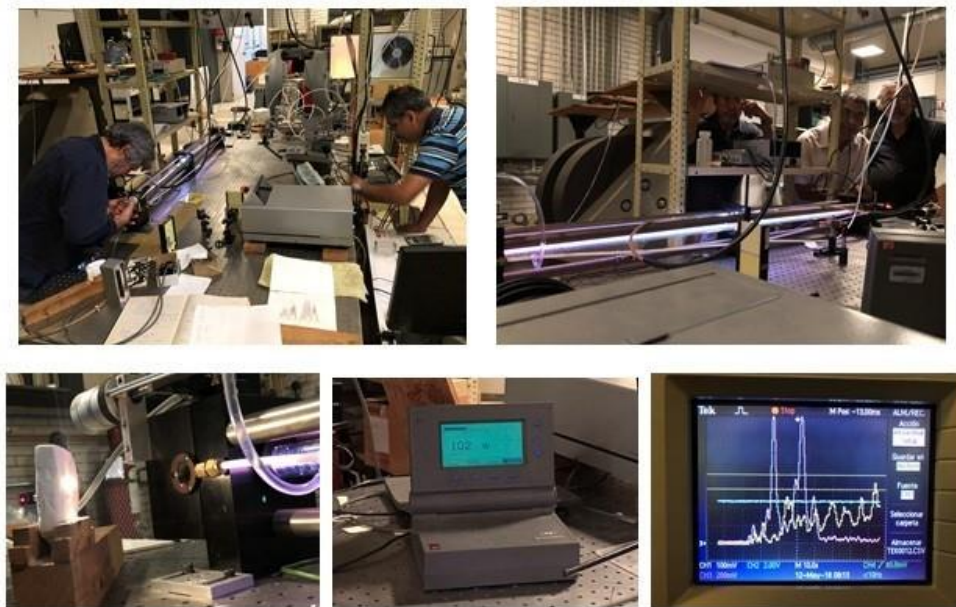


Figura 1.11: Sintonización y operación manual del experimento por los investigadores.

En los estudios realizados se pudo comprobar que la distribución actual de los componentes dentro del taller, figura 1.12, no resulta adecuada para garantizar un flujo constante y óptimo del agua que se utiliza en las labores de enfriamiento del instrumental óptico, figura 1.13; ello repercute en la inestabilidad de la temperatura de operación y por tanto de las potencias de emisión del láser.

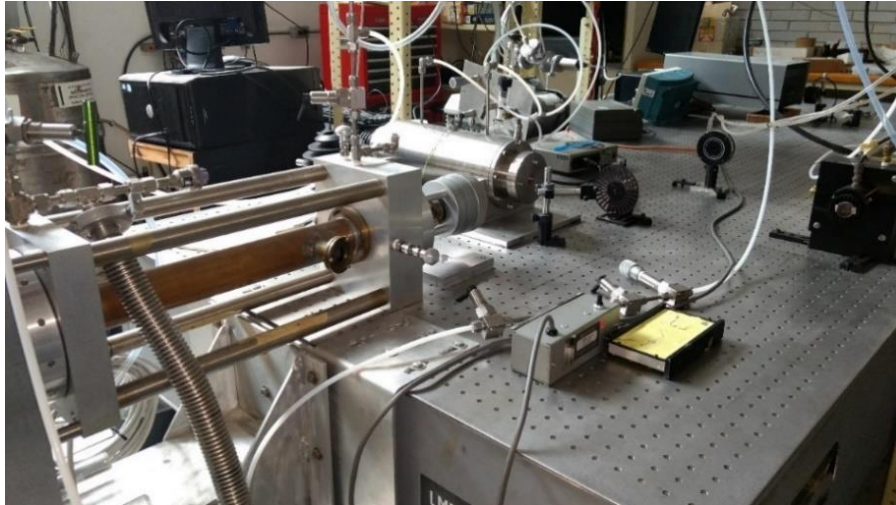


Figura 1.12: Distribución instrumental sobre la mesa óptica.

Además de la inexistencia de reservas del líquido que permitan realizar el experimento independientemente de su disponibilidad en el servicio universitario. Es preciso señalar la importancia de realizar un adecuado pulsado del haz de láser incidente a la celda fotoacústica como condición en la generación del mencionado efecto que se requiere estudiar.

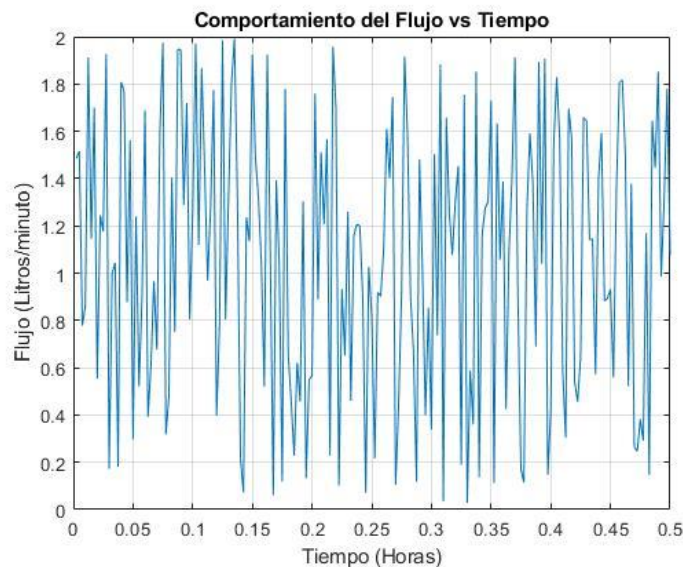


Figura 1.13: Comportamiento del flujo de agua en el laboratorio.

En la presente investigación se realiza el desarrollo de una infraestructura experimental dentro de la Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) para permitir la semiautomatización del experimento que se desarrolla en el interior del TRLM; de esta manera se propone impactar en el perfeccionamiento del mencionado experimento y en el aumento de la calidad de los resultados obtenidos.

El desarrollo propuesto resuelve una problemática real e impacta de manera positiva en los proyectos de investigación que se realizan dentro del TRLM al eliminar la interferencia

humana en la manipulación del instrumental y con ello disminuir los posibles errores. Por otro lado, resulta novedoso al no ser encontrado referencia publicada, en la bibliografía consultada, sobre un sistema similar al que se propone desarrollar, por tanto, el presente trabajo exhibe un desarrollo de alto impacto. Derivado del trabajo realizado se presentaron dos ponencias a diferentes congresos internacionales; así como la inclusión de una de ellas en un libro de formato electrónico.

El aspecto interdisciplinario de la física es ahora una de las grandes prioridades del desarrollo científico-técnico y permite ofrecer proyectos investigativos con altos impactos en la formación de estudiantes en áreas de la Física, Biología y Biomedicina de la Facultad de Ciencias de la UNAM.

Objetivo general

“Automatizar parcialmente la operación de un espectrómetro fotoacústico”

Objetivos particulares

- Estudio del funcionamiento de un espectrómetro fotoacústico
- Diseñar y construir un sistema de enfriamiento para el espectrómetro fotoacústico
- Diseñar y construir un robot de 1 grado de libertad (GDL) que funcione como chopper
- Diseñar el hardware necesario
- Diseñar el firmware necesario
- Diseñar el software necesario
- Integración del sistema
- Realizar pruebas experimentales del sistema diseñado
- Publicación de resultados
- Escritura de la tesis

Seguidamente se realiza una breve presentación del contenido desarrollado en la presente tesis. En el primer capítulo se presenta una descripción general del experimento de detección fotoacústica dentro de la UNAM, identificando las principales deficiencias y dificultades a resolver en la investigación y presentando el sistema embebido básico que se utilizará en las labores de diseño y control. En el segundo capítulo se desarrolla el firmware necesario en función de los requerimientos experimentales y se modifica el sistema embebido, adaptándolo a las necesidades del desarrollo propuesto. En el tercer, cuarto y quinto capítulos, se describen, diseñan e implementan los sistemas de control de nivel, control de temperatura de operación y control de velocidad de un pulsador mecánico, respectivamente. El sexto capítulo se dedica a la integración de los diferentes sistemas desarrollados, así como a describir la implementación del sistema de alarmas y la visualización de parámetros en LabView. Los resultados experimentales de los diseños realizados se presentan en el capítulo 7 y seguidamente se exponen las Conclusiones generales. Se anexan las constancias de los congresos presentados, de la acreditación de idioma inglés y los artículos publicados.

Capítulo 1 : Descripción general del sistema

Se realiza una breve descripción del instrumental utilizado en el experimento de detección fotoacústica, su disposición espacial, principales problemáticas; así como los modos experimentales de interés para los investigadores; se detectan las principales dificultades que afectan el desarrollo experimental, y se proponen soluciones a las problemáticas. Se presentan y describen las principales características del sistema embebido básico utilizado para la adquisición y el procesamiento de datos, puertos, periféricos, y el lenguaje de programación a utilizar.

1.1. Espectrómetro fotoacústico

El experimento desarrollado dentro del TRLM tiene carácter docente e investigativo. El instrumental óptico se encuentra dispuesto sobre una mesa de trabajo en la cual se distribuye el láser, los juegos de espejos, el atenuador, la celda fotoacústica, el pulsador mecánico, entre otros. Próximo a la mesa de trabajo se encuentran instalados los sistemas auxiliares: bombas de vacío, fuentes de alto voltaje y los tanques con la mezcla gaseosa que se utiliza para garantizar la operación del experimento. En la figura 1.1 se presenta parte del instrumental mencionado con anterioridad.

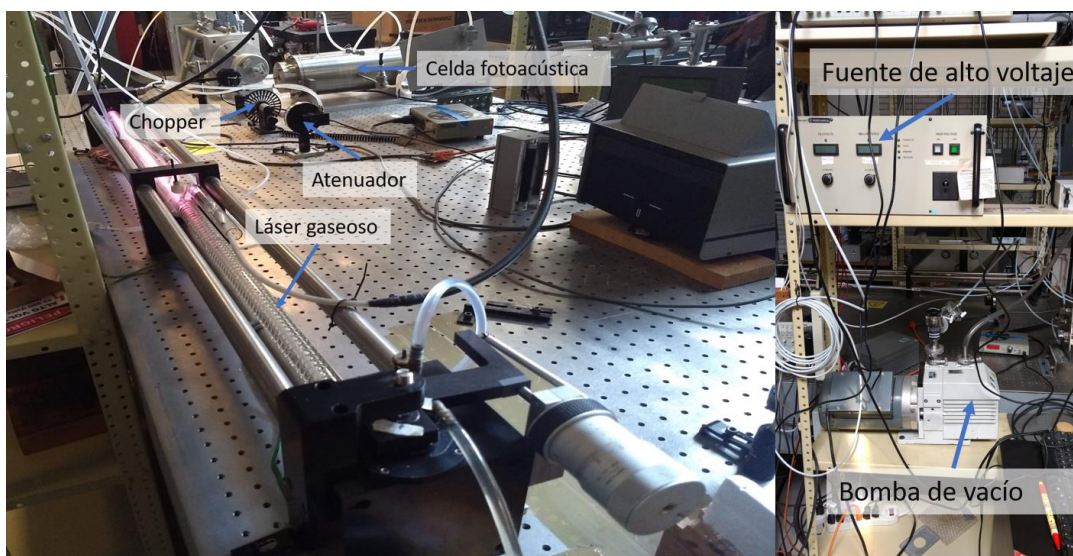


Figura 1.1: Distribución instrumental sobre la mesa óptica y fuentes de alto voltaje.

En la figura 1.2 se presenta el diagrama instrumental general y se describen los principales componentes que son utilizados en el experimento de detección fotoacústica. El núcleo del experimento se encuentra en la correcta operación del láser que garantiza la generación de la radiación con las características necesarias para excitar a las moléculas en el interior de la cavidad fotoacústica. Existe toda una configuración auxiliar utilizada para suministrar la mezcla gaseosa adecuada en la generación del plasma.

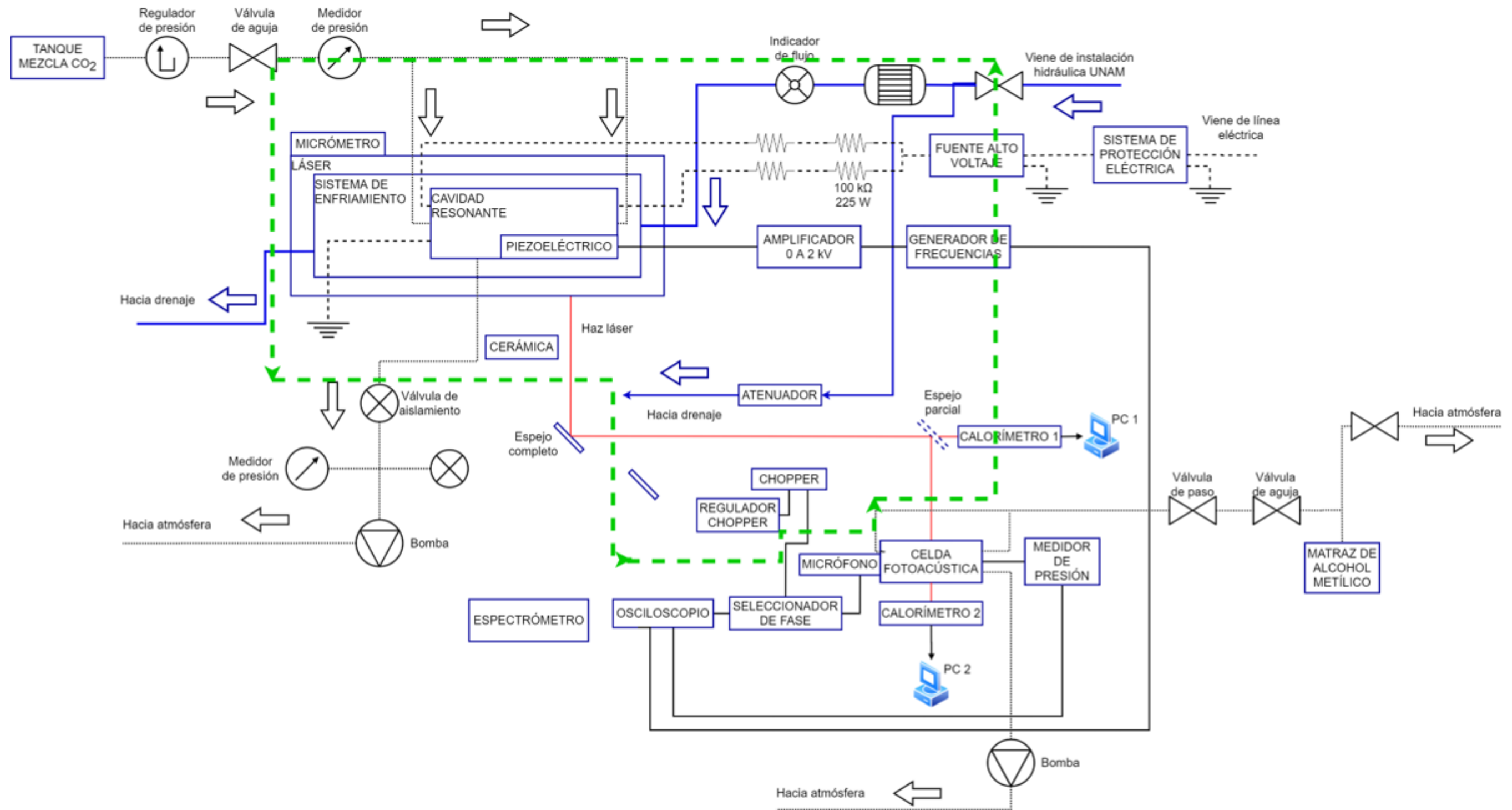


Figura 1.2: Diagrama inicial instrumental.

Ya generado el plasma, en el interior de la cavidad resonante se alcanzan potencias próximas a los 2 kW, estas potencias se traducen en elevadas temperaturas de operación interna y requieren de sistemas adecuados para su enfriamiento. Este láser debido a su propio diseño se enfría al hacer circular agua alrededor de su cavidad resonante. El sistema de enfriamiento inicial se representa de color azul en la figura 1.2.

Este sistema, se conectaba directamente a la entrada de agua del servicio universitario, figura 1.3. Se utilizaba un indicador visual de flujo para monitorear su comportamiento; generando inconvenientes logísticos dentro del laboratorio. El servicio de agua es inestable y su flujo varía constantemente de ahí que sea difícil mantener una temperatura adecuada; por estas razones uno de los investigadores supervisaba de manera constante el estatus del sistema al no contar con un procedimiento de alerta. Lo anterior influía de manera negativa en la realización del experimento y en la calidad de los resultados obtenidos.

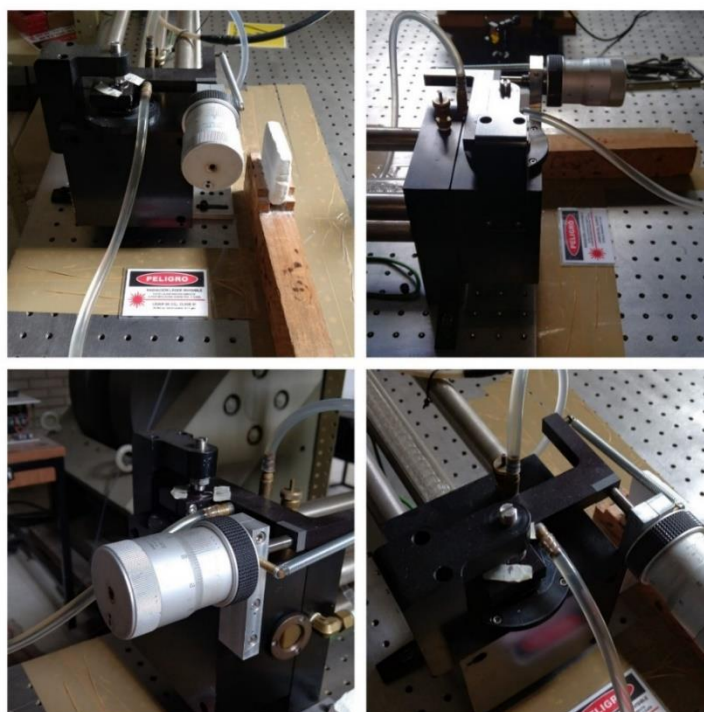


Figura 1.3: Conexión inicial del sistema de enfriamiento.

Las condiciones ambientales y la configuración inicial del sistema incidían en la inestabilidad de la temperatura de operación del láser generando procesos de contracción y expansión de la cavidad resonante que se traducen en derivas en la potencia de las líneas de emisión sintonizadas. Otra problemática identificada está con relación a una cuestión ambiental: la configuración no garantizaba el recirculado de los recursos hídricos utilizados, el agua era desechada luego de circular por el interior del láser: realizando un uso no adecuado de este recurso natural.

Luego de sintonizar la línea de emisión, la radiación láser (de color rojo en la figura 1.2) sale de la cavidad resonante desde un espejo parcial en configuración *Littrow*, a través de una ventana frente a la cual se coloca una placa cerámica de óxido de circonio para bloquear el paso del haz de láser. Es preciso señalar que, a pesar de no ser visible, se generan altas

potencias que resultan peligrosas para la salud al tener exposición directa, resultando necesario extremar las medidas de protección y seguridad. Al retirar la placa cerámica se direcciona el haz de luz mediante un juego de espejos y de atenuadores, colocados sobre la mesa óptica, hasta la celda fotoacústica, figura 1.4.

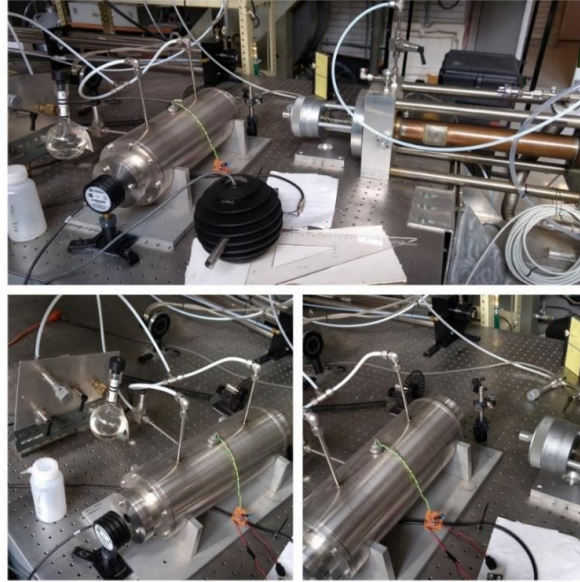


Figura 1.4: Celda fotoacústica.

El láser emite radiación de manera continua, para observar el efecto fotoacústico se pulsa la radiación incidente a la cavidad fotoacústica utilizando un pulsador mecánico externo tipo chopper, figura 1.5. Al pulsador mecánico se le especifica la frecuencia de trabajo necesaria para cada experimento en función de los intereses de la investigación.

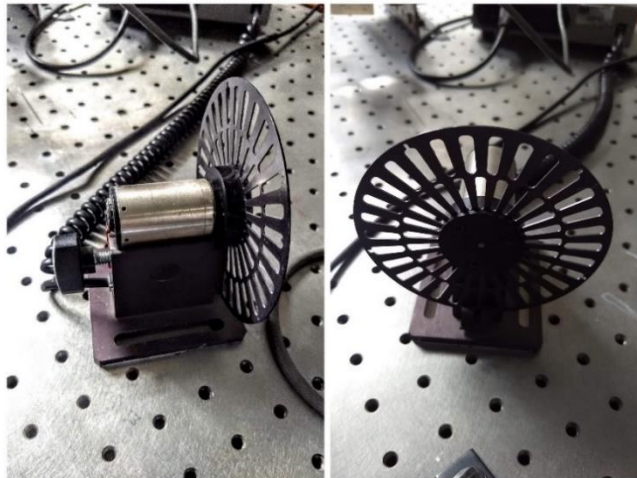


Figura 1.5: Pulsador mecánico comercial.

Los intereses de estudio actuales incluyen el análisis del comportamiento de la potencia incidente y transmitida en el interior de la celda fotoacústica. La ocurrencia del efecto fotoacústico se determina al recuperar la señal de sonido del interior de la celda empleando un dispositivo electret colocado junto a esta. La señal eléctrica de sonido es enviada a un

discriminador de fase y a un osciloscopio junto con las señales provenientes de los sensores de potencia óptica. En la presente investigación se proponen modificaciones a la distribución instrumental, así como el desarrollo de un sistema que garantice la temperatura de operación adecuada del espectrómetro, la disponibilidad de agua y el pulsado mecánico de la radiación incidente para generar el efecto fotoacústico.

1.2. Desarrollo del experimento

El correcto desarrollo experimental se sustenta en un meticuloso protocolo, especificado seguidamente, que garantiza las condiciones adecuadas.

1. Limpieza de la línea de flujo: la generación de la radiación incidente depende de la limpieza adecuada y de la ausencia de humedad al interior de la cavidad resonante. Por estas razones se procura preparar a la cavidad para la entrada de la mezcla gaseosa previo a la realización del experimento; se comienza con la apertura de las válvulas y el encendido de la bomba de vacío, este procedimiento garantiza la adecuada limpieza de la cavidad para posteriormente proceder al ingreso de la mezcla gaseosa, en la figura 1.6 se detalla completamente el procedimiento.
2. Encendido o generación del plasma: Para encender el plasma se aplican altos voltajes a los electrodos de la cavidad resonante con el objetivo de generar la emisión estimulada una vez se encuentre en su interior la mezcla gaseosa correspondiente. El encendido del plasma puede darse en solo una de las mitades de la cavidad resonante debido a diversos factores entre los que se señala: la humedad o una baja presión de la mezcla gaseosa. Una vez se ha encendido, el plasma toma un color blanco con matices violáceos. Un plasma de otro color indica la presencia de humedad. Los valores adecuados en el proceso se encuentran detallados en el diseño experimental [29] y sirven de guía a los investigadores, aunque estos valores en sí ya no reflejan la realidad debido a los años de explotación del equipamiento; en la figura 1.7 se detalla el procedimiento seguido.
3. Generación del láser y sintonización de la línea de emisión: El proceso de caracterización original del sistema láser permitió definir las posiciones de las diferentes líneas de emisión del dispositivo [29], actualmente esas mediciones no corresponden a la realidad debido a los años de trabajo, por ese motivo los investigadores utilizan como guía las mediciones anteriores registradas en una bitácora para estimar la posición de las diferentes líneas de emisión y corroboran esos datos con el empleo de un espectrómetro externo. Una vez determinada la línea de emisión, el láser se encuentra preparado para comenzar con el experimento; en la figura 1.8 se detalla el procedimiento seguido.

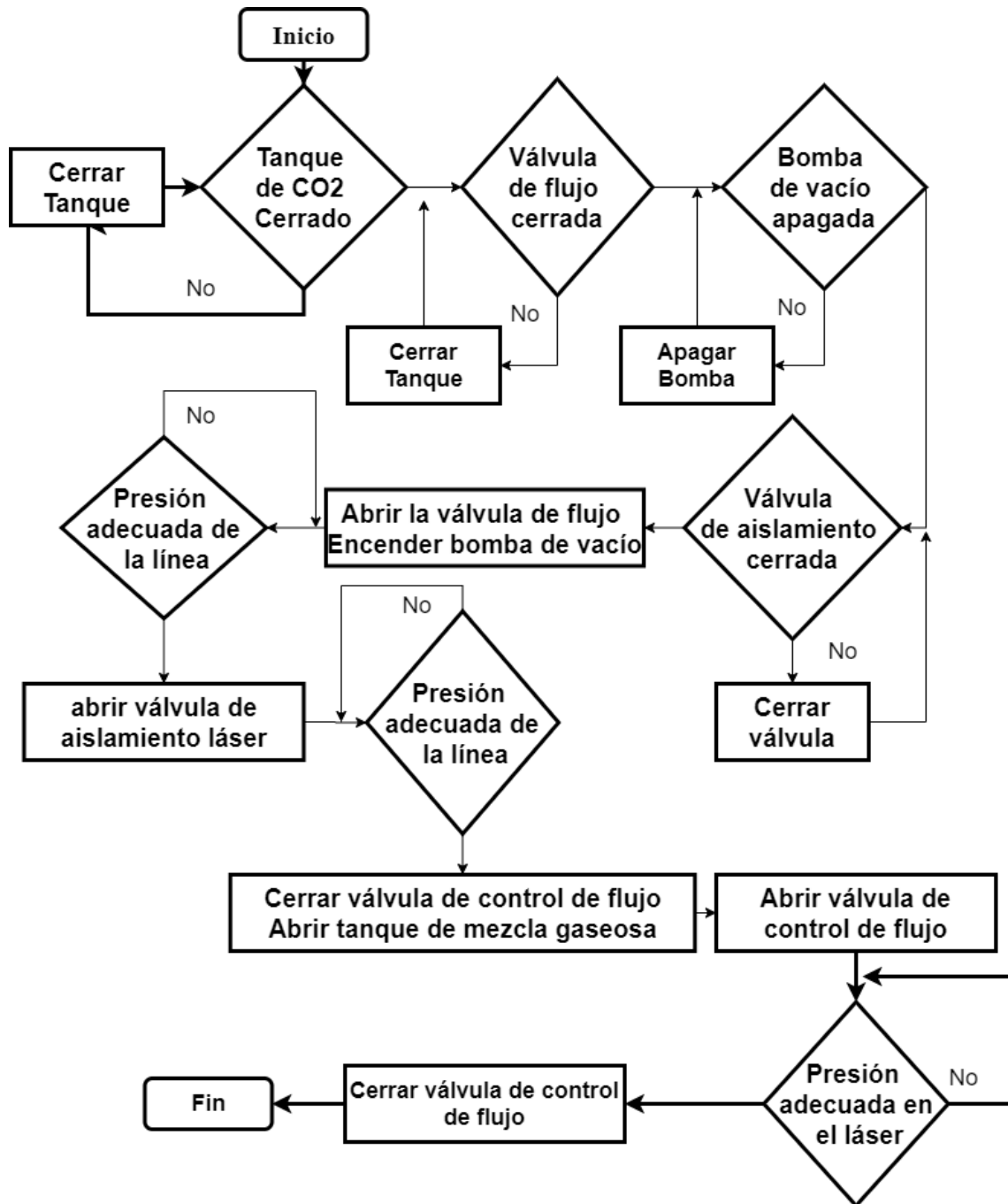


Figura 1.6: Procedimiento para la limpieza de la línea de flujo.

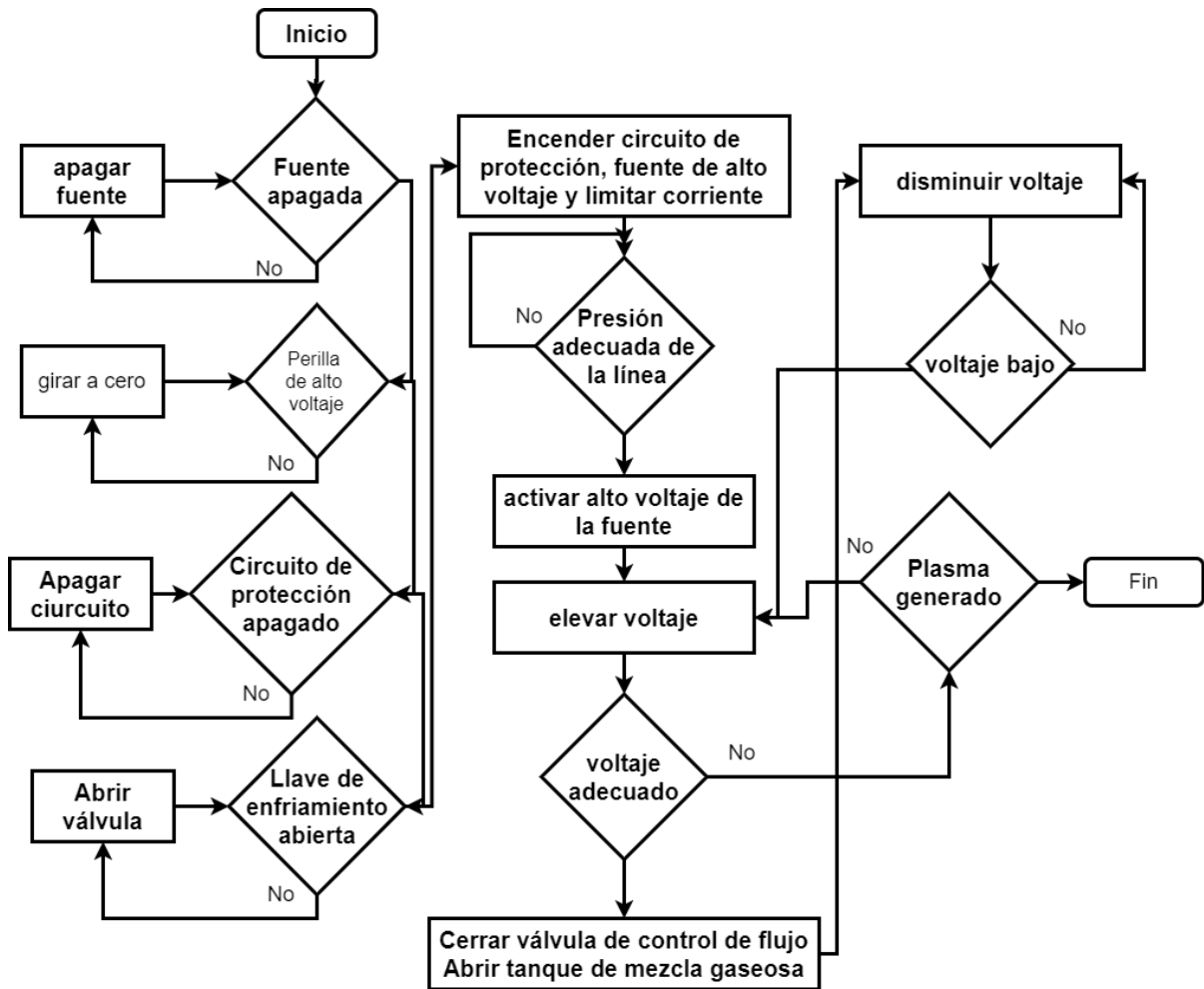


Figura 1.7: Procedimiento para la generación del plasma.

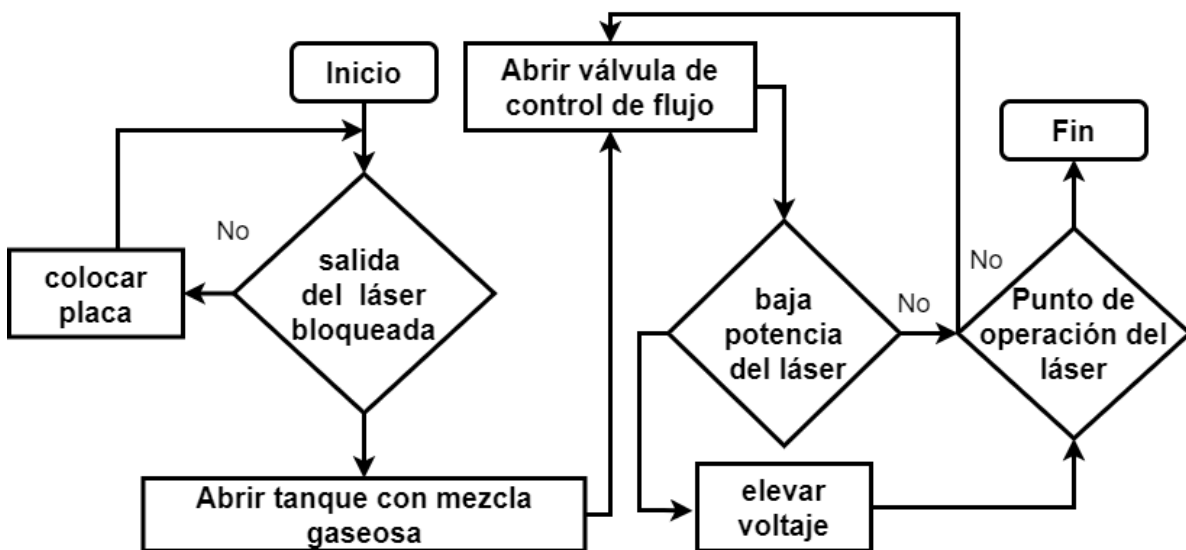


Figura 1.8: Procedimiento para la generación del láser.

Estos procesos por su complejidad e importancia se continuarán desarrollando de forma manual y bajo supervisión de los investigadores.

1.2.1. Modos de operación del experimento

La infraestructura actual permite realizar dos configuraciones o modos de operaciones diferentes que son detallados seguidamente, se realiza hincapié en el modo de operación 2 por resultar el de interés actual para los investigadores.

Modo de operación 1

En esta configuración, figura 1.9, se realiza una evaluación de la relación que existe entre la señal eléctrica fotoacústica y las líneas de emisión incidente en la cavidad; la radiación se pulsa a determinada frecuencia de interés.

El pulsado mecánico se realiza con el empleo del pulsador mecánico externo, su frecuencia se ajusta en función de los intereses experimentales, en estos momentos se encuentra próximo a los 666 Hz. Con la frecuencia de trabajo ya definida se procede a realizar un barrido de la sintonización modificando la posición de un tornillo micrométrico.

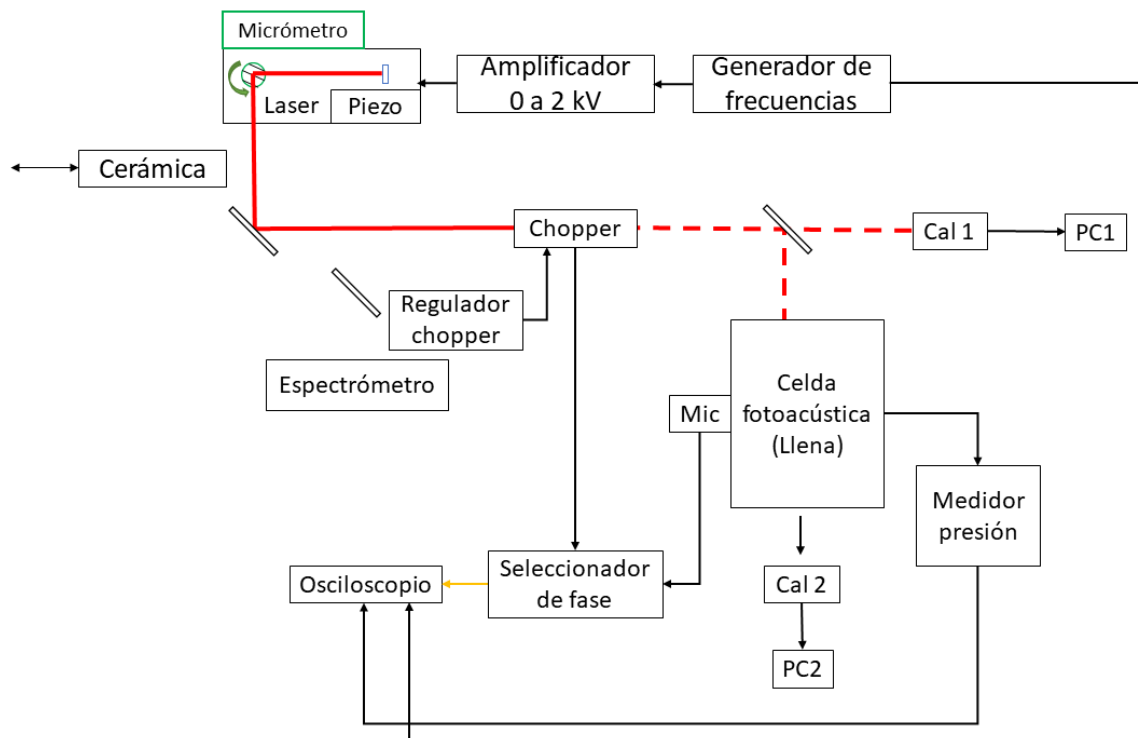


Figura 1.9: Diagrama instrumental. Modo de operación 1.

Los datos analizados provienen desde el detector de potencia óptica (CAL 2 en la figura 1.9) y del micrófono con la señal fotoacústica generada con frecuencia igual a la frecuencia de modulación del haz del láser, en estos momentos 666 Hz. Estos datos son almacenados y posteriormente se grafican para estudiar su comportamiento. Se analiza la absorción de la

radiación en función de la frecuencia de operación, así como de la longitud de onda incidente para determinar la ocurrencia del efecto fotoacústico.

Modo de operación 2

En este caso, se busca evaluar la transmitancia de un gas de alcohol metílico ante la incidencia de la radiación láser, a lo que se denomina espectroscopía por absorción en el infrarrojo medio del alcohol metílico, figura 1.10.

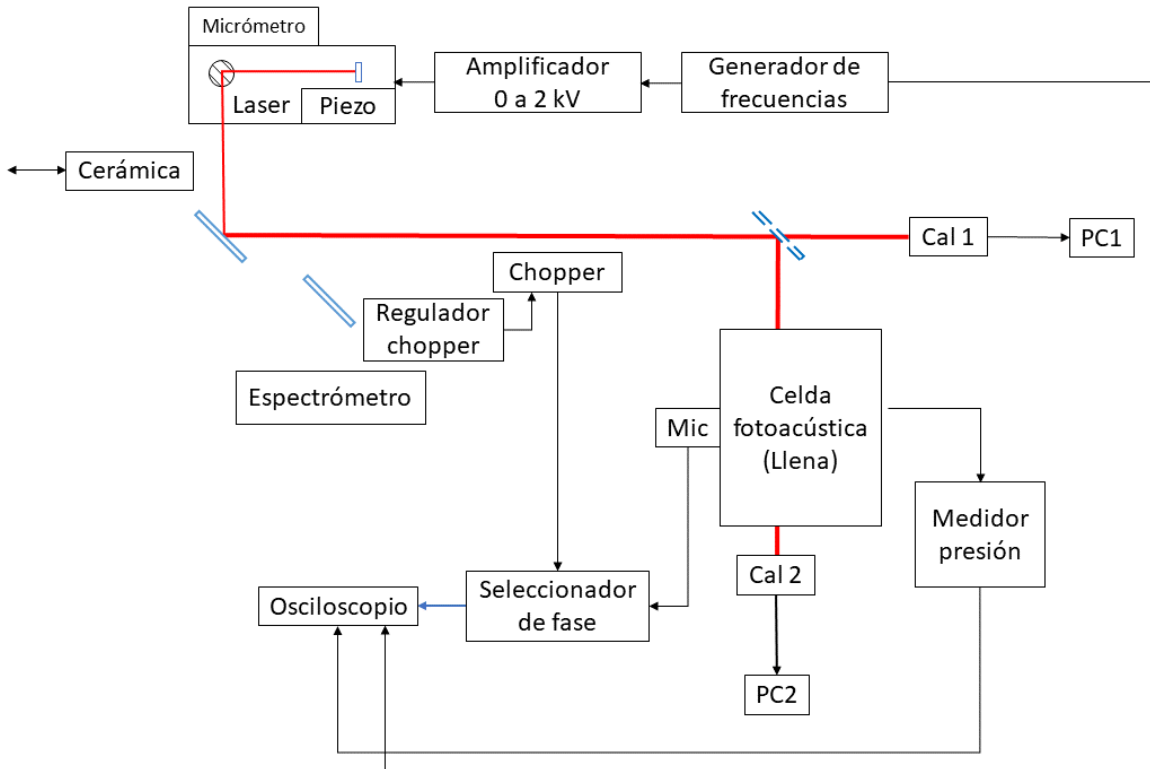


Figura 1.10: Diagrama instrumental. Modo de operación 2.

Una vez se ha generado el haz del láser, se procede a retirar la placa cerámica y a direccionar la radiación (de color rojo continuo en la figura 1.10) utilizando un juego de espejos colocado sobre la mesa óptica. Inicialmente se realiza un proceso de calibración con el empleo del pulsador mecánico, ya calibrados los detectores de potencia óptica, se direcciona la radiación incidente a través de un atenuador de señales al tiempo que se hace incidir sobre un detector de potencia óptica (CAL 1 en la figura 1.10) ubicado a la entrada de la celda fotoacústica y la otra porción se dirige al interior de la celda. A la salida de la celda se coloca un segundo detector de potencia óptica (CAL 2 en la figura 1.10) para determinar la potencia transmitida a través del gas. La señal proveniente de cada uno de los detectores de potencia es registrada por dos computadoras mediante un software propietario brindado por el fabricante de los dispositivos. Estos detectores de potencia óptica permiten conocer el comportamiento de las potencias transmitidas y a partir de ellas determinar la potencia absorbida en interior de la cavidad fotoacústica.

El objetivo perseguido, en este caso, es la reproducción de la transmitancia, ya documentada, del alcohol metílico [30] para realizar una caracterización del láser basado en el experimento y de este modo comprobar la metodología utilizada.

La transmitancia de un gas $T(\nu)$ ante la luz incidente durante el proceso de absorción es caracterizada a partir de la ecuación de Beer-Lambert, ecuación (1.1), la cual establece que la probabilidad de absorción de un fotón es directamente proporcional a la concentración de moléculas absorbentes y al espesor de la muestra [31].

$$\frac{\partial I}{I} = -kY \partial x \quad (1.1)$$

Donde I es el número de fotones por unidad de área y ∂I es la variación de la intensidad luminosa producida por la absorción de espesor ∂x , siendo Y la concentración en el medio, k es una constante de absortividad molar, corresponde a la cantidad de radiación que absorbe una sustancia a determinada longitud de onda en función de su concentración; se expresa en $L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ y la distancia x se mide en la dirección del rayo incidente.

La intensidad de la radiación, al atravesar un medio de longitud l se determina integrando la ecuación (1.1) como se muestra:

$$\int_{I_0}^I \frac{\delta I}{I} = -kY \int_0^l \delta x \rightarrow \ln I|_{I_0}^I = -kYx|_0^l \quad (1.2)$$

$$\therefore \ln \frac{I}{I_0} = -kYl \quad (1.3)$$

Realizando un adecuado cambio de variables, la ecuación de Beer-Lambert queda expresada como [31]:

$$\log \frac{I_0}{I} = A = \varepsilon Y l \quad (1.4)$$

Para fines investigativos dentro del TRLM se parte de la expresión (1.3) y se obtiene:

$$\exp\left(\ln \frac{I}{I_0}\right) = \exp(-kYl) \rightarrow \frac{I}{I_0} = \exp(-kYl) \quad (1.5)$$

Luego, al renombrar $I/I_0 = P_t(\nu)/P_i(\nu)$, se obtiene la transmitancia ante la incidencia de la luz como una razón entre la potencia transmitida ($P_t(\nu)$) y la potencia incidente ($P_i(\nu)$), ecuación (1.6).

$$T(\nu) = \frac{P_t(\nu)}{P_i(\nu)} \quad (1.6)$$

En el caso del experimento desarrollado, estas potencias se encuentran directamente relacionadas con los detectores de potencia óptica; ubicado uno previo a la entrada del haz del láser en la celda fotoacústica y el otro justo a la salida de la celda, tal como fue especificado. Bajo las condiciones actuales en las cuales se realiza el experimento, la luz es absorbida y determina un coeficiente de absorción constante indicando que tanto es absorbido el haz incidente por un determinado gas. Como la sintonía puede ser modificada a lo largo del experimento se busca encontrar la relación existente entre el coeficiente de absorción y la frecuencia del haz láser incidente, el espectrómetro registra si el material absorbe o no durante la sintonía.

Para ello se procede a renombrar al factor $kY = \alpha(\nu)$, representando el factor de absorción del gas a la frecuencia ν . Luego al sustituir en la ecuación (1.5) y (1.6) se obtiene que la transmitancia está dada por la expresión.

$$T(\nu) = \exp(-\alpha(\nu)l) \quad (1.7)$$

El espectrómetro se encarga de registrar la absorción del material durante la sintonía. Una vez seleccionada una determinada línea de emisión, se realiza un barrido alrededor de esta, al modificar la posición de los espejos del resonador. La primera prueba se realiza con la celda fotoacústica vacía y se tiene en consideración la intensidad del láser y la reflexión del 100% con la que cuentan los espejos. La luz del láser es direccionada a través de un espejo atenuador, y por tanto su intensidad será diferente en cada una de sus trayectorias.

En (1.8) se presenta la ecuación que describe la potencia incidente a la entrada de la celda fotoacústica, donde β' es un factor que indica la fracción de intensidad que pasa a través del espejo atenuador. Es necesario considerar la existencia de pérdidas en el haz que incide sobre la celda fotoacústica debido a diferencias con el diámetro de la celda y a posibles reflexiones en el interior de esta. Estas pérdidas se consideran al incluir un factor al que se denomina t_r , luego la intensidad de salida está dada por la ecuación (1.9). Se observa el proceso en la figura 1.11.

$$P_{i_vacía}(\nu) = \beta' \alpha l \quad (1.8)$$

$$P_{t_vacía}(\nu) = t_r \beta \alpha l \quad (1.9)$$

Si se aplica la ecuación (1.6) se obtiene que:

$$T_{vacía}(\nu) = \frac{t_r \beta \alpha l}{\beta' \alpha l} = \frac{t_r \beta}{\beta'} \quad (1.10)$$

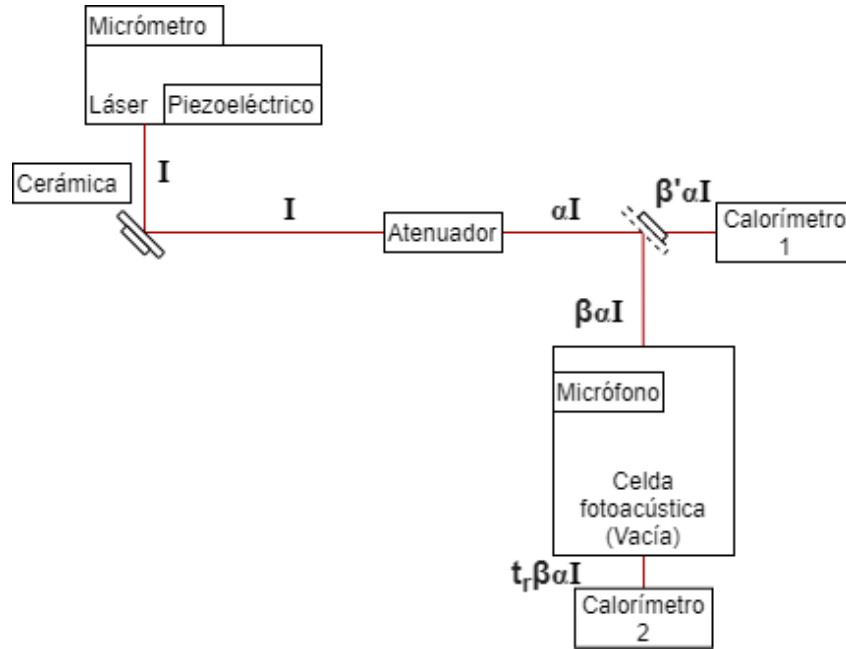


Figura 1.11: Determinación de la transmitancia con la celda fotoacústica vacía.

En (1.10) se ha obtenido la transmitancia para la celda vacía, para ser utilizada como referencia, ahora se procede a repetir el experimento considerando la celda fotoacústica llena, ver figura 1.12, y se obtiene:

$$P_{i_Llena}(v) = \beta' \alpha I \quad (1.11)$$

$$P_{t_Llena}(v) = t_r T(v)_{gas} \beta \alpha I \quad (1.12)$$

En la expresión (1.12) se considera un término correspondiente a la absorción del gas, $T(v)_{gas}$, en el interior de la celda. Luego la transmitancia de la celda llena estará dada por:

$$T_{Llena}(v) = \frac{t_r T(v)_{gas} \beta \alpha I}{\beta' \alpha I} = \frac{t_r T(v)_{gas} \beta}{\beta'} \quad (1.13)$$

Como se aprecia, la transmitancia obtenida es modificada por factores físicos, al aplicar la ecuación (1.6) obtenemos que la transmitancia del sistema está dada por:

$$T_{sistema}(v) = \frac{T_{Llena}(v)}{T_{vacía}(v)} = T(v)_{gas} \quad (1.14)$$

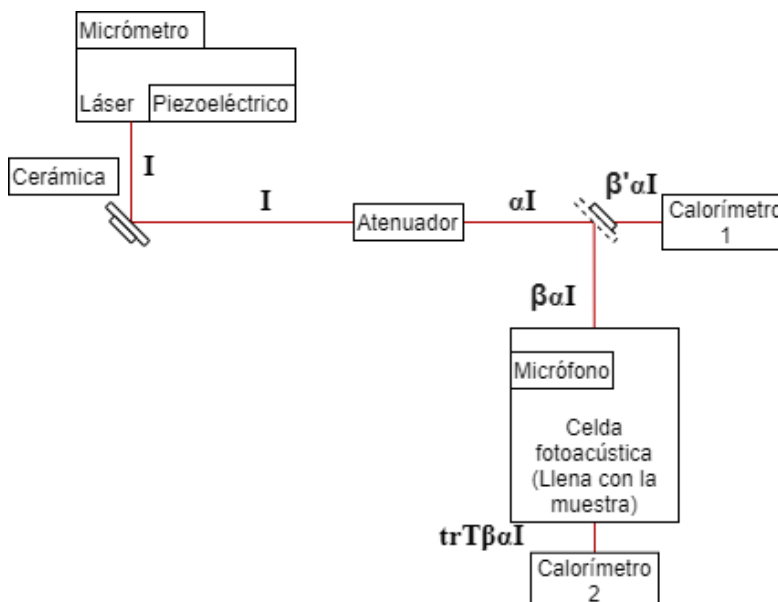


Figura 1.12: Determinación de la transmitancia con la celda fotoacústica llena.

De esta manera se obtiene de forma experimental, la transmitancia para su estudio y posterior análisis. Al utilizar como referencia la transmitancia de la celda vacía, se cancelan las interferencias debido a las propiedades instrumentales, así como las características de absorción y reflexión de la luz obteniendo un resultado final que solo depende de las propiedades del gas objeto de estudio.

1.3. Propuestas para semiautomatizar el experimento.

Una vez identificadas las principales problemáticas que afectan el desarrollo experimental y definidos los intereses investigativos, se realiza un proceso de semiautomatización del sistema anteriormente descrito. Debido a su complejidad se decidió que este proceso se realizara en dos tesis de forma concurrente: la que se presenta seguidamente y una desarrollada por el Ing. Jasid Israel Aguirre Arróniz. El trabajo desarrollado por el ingeniero Jasid comprende el proceso de obtención de los datos experimentales y su correcto procesamiento hasta la presentación de los resultados. Ambas tesis permitirían la automatización del experimento que se analiza y abordarán los siguientes aspectos:

1. Control de temperatura de operación del espectrómetro fotoacústico: garantizando de esta manera la estabilidad de la potencia de emisión del láser, así como la seguridad e integridad física del instrumental de laboratorio y de los investigadores.
2. Control de nivel para recipientes de agua: para garantizar la disponibilidad efectiva del agua utilizada en las labores de refrigeración.
3. Control de frecuencia de pulsado (robot tipo chopper): para garantizar el pulsado mecánico del haz de láser empleado en el modo de operación 1 y en los procesos de calibración del espectrómetro fotoacústico (modo de operación 2).

4. Sistema de alarmas: para garantizar la seguridad de operación y alertar de posibles fallos o errores que pongan en riesgo la integridad del experimento o de los investigadores.
5. Posicionamiento de elementos (robots de 1 grado de libertad con desplazamiento horizontal): para garantizar la ubicación de los diferentes elementos móviles sobre la mesa óptica y evitar posibles accidentes ante exposiciones a la radiación láser por parte de los especialistas.
6. Adquisición, monitoreo y procesamiento de datos experimentales: para eliminar los posibles errores en los procesos de medición y procesamiento de los datos.

En la figura 1.13 se presenta el diagrama general del sistema propuesto. En la parte inferior se encuentra los bloques de firmware de los diferentes sensores necesarios para realizar los procesos de control: sensores de nivel, sensores de posición, sensores de temperatura.

Al interior de los bloques de firmware se desarrolla la lógica necesaria para realizar las labores de detección de nivel y de posición. En el caso del firmware para la detección de temperatura se desarrolla en función del sensor escogido y del protocolo de comunicación necesario en cada uno de los casos como se detallará con posterioridad. Esta información, se envía al microprocesador para su correspondiente análisis y procesamiento de acuerdo con los intereses en cada uno de los casos.

El módulo WIFI es utilizado para enviarle al microprocesador algunos parámetros de interés como las acciones a realizar, los valores de temperatura deseada o la frecuencia de trabajo del pulsador mecánico. Al tiempo que permite iniciar los procesos o detenerlos según sea el caso, este bloque se encuentra conectado al firmware de decodificación que realiza la programación de la memoria del microprocesador y envía las señales de activación.

Los bloques de firmware para el control de flujo y para el control del chopper, envían una señal digital modulada en ancho de pulso para controlar la etapa de potencia de las bombas y del motor utilizado. Estas señales están en proporción al torque necesario, considerando que la respuesta de la planta es lineal respecto al torque y que por tanto su implementación en las labores de control se ve facilitada.

Al decodificador de entrada llegarán los datos provenientes de los sensores de nivel, así como de los sensores de temperatura y de flujo de agua. Estos datos serán procesados al interior del microprocesador en los diferentes sistemas de control para con posterioridad enviar los resultados al decodificador de salida para la oportuna activación o desactivación de cada uno de los recursos disponibles. La activación de los controles de temperatura depende del comportamiento del control de nivel, esto se realiza por cuestiones prácticas y de seguridad.

El proceso de semiautomatización permitirá eliminar el factor subjetivo antes, durante y posterior a la realización del experimento. De esta manera se minimizarán los errores que se comenten en la adquisición de datos, además de aumentar la seguridad de operación al garantizar las temperaturas óptimas de los sistemas e incluir sistemas de alarmas y de alerta temprana garantizando la estabilidad de la potencia de emisión del láser.

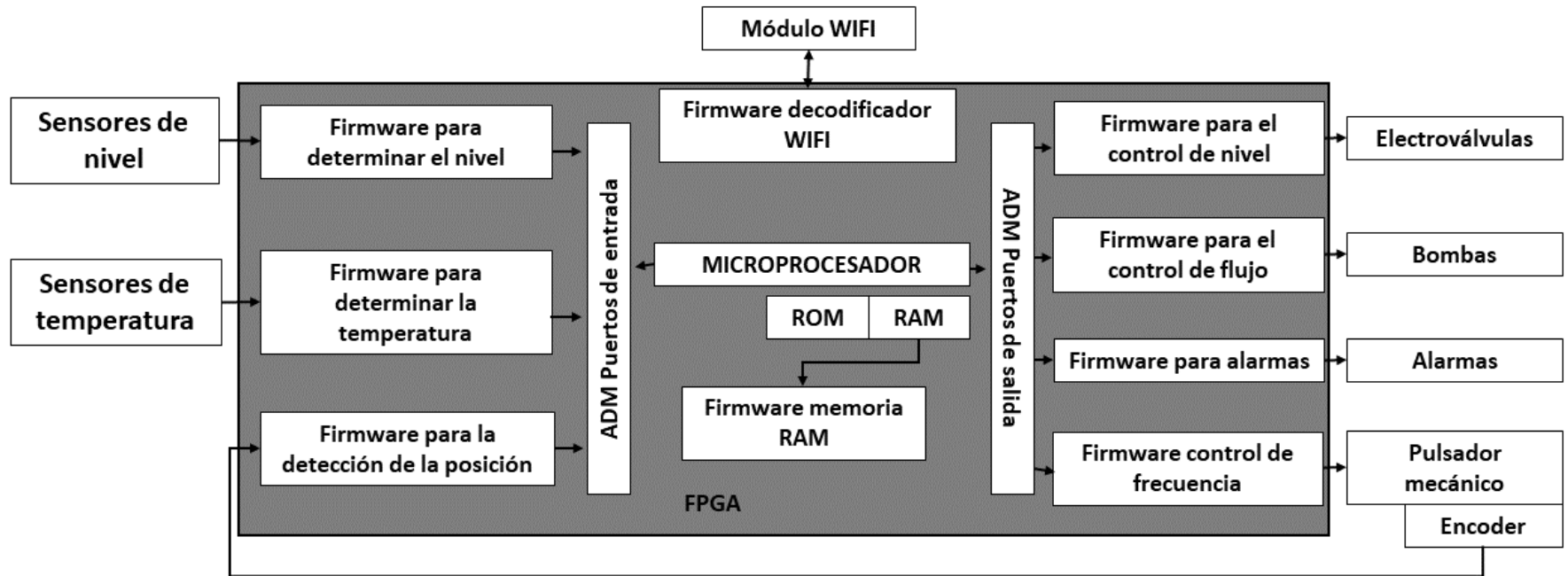


Figura 1.13:Diagrama general del sistema.

1.4. Sistema embebido

La arquitectura de firmware inicial del sistema embebido se presenta en la figura 1.14, se resalta la presencia de un módulo para la comunicación inalámbrica WIFI, así como el desarrollo de sistemas para la comunicación con las memorias RAM y ROM. Con posterioridad se describirán los recursos disponibles.

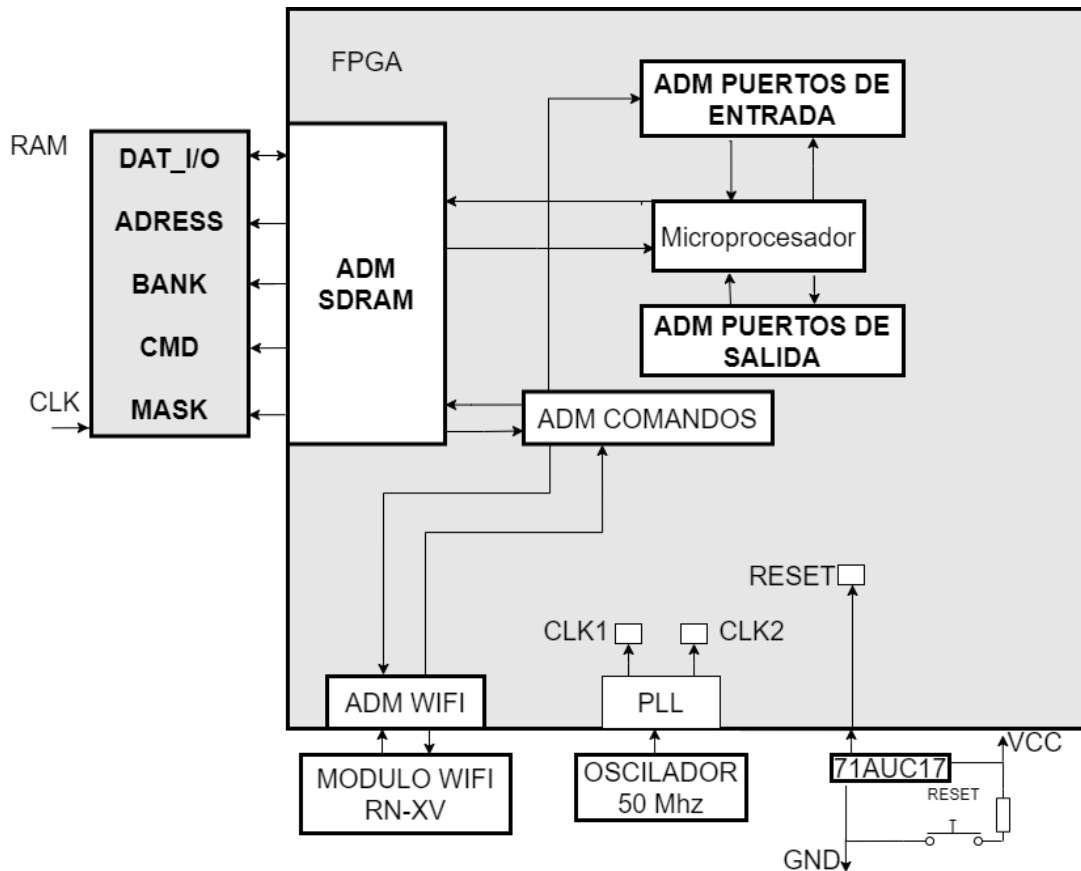


Figura 1.14: Arquitectura inicial del sistema embebido.

Los módulos fueron desarrollados utilizando el lenguaje AHDL de Altera y permiten la ejecución concurrente de las diferentes estructuras descritas mediante firmware. La unidad central de procesamiento (CPU) está conformada por una unidad aritmética lógica, una unidad para la decodificación, así como una unidad para el control de acceso a memoria. El decodificador de instrucciones se encarga de procesar el código de programa almacenado en la memoria, garantizando el programado de la unidad. Este proceso se realiza controlando la unidad aritmética lógica, donde se encuentra ubicado el firmware necesario para la ejecución de las instrucciones lógicas y aritméticas [32, 33].

El acceso oportuno y adecuado a los espacios de memoria es garantizado a partir del bloque de control de memoria, que permite mapear adecuadamente el módulo de memoria SDRAM. Las instrucciones desarrolladas para el control del microprocesador están diseñadas bajo la

arquitectura MIPS de 32 bits como un conjunto basado en la utilización de 16 registros de memoria caché dentro del microprocesador [32, 33].

La comunicación entre la tarjeta, el microprocesador y el medio circundante se realiza mediante los puertos de entrada y los puertos de salida que se definen. Cada puerto tiene asociado un registro de 32 bits que permite el direccionamiento de diferentes recursos. Cuando se realiza la programación de los algoritmos de control resulta importante considerar esta distribución para evitar realizar lecturas erróneas de datos.

Se han implementado 7 puertos de entrada, de ellos solo 6 son accesibles para los usuarios, el puerto PT0 está restringido para la comunicación inalámbrica WIFI y no es accesible a los usuarios, el resto se especifican seguidamente. El bit 32 de cada uno de los registros asociados a puertos no se utiliza para no cambiar el significado de la palabra que se envía, este bit es el de signo de ahí que una incorrecta manipulación puede modificar toda la palabra generando resultados no deseados. En el caso de los puertos de salida se han utilizado hasta el momento solo 3, de ellos solo son accesibles para el usuario 2 porque el puerto de salida PT0 se encuentra reservado para la comunicación inalámbrica.

En la tabla 1.1 y tabla 1.2 se representan la distribución de los puertos de entrada y salida respectivamente. Se observa que inicialmente los puertos se encuentran vacíos a excepción del PT0 que como se mencionó con anterioridad está dedicado a la comunicación WIFI y no resulta accesible a los usuarios.

Tabla 1.1: Distribución de puertos de entrada.

PT0	No usar PT0[32]	Reservado para la lectura del módulo WIFI PT0[31-1]
PT1	No usar PT1[32]	Bits de usuario PT1[31-1]
PT2	No usar PT2[32]	Bits de usuario PT2[31-1]
PT3	No usar PT3[32]	Bits de usuario PT3[31-1]
PT4	No usar PT4[32]	Bits de usuario PT4[31-1]
PT5	No usar PT5[32]	Bits de usuario PT5[31-1]
PT6	No usar PT6[32]	Bits de usuario PT6[31-1]

En función de los desarrollos de firmware necesario, se van llenando los puertos para permitir la comunicación entre el medio circundante y el microprocesador.

Tabla 1.2: Distribución de puertos de salida.

PT0	No usar PT1[32]	Reservado para escritura del módulo WIFI PT0[31-1]
PT1	No usar PT1[32]	Bits de usuario PT1[31-1]
PT2	No usar PT1[32]	Bits de usuario PT2[31-1]

El sistema utilizado permite el empleo de una memoria RAM para el almacenamiento temporal de valores o datos necesarios en el procesamiento dentro de las labores de control. La arquitectura se diseñó para el trabajo con registros de 32 bits. La utilización de estos recursos permite disminuir los tiempos de respuesta y procesamiento del sistema desarrollado [32]. En la figura 1.15 se muestra la organización interna de la memoria y su separación en recursos del sistema, donde se almacena el firmware, recursos de usuario donde se descarga el programa a ejecutar y el espacio para los parámetros de configuración inicial.

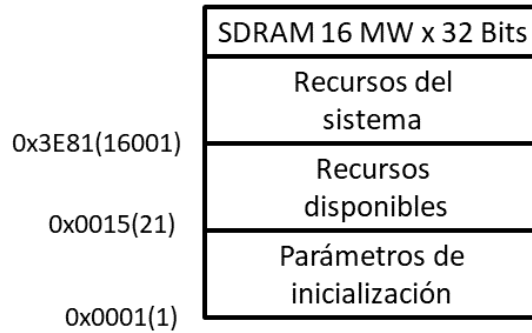


Figura 1.15: Organización interna de la memoria RAM.

1.4.1. Código de programación “D”

La programación del microprocesador puede realizarse utilizando instrucciones en lenguaje ensamblador; sin embargo, esta programación puede resultar compleja y en determinadas circunstancias engorrosa [33].

Para evitar estas problemáticas y ya definidos los recursos, así como los puertos y periféricos que permiten la comunicación del microprocesador con el medio circundante, se utilizó un lenguaje de programación de alto nivel que traduce las instrucciones al microprocesador, el lenguaje ha sido denominado “Código D” [32, 33]. Este código es producto de desarrollos anteriores dentro de la MCEA-BUAP. El mismo cuenta con instrucciones de asignación, condicionales, matemáticas y ciclos que permiten desarrollar cualquier tipo de control con gran efectividad y rapidez, en función de las características de la tarjeta FPGA que se esté utilizando.

En la tabla 1.3 se detallan las instrucciones disponibles en este código y que se utilizaron en la implementación de la presente investigación.

Tabla 1.3: Instrucciones disponibles en Código D.

IF	R	>,<,>=,<=	R o N	
CÓDIGO POR REALIZAR SI LA CONDICIÓN ES CIERTA				
ENDIF				
WHILE	R	>,<,>=,<=	R o N	
CÓDIGO POR REALIZAR REPETIDAMENTE SI LA CONDICIÓN ES CIERTA				
ENDWHILE				
FOR	N (VALOR DE INICIO)	N (VALOR DE AUMENTO)	N (VALOR FINAL)	
CÓDIGO POR REALIZAR REPETIDAMENTE				
ENDFOR				
DELAY				
R	=	N		
R	=	R	+	R o N
R	=	R	-	R o N
R	=	R	*	R o N
R	=	R	/	R o N
R	=	R o N	^	R o N
R	=	R	AND	R
R	=	LN	R o N	
R	=	EXP	R o N	
R	=	SQRT	R o N	
R	=	SIN	R o N	
R	=	COS	R o N	
R	=	TAN	R o N	
R	=	CSC	R o N	
R	=	SEC	R o N	
R	=	COT	R o N	
R	=	SINH	R o N	
R	=	COSH	R o N	
R	=	TANH	R o N	
R	=	CSCH	R o N	
R	=	SECH	R o N	
R	=	COTH	R o N	
R	=	ARCSIN	R o N	
R	=	ARCCOS	R o N	
R	=	ARCTAN	R o N	
LRAM	DIRECCIÓN	R		
ERAM	R	DIRECCIÓN		
LPOR	P	R		
EPOR	R	P		

Se incorpora una instrucción DELAY para generar demoras de 2.5 ms. Con las instrucciones anteriormente presentadas es posible implementar cualquier subrutina y por tanto la ejecución de cualquier algoritmo de control de manera sencilla utilizando el procesador desarrollado.

1.4.2. Interfaz de usuario básica

Se ha definido una interfaz de usuario general que permita enviar/recibir información desde y hacia el sistema embebido, esta interfaz se desarrolló en LabView y puede ser adaptada a las necesidades de cada proyecto en particular. La interfaz está compuesta de varias pestañas: “Descarga de software”, “Ejecución de Programas”, “Descarga de datos a RAM” y “Manual de usuario” que a su vez contienen operaciones internas. Cada pestaña corresponde a una instrucción condicional tipo IF.

En la figura 1.16 se presenta la interfaz de usuario inicial del software de programación, en esta interfaz se procede a realizar la carga del archivo con formato hexadecimal (recuadro “C”) que contiene la información codificada de los algoritmos desarrollados en código D, así como un indicador de grabado (recuadro “B”).

Además, presenta una pantalla para indicar errores en la comunicación de la información entre el módulo de LabView y la tarjeta FPGA (recuadro “D”), considerando que esta comunicación se realiza de manera inalámbrica y pueden existir interferencias que comprometan la calidad de la transmisión. Incorpora además la visualización de dos vectores de depuración para la transferencia de datos (recuadro “A”) como asistencia a la programación del microprocesador.

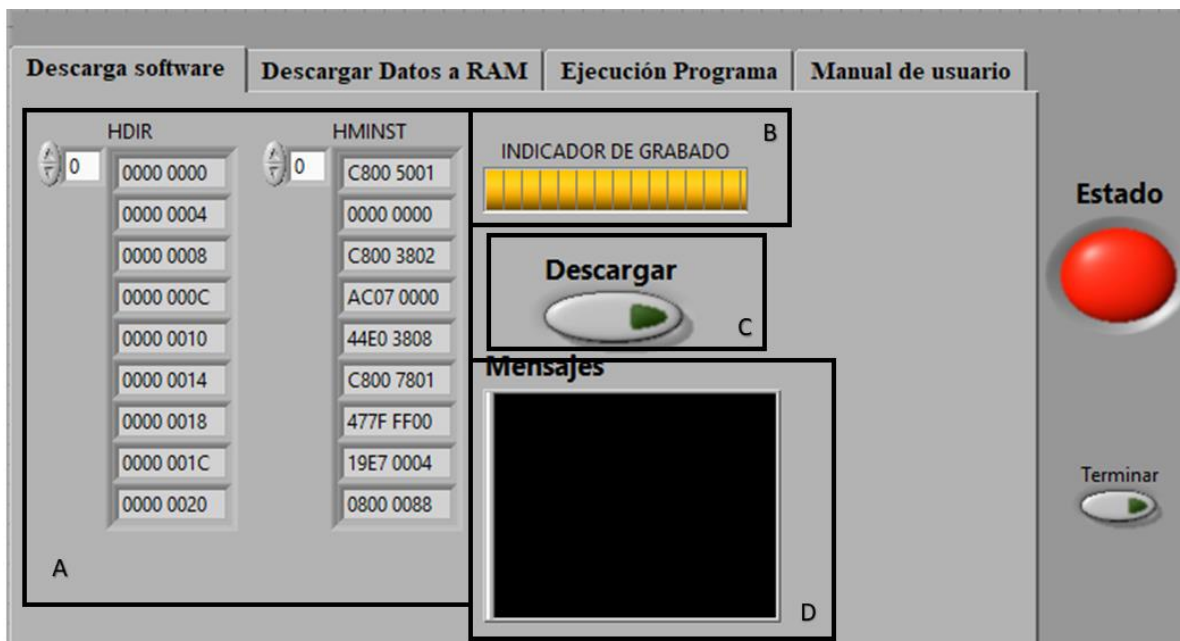


Figura 1.16: Interfaz para la programación del microprocesador.

En la figura 1.17 se presenta la interfaz para la descarga directa de datos o parámetros a la memoria RAM, estos datos pueden ser incorporados por el microprocesador para la implementación de sistemas de controles diversos. Los recursos disponibles son un botón para la descarga que da acceso a la tabla de valores de interés (recuadro “B”), además de un indicador de descarga en memoria y la indicación de la longitud del archivo a transferir (recuadro “C”). En este caso resulta importante definir la dirección inicial en la que se resguardarán los datos y se incorporan dos vectores para el proceso de depuración de la información (recuadro “A”).

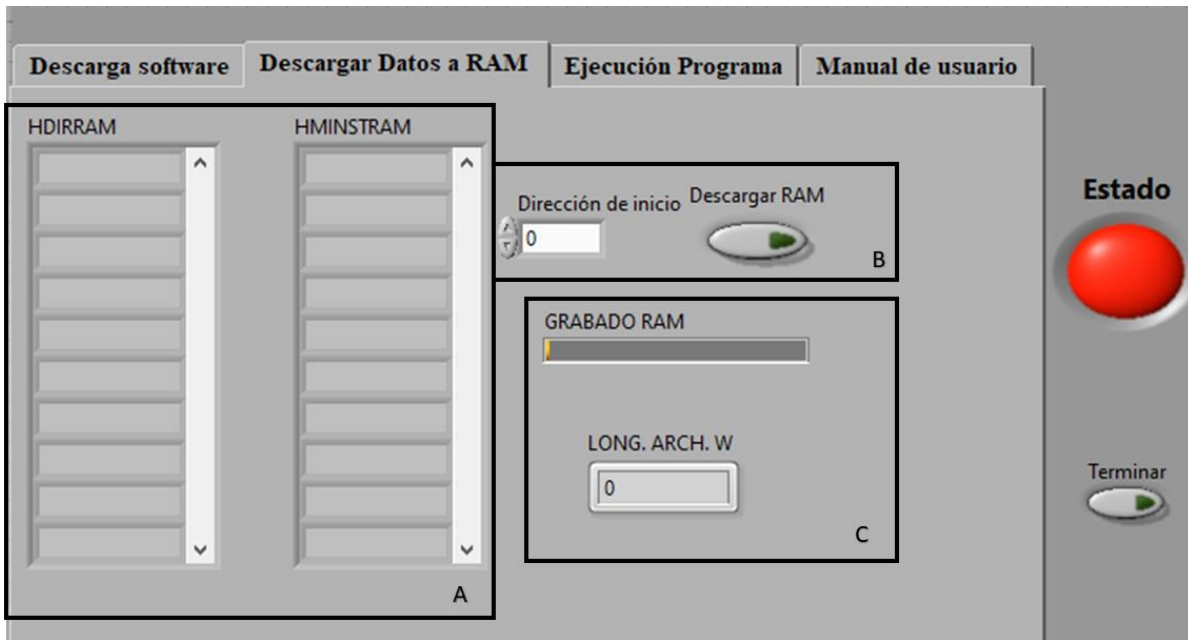


Figura 1.17: Interfaz para la descarga de parámetros a la RAM.

En la figura 1.18 se aprecia la ventana de envío de comandos. Esta sección permite la configuración de 15 parámetros o variables a utilizar en la programación de los diferentes algoritmos de control (recuadro “B”). Los parámetros se descargan al microprocesador cada vez que se acciona el botón “INICIO” (recuadro “A”). Cuenta además con un led para indicar que el programa se está ejecutando al interior del microprocesador. Los parámetros numéricos son enviados en paquetes de 32 bits de los cuales 8 bits corresponden a la etiqueta o identificador. Estos bits de etiquetas nos permiten configurar el empleo de hasta 255 parámetros numéricos.

Al interior del FPGA se realizan los procesos de decodificación y recuperación de la información suministrada. Los botones de inicio y detención del microprocesador utilizan comandos de 32 bits de longitud. Estos parámetros al ser decodificados por el firmware activan o desactivan el funcionamiento del microprocesador. Cuando se inicia el procesamiento matemático, se envían los parámetros numéricos previamente colocados en la interfaz de LabView. Al detener el funcionamiento del microprocesador se reinicia la memoria caché y todos los registros internos del microprocesador.

Otro aspecto importante es el que se muestra en la figura 1.19, esta interfaz permite el envío de parámetros de configuración en tiempo real (recuadro “A”), a diferencia de la interfaz anterior que solo permite el envío de los parámetros de inicio al comenzar la ejecución. Esta interfaz se utiliza para realizar labores de depuración de parámetros y para comprobar la ejecución de acciones o algoritmos en el interior del microprocesador al permitir la visualización en formato entero y en punto flotante, es posible determinar y comprobar cual recurso se encuentra siendo activado en cada momento (recuadro “B”).

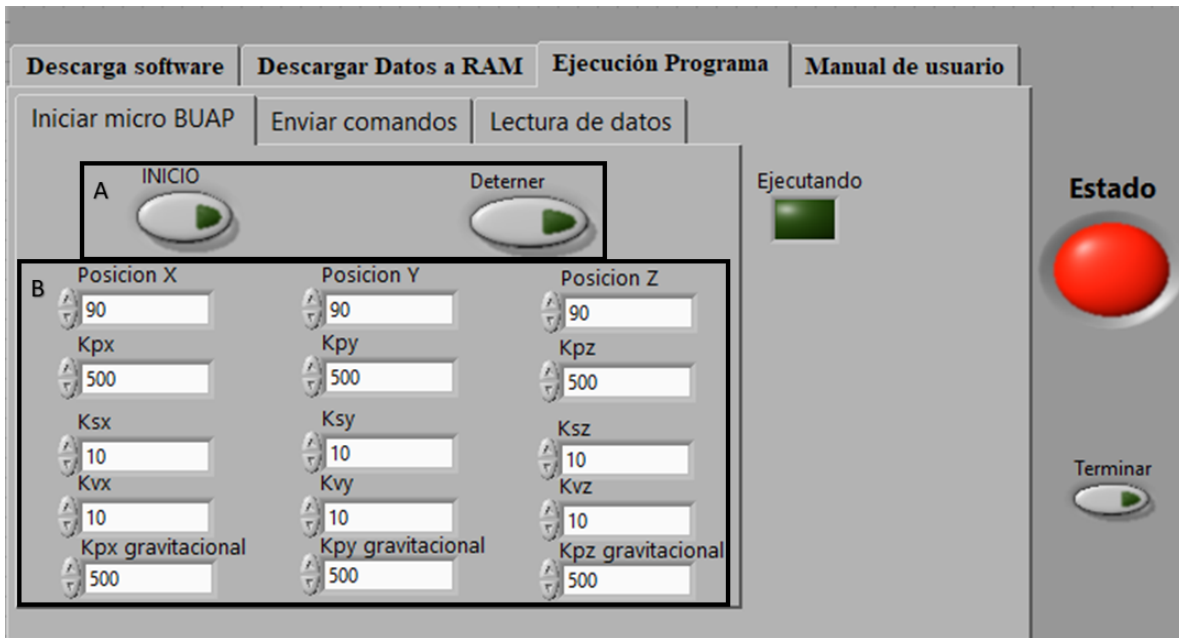


Figura 1.18: Interfaz de usuario. Envío de parámetros de configuración.

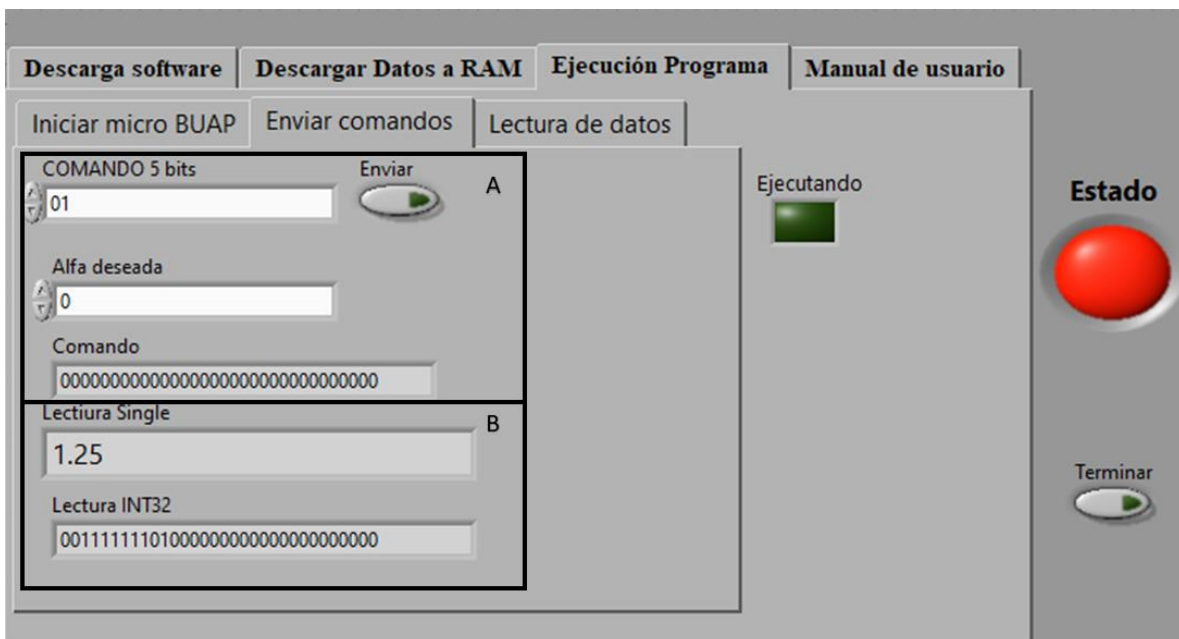


Figura 1.19: Interfaz de usuario. Envío de parámetros en tiempo real.

De la misma manera, es posible acceder a los datos que se procesan al interior del FPGA o en su defecto a los resultados de las acciones de control para su posterior análisis, para ello en la sección de lectura de datos, figura 1.20, se define el nombre del archivo en el cual se desea se guarden los datos para su posterior procesamiento (recuadro “B”). Este archivo tiene formato .dat y puede ser analizado o procesado en otro software como Matlab. Por defecto este archivo se almacena en la raíz del sistema, aunque su ubicación puede ser modificada según los intereses. Cuenta además con Tolbox de visualización en tiempo real de los datos o parámetros transmitidos por el módulo WIFI (recuadro “A”).

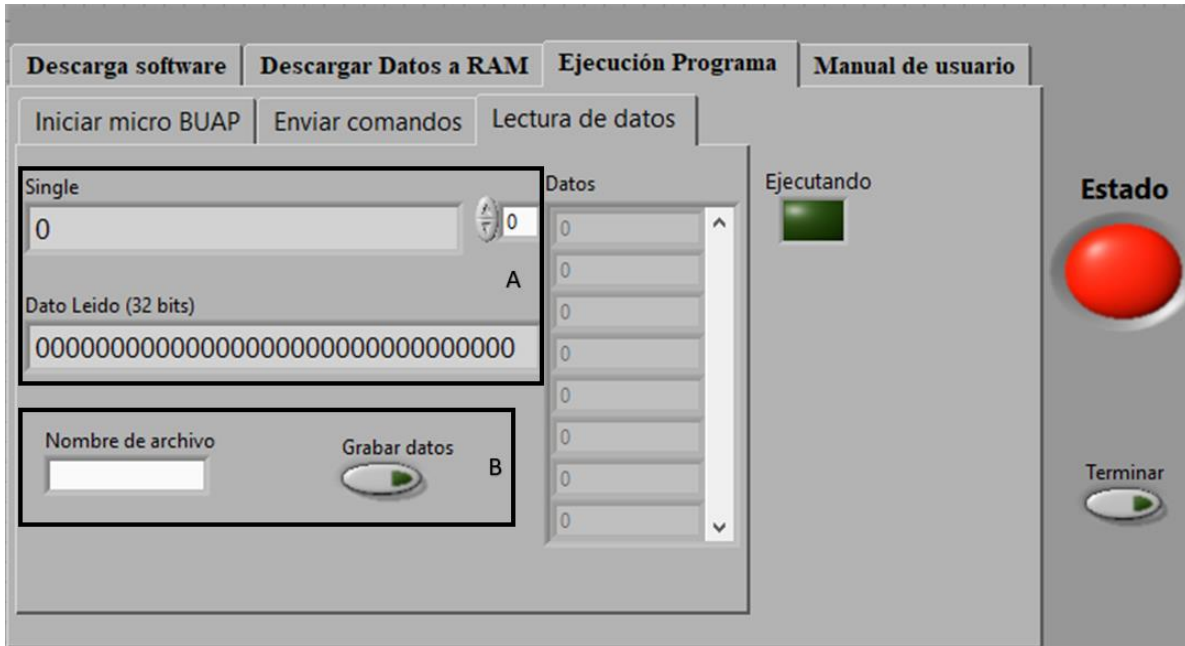


Figura 1.20: Interfaz de usuario. Lectura de datos.

Cada una de estas secciones son accesibles al programador para su modificación y adecuación a las necesidades y particularidades del trabajo que se esté desarrollando.

1.4.3. Tarjeta de desarrollo

Como dispositivo de procesamiento se utilizará una tarjeta de desarrollo FPGA modelo DE0-CV. Esta tarjeta es una plataforma robusta para el diseño de hardware utilizando como soporte un FPGA Cyclone V de Altera que se encuentra optimizado para realizar labores variadas con alto grado de flexibilidad en los diseños.

Como se aprecia en la figura 1.21, la tarjeta provee un entorno de desarrollo complejo con puertos de entrada salida de tipo USB, VGA y PS/2; además cuenta con dos bloques de expansión para terminales que nos permiten acceder a 40 pines que pueden ser configurados como entrada o salida en función de los intereses de desarrollo. Es posible acceder a 4 botones y a un bloque de 10 switch que pueden ser utilizados para generar interrupciones o para programar diferentes funciones dentro de la FPGA.

La tarjeta cuenta con capacidades de memoria con ranuras de expansión para tarjetas SD y una SDRAM propia para almacenar las instrucciones de programas y tiene un total de 49000 compuertas lógicas; se ha manejado para emular un microprocesador conectado a núcleos de propiedad intelectual, *IP-Core*, a través de los puertos de entrada/salida con funcionalidades para la lectura/escritura de datos con propósitos generales y específicos. Para un adecuado funcionamiento es necesario su programación con los bloques de firmware interno necesarios desde los cuales se manejan los recursos disponibles.

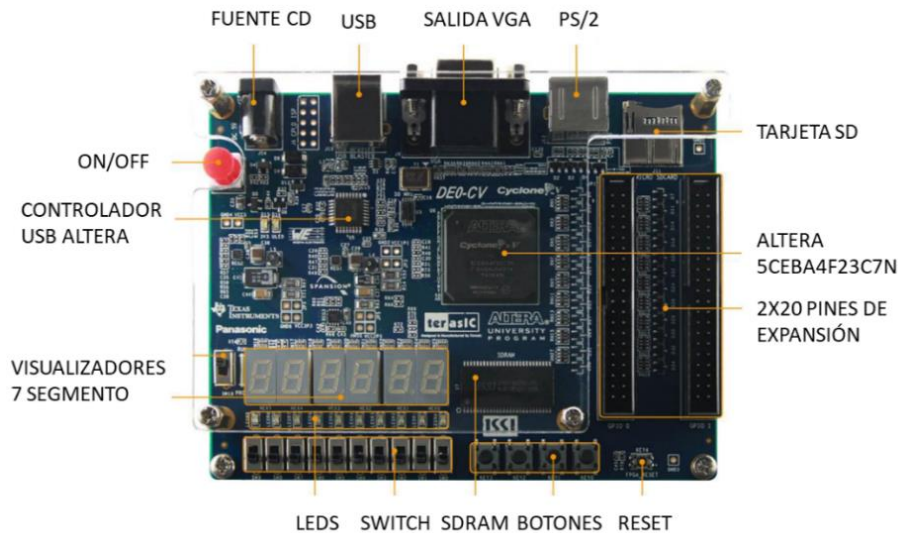


Figura 1.21: Descripción física de la tarjeta de desarrollo DE0-CV.

En la tabla 1.4 se presenta un resumen de las principales características de la tarjeta de desarrollo utilizada.

Tabla 1.4: Resumen de especificaciones de la tarjeta de desarrollo DE0-CV.

Procesador	Cyclone V 5CEBA4F23C7N
Compuertas lógicas totales	49000
Memora SDRAM	64 MB
Método de programación	Software Quartus II y/o Nios II (aplicaciones embebidas)
Pines de propósito general	2 expansiones de 40 pines: 36 pines de entrada/salida, 2 fuentes (3.5 V y 5 V) y dos de tierra (GND)
Periféricos genéricos	4 push buttons, 10 switch, 10 leds, 6 pantallas 7 segmentos
Otros periféricos	Salida VGA, expansión SD, PS/2

En la figura 1.22 se presenta la distribución de pines físicos a donde se conectan las diferentes etapas de potencia, así como los transductores para su comunicación con el microprocesador que se encuentra en el interior de la tarjeta de desarrollo, una vez se realiza el diseño de los bloques de firmware.

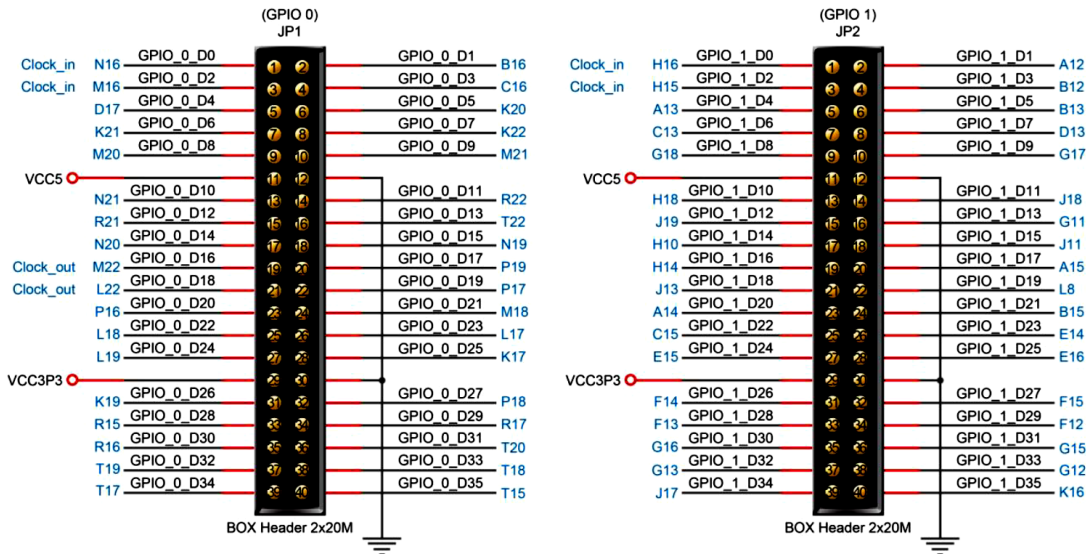


Figura 1.22: Distribución de los pines de expansión de la tarjeta de desarrollo DE0-CV.

La distribución de terminales se realiza mediante firmware y puede ser modificada de acuerdo con los intereses en cada oportunidad.

1.4.4. Módulo de comunicación inalámbrica WIFI

La comunicación entre el microprocesador emulado en interior de la tarjeta FPGA y el medio se realiza utilizando el protocolo de comunicación inalámbrica WIFI. En la figura 1.23 se presenta el módulo utilizado. Este módulo es capaz de administrar los comandos necesarios para permitir la comunicación bidireccional [32, 33].

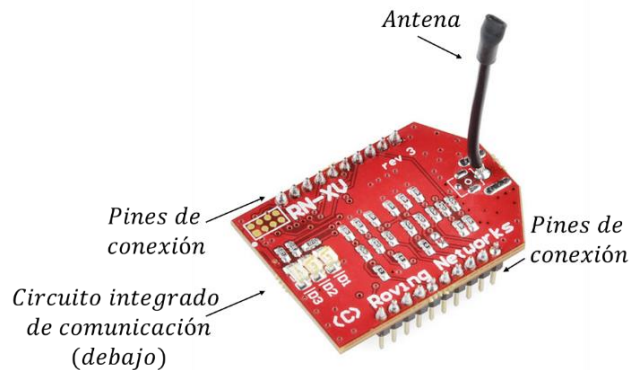


Figura 1.23: Módulo de comunicación WIFly EZX RN-171.

En la tabla 1.5 se presentan las principales características del módulo de comunicación inalámbrico utilizado.

Tabla 1.5: Principales características del módulo WIFly EZX RN-171.

Frecuencias de operación	2402-2480 MHz
Modulación	802.11b y 802.11g
Separación entre canales	5MHz
Número de canales	1-14
Velocidad de transmisión	1-11 Mbps para el estándar 802.11b y 6-54 Mbps para el estándar 802.11g
Potencia de recepción	-83 dBm
Potencia de transmisión	0 dBm – 12 dBm (configurable por software)
Alcance	20 metros (condiciones ideales)

Como se describió en la tabla 1.1 y tabla 1.2 se reservó el puerto PT0 de entrada y de salida para esta comunicación. Para un correcto enlace es preciso configurar parámetros tales como su dirección IP y su tasa de bits por unidad de tiempo, así como el canal adecuado para evitar la interferencia de otros módulos y de esta manera garantizar su funcionamiento en entornos concurrentes.

La configuración se realiza utilizando el software Teraterm, ver figura 1.24. Es necesario enlazar la computadora con el módulo inalámbrico para lo cual se utiliza su dirección IP, por defecto es 1.2.3.4. Una vez se han enlazado se selecciona el servicio Telnet y se indica el puerto de acceso TCP 2000.

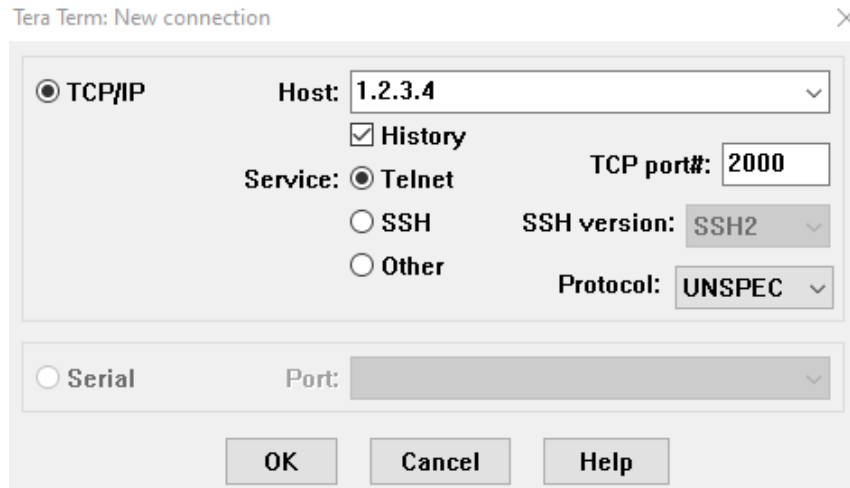


Figura 1.24: Interfaz gráfica del software Teraterm.

Al establecerse la comunicación, se habilita la ventana de comandos del terminal, figura 1.25, ello indica que el dispositivo se encuentra correctamente conectado y se procede a su configuración. Se debe de especificar una velocidad de transferencia de 460800 baudios y el tamaño de la palabra en 5, el resto de las configuraciones pueden mantenerse en sus especificaciones de fábrica.

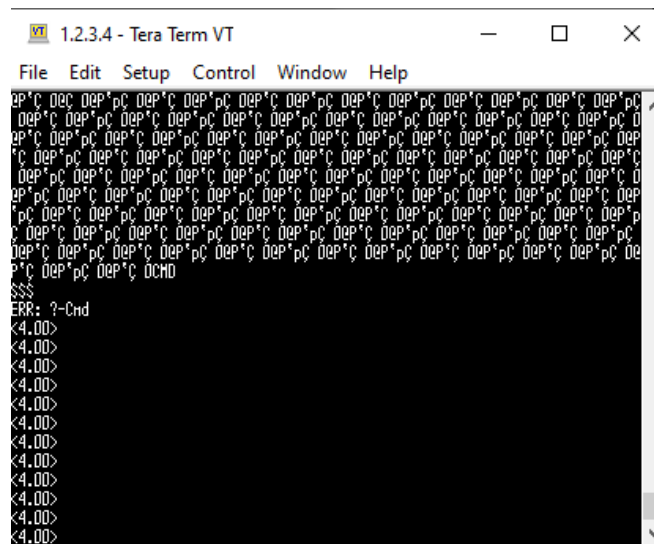


Figura 1.25: Ventana de configuración.

Esta configuración se realiza utilizando los comandos que se listan seguidamente:

- **\$\$\$**: se utiliza para entrar al modo de configuración, al ejecutarse se recibe un mensaje “CMD” que nos indica que el dispositivo está listo para ser configurado.
- **Set uart baudrate**; este comando permite especificar la velocidad de transferencia (anteriormente señalada), al especificar la velocidad se recibe un mensaje “AOK” de confirmación.

- **Set comm size:** permite cambiar el tamaño de la palabra (se configura como 5 palabras de 8 bits), al especificar el tamaño se recibe un mensaje “AOK” de confirmación.

Es preciso guardar los nuevos requerimientos de configuración, para lo cual se utilizan los comandos:

- **Save:** guarda las modificaciones realizadas a los parámetros de configuración.
- **Rebot:** permite reiniciar el dispositivo y salir del módulo de configuración.

Una vez realizada esta secuencia, el dispositivo se encuentra adecuadamente configurado de acuerdo con los requerimientos y es posible operarlo desde el microprocesador.

1.5. Conclusiones del capítulo

Como consecuencia de las problemáticas identificadas, se propusieron las principales líneas de trabajo para su solución para lo cual se describió las características del sistema embebido que se utilizará, la interfaz gráfica para las labores de programación y control y la configuración del módulo de comunicación inalámbrico. De acuerdo con los alcances de la investigación, la obtención de las lecturas provenientes de los detectores de potencia óptica, así como su procesamiento excederían los objetivos del trabajo de investigación y se desarrollarán en una tesis paralela, para posteriormente realizar la integración sobre un solo sistema que permita la operación del experimento.

Capítulo 2 : Firmware

En el presente capítulo se realiza una breve descripción de las modificaciones realizadas al firmware del sistema embebido base para la adquisición y el monitoreo de los datos. Se presentan los bloques funcionales diseñados y sus principales características, así como la distribución de puertos, recursos y el mapa de memoria RAM al interior del sistema de adquisición que permitirán realizar las diferentes labores de control.

2.1. Modificaciones al sistema embebido

En la figura 2.1 se presentan las modificaciones propuestas al diagrama general de adquisición y procesamiento de datos descrito en el epígrafe 1.4. Sistema embebido. Estas modificaciones se realizan para incluir los bloques de firmware desarrollados en función de los intereses de la investigación para realizar las labores de control.

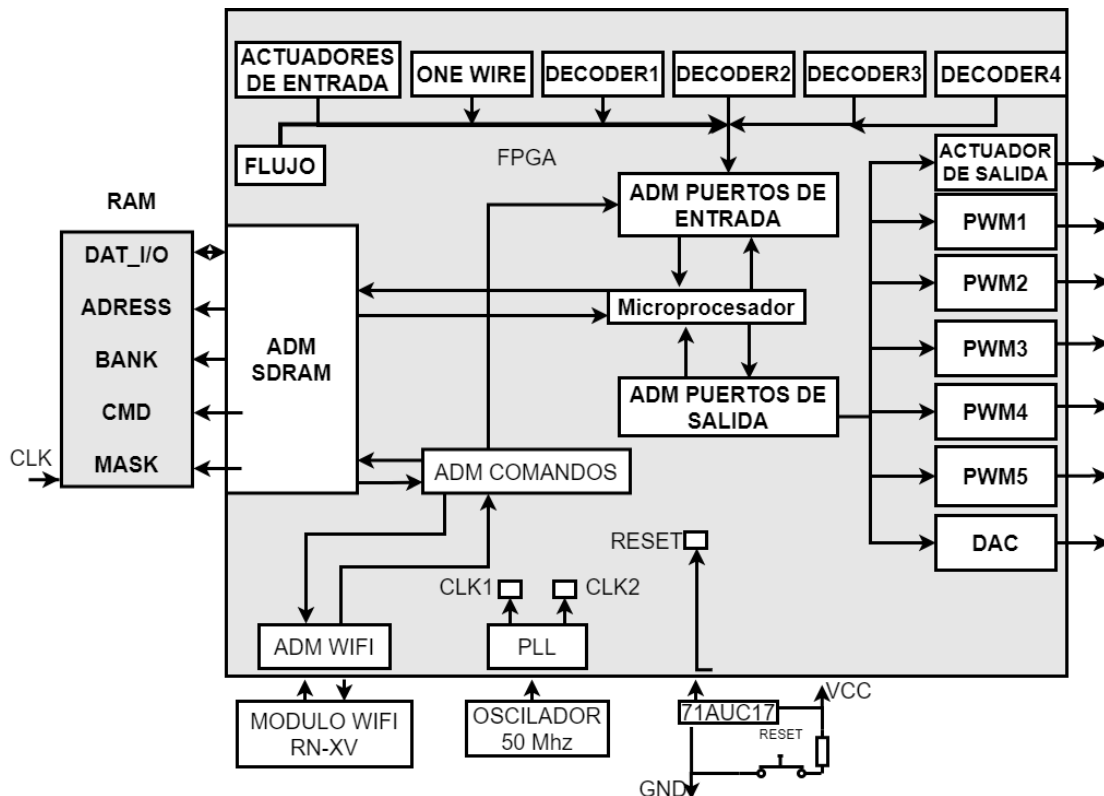


Figura 2.1: Estructura interna lógico-funcional del sistema de adquisición.

. De los bloques y recursos disponibles en la implementación realizada, figura 2.1, en la presente investigación se utilizarán los que seguidamente se señalan:

- 1 bloque de decoder: para determinar la posición actual del motor de corriente directa utilizado en la implementación del pulsador mecánico.
- 3 bloques de PWM: para el control de los diferentes robots utilizados en el proceso de automatización (robot chopper, control de dos bombas de agua).

- 1 bloque para el protocolo One-Wire: para la configuración, selección y obtención del valor de temperatura en cada uno de los casos para 4 sensores.
- 2 bloques para determinar el flujo de agua.
- 4 actuadores de entrada: para la interconexión con sensores.
- 3 actuadores de salida: para accionar sobre otros sistemas en función de las necesidades de los algoritmos de control.
- 1 bit del conversor digital-analógico: señalización y alarmas.

El diseño funcional de cada uno de los bloques se realizó utilizando el lenguaje de descripción de hardware de Altera AHDL y se detallan seguidamente los aspectos más significativos.

2.1.1. Bloque de Decoder

El bloque de decoder se utiliza para determinar la posición actual de los motores a partir de analizar las combinaciones lógicas provenientes del encoder del mismo. En la figura 2.2 se presentan las señales en cuadratura provenientes de este.

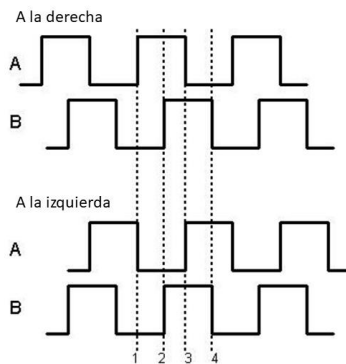


Figura 2.2: Señales en cuadratura provenientes del encoder del motor.

A partir de las señales anteriores, es posible determinar las combinaciones lógicas que se muestran en la tabla 2.1. La frecuencia con la que aparecen las combinaciones depende de la velocidad de rotación del eje del motor. Si los estados lógicos se observan de manera ascendente el motor se encuentra girando en un sentido, si se invierten los estados lógicos observados ello implica una inversión en la dirección de giro del motor [34].

Tabla 2.1: Estados lógicos de las señales en cuadratura del encoder.

Estado lógico	Señal A	Señal B
1	0	0
2	1	0
3	1	1
4	0	1

En la figura 2.3 se presenta el diagrama de flujo implementado en lenguaje AHDL para el bloque de firmware de decoder (decodificador de posición). Básicamente se trata de un contador que se incrementa o decrementa en función de la dirección de giro determinada por las secuencias lógicas recibidas de las señales del encoder (codificador rotatorio o codificador del eje del motor que convierte la posición angular del eje del motor en un código digital) del motor. Resulta importante considerar que los encoder utilizados son de tipo relativo, es decir que el código generado es relativo a la última posición o posición anterior y por tanto no representa el valor absoluto de posición, de ahí que en caso de pérdida de la energía eléctrica no se sabría la posición real del eje del motor [34].

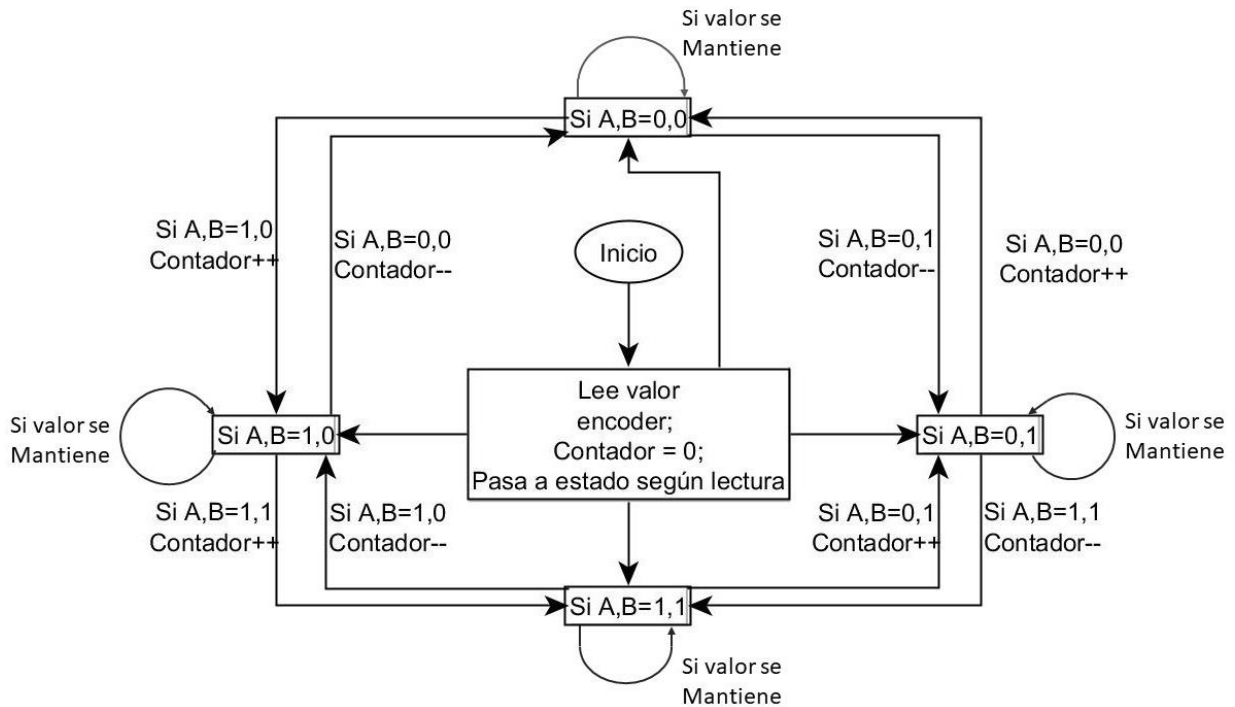


Figura 2.3: Diagrama de flujo para el diseño del decoder.

2.1.2. Bloque de PWM

La modulación por ancho de pulso (PWM) es una técnica ampliamente utilizada para las labores de control de servomecanismos. Esta técnica consiste en generar un tren de pulsos con una frecuencia determinada, pero al cual se le puede modificar su ciclo de trabajo, es decir su relación ON/OFF. Estas modificaciones permiten dosificar la energía con la que se excita determinado mecanismo y con ello variar sus parámetros de funcionamiento. Es preciso establecer la frecuencia de operación, esta frecuencia es fija y está en función del mecanismo que se esté analizando, en la presente investigación se describe el procedimiento seguido para su determinación en el epígrafe 5.2.2. Caracterización del motor de DC JGB37-555B.

En el firmware desarrollado, ya establecida la frecuencia de trabajo, se modifica el ancho de pulso al leer una entrada de 8 bits (0 a 255), esta lectura es comparada con un contador interno

que se incrementa en función del reloj del sistema. Con estos datos, se realizan comparaciones para activar o desactivar banderas lógicas (ON/OFF). Cuando el contador llega a su valor nominal máximo, se reinicia. En la figura 2.4 se describe el procedimiento. De esta manera se garantiza la modificación del ciclo de trabajo del tren de pulso.

El control sobre la frecuencia de operación se realiza implementando un Flip-Flop tipo T que permite generar retrasos en las señales que se reciben a su entrada. Para ello se genera un divisor de frecuencias al contar un determinado número de ciclos de reloj.

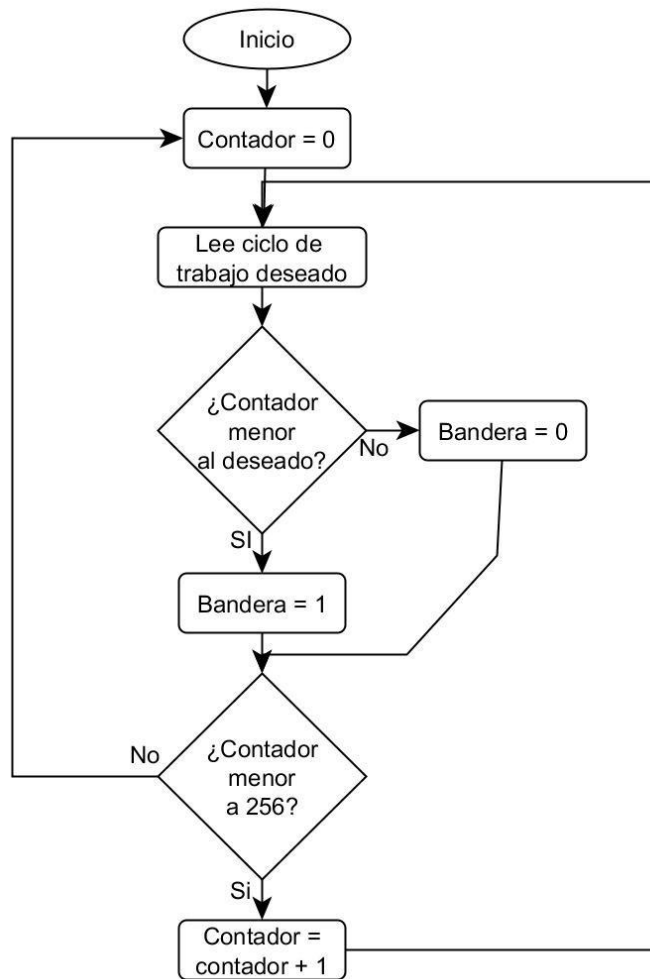


Figura 2.4: Diagrama de flujo para modificar el ciclo de trabajo del PWM.

En la figura 2.5 se observa el diagrama de flujo utilizado en la generación del nuevo reloj para la señal de PWM en el que se implementa la metodología descrita seguidamente para genera la señal con la frecuencia necesaria, en función de los requerimientos.

Para determinar el divisor de frecuencia adecuado, se utiliza la expresión (2.1), esta ecuación genera el número de retrasos o el contador a utilizar en el proceso. La frecuencia de operación nominal de la tarjeta es de 50 MHz, se le resta 1 para garantizar el adecuado tamaño del arreglo.

$$Div_{frecuencias} = \frac{Frecuencia\ FPGA - 1}{Frecuencia\ deseada} = \frac{50000000 - 1}{Frecuencia\ deseada} \quad (2.1)$$

Como el objetivo final es la generación de un ancho de pulso variable representado por 8 bits, es preciso generar un reloj secundario 255 veces más rápido que el reloj anteriormente generado, para ello se determina el nuevo contador como se muestra en (2.2).

$$Contador\ Reloj = \frac{Div_{frecuencias}}{255} \quad (2.2)$$

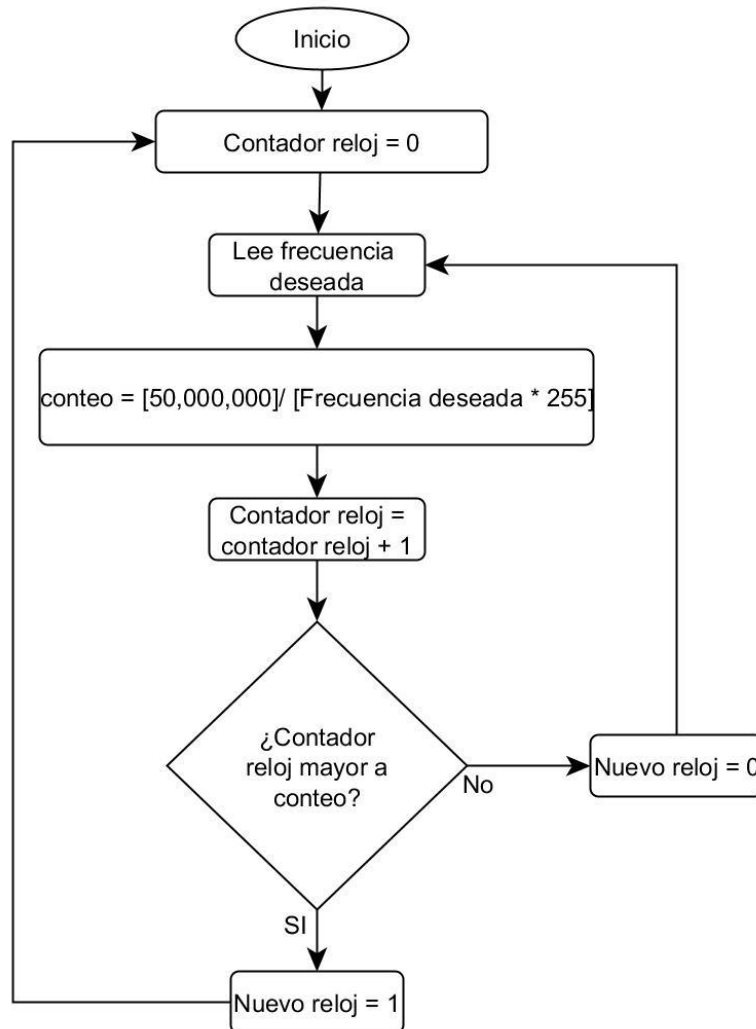


Figura 2.5: Diagrama de flujo para establecer la frecuencia de operación.

2.1.3. Bloque One-Wire

La detección de temperatura se realizará utilizando el sensor ds18b20, este sensor utiliza un protocolo bidireccional de comunicación denominado One-Wire, por ese motivo resulta necesario su implementación. Para trabajar de manera adecuada con el sensor es necesario cumplir con una secuencia de operación y respetar los tiempos de lectura y de escritura [35].

La secuencia es la que se presenta:

1. Inicialización del sensor
2. Se envían los comandos de ROM (requerido para cualquier intercambio de datos)
3. Se envían los comandos de funciones (requerido para cualquier intercambio de datos)

En la figura 2.6 se presenta el diagrama de flujo utilizado en la programación del sensor empleado. En este caso, se concatenan varios sensores a un mismo bus de datos para economizar la cantidad de terminales a utilizar y se alimentarán con una fuente externa para, de esta manera contar con una señal de indicación de conversión.

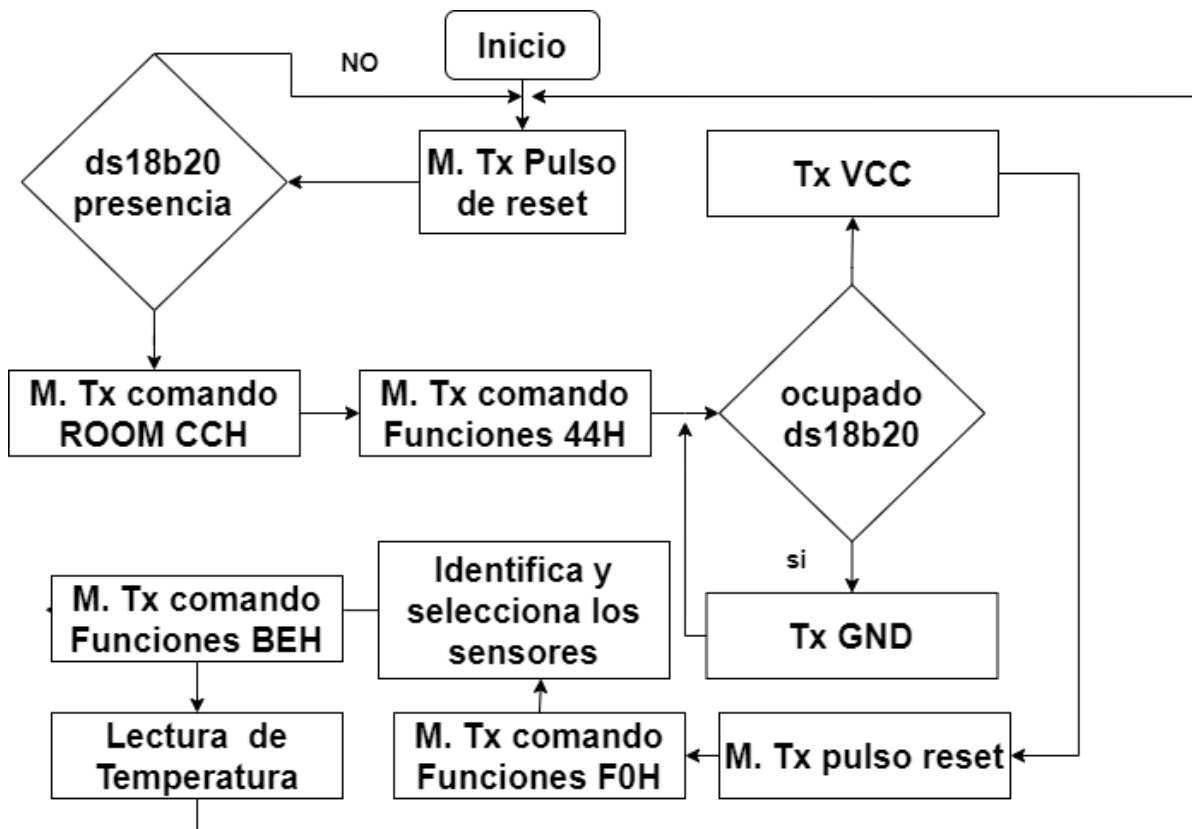


Figura 2.6: Diagrama de flujo para la operación del sensor de temperatura.

El proceso comienza cuando el maestro envía un pulso de reset a los dispositivos y espera a que los mismos respondan y confirmen su presencia en el bus de datos, así como que están listos para iniciar las operaciones. Una vez se confirmó la presencia de los dispositivos se envían los comandos de ROM para posteriormente comenzar la conversión de temperatura. Se generan demoras mientras dura el proceso de conversión. Una vez terminado el proceso,

el sensor lo indica y se procede a realizar la lectura de los registros que contienen el valor de temperatura, se procede a realizar un reinicio del sistema y se repite la subrutina.

Al implementarse el protocolo para varios sensores conectados a un único pin de datos, resulta necesario que el maestro descubra los códigos de identificación de cada uno de los sensores a la hora de realizar las operaciones para, de esta manera evitar colisiones de datos y pérdidas de información, por ello se utiliza el comando ROM F0H que permite determinar el correspondiente identificador a la par que se activa o selecciona el sensor correspondiente.

El firmware desarrollado respeta las características de los sensores y del protocolo de comunicación anteriormente expuesto. Su implementación permite realizar la selección y configuración de cada uno de los sensores con los cuales se cuenta, así como la obtención del valor correspondiente de temperatura para su posterior procesamiento por parte del microprocesador. La base de tiempo se ha definido en $1 \mu s$ y se genera a partir del reloj interno de la FPGA.

En la figura 2.7 se observa el firmware desarrollado; por cuestiones prácticas se separaron dos bloques. Un bloque para cada dos sensores, de esta manera se logra disminuir las interacciones al interior del FPGA para evitar lecturas erróneas. Es preciso la implementación de un bloque auxiliar de lectura de datos para un correcto manejo del puerto bidireccional en tercer estado, ello con vistas a evitar posibles cortocircuitos en la tarjeta FPGA.

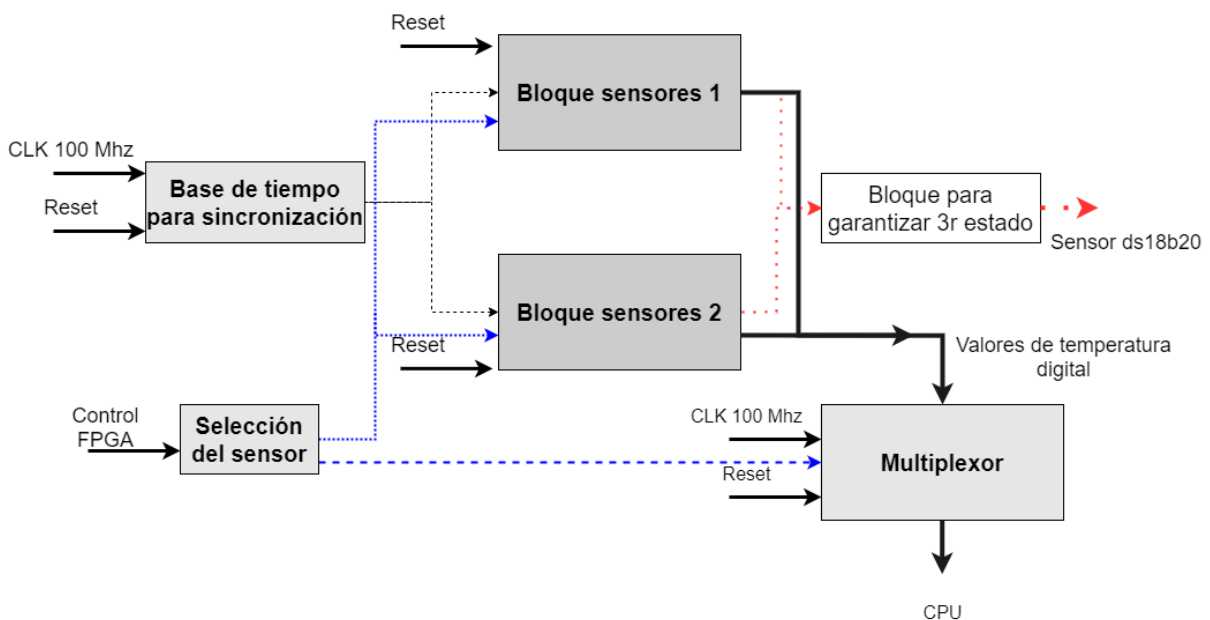


Figura 2.7: Diagrama a bloques del firmware para la selección de los sensores de temperatura.

El protocolo utilizado permite el empleo de un solo bus de datos, de ahí que es necesaria la incorporación de un bloque para multiplexar la selección de cada uno de los sensores y el correcto envío de la información al microprocesador. La selección del sensor a activar en cada caso se realiza mediante una variable de control desde el propio microprocesador. De la anterior manera se logra la selección adecuada de cada sensor y el posterior procesamiento del valor de temperatura entregado por estos.

2.1.4. Bloque de Flujo

En la figura 2.8 se presenta el diagrama para determinar el flujo de agua circulante. Básicamente se realiza un conteo de la cantidad de pulsos provenientes del sensor de efecto Hall. El conteo se realiza por simplicidad durante 1s, cuando ha transcurrido ese tiempo se procede a enviar esa información al microprocesador.

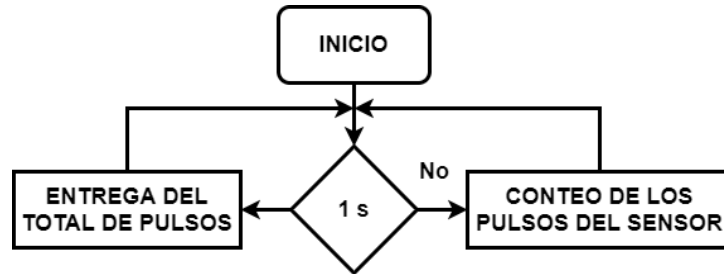


Figura 2.8: Diagrama de flujo para la detección de pulsos.

En la figura 2.9 se presenta el bloque de firmware implementado para determinar el valor de conteo correspondiente al flujo de agua censada, se observa el bloque que se utiliza para realizar el conteo de los pulsos provenientes del sensor, así como un arreglo de compuertas lógicas para realizar la habilitación de lectura de uno u otro sensor disponible. Esta elección se realiza mediante software.

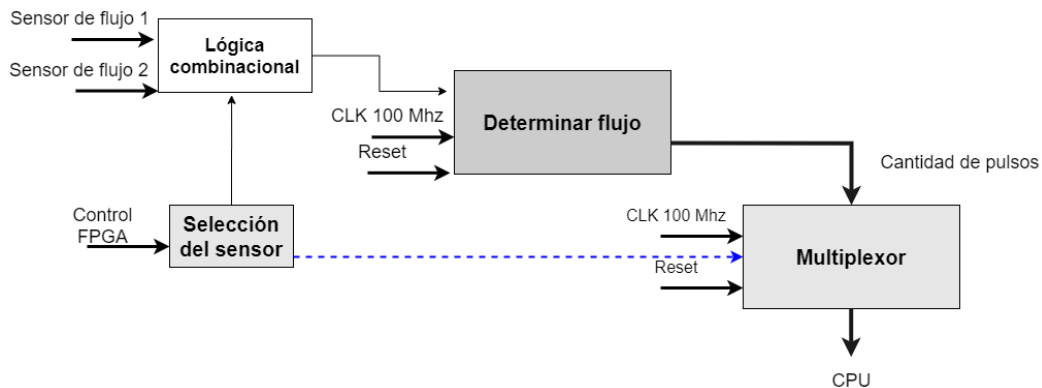


Figura 2.9: Diagrama a bloques del firmware implementado para la detección de flujo.

2.1.5. Bloques de actuadores de entrada y actuadores de salida.

Resulta necesario la inclusión de terminales de entrada/salida que se encuentren directamente conectados al microprocesador con fines generales. En la figura 2.10 se observa el diagrama a bloques de los actuadores de entrada diseñados. En este caso, es posible conectar a estos terminales tanto los fines de carrera (actuadores para inhabilitar el funcionamiento de los robots lineales desarrollados en la otra investigación), para seguridad de los robots, como sensores de tipo general. Existe un bloque a nivel firmware al interior del FPGA que se encarga de activar estos terminales para ser utilizado de una u otra manera, logrando de esta manera versatilidad en los diseños. Es importante señalar que los dos modos de operación de

estos terminales son mutuamente excluyentes y por defecto se encuentran activos los fines de carrera.

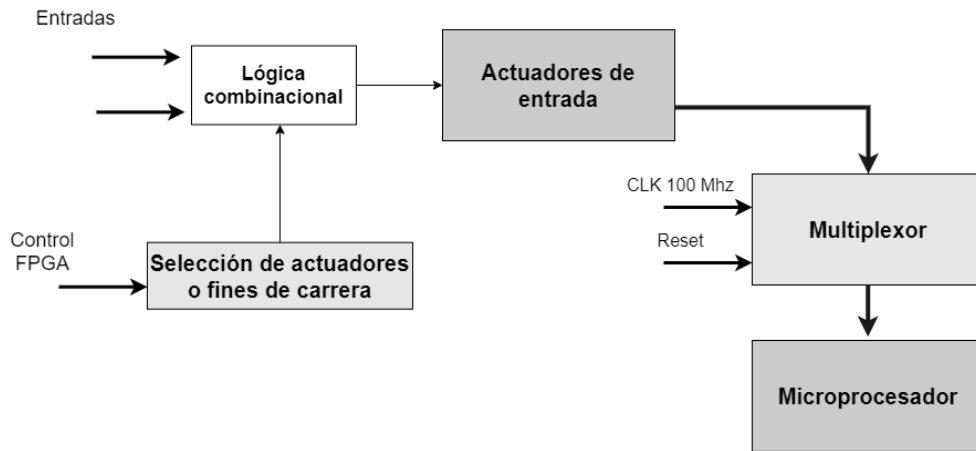


Figura 2.10: Diagrama a bloques del firmware para los actuadores de entrada.

De la misma manera que los actuadores de entrada, es preciso definir a los actuadores de salida. En la figura 2.11 se presenta su diagrama a bloques. En este caso no existe nada más conectado a estas salidas, permitiendo de esa manera controlar diferentes dispositivos con propósitos generales directamente desde el FPGA.

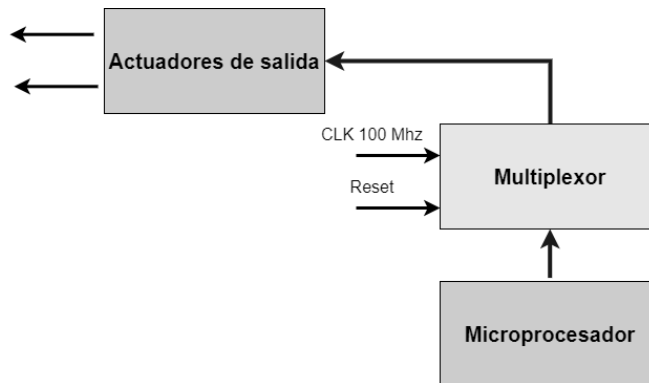


Figura 2.11: Diagrama a bloques para el firmware de los actuadores de salida.

2.1.6. Conversor digital-analógico.

Se tratan de 8 salidas conectadas directamente al microprocesador, a las cuales se les puede conectar un circuito integrado de conversión digital-analógico como hardware externo para obtener el correspondiente valor de acuerdo con el código digital de salida del microprocesador. En el caso del presente desarrollo se utiliza el bit menos significativo de salida y se acopla un hardware para controlar la etapa de potencia correspondiente al sistema de alarmas.

2.2. Puertos de entrada/salida y mapa de memoria RAM

Luego de definir los bloques de firmware desarrollados es necesario realizar su mapeo en los puertos disponibles para permitir la comunicación efectiva. En la tabla 2.2 se aprecia la distribución realizada de los recursos disponibles.

Tabla 2.2: Mapa de puertos de entrada desarrollado.

					Pines físicos	
PT1	No usar PT1[32]	Posición Encoder [31..1]			N16	M16
PT2	No usar PT2[32]	Posición Encoder [31..1]			M20	M21
PT3	No usar PT3[32]	Posición Encoder [31..1]			K21	K22
PT4	No usar PT4[32]	Posición Encoder [31..1]			D17	K20
PT5	No usar PT5[32]	Fines de carrera [24-21]	Actuadores Entrada [20..17]	2 ADC [16..1]	-	-
Pines físicos			T22, R21, R22, N21		-	-
PT6	No usar PT5[32]	One-Wire [16..1]			T19	-

El acceso a los recursos disponibles resulta intuitivo y se reduce a la conformación adecuada de las palabras de control de acuerdo con la acción o acciones que se quieran desarrollar y su oportuno envío al puerto de entrada/salida correspondiente. Al interior de la tarjeta los multiplexores y demultiplexores se encargan de direccionar y accionar de manera adecuada el recurso solicitado en cada oportunidad. En la tabla 2.3 se presentan los puertos de salida implementados. Como se observa tenemos acceso a las configuraciones de los PWM a los que se les especifica su dirección de giro, así como su ciclo de trabajo (0 - 1000) y el periodo de trabajo (0.0001s - 0.1s).

Tabla 2.3: Mapa de puertos de salida desarrollado.

						Pines físicos	
PT1	No usar PT1[32]	PWM 1 [31..26]	Dir Giro [25]	DeltaT [24..11]	AP [10..1]	F14	-
PT1	No usar PT1[32]	PWM 2 [31..26]	Dir Giro [25]	DeltaT [24..11]	AP [10..1]	F15	-
PT1	No usar PT1[32]	PWM 3 [31..26]	Dir Giro [25]	DeltaT [24..11]	AP [10..1]	M18	-
PT2	No usar PT1[32]	DAC [19..12]	Actuadores de salida [11..9]	Selector de sensor de temperatura [8..7]	Fines de carrera [6..1]		
Pines físicos		K16	P19, L22, M22	-	-		

Se aprecia que en el puerto PT2 se tiene acceso a varios recursos entre los cuales se encuentra la elección del sensor de temperatura a activar, así como a los actuadores de salida o el conversor digital-analógico.

Es necesario organizar el acceso de los diferentes recursos a los espacios de memoria para evitar la pérdida de valores o la corrupción de la información que se procesa. Existen espacios de memoria preestablecidos de antemano para la manipulación de los puertos de entrada desde la interfaz de LabView (se han implementado 15 parámetros o puertos accesibles desde la interfaz gráfica para acciones de configuración y control) como se especificó anteriormente.

De los espacios de memoria de usuario disponibles serán utilizados los siguientes espacios. En la tabla 2.4 se presenta la localización ocupada, así como su descripción.

Tabla 2.4: Distribución de localizaciones de memoria.

Espacio de memoria	de	Objeto
40		Posición actual del encoder (robot chopper)
41		Valor de par calculado para el chopper
42		Valor de flujo de agua del láser
43		Valor de flujo de agua del divisor
44		Nivel tanque auxiliar
45		Nivel tanque principal
46		Temperatura del láser
47		Temperatura del divisor del atenuador de potencia óptica
48		Temperatura del agua almacenada para refrigeración

2.3. Conclusiones del capítulo

Como consecuencia de los requerimientos experimentales se modificó el sistema de adquisición y procesamiento de datos, al diseñar diferentes bloques funcionales de firmware para realizar el control sobre los sistemas que se desarrollan. Se especificó la distribución de memoria. Las modificaciones permiten la comunicación efectiva desde y hacia el microprocesador y con ello se garantizan las diferentes subrutinas de control.

Capítulo 3 : Sistema de control de nivel de agua

Seguidamente se propone una solución a la variación o la inestabilidad en el flujo de agua dentro del taller, ello como resultado de la propia configuración existente, mencionada con anterioridad en el epígrafe 1.2. Desarrollo del experimento. Con el objetivo de eliminar esa problemática y garantizar la disponibilidad del agua es preciso el desarrollo de mecanismos de almacenamiento y de métodos que permitan conocer esta información en tiempo real.

Se propone el empleo de dos recipientes para realizar el almacenamiento del agua necesaria en el sistema de enfriamiento, automatizando los procesos de llenado-drenaje de estos, al tiempo que se obtenga la información referente al nivel de agua disponible y se incluyan las alarmas en caso de roturas o fallas en los sistemas.

En la figura 3.1 se presenta el diagrama general propuesto para este caso. Se aprecia la existencia de 6 electrodos de nivel para determinar la cantidad de agua almacenada en cada uno de los recipientes. Como actuadores se propone el empleo de 3 electroválvulas, una para controlar la entrada de agua, otra para controlar el proceso de drenaje y una tercera para permitir el intercambio entre ambos depósitos.

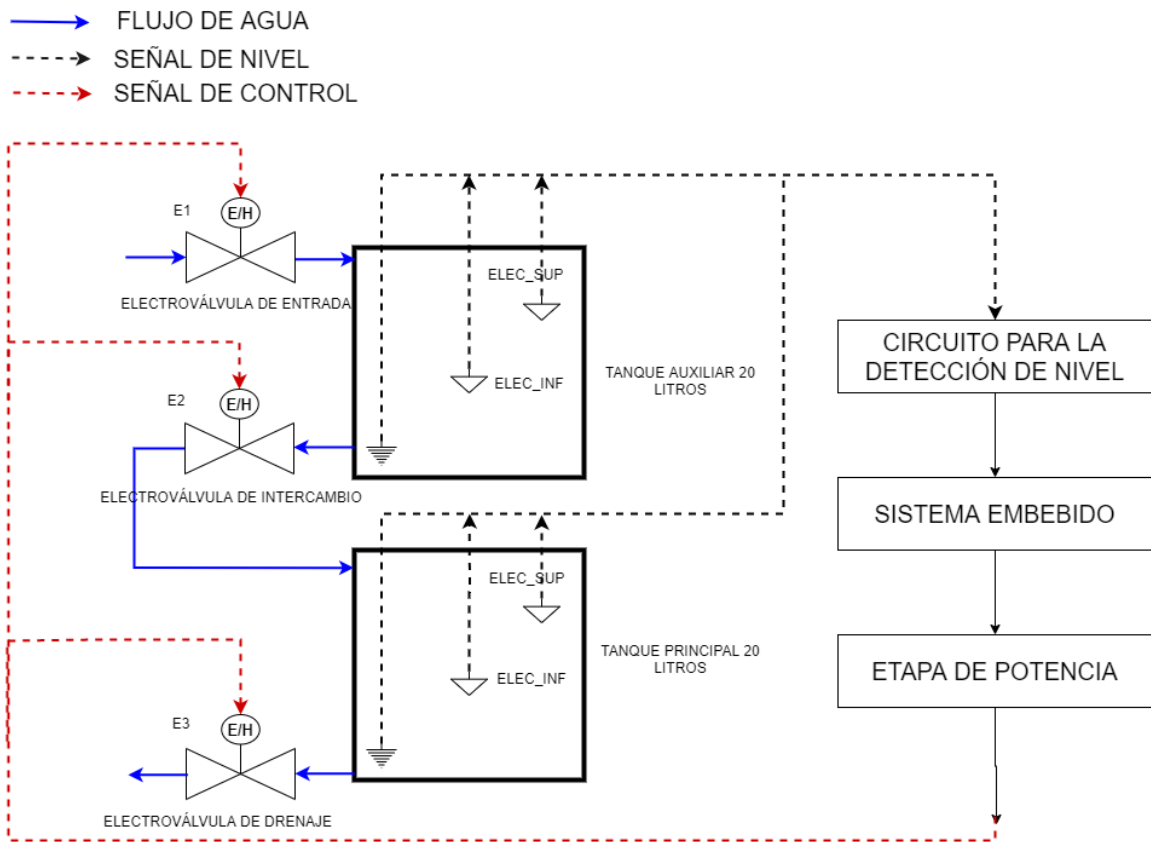


Figura 3.1: Diagrama general para el control de llenado.

Se propone colocar los recipientes de tal forma que no sea necesario el empleo de bombas eléctricas para transferir el agua de uno a otro, en vez de ello se empleará la gravedad, reduciendo de esta manera el consumo de portadores energéticos. Otro punto importante está en determinar el material del cual estarán confeccionados. Se proponen dos variantes: utilizar

tanques metálicos (aluminio o acero inoxidable) o plásticos. En el primer caso, los tanques serían empleados además como disipadores auxiliares del sistema de enfriamiento que se desarrollará con posterioridad, al utilizar sus propiedades disipativas; si se emplean tanques de plástico es necesario considerar sus características aislantes.

Seguidamente se analiza los beneficios o desventajas de cada uno de los tipos de materiales anteriormente señalados y se seleccionará el más adecuado en función de los intereses experimentales.

3.1. Efectos corrosivos del agua en metales

Cuando se utilizan elementos metálicos: electrodos, tanques, u otros; es necesario considerar el comportamiento de la corrosión de estos. La corrosión se refiere al deterioro de un material debido a la acción del medio ambiente que lo rodea. El término es utilizado especialmente para referirse al deterioro de los metales, aunque otros elementos de igual manera presentan este tipo de fenómeno [36, 37].

Este fenómeno genera cambios en las propiedades físicas de los materiales, lo cual suele ocasionar fallas inesperadas disminuyendo la fiabilidad de los sistemas desarrollados. La mayoría de estos cambios pueden pasar de manera desapercibida ante inspecciones visuales volviendo más importante su previsión adecuada. Existe una relación directa entre la velocidad de corrosión de los metales y la cantidad de energía que se aplica a su mineral base para transformarlo en un metal comercial. Esta energía varía con relación a uno u otro metal; es relativamente alta en metales tales como el magnesio, el aluminio o el hierro, mientras que es baja en metales como el oro y la plata; de ahí que la vulnerabilidad a los efectos de la corrosión sea mayor en los primeros que en los segundos [36, 37]. Otro aspecto importante por considerar resulta en las propias características del agua que se emplea para refrigerar: su dureza, cantidad de cloro o la presencia de sales disueltas que pueden afectar a los metales.

Han sido considerados dos tipos de sistemas empleando los recipientes metálicos: en primer lugar, el empleo de aluminio y en segundo lugar el empleo de acero inoxidable; seguidamente se analizarán sus características y resistencia a la corrosión.

3.1.1. Tipos de corrosión y factores ambientales

Existen varios tipos de procesos corrosivos diferentes que se caracterizan en función de la naturaleza de los materiales, así como de los factores ambientales [38], entre ellos:

- Corrosión uniforme: se refiere a la destrucción de la película pasiva que recubre al metal debido a un medio ambiente agresivo. Toda la superficie se corroe de manera uniforme y la pérdida de material se expresa en micras/años. Este tipo de corrosión se observa cuando se sumerge al metal en ácidos, sobre todo cuando los materiales son a base de hierro no aleado con metales inoxidables como el níquel o el cobre.
- Corrosión intersticial: se refiere a la corrosión en hendiduras y ocurre en espacios confinados donde la concentración de oxígeno es mucho menor que en el resto del sistema lo cual provoca que actúe como ánodo propiciando el proceso corrosivo.

- Corrosión galvánica: Ocurre cuando existe una unión de tipo física o eléctrica entre materiales de diferente electronegatividad. En este caso el material con menor potencial electroquímico se corroe.
- Corrosión por picadura: resultado de una insuficiente resistencia a la corrosión en entornos clorados muy agresivos. Se inicia con la aparición de irregularidades en la superficie o a inclusiones no metálicas muy pequeñas. Se propaga porque las reacciones electroquímicas en la cavidad no se ven afectadas por la re-pasivación.

El medio ambiente circundante tiene un importante papel en la forma en la cual se desarrollan los procesos corrosivos y se ve determinado por varios factores entre los que se menciona:

1. Acidez del medio: las soluciones ácidas son más corrosivas que las soluciones neutras o alcalinas debido a la disponibilidad de iones de hidrógeno libres que son capaces de reaccionar con el medio circundante y comportarse como ánodo.
2. Sales disueltas: la concentración de sales en el agua genera una disminución del pH de la disolución acelerando los procesos de corrosión por acidez.
3. Temperatura: A mayor temperatura disminuye la resistencia a la corrosión.
4. Concentración de cloro [39].
5. Tipo de acero inoxidable del que esté confeccionado el recipiente [39, 40].

En el taller se presentan algunas de las condiciones o factores ambientales descritos con anterioridad. Se procedió a realizar la evaluación experimental de un recipiente de aluminio. En la figura 3.2 se observan los resultados de utilizar por 2 semanas el mencionado recipiente. Se aprecia la acumulación de sales sobre la superficie de este (debido a la alta dureza del agua) y como esos montículos se traducen en una corrosión por picadura apreciable. Como resultado de estas evaluaciones y a que el comportamiento en el caso del acero inoxidable es similar, se decidió no utilizar este tipo de material para almacenar el agua y se propone sustituir los tinacos metálicos por recipientes de polímeros plásticos.

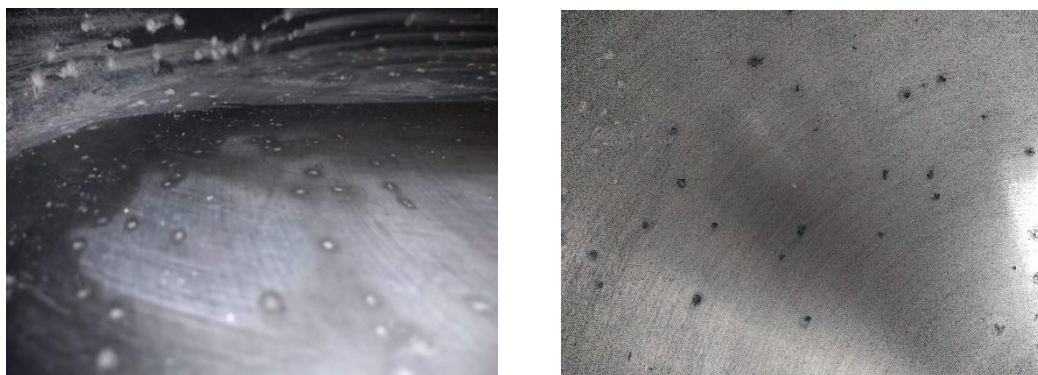


Figura 3.2: Efectos corrosivos del aluminio en las condiciones del laboratorio.

Los recipientes construidos de polímeros plásticos no presentan el inconveniente de la corrosión, sin embargo, se producen procesos de incrustación de las sales disueltas en el agua, estas sales es preciso removerlas con determinada periodicidad para evitar que su acumulación impida la circulación del agua por los conductos y la correcta refrigeración del sistema. Otra problemática para tener en cuenta es el comportamiento del plástico como aislante, lo cual nos imposibilitaría su utilización como disipador auxiliar de la potencia del láser. No obstante, teniendo en cuenta la problemática causada por la corrosión, la cual pone

en riesgo todo el sistema, se propone el empleo de tanques de polímero plástico para almacenar el agua utilizada en el sistema de enfriamiento.

3.2. Sistema para la detección de nivel

Un correcto funcionamiento del sistema pasa por determinar en tiempo real el nivel de agua existente en cada uno de los recipientes, esta problemática tiene diferentes soluciones comerciales englobadas dentro de los denominados sensores de nivel. Un sensor de nivel es un dispositivo electrónico que permite realizar mediciones sobre la altura de un líquido, generalmente funcionan como alarmas para indicar el llenado cuando determinado umbral ha sido alcanzado o bien para realizar el seguimiento de un fluido dentro de determinado rango.

Existen diversos circuitos integrados comerciales que resuelven la problemática de la detección de nivel. Estos circuitos realizan la detección utilizando señales de corriente directa (CD). El empleo de la corriente directa cuando se trabaja con agua genera procesos electrolíticos en la misma. En estos procesos ocurre una ruptura de la molécula de agua. El agua está formada por dos átomos de hidrógeno unidos a un átomo de oxígeno. Los enlaces son covalentes debido a que comparten un par electrónico. En este caso, el oxígeno tiene un carácter no metálico mayor, es decir, posee mayor electronegatividad, el par electrónico del enlace está más cerca de este elemento que del hidrógeno y determina de esta manera la polaridad del enlace. Bajo estas condiciones, al aplicarse una fuente de energía de CD ocurre un proceso de oxidación-reducción de las moléculas de agua. Cada electrodo dentro del agua mantiene atraído a los iones de carga opuesta, de esta manera al aplicarse una cantidad de energía suficiente, ocurren procesos de transferencia de electrones entre ellos y los iones lo cual genera la descomposición de la molécula de agua con la consecuente liberación del dióxígeno y un aumento de la concentración de hidrógeno. El aumento de la concentración de hidrógeno incrementa la acidificación del medio cercano a los electrodos, generando un proceso de deterioro progresivo de mantenerse un uso continuado.

Diferentes investigaciones han arribado a la conclusión que estos procesos se ven minimizados si se utilizan fuentes de corriente alterna (AC). Bajo esas condiciones ocurre un proceso de reducción de la irreversibilidad del proceso, es decir, actúa de manera tal que se despolariza el ánodo y el cátodo [41]; disminuyendo de esta manera la descomposición química del agua. Los resultados experimentales han arrojado que [42, 43]:

- La descomposición química generada por la corriente alterna es menor que aquella provocada por la corriente directa.
- La corrosión se comporta de manera proporcional a la corriente que circula por los electrodos.
- La cantidad de corrosión disminuye con el aumento de la frecuencia de trabajo.

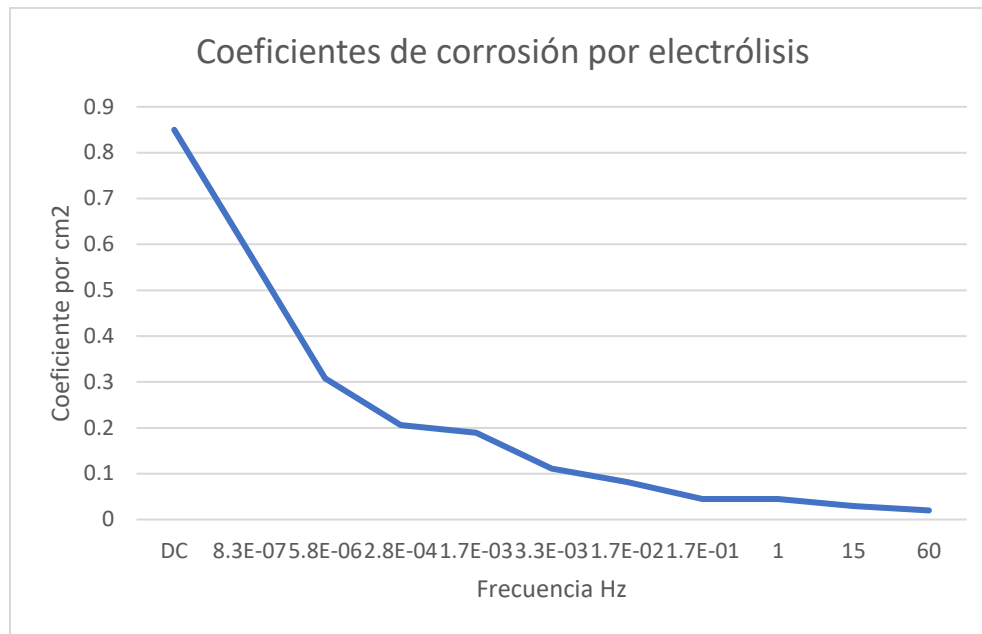


Figura 3.3: Coeficientes de corrosión vs frecuencia (fuente [43]).

En la figura 3.3 se presentan los resultados experimentales presentados en [43]. Se aprecia que a menores frecuencias de trabajo corresponden los mayores coeficientes de corrosión en el proceso electrolítico. Los menores coeficientes se obtienen para una frecuencia de trabajo de 60 Hz, coincidiendo con la frecuencia de la línea de alimentación comercial de AC.

3.2.1. Actuadores. Caracterización y hardware

Para solucionar las problemáticas derivadas del proceso de electrólisis del agua, se propone el diseño de un circuito de detección de nivel con AC. El circuito propuesto es el que se muestra en la figura 3.4, se compone de un transformador reductor de baja corriente de 110V:6V, un puente de diodos para rectificar la salida del transformador y un optoacoplador 4n25 con una resistencia de pull-up a la salida donde se obtiene la lectura de nivel. Su funcionamiento básico se detalla seguidamente.

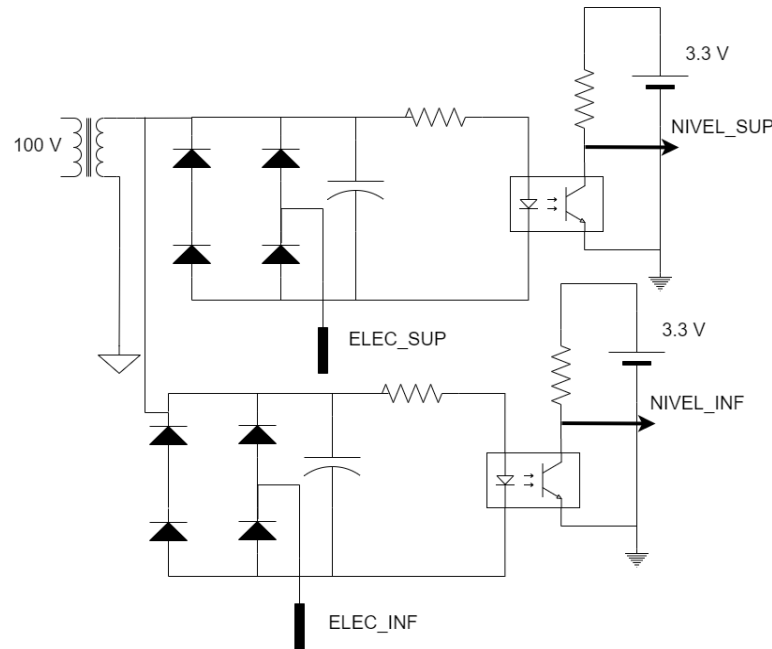


Figura 3.4: Circuito de detección de nivel para cada tanque.

Del transformador se conecta una de sus salidas directamente al puente de diodos y la segunda está conectada a tierra física en el fondo del recipiente que acumula el agua, es decir que si el tanque está vacío el circuito inicialmente se encuentra abierto, no circula corriente y por tanto a la salida del optoacoplador tenemos el voltaje de la fuente.

Los electrodos son colocados de manera tal en el puente de diodos que, al subir el nivel de agua y ponerse en contacto con ellos, circule la corriente y se cierre el circuito (aprovechando las propiedades conductoras del agua). Al cerrarse el circuito, el puente rectificador y el capacitor permiten obtener a su salida un voltaje de aproximadamente 4.6 V (considerando una caída de tensión de 1.4 V en los diodos en cada semiciclo) para excitar el circuito optoacoplador.

Al excitar el optoacoplador, comienza la conducción de su diodo led interno y a su vez induce que circule la corriente en el fototransistor interno, cuando esto ocurre, aparece una tierra virtual en el punto donde se está tomando las lecturas de nivel e indica que el nivel de agua está hasta esa posición.

En la figura 3.5 se presenta la implementación práctica del circuito descrito con anterioridad, se observa al transformador de bajo voltaje (encerrado en el cuadro de color azul); así como al resto de los componentes electrónicos utilizados.

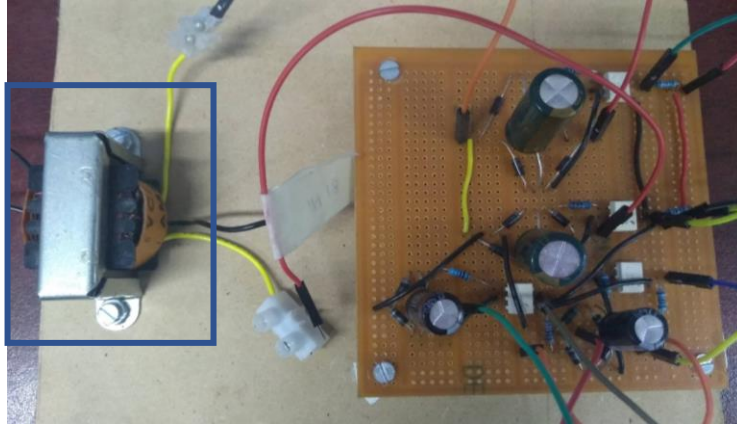


Figura 3.5: Implementación práctica del circuito para la detección de nivel en ambos tanques.

En la tabla 3.1 se muestra el significado lógico de las salidas del circuito anteriormente presentado. El sensor 1 corresponde al electrodo que se encuentra indicando el nivel más bajo (próximo a la base del recipiente), mientras que el sensor 2 indica el nivel máximo de agua permisible por los recipientes.

Tabla 3.1: Significado lógico del nivel de agua a la salida del hardware.

Sensor 1	Sensor 2	Significado
1	1	Depósito vacío
0	1	Nivel de agua bajo
1	0	Carece de sentido
0	0	Depósito lleno

La combinación lógica 10 carece de sentido porque indicaría que el circuito del sensor de posición más elevado está cerrado mientras que el circuito de la posición inferior se encuentra abierto, lo cual es físicamente imposible si consideramos la disposición espacial del agua.

3.3. Algoritmos para el control de llenado

En la figura 3.6 se presenta el comportamiento de los ciclos de histéresis para el llenado de los tanques auxiliar y principal. Se aprecia inicialmente que, mientras el nivel de agua se encuentra por debajo de la altura del sensor superior (SA), se mantiene energizada la electroválvula (trayectoria de color rojo). Una vez se ha alcanzado ese nivel y mientras este no disminuya (trayectoria de color verde), las electroválvulas se mantendrán des-energizadas. De la anterior manera se garantiza el proceso de llenado de los recipientes. En la figura SB se refiere al sensor inferior, en el eje Y se presentan los niveles de las electroválvulas donde ON corresponde a las electroválvulas encendidas y GND se refiere a las electroválvulas apagadas.

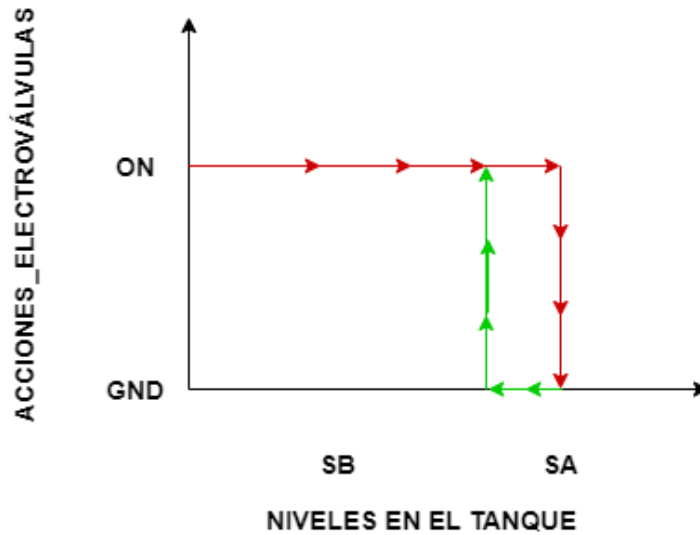


Figura 3.6: Ciclo de histéresis para el llenado de los tinacos.

En la figura 3.7 se puede observar la disposición espacial de los diferentes componentes del sistema de control: las electroválvulas de entrada, intercambio y drenaje, así como los sensores de nivel y la bomba de agua utilizada. Se aprecia además la manera en la que se colocaron los tanques para garantizar el empleo de la gravedad para el proceso de traspaso de agua.

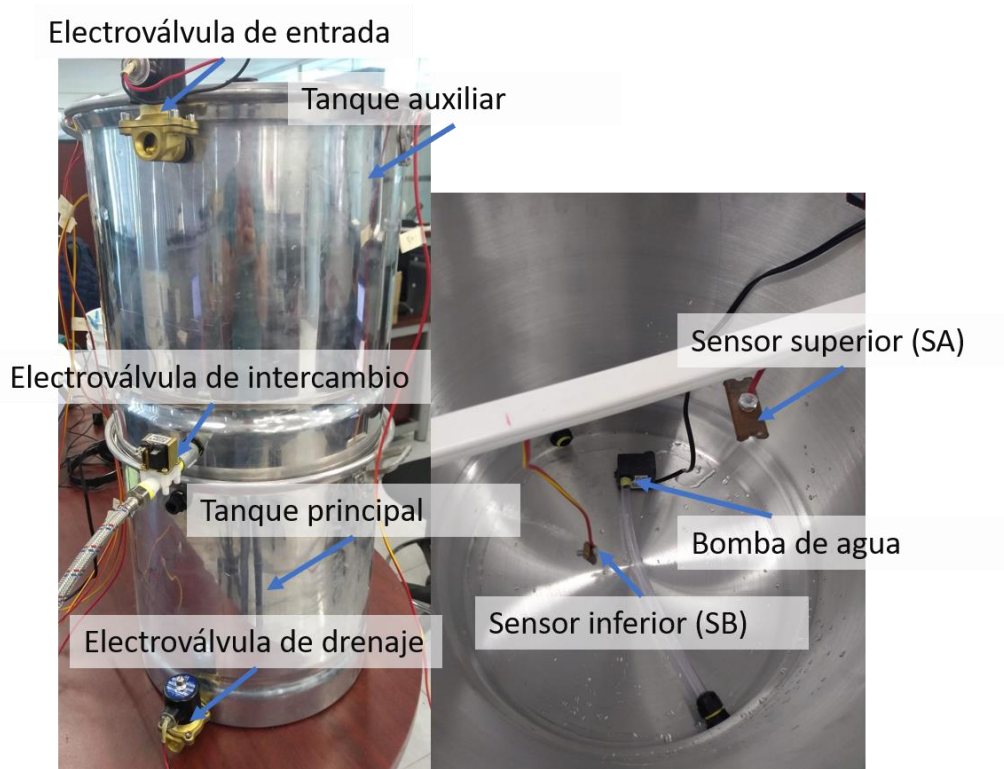


Figura 3.7: Disposición espacial de los componentes del sistema de control de nivel.

En la figura 3.8 se observa el diagrama de flujo concerniente a la acción de llenar el tanque auxiliar, donde las señales de salida E1, E2, E3 corresponden a las señales de control de las electroválvulas de entrada, intercambio y drenaje respectivamente.

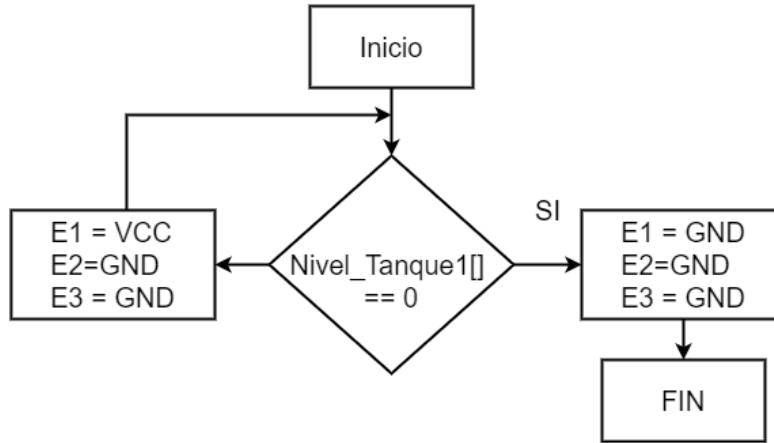


Figura 3.8: Diagrama de flujo para el control de llenado del tanque auxiliar.

El proceso inicia con la verificación de la disponibilidad de agua en el tanque, el valor del registro “Nivel Tanque 1” se obtiene utilizando los circuitos para la detección de nivel explicados con anterioridad. Si el recipiente se encuentra vacío “Nivel Tanque 1 = 3” o en su defecto en el nivel mínimo “Nivel Tanque 1 = 1”, entonces realiza la acción y se procede a energizar la electroválvula 1 que controla la entrada de agua hasta este recipiente. Constantemente se estará revisando el nivel de agua en el recipiente para evitar derrames y una vez sea la requerida “Nivel Tanque 1 = 0” se procede a retirarle la energía a la electroválvula, deteniendo la entrada de agua, concluyendo de esta manera el proceso.

En el caso de que se requiera llenar el tanque de agua principal, se procede como se indica en la figura 3.9. el procedimiento es similar al descrito con anterioridad; en esta ocasión se debe de comprobar inicialmente la disponibilidad de agua en el auxiliar (para garantizar que siempre exista reserva del líquido y de este modo evitar que el experimento no pueda ser llevado a cabo en determinado momento), si el tanque 1 tiene almacenada agua, se procede a energizar la electroválvula 2 que comunica los dos reservorios, lo que permitiría la libre circulación desde el tanque 1 hasta el tanque 2 (considerando que en este caso por la distribución que se propone la entrada de agua sería por gravedad, ver la figura 3.7.)

En todo momento se estará comprobando el valor de agua en el tanque 2 para evitar posibles derrames. Una vez se ha llegado al nivel máximo de este recipiente se procede a des energizar la electroválvula y de esta manera deja de circular agua.

El proceso más complicado a realizar está relacionado con el drenaje del sistema. Es necesario ejecutar este procedimiento para evitar la proliferación de microorganismos que puedan llegar a impedir la circulación de agua comprometiendo el desarrollo del experimento.

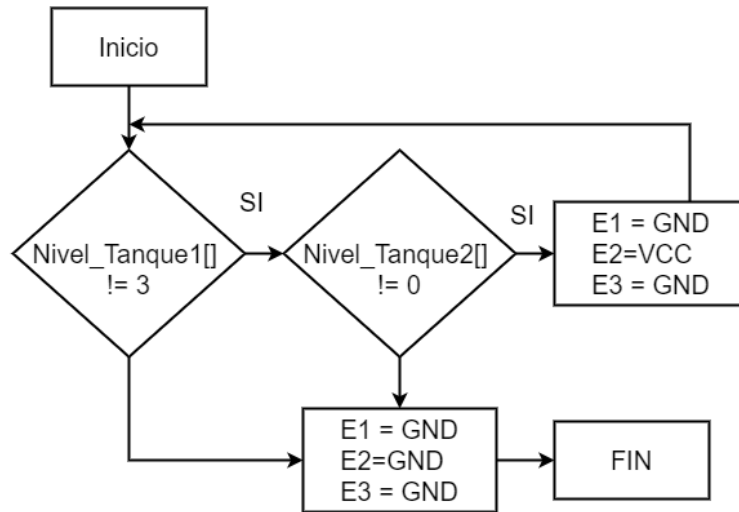


Figura 3.9: Diagrama de flujo para el control de llenado del tanque principal.

En la figura 3.10 se presenta el comportamiento de los ciclos de histéresis para el proceso de drenaje de los recipientes de agua. En este caso la diferencia con los resultados anteriores radica en que la electroválvula de llenado estará deshabilitada hasta tanto no se drene completamente el agua contenida en el tanque, el proceso se representa de color verde. Una vez que se ha drenado el tanque se procede a energizar esta electroválvula hasta tanto se alcance el nivel de agua del sensor superior (SA).

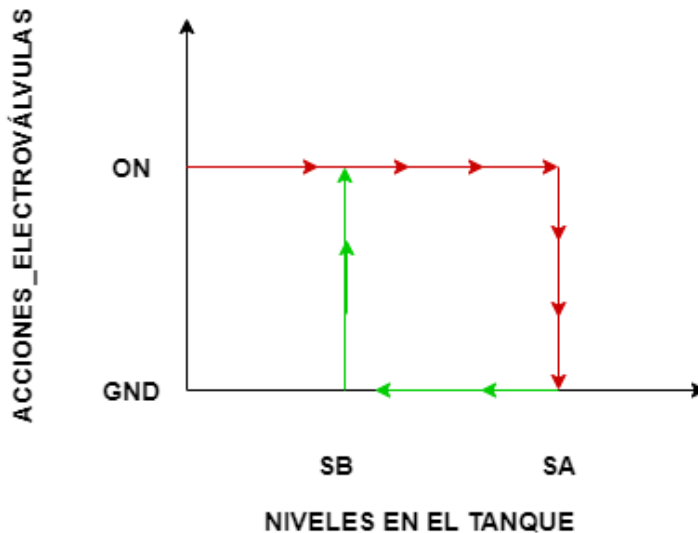


Figura 3.10: Ciclo de histéresis para el drenaje de los recipientes.

En la figura 3.11 se presenta el diagrama de flujo para realizar el proceso de drenaje del sistema. Se debe verificar la disponibilidad de agua en el tanque de reserva; si existe agua disponible, se prosigue de lo contrario no se realiza acción alguna.

Suponiendo que existe disponibilidad de agua, se procede a comprobar el nivel de agua en el tanque que se pretende drenar. Si el tanque tiene agua se procede a energizar la electroválvula 3 y permitir que el líquido escape, en caso contrario implica que ya terminó de evacuar el

agua y por tanto se comprueba la disponibilidad entre el tanque 1 y el 2. Mientras el tanque 1 no esté vacío y el tanque 2 no esté lleno se mantendrá energizada la electroválvula 2 permitiendo la circulación desde el tanque superior. Luego que termine el proceso por el cual se llena el tanque 2, se procede a realizar el proceso de llenado del tanque 1 tal como se explicó con anterioridad. Al finalizar el proceso de drenaje se emite una señal para indicar que el proceso ha concluido de manera satisfactoria.

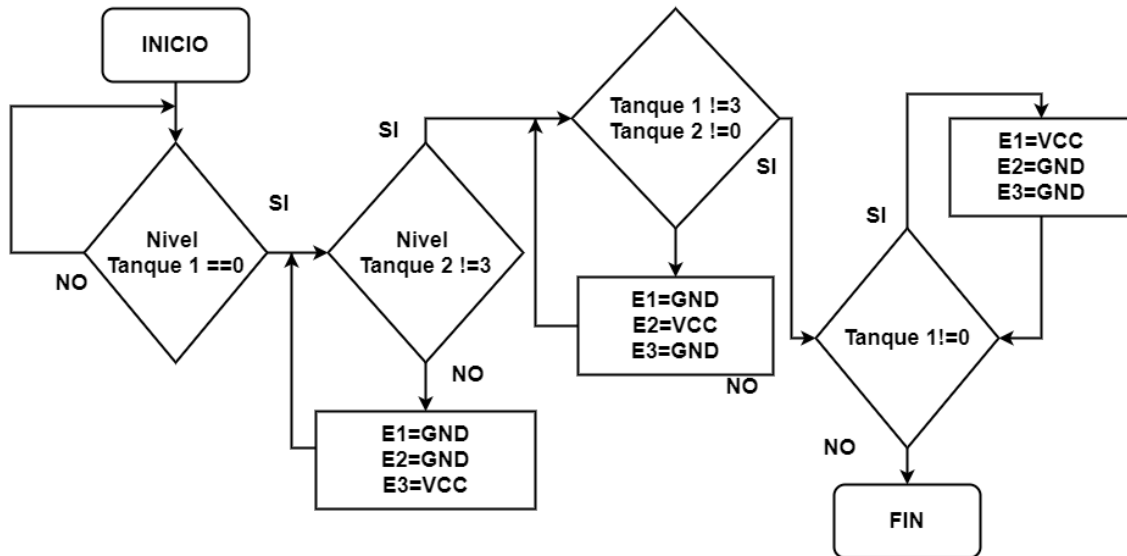


Figura 3.11: Diagrama de flujo para el control de drenaje del sistema.

3.3.1. Software

Una vez que han sido definidos los algoritmos para los procesos de llenado y de drenaje de los tinacos, se procede a su implementación en código D, figura 3.12. Lo primero que se realiza es la detección de nivel, para lo cual se leen los datos provenientes desde el puerto de entrada PT5, en ese puerto además de los valores de los electrodos, se lee de la misma manera los datos correspondientes a los convertidores analógico-digital, como de momento esos valores no se requieren solo vamos a procesar los datos de nuestro interés. Es importante señalar que los actuadores de entrada coinciden con los pines físicos de los fines de carrera, es preciso, por ese motivo, deshabilitar estos pines cuando son utilizados como entrada para los valores de los electrodos.

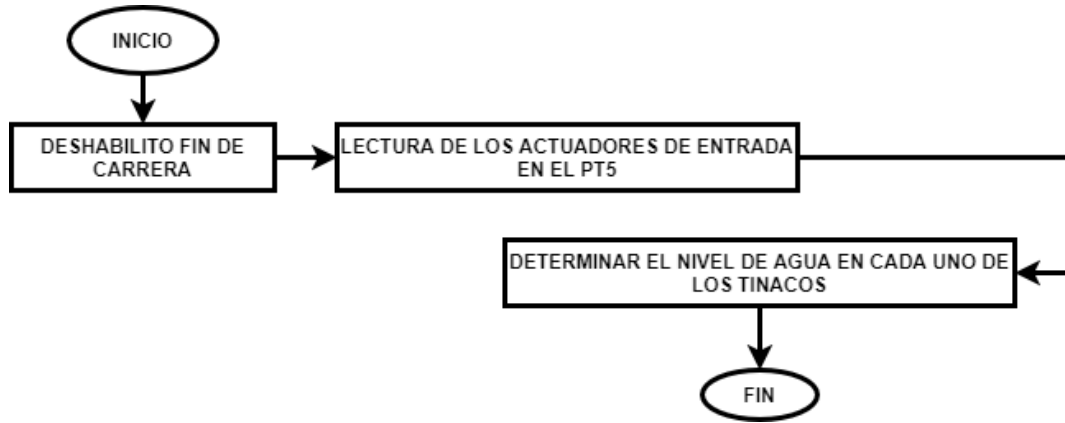


Figura 3.12: Diagrama de flujo para determinar el nivel de agua en los tinacos.

Seguidamente se presenta el correspondiente software desarrollado en código D que describe lo anteriormente especificado.

<pre> \ DETERMINANDO LOS NIVELES DE AGUA R3 =E 15 EPOR R3 PT2 \ LECTURA DE LOS ACTUADORES DE ENTRADA Y DETERMINANDO LOS NIVELES DE AGUA EN CADA UNO DE LOS TANQUES LPOR PT5 R4 \ VALORES A PUERTO R5 =E 983040 R6 = R4 AND R5 ERAM R6 52 </pre>	<pre> \ DESHABILITAR LOS FINES DE CARRERA PARA QUE FUNCIONES COMO ACTUADORES DE ENTRADA 4 BITS MENOS SIGNIFICATIVOS R3 =E 15 EPOR R3 PT2 \ LECTURA DE LOS ACTUADORES DE ENTRADA Y DETERMINANDO LOS NIVELES DE AGUA EN CADA UNO DE LOS TANQUES LPOR PT5 R4 \ TANQUE AUXILIAR R5 =E 196608 R6 = R5 AND R4 </pre>	<pre> R6 = INT2FP R6 R5 = 65536 R6 = R6 / R5 ERAM R6 44 \ TANQUE PRINCIPAL R5 =E 786432 R6 = R4 AND R5 R6 = INT2FP R6 R5 = 262144 R6 = R6 / R5 ERAM R6 45 </pre>
---	--	---

Una vez se ha determinado el nivel de agua en cada uno de los tanques se procede a almacenar estos datos en la RAM para posteriores análisis.

Para el accionamiento de las diferentes electroválvulas, figura 3.13, se escribe al puerto de salida PT2 el valor correspondiente en función del cumplimiento de las condiciones en cada subrutina. Las acciones por realizar son introducidas desde la interfaz de usuario diseñada en LabView.

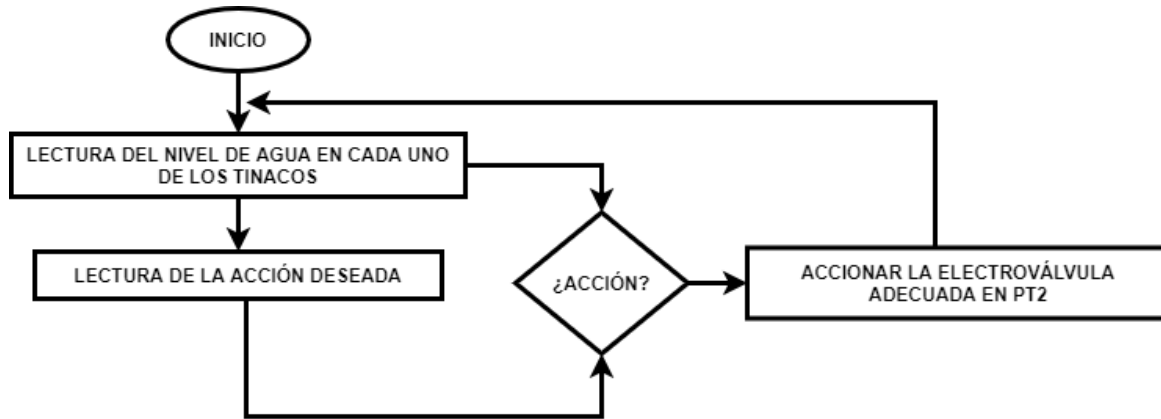


Figura 3.13: Diagrama de flujo para accionar las electroválvulas de control.

Seguidamente se presenta el correspondiente software desarrollado en código D que describe el proceso de drenaje por ser el de mayor complejidad.

```

\ DETERMINANDO LAS R5 =E 15 ERAM R5 50
ACCIONES A REALIZAR EPOR R5 PT2 ENDIF
LRAM 1 R3 R5 = 10 ENDIF
\ POSICION DE CASA ERAM R5 50 ENDIF
IF R3 = 0 ENDIF LRAM 44 R4
R5 =E 15 ENDIF LRAM 50 R6
EPOR R5 PT2 ENDIF IF R3 = 3
ENDIF LRAM 50 R4 IF R6 = 15
\ *** ACCION DE DRENAJE IF R3 = 3 IF R4 > 0
LRAM 44 R4 IF R4 = 10 R5 =E 271
LRAM 45 R6 IF R6 > 0 EPOR R5 PT2
IF R3 = 3 R5 =E 527 ENDIF
IF R4 = 0 EPOR R5 PT2 ENDIF
IF R6 < 3 ENDIF ENDIF
R5 =E 1039 ENDIF IF R3 = 3
EPOR R5 PT2 ENDIF IF R6 = 15
ENDIF IF R4 = 0
ENDIF IF R4 = 10 R5 =E 2063
ENDIF IF R6 = 0 EPOR R5 PT2
IF R3 = 3 R5 =E 15 ENDIF
IF R4 = 0 EPOR R5 PT2 ENDIF
IF R6 = 3 R5 = 15 ENDIF
    
```

3.4. Conclusiones del capítulo

De acuerdo con el comportamiento de la corrosión se definió el uso de tanques de plásticos para realizar el almacenamiento del agua que se utiliza como refrigerante. Dentro del análisis para aumentar la confiabilidad del sistema se diseñó un circuito para la detección de nivel a partir de la corriente alterna para disminuir los efectos electrolíticos en el agua, con resultados favorables. En función de los requerimientos experimentales se diseñaron las diferentes subrutinas para lograr el control sobre el nivel de agua almacenada en cada uno de los tanques.

Capítulo 4 : Sistema de control de temperatura

Se realiza una propuesta de diseño de un sistema de refrigeración para garantizar la temperatura de operación del espectrómetro fotoacústico; se proponen y caracterizan los sensores a emplear de acuerdo con las demandas y las necesidades del experimento que se desarrolla. El agua utilizada en el sistema de enfriamiento será almacenada en tinacos, considerando lo expuesto con anterioridad en el Capítulo 3.

4.1. Lazos de control de temperatura

En la figura 4.1 se presenta el esquema general propuesto para el sistema de control de temperatura; el mismo, extiende su funcionamiento tanto para el dispositivo láser como para el atenuador de señales ópticas, la única diferencia en ambos casos está en la potencia a disipar. Es necesario resaltar la necesidad de realizar la detección de nivel en los contenedores de agua para un correcto funcionamiento del sistema, verificando su disponibilidad; en caso de que no exista agua para realizar el proceso de enfriamiento no se desarrolla el experimento y se emite una alarma.

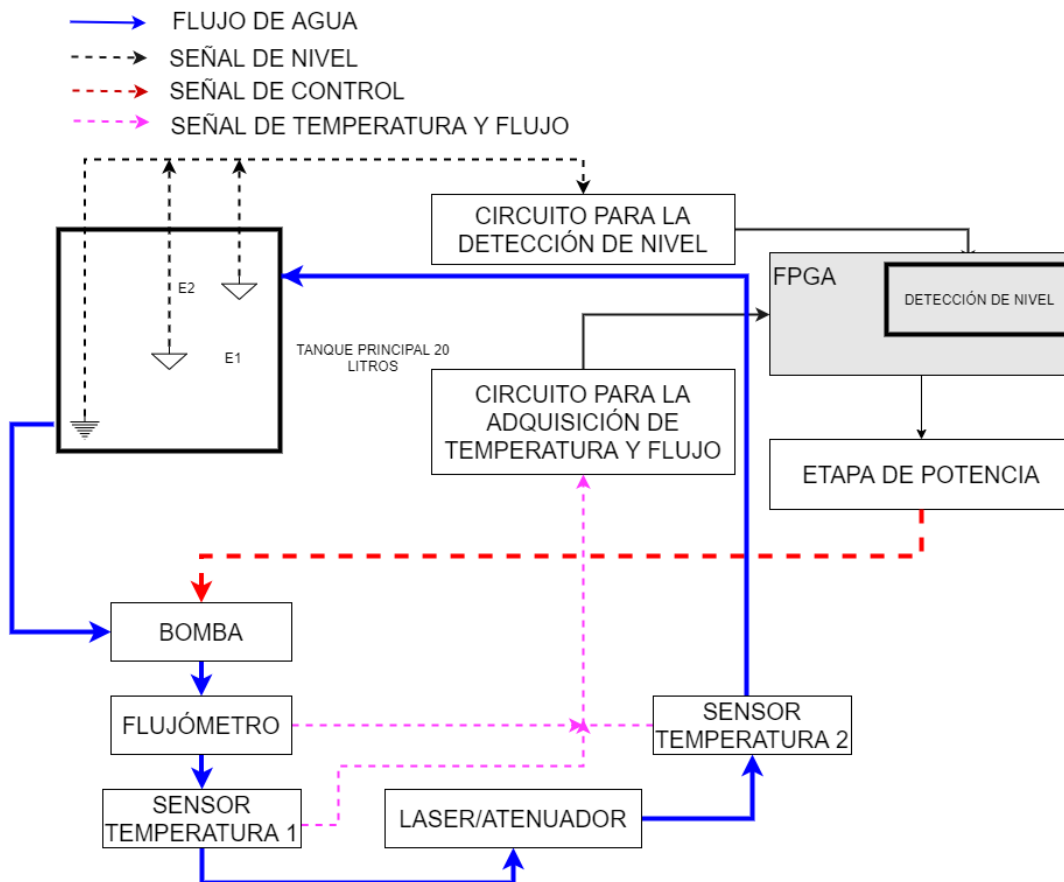


Figura 4.1: Diagrama general para el control de temperatura.

Como actuadores, se propone utilizar una bomba de agua para garantizar el flujo constante y de esta manera controlar la temperatura, así como el empleo de 2 sensores de temperatura

para su correcto monitoreo. Estos sensores serán colocados uno a la entrada del láser y otro a su salida, el control de temperatura se realizará tomando en consideración las lecturas provenientes del sensor de salida, mientras que el sensor de entrada se tomará como referencia para determinar la viabilidad del sistema o su capacidad real de enfriamiento. Para modificar la temperatura se procederá a variar el flujo de agua circulante por el interior de los dispositivos para lo cual se controlará la operación de las bombas (utilizando PWM variable) de acuerdo con una determinada ley de control. Se propone incluir 1 sensor de flujo colocado de manera tal que se garantice en todo momento el conocimiento de la circulación de agua existente. Seguidamente se procede a explicar y caracterizar cada uno de los componentes propuestos y en epígrafes posteriores se presentan los resultados experimentales obtenidos.

4.1.1. Sensor de temperatura ds18b20

El objetivo fundamental del sistema propuesto es el control de temperatura, de ahí que la primera problemática resulta en la correcta detección de esta, para lo cual se propone el empleo del sensor de temperatura ds18b20, figura 4.2.



Figura 4.2: Sensor de temperatura ds18b20.

El sensor propuesto es un termómetro digital que permite la conversión de la temperatura con una resolución programable de 9 a 12 bits. El sensor utiliza para comunicarse el protocolo bidireccional 1-Wire requiriendo una sola línea para la transmisión de datos; permite realizar mediciones con una precisión de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un rango que comprende desde los $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $85\text{ }^{\circ}\text{C}$, de manera adicional, se energiza con una fuente externa o en su defecto empleando el propio bus de datos [35]. En la Tabla 4.1 se presentan las principales características del sensor.

Tabla 4.1: Principales características del sensor ds18b20.

Modelo	Ds18b20
Voltaje de funcionamiento	5V
Resolución	9-12 bits
Rango de operación	-55°C a 125°C
Precisión	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ de -10°C a 85°C
Tiempo de conversión máximo	750 ms

Este sensor utiliza una lógica maestro-esclavo que permite conectar varios dispositivos al mismo bus de datos, economizando la cantidad de terminales a emplear; para ello utiliza un código de 64 bits que identifica a cada dispositivo de manera única [35] dentro del esquema de control.

En la figura 4.3 se presenta el diagrama a bloques de la estructura interna lógico-funcional del sensor en cuestión. El código de identificación se encuentra almacenado en la memoria interna del mismo, además la memoria contiene 2 bytes para almacenar el valor de temperatura, provee acceso a 2 byte para los registros de alarmas y 1 byte para la configuración de funcionamiento.

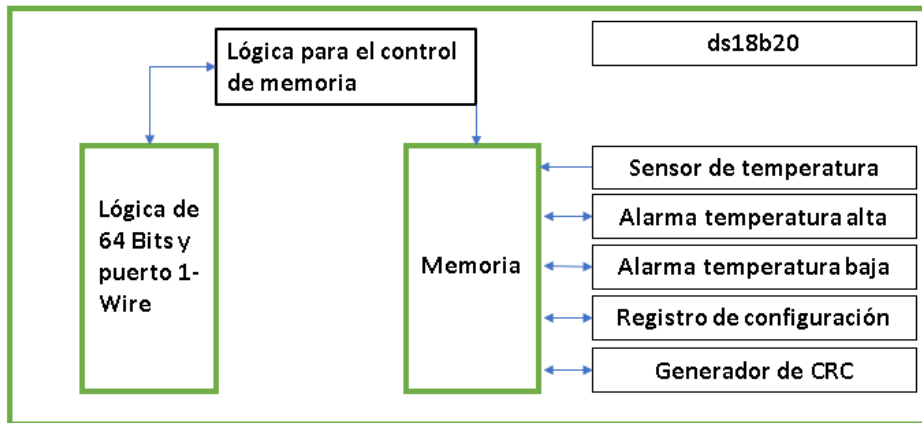


Figura 4.3: Estructura interna del sensor ds18b20.

Su principal ventaja está en ofrecer una medición de temperatura digital, permitiendo prescindir de los conversores analógicos-digitales, así como del ruido que afecta a los mismos. El sensor se encuentra calibrado en grados Celsius y el valor de temperatura convertido es almacenado en dos registros de 8 bits con la estructura que se muestra en la figura 4.4, los bits de signo (S) indican si la temperatura es positiva o negativa.

BYTE MENOS SIGNIFICATIVO	BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	BIT 0
	2^3	2^2	2^1	2^0	2^{-1}	2^{-2}	2^{-3}	2^{-4}
BYTE MAS SIGNIFICATIVO	BIT 15	BIT 14	BIT 13	BIT 12	BIT 11	BIT 10	BIT 9	BIT 8
	S	S	S	S	S	2^6	2^5	2^4
S = SIGNO								

Figura 4.4: Formato del registro de temperatura.

- Para una temperatura positiva S=0
- Para una temperatura negativa S=1

En el epígrafe 2.1.3. Bloque One-Wire se realizó el diseño del firmware necesario para la configuración, selección y operación de este sensor de manera adecuada y su comunicación con el FPGA.

En la figura 4.5 se puede observar la comparación entre los valores de temperaturas obtenidos con el sensor en cuestión y un sensor Lm35 a modo de patrón. Se aprecia que la diferencia

entre uno y otro se encuentra sobre los $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ por debajo de los errores máximos indicados por el fabricante. Por tanto, resulta adecuado el empleo del sensor ds18b20.



Figura 4.5: Caracterización del sensor ds18b20 utilizando un Lm35.

4.1.2. Sensor de flujo Yf-s201

Para determinar el flujo de agua circulante en el interior del láser y en el interior del atenuador de señales ópticas, se propone utilizar el sensor Yf-s201, figura 4.6, este sensor permite medir de forma general el flujo de un líquido determinado. Esta información será utilizada para una adecuada programación de las alarmas.



Figura 4.6: Sensor de flujo Yf-s201.

El sensor utiliza aspas para medir la cantidad de líquido que se ha movido a través de él. En su interior se encuentra un sensor magnético de efecto Hall, al circular el líquido se genera

un tren de pulsos de salida a una frecuencia proporcional a la velocidad del flujo. Cada pulso corresponde a 2.25 ml, por lo tanto, por cada litro de agua circulante se contarán 450 pulsos. En la Tabla 4.2 se presentan las principales características del sensor utilizado.

Tabla 4.2: Características del sensor de flujo YF-S201.

Tipo de sensor	Efecto Hall
Rango de medición	1 a 30 litros/minuto
Voltaje de operación	5 a 24 V
Presión máxima	2 MPa
Temperatura de operación	-25°C a 80°C
Precisión	±10%
Señal de salida	Frecuencia = 7.5* caudal (litro/minutos)
Pulsos por litro	450

En la figura 4.7 se presenta el diagrama de flujo del software para la adquisición de los valores de flujo. Una vez que se le solicita al FPGA que entregue el valor del conteo, epígrafe 2.1.4. Bloque de Flujo, este valor es procesado y se determina la cantidad de pulsos por minuto, posteriormente se convierte a *l/min* para lo cual se procede a dividir el valor de conteo entre los 450 pulsos por minutos. El valor obtenido es guardado en memoria RAM para su posterior empleo en la sección de alarmas.

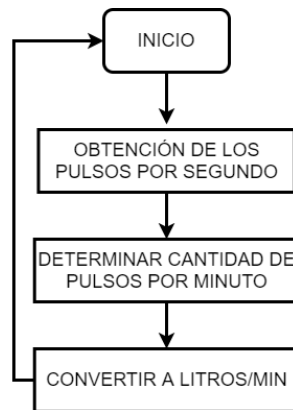


Figura 4.7: Diagrama para determinar el flujo de agua por minuto.

4.2. Caracterización inicial del sistema de enfriamiento

Para una correcta evaluación del sistema que se diseñó fue preciso realizar un proceso de caracterización del comportamiento de la temperatura cuando se encuentra en funcionamiento el experimento.

A partir de la configuración actual de trabajo en el Taller de Resonancia y Luminiscencia Magnética, se monitorea la temperatura de salida del agua del láser y además la temperatura a la cual se encuentra el agua en los tinacos. Se considera la temperatura de los tinacos para analizar la posibilidad de que la retroalimentación del agua modifique este parámetro y que esto repercuta en un funcionamiento no adecuado del control que se diseñó.

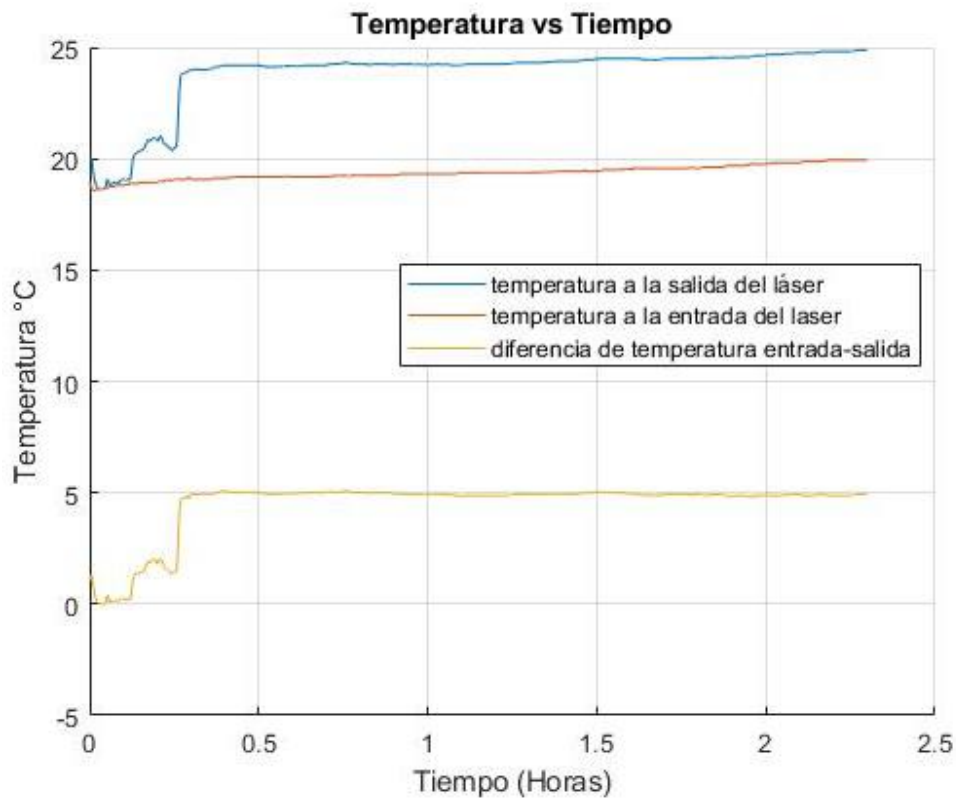


Figura 4.8: Caracterización inicial del sistema de enfriamiento.

En esta primera evaluación, se modificó la configuración real al garantizar un flujo constante con el empleo de una bomba de agua, el flujo estuvo determinado en 0.8 l/min. Bajo esas condiciones se obtuvieron los resultados experimentales que se muestran en la figura 4.8. De color rojo se representa la temperatura de almacenamiento en el tinaco y de color azul la temperatura en el interior del láser. Se observa como a medida que transcurre el tiempo los factores ambientales determinan un aumento de la temperatura de entrada, en este caso no se tuvo control sobre esta variable porque se desconoce la distribución de las tuberías en el interior del edificio. En el caso de la temperatura del láser se aprecia de la misma manera un leve desplazamiento debido a las razones anteriormente expuestas. Sin embargo, bajo esas condiciones se mantiene una diferencia de temperatura estable de 5 °C entre la entrada y la salida de agua del dispositivo, de color amarillo en la figura.

Esta caracterización inicial, nos arroja la necesidad de lograr una efectiva disipación de los 5°C a la hora de implementar el sistema diseñado y nos permite realizar una comparación efectiva de los resultados obtenidos.

El agua que se utiliza en las labores de enfriamiento modifica su temperatura por un proceso de conducción térmica debido a la diferencia de temperatura existente entre los medios. Para analizar esta problemática es preciso realizar algunas consideraciones:

- 1- El medio de trabajo es homogéneo e isotrópico lo que garantiza que las propiedades físicas sean las mismas en todos los puntos y no dependan de la dirección en la cual se midan.
- 2- Los parámetros físicos son constantes y uniformes en el medio
- 3- Las variaciones volumétricas generadas por los cambios de temperatura son despreciables con el volumen que se analiza y por tanto se puede despreciar el trabajo realizado.
- 4- La fuente de calor se encuentra distribuida de manera uniforme a lo largo del sistema.

Considerando además que el grosor del vidrio de la cavidad resonante es mucho menor que su radio, es posible estimar la densidad de flujo (q en W/m) que circula a través de la pared como:

$$q = -\frac{\lambda}{b}(T_2 - T_1) \quad (4.1)$$

Donde

- $\lambda = 0.598 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ es la conductividad térmica del agua
- $b = 0.0005 \text{ m}$ es el espesor aproximado de la capa de vidrio
- $T_2 - T_1 = 5^\circ\text{C}$ es la diferencia de temperatura

De la expresión (4.1) se desprende que el flujo transmitido vendrá dado por

$$d\phi = qdS = -\frac{\partial T}{\partial x}dS = -\frac{\lambda}{b}(T_2 - T_1)dS \quad (4.2)$$

Al integrar la expresión anterior se obtiene que la potencia total está dada por

$$\phi = \int_0^\phi d\phi = \int -\frac{\lambda}{b}(T_2 - T_1)dS = -\frac{\lambda}{b}(T_2 - T_1)S \quad (4.3)$$

Donde $S = 0.0188 \text{ m}^2$ es el área de la superficie de contacto entre los dos medios. Al utilizar la expresión (4.3) y sustituir los valores se obtiene que:

$$\phi = -\frac{\lambda}{b}(T_2 - T_1)S = 1126.6 \text{ W} \quad (4.4)$$

Luego en (4.4) se ha obtenido la potencia aproximada generada al interior del láser.

4.3. Algoritmo para el control de temperatura

La programación de los algoritmos de control, ver figura 4.9, se realizó utilizando el código de programación anteriormente expuesto, ver epígrafe 1.4.1. Código de programación “D”. Se aprecia el diagrama de flujo del proceso de control de temperatura de ambos dispositivos analizados (láser y divisor de potencia). Para efectuar un correcto control de esta variable física es preciso conocer en cada momento:

- Nivel de agua disponible en el tanque principal.
- Valor del flujo que está circulando en el interior del espectrómetro.
- Temperatura del líquido refrigerante, antes y después de atravesar la planta (resulta imposible objetivamente conocer la temperatura dentro de la planta).

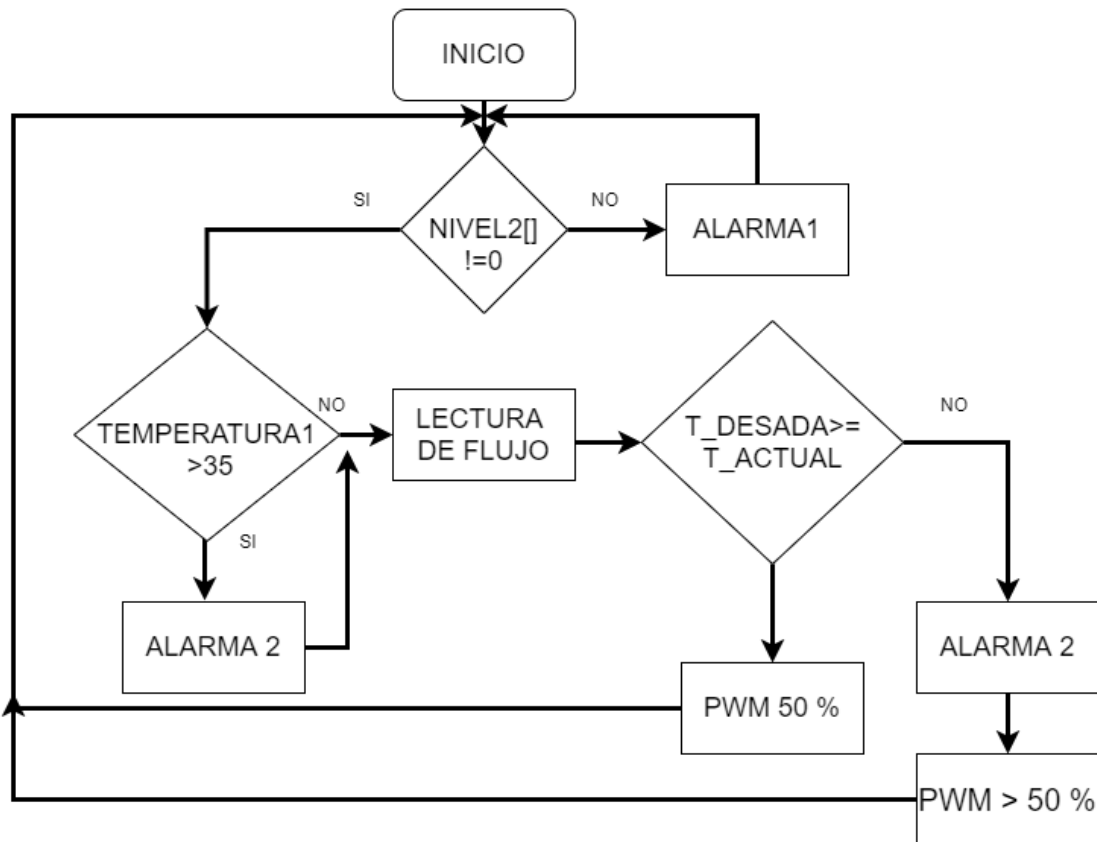


Figura 4.9: Algoritmo de control de temperatura.

La salida de control será el PWM con el cual es controlada la bomba, garantizando de esta manera un bombeo de agua de acuerdo con la temperatura que se alcance al interior del láser. Los resultados experimentales han demostrado que, para un correcto y seguro funcionamiento del sistema, la temperatura del agua circulante no debe sobrepasar un valor umbral de 35 °C, temperaturas superiores generan afectaciones al funcionamiento del dispositivo que pueden poner en peligro su integridad física, temperaturas inferiores al valor umbral garantizan la operación del sistema de manera adecuada.

Teniendo lo anterior en consideración, se propone utilizar como umbral de temperatura unos 35 °C. Esta temperatura será obtenida del sensor que se encuentra a la salida de la cavidad

resonante. Se considera que exista un gradiente de temperatura de 10 grados Celsius respecto a la entrada. Con estos datos se procede a realizar el control del flujo de agua circulante y con ello de la temperatura.

El algoritmo de control comienza con la comprobación de la disponibilidad de agua para realizar el experimento, en caso de que no existiera agua, se emite una alarma y se pospone el resto de los análisis hasta que esta condición sea cumplida. Una vez se tenga disponibilidad de agua, se procede a comprobar la temperatura del agua a la entrada del láser. Si esta temperatura excede los 25°C se perdería la capacidad efectiva de realizar el control de la temperatura por lo cual se procedería a emitir una señal de alerta para los investigadores que desarrollan el experimento.

Posteriormente se procede a analizar el comportamiento del flujo de agua para lo cual se leen los valores arrojados por los flujómetros estos valores se tienen en cuenta para garantizar el conocimiento sobre la circulación de agua y de esta manera mantener el sistema de alarmas. Si no existe problema con el flujo de agua se procede a analizar el comportamiento de la temperatura.

La temperatura de operación deseada será definida por parte de los investigadores. Mientras que la temperatura de operación real sea menor que la temperatura deseada se mantendrá la excitación a la bomba de agua con un PWM de 50 %; en el momento en el cual la temperatura deseada sea menor que la temperatura actual, se comenzará a variar el valor de PWM para, de esta manera aumentar el flujo de agua y contrarrestar el error de temperatura. El ciclo de trabajo del PWM está determinado por una ley de control tipo proporcional hiperbólica recursiva para garantizar la sensibilidad adecuada del error de temperatura y evitar paradas abruptas de las bombas que impulsan el agua en las labores de refrigeración.

4.3.1. Software

Una vez que se ha desarrollado el firmware correspondiente para una correcta selección y configuración de los sensores, epígrafe 2.1.3. Bloque One-Wire; así como para la correcta captura del valor numérico de temperatura, se procede a la implementación del correspondiente algoritmo de control presentado con anterioridad. La lectura de la temperatura se realiza por el Puerto 6 del microprocesador, mientras que la selección del sensor adecuado en cada momento se realiza a través del Puerto 2 de salida.

La correcta implementación comienza con la selección adecuada del sensor de temperatura y la posterior lectura del valor numérico que entregan correspondiente al valor en tiempo real de la temperatura censada, ver la figura 4.10. Los valores de temperatura son almacenados en la RAM para su posterior empleo.

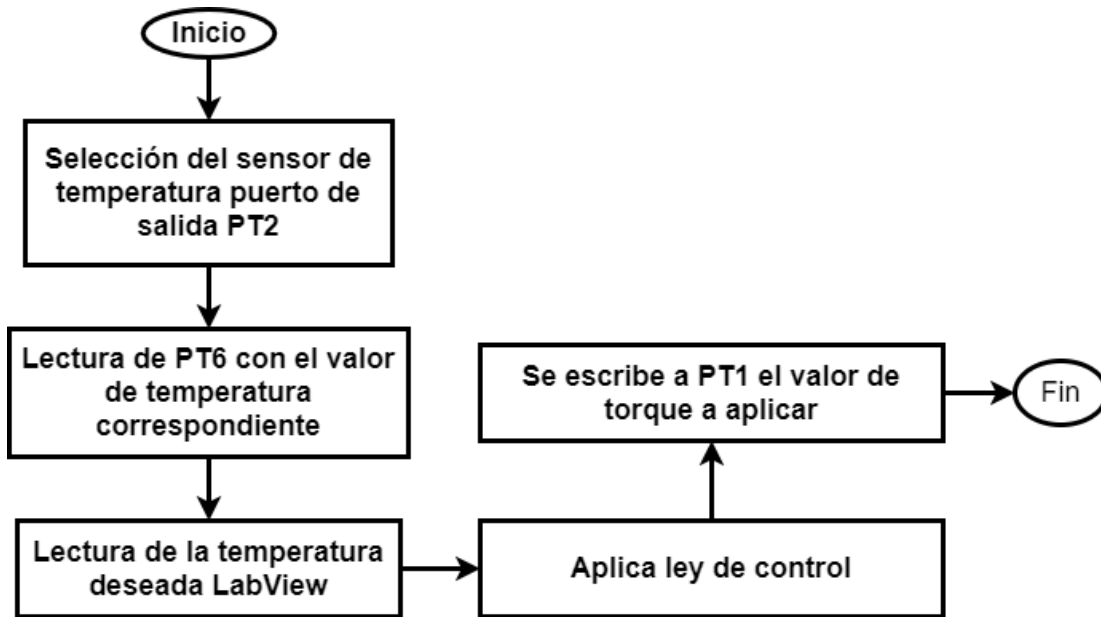


Figura 4.10: Determinando temperatura actual y acciones de control.

Seguidamente se presenta el correspondiente software desarrollado en código D que describe lo anteriormente especificado.

<pre> \ SELECCION DEL SENSOR DE TEMPERATURA ADECUADO \ SELECCIÓN DEL SENSOR 1 R5 =E 15 EPOR R5 PT2 \ LECTURA DEL VALOR DE TEMPERATURA LPOR PT6 R6 </pre>	<pre> R5 =E 65535 R6 = R5 AND R6 R6 = INT2FP R6 ERAM R6 46 \ SELECCIÓN DEL SENSOR 2 R5 =E 79 EPOR R5 PT2 </pre>	<pre> \ LECTURA DEL VALOR DE TEMPERATURA LPOR PT6 R6 R5 =E 65535 R6 = R5 AND R6 R6 = INT2FP R6 ERAM R6 47 </pre>
--	---	--

Una vez que se ha determinado el valor de temperatura se procede a leer la temperatura deseada por el usuario desde LabView, figura 4.11. Con los dos valores de temperatura: temperatura deseada y temperatura actual, se procede a determinar el error que se comete y a ese error se le aplica la ley de control correspondiente. El resultado de las operaciones determina el ciclo de trabajo del PWM que será aplicado a la bomba de agua para su control.

Seguidamente se presenta el correspondiente código en lenguaje D que describe lo anteriormente especificado.

<pre> \ LECTURA DE LA TEMPERATURA DESEADA LRAM 6 R2 LRAM 46 R3 \ DETERMINO EL ERROR DE TEMPERATURA R2 = R2 - R3 </pre>	<pre> IF R2 < 0 R3 = 1000 ENDIF IF R2 > 0 R3 = 1000 ENDIF </pre>	<pre> IF R2 = 0 R3 = 1000 ENDIF \ COMPROBAR DISPONIBILIDAD DE AGUA \ LRAM 45 R5 </pre>
--	--	--

```
\ IF R5 = 3                                LRAM 1 R5                                ENDIF  
\ R3 = 0                                    IF R5 > 0  
\ ENDIF                                     R3 = 0
```

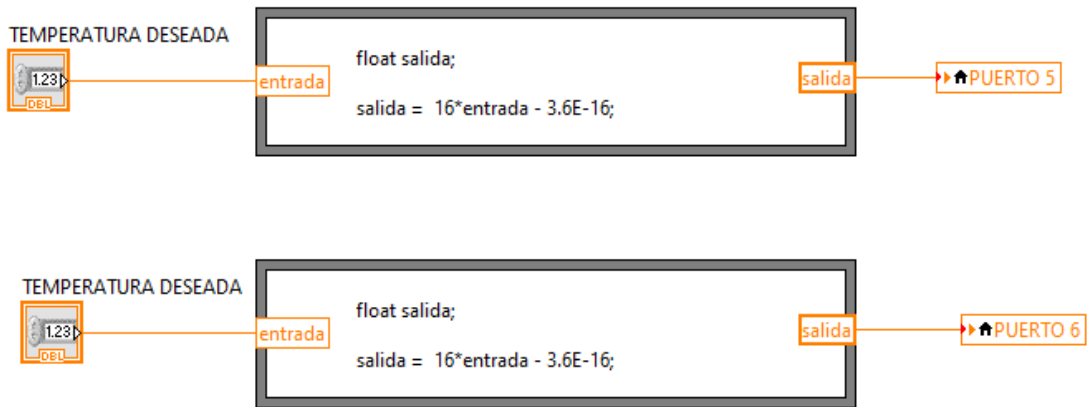


Figura 4.11: Tolbox de LabView para el envío de la temperatura deseada.

La comprobación de los niveles de agua almacenada se realiza por cuestiones de seguridad: sin agua resulta imposible realizar el experimento y no se pueden colocar en funcionamiento las bombas porque pueden averiarse debido a las temperaturas y las condiciones de trabajo.

4.4. Conclusiones del capítulo

De acuerdo con los requerimientos se propuso el empleo del sensor de temperatura ds18b20 para prescindir del empleo de conversores analógico-digitales. Con base a los resultados en la caracterización inicial se determinó la necesidad de disipar la diferencia de 5°C entre la temperatura de salida-entrada y para ello se propuso un esquema de control inicial de esta variable física y su respectiva implementación en código D para su evaluación.

Capítulo 5 : Robot de 1 GDL que funcione como chopper

En el presente capítulo se realiza una propuesta de implementación de un robot de 1 grado de libertad que funcione como pulsador mecánico de la radiación incidente en la cavidad fotoacústica. Se presenta su esquema de control, su principio de funcionamiento, el diseño de su respectivo hardware, así como la propuesta de un algoritmo para realizar las labores de control. Se realiza el modelado dinámico del robot utilizando la metodología de Newton-Lagrange y su correspondiente análisis en Simulink. Se propone una manera para estimar la implementación de la velocidad de operación del robot y de esta manera realizar el control, así como la propuesta de control utilizando el código D para su posterior implementación.

5.1. Robot para el pulsado mecánico de la radiación láser

El efecto fotoacústico se genera bajo la acción de una radiación incidente pulsada, el láser disponible en el taller emite radiación de manera continua, por esta razón, se emplea un pulsador mecánico externo al cual se le especifica la frecuencia de trabajo adecuada en cada corrida de los experimentos. El pulsador mecánico o chopper, que se utiliza en estos momentos dentro del taller, figura 5.1, es de arquitectura cerrada y no permite acceder a su control, a los efectos prácticos no puede ser utilizado en la presente propuesta de automatización. Este hecho obliga a proponer e implementar un robot de 1 GDL, y proceder a desarrollar un control de velocidad que permita garantizar la frecuencia de pulsado de la radiación incidente.



Figura 5.1: Pulsador mecánico comercial.

Por requerimientos experimentales, el robot debe permitir variar su velocidad de operación que se traduce en frecuencia de pulsado. Las frecuencias de trabajo actuales están próximas a 666 Hz. El robot que se propone tiene un ancho de banda teórico comprendido entre los 30 Hz y los 1986 Hz, aunque para efectos prácticos resulta necesario establecer un adecuado ancho de banda considerando los efectos de la fricción estática.

5.1.1. Requerimientos experimentales

El pulsador propuesto está compuesto por un motor de corriente directa al cual se le acopla una rejilla con 30 ranuras, por tanto, la frecuencia de pulsado será igual a la velocidad de rotación del eje del motor por las 30 ranuras anteriormente señaladas.

El motor, figura 5.2, cuando es energizado con un voltaje de 12 V permite una velocidad angular máxima de 66.23 rev/seg al considerar las 30 ranuras anteriormente mencionadas, se obtendría una frecuencia de pulsado máxima de 1986 Hz. La frecuencia máxima de operación se encuentra por encima de los actuales requerimientos experimentales y permite aumentar el rango de trabajo para futuros experimentos.



Figura 5.2: Motor de DC modelo JGB37-555B.

5.1.2. Modelo dinámico

El correcto diseño experimental parte de analizar el comportamiento teórico o esperado del robot propuesto. Para ello se realiza su modelado dinámico correspondiente y su simulación, de esta manera es posible encontrar un punto de referencia o comparación para realizar los pertinentes ajustes prácticos o como modelo a seguir con los resultados experimentales.

En este caso se propone partir de un análisis Newtoniano y de las ecuaciones de Lagrange, se procede a caracterizar el comportamiento dinámico del robot, así como de otras variables físicas determinantes. A efectos prácticos, en este caso solo es necesario modelar el comportamiento del motor, al no contener caja de reducción ni acoples mecánicos no tiene sentido analizar las vibraciones u otro tipo de interacción, de esta manera se logra la simplificación del modelo a estudiar. No se tendrá en cuenta de la misma manera la influencia del peso de la rejilla o su ubicación a lo largo del eje del motor o en su defecto las vibraciones que pueda generar.

En la figura 5.3 se presenta el esquema básico, reportado en la literatura, para modelar un motor de CD [44, 45]. En esencia, el motor puede ser modelado a partir de las siguientes ecuaciones.

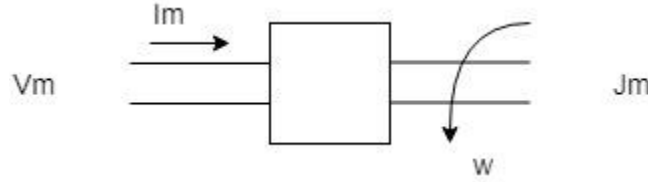


Figura 5.3: Esquema de un motor de CD.

$$\tau = K_T i_m \quad (5.1)$$

$$v_b = K_v \omega \quad (5.2)$$

Donde τ es el torque debido a la corriente i_m , K_T es la constante de torque. El voltaje v_b es el resultado de la velocidad angular ω y K_v es la constante de fuerza electromotriz. Luego es posible realizar el modelado del torque y el voltaje generado v_b como una fuente de esfuerzo regulada [44].

En la figura 5.4 se aprecia el modelo de parámetros concentrados para describir el funcionamiento del robot objeto de estudio.

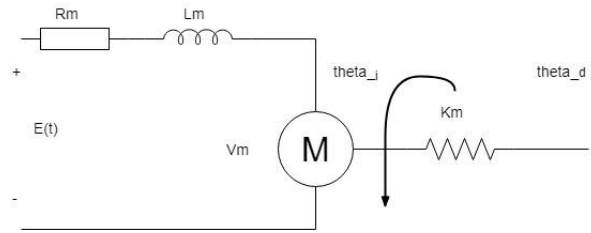


Figura 5.4: Diagrama esquemático para el análisis de los parámetros del sistema.

Se procede a determinar la energía cinética del sistema, ecuación (5.3), y su respectiva energía potencial, ecuación (5.4), como se presenta seguidamente.

$$E_c = \frac{1}{2} J_m \dot{\theta}_m^2 \quad (5.3)$$

$$E_p = \frac{1}{2} K_m (\theta_d - \theta_i)^2 \quad (5.4)$$

Donde $\dot{\theta}_m$ es la velocidad angular del eje del motor, θ_i y θ_d son las posiciones del eje del motor antes y después de la barra en la que se acopla la rejilla respectivamente.

Una vez han sido propuestas, se determina su Lagrangiano, ecuación (5.5), y se procede a aplicar las conocidas ecuaciones de Lagrange tal como se muestra en (5.6)-(5.8).

$$L = E_c - E_p = \frac{1}{2} J_m \dot{\theta}_m^2 - \frac{1}{2} K_m (\theta_d - \theta_i)^2 \quad (5.5)$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_m} \right] = J_m \ddot{\theta}_m \quad (5.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta_d} = -K_m(\theta_d - \theta_i) \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta_i} = K_m(\theta_d - \theta_i) \quad (5.8)$$

Al realizar los procedimientos matemáticos se obtiene que el modelo dinámico viene dado por las ecuaciones (5.9)-(5.10).

$$\tau = J_m \ddot{\theta}_m + b \dot{\theta}_m \quad (5.9)$$

$$E(t) = R_m i_m + L_m \frac{d}{dt} i_m + K_e \dot{\theta}_m \quad (5.10)$$

Si se procede a llevar dicho modelo a variables de estado, se obtienen las siguientes ecuaciones (5.11)-(5.14)

$$x_1 = \dot{\theta}_m \quad (5.11)$$

$$x_2 = i_m \quad (5.12)$$

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{J_m} [K_m x_2 - b x_1] \quad (5.13)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{L_m} [E(t) - R_m x_2 - K_e x_1] \quad (5.14)$$

Donde L_m , R_m , K_e corresponden a la inductancia del motor, la resistencia interna del motor y la constante de transmisión eléctrica del motor respectivamente, de acuerdo con el modelo de parámetros concentrados que describe a un motor de corriente directa.

Dicho modelo permite la descripción del sistema y su correspondiente simulación utilizando las herramientas del módulo Simulink de Matlab a partir de la corriente demandada por el motor y la velocidad angular generada. En la figura 5.5 se presenta la propuesta de implementación en variables de estado y su relación con el control propuesto dentro de la herramienta anteriormente señalada. La simulación se realizó utilizando una ley de control proporcional hiperbólica, ecuaciones (5.15) y (5.16), con ganancia proporcional 40 y ganancia hiperbólica de 0.01, de acuerdo con los estudios realizados, como se muestra en la figura 5.6. Los resultados obtenidos se presentan seguidamente.

$$\tau_i = K_p \tanh(K_s * error_velocidad) \quad (5.15)$$

$$\tau_i = 40 \tanh(0.01 * \text{error_velocidad}) \quad (5.16)$$

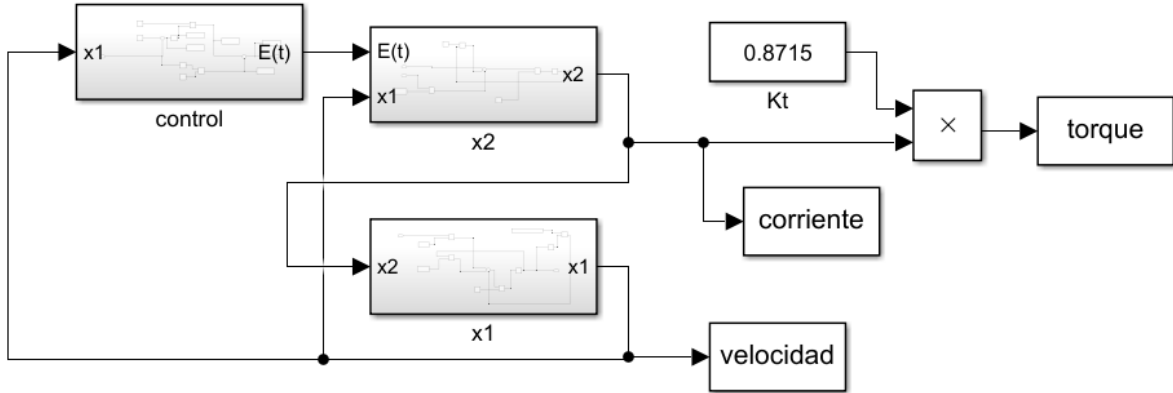


Figura 5.5: Diagrama esquemático para implementación en Simulink.

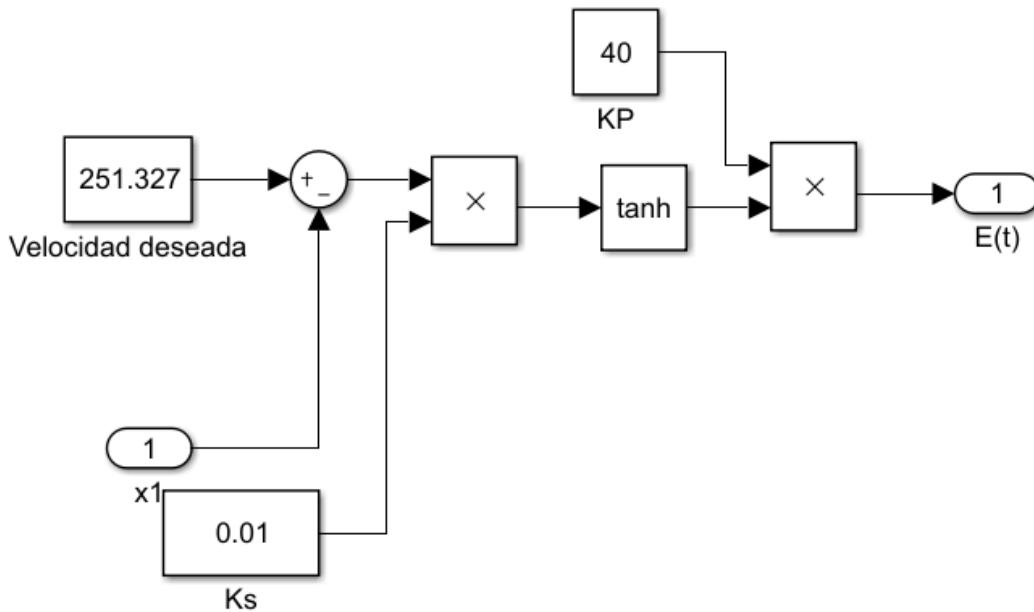


Figura 5.6: Implementación de la ecuación de control en Simulink.

En la figura 5.7 se muestran diferentes frecuencias deseadas obtenidas a partir de la simulación del modelo dinámico. El modelo dinámico nos brinda las velocidades de rad/segundo y fueron realizadas las conversiones pertinentes para mostrar los resultados. se observa que en los tres casos analizados el motor alcanza la frecuencia de trabajo deseada, el comportamiento durante el proceso transitorio puede ser modificado al variar las ganancias proporcionales en función de los intereses experimentales. En la presente investigación, se considera que el comportamiento obtenido es el adecuado y por tanto no se modifican las ganancias $K_p=40$ y $K_s = 0.01$.

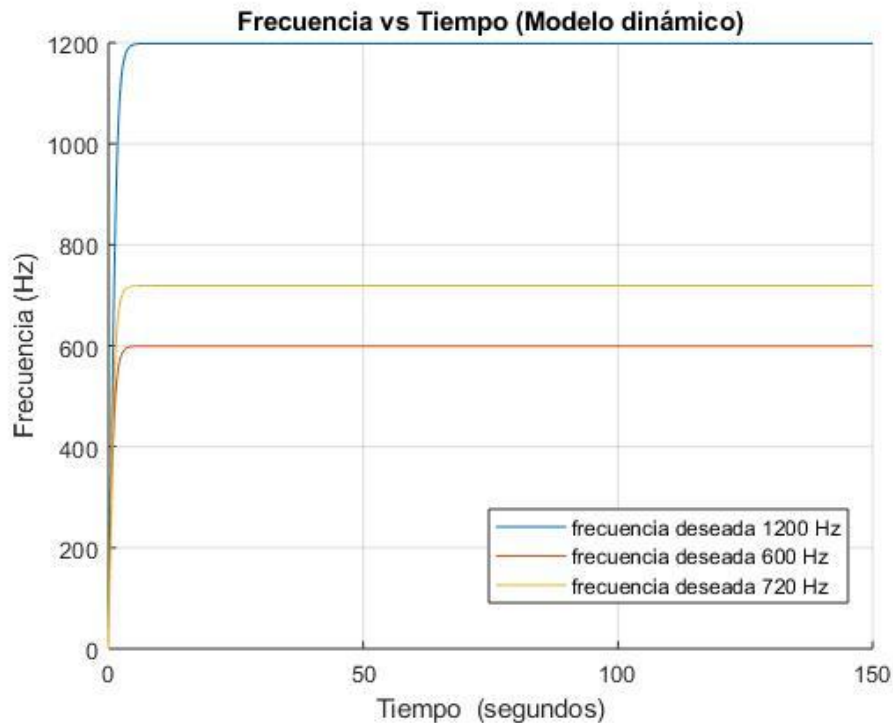


Figura 5.7: Evaluación del modelo dinámico.

5.2. Esquema de control

El diseño del esquema de control propuesto se muestra en la figura 5.8. La variable para controlar será la velocidad de rotación del eje del motor, lo que a su vez determina la frecuencia de pulsado de la radiación incidente.

Resulta necesario determinar la velocidad de rotación del motor, a efectos prácticos es posible determinar su posición actual al procesar las señales provenientes de los encoder. Utilizando esta información y a partir del empleo de la diferenciación numérica es posible determinar la velocidad de rotación del eje del motor.

El usuario final, a quien los procesos internos le resultan transparentes, debe definir la frecuencia de operación deseada en Hertz, este dato se traduce a velocidad deseada (revoluciones por segundo) en la interfaz de usuario antes de pasar el dato al FPGA. Al interior del FPGA se realizan los procesos de adquisición de la posición actual y con esos datos se estima la velocidad aproximada de operación.

Una vez se ha determinado la velocidad de operación, se determina el error de velocidad y se aplica una ley de control proporcional hiperbólica. Esta ley de control permite obtener un valor de torque a aplicar, el cual, a su vez modifica el ciclo de trabajo del PWM de la señal de excitación que se le aplica al robot. De esta manera se controla la velocidad de operación del eje del motor y por tanto se extiende al control de la frecuencia de pulsado del láser.

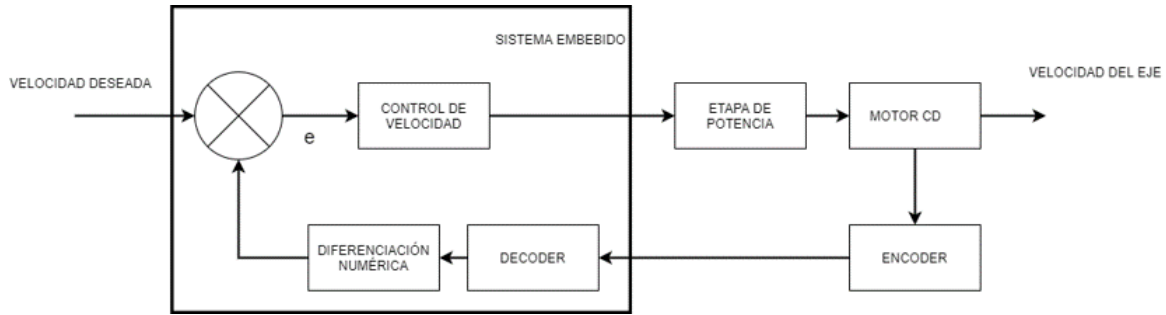


Figura 5.8: Esquema de control para la frecuencia del chopper.

5.2.1. Hardware

En este caso se considera una baja demanda de corriente por parte del robot, 500 mA, debido a su naturaleza, y al hecho de que se encontrará girando de manera libre y sin oposición más allá de la propia resistencia del aire. Se propone un esquema que emplee el transistor de potencia TIP 35C y un transistor de pequeña señal 2n2222.

Considerando un arreglo formado por dos transistores se tiene:

$$\beta_T = B_{2n2222} * \beta_{TIP35C} \quad (5.17)$$

$$\beta_T = 60 * 20 = 1200 \quad (5.18)$$

Para garantizar el trabajo en la región de corte y saturación es preciso que exista una β_f tal que $\beta_f \ll \beta_T$ para lo cual esa $\beta_f = \frac{\beta_T}{10} = 120$, es necesario que se cumpla que $\beta_f = \frac{I_c}{I_b}$ de ahí que asumiendo $I_c = 500 \text{ mA}$

$$I_{bf} = \frac{I_c}{\beta_f} = 4.1 \text{ mA} \quad (5.19)$$

Por tal razón se concluye la necesidad de emplear un arreglo de 2 transistores en configuración Darlington; este tipo de arreglos puede ser controlado directamente desde la tarjeta FPGA para realizar el proceso de pulsado del láser.

En la figura 5.9 se presenta una vista frontal del pulsador mecánico ya acoplado una vez se ha realizado su instrumentación, las rejillas fueron diseñadas en SolidWorks y cuenta con 30 ranuras con un ángulo de 6° . Fue impresa en el Laboratorio de Robótica y Control BUAP utilizando una impresora 3D. Se aprecia además el robot lineal de la base, utilizado para permitir el desplazamiento longitudinal del chopper en función de las variantes de los experimentos que se desarrollan dentro del taller.

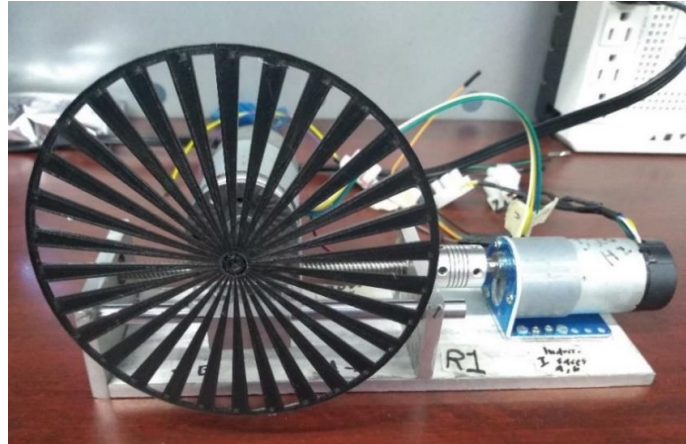


Figura 5.9: Vista frontal del pulsador mecánico implementado.

5.2.2. Caracterización del motor de DC JGB37-555B

Para un correcto funcionamiento del robot es necesario que el motor de CD se comporte como un motor de transmisión directa, es decir, el torque varíe directamente proporcional al voltaje aplicado. Para lograr lo anteriormente expresado se realiza un proceso de caracterización donde se determinan el voltaje nominal y la frecuencia de operación óptimos. La metodología que se expone seguidamente fue desarrollada dentro de la MCEA-BUAP y se describe como:

1. Determinación del voltaje nominal: Se busca encontrar el valor de voltaje en el cual el motor genera el mayor torque posible con el menor consumo de corriente.

Para ello se coloca el motor en una mesa de prueba y se comienza a variar el voltaje de alimentación al tiempo que se registran los valores de torque generados. En la tabla 5.1 se pueden observar los resultados experimentales alcanzados. Se aprecia como la mejor relación torque-voltaje-consumo energético se obtiene a los 12 V, este será nuestro voltaje nominal seleccionado.

Tabla 5.1: Determinación del voltaje nominal. Motor DC JGB37-555B.

Tensión (V)	Corriente(A)	Peso(kg)	Torque
2	0.21	0.22	0.0367598
3	0.47	1.4	0.233926
4	0.82	3	0.50127
5	1.04	4.5	0.751905
6	1.31	5.7	0.952413
7	1.6	7.2	1.203048
8	1.86	9.4	1.570646
9	2.13	10.4	1.737736
10	2.4	10.9	1.821281

11	2.64	11.7	1.954953
12	2.84	13.3	2.222297

En la figura 5.10 se presenta la gráfica de variación de torque vs voltaje, se comprueba como a medidas que se aumenta el voltaje nominal el torque generado aumenta de la misma manera.

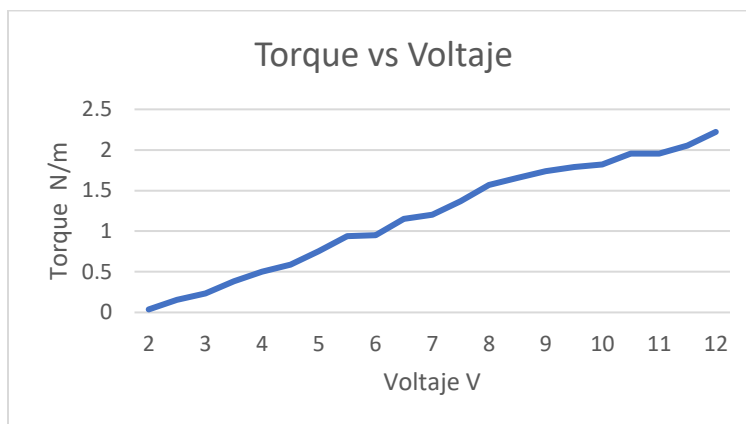


Figura 5.10: Relación de Torque vs voltaje de alimentación.

2. Determinación de la frecuencia óptima: luego de determinar el voltaje nominal, se procede a realizar un barrido en frecuencias empleando un generador de onda cuadrada con ciclo útil de un 50%. El objetivo es encontrar al menos una frecuencia en la cual el torque generado sea la mitad del torque producido en el voltaje nominal.

En la misma planta experimental, ahora se comienza a modificar la frecuencia de la señal de excitación al motor mientras que el voltaje de alimentación se fija en 12 V, en la tabla 5.2 se muestran los resultados experimentales. Se observa que a una frecuencia de 240 Hz se obtiene la mitad del torque generado en el voltaje nominal.

Tabla 5.2: Determinación de la frecuencia óptima Motor DC JGB37-555B.

Frecuencia	Peso (kg)	Torque (N/m)
10	17.2	1.873948
20	19.3	2.224837
30	19.5	2.258255
40	19.2	2.208128
50	19.3	2.224837
60	18.7	2.124583
70	18.9	2.158001
80	18.5	2.091165
90	17.5	1.924075
100	17.3	1.890657
110	16.2	1.706858
120	15.9	1.656731

130	15.8	1.640022
140	15.7	1.623313
150	15.4	1.573186
160	15.2	1.539768
170	14.6	1.439514
180	14.3	1.389387
190	14	1.33926
200	14	1.33926
210	13.8	1.305842
220	13.7	1.289133
230	12.8	1.138752
240	12.6	1.105334
250	12.5	1.088625
260	12.2	1.038498
270	12.2	2.038498

En la figura 5.11 se observa como a medida que aumenta la frecuencia del PWM comienza a disminuir el torque generado.

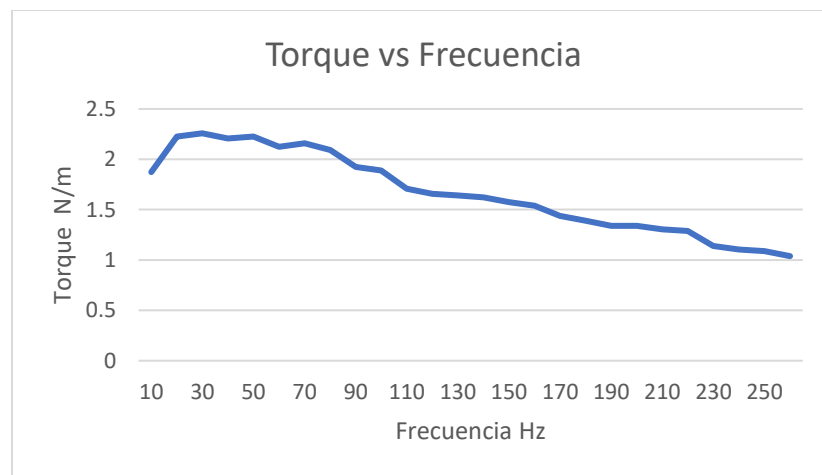


Figura 5.11: Relación entre el torque y la frecuencia del PWM.

3. Variación del ancho de pulso: Luego de determinar el valor de frecuencia óptima se procede a realizar un barrido del ciclo útil de la señal sintonizada a la frecuencia óptima.

Una vez se ha determinado la frecuencia de operación, se procede a modificar el ciclo de trabajo de la señal de excitación. En la tabla 5.3 se observan los resultados experimentales obtenidos.

Tabla 5.3: Resultados experimentales al modificar el ciclo de trabajo del PWM a 240 Hz.

ciclo útil	Peso (kg)	Torque (N/m)
10	0.5899994	0.098583
20	1.91870848	0.320597
30	3.24741756	0.542611
40	4.57612664	0.764625
50	5.90483572	0.986639
60	7.2335448	1.208653
70	8.56225388	1.430667
80	9.89096295	1.652681
90	11.2076186	1.872681
100	13.3461009	2.23

Si el procedimiento es realizado de manera acertada, se grafica el comportamiento del torque generado vs la variación del ancho de pulso y la gráfica debe aproximarse lo más posible a una función lineal lo cual garantiza la linealización de la planta.

En la figura 5.12 se aprecia el comportamiento del torque vs el ciclo de trabajo, como se observa tiene un comportamiento muy próximo a una función lineal y puede ser utilizado bajo esas condiciones para la construcción del robot propuesto.

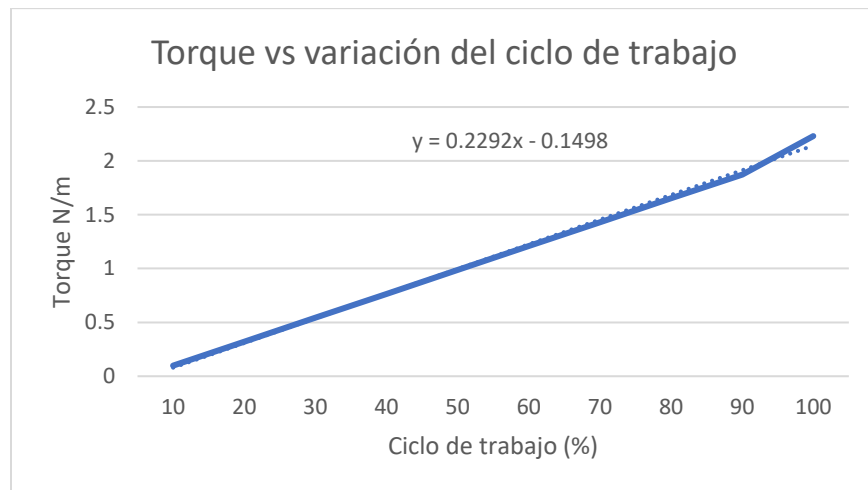


Figura 5.12: Respuesta del torque a la modificación del ciclo de trabajo.

El proceso de caracterización arrojó que el voltaje nominal es de 12 V, la frecuencia de trabajo óptima es de 240 Hz, esta frecuencia será empleada para generar el PWM descrito con anterioridad en el epígrafe 2.1.2. Bloque de PWM y de esta manera controlar al robot.

5.2.3. Algoritmo de control

En la figura 5.13 se presenta la propuesta de algoritmo implementado para realizar el control de velocidad.

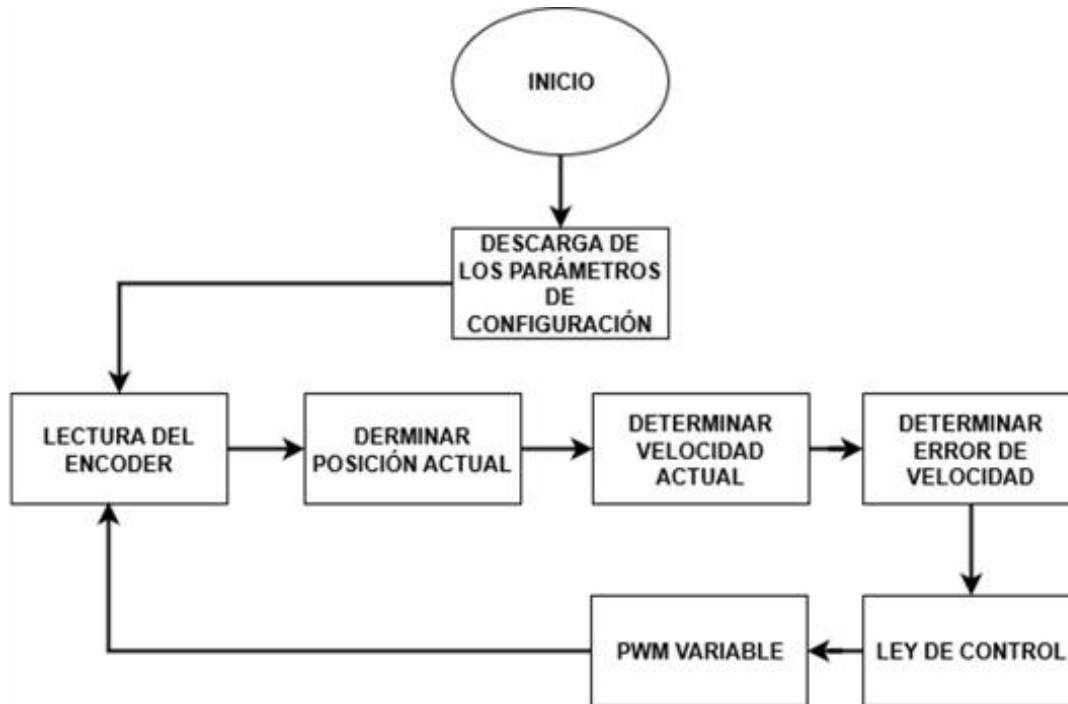


Figura 5.13: Algoritmo para el control de velocidad.

Inicialmente se procede a descargar los diferentes parámetros de configuración, dentro de los cuales se significa a las ganancias proporcionales K_p y K_s , así como la frecuencia deseada en el pulsador mecánico. Una vez que se han fijado estos parámetros de configuración se procede a realizar la lectura de la posición actual, este dato se obtiene computando las señales provenientes del encoder. Con los datos de posición del motor se procede a realizar una diferenciación numérica empleando el conocido método de Euler. A partir de la velocidad estimada se procede a determinar el error de velocidad considerando la velocidad deseada introducida desde la interfaz de usuario desarrollada en LabView. A este error se le aplica la ley de control descrita en la ecuación (5.15) [46], la salida de la ley de control modificará el valor del ancho de pulso del PWM variable diseñado.

En [34] se explica y se procede a realizar la demostración de estabilidad asintótica en el sentido de Lyapunov para la ley de control propuesta. Esta demostración de estabilidad garantiza que en un sistema a lazo cerrado el error se encuentra acotado y tienda asintóticamente a cero conforme evoluciona el tiempo, lo cual resulta de importancia vital en cuestiones de control.

Si se analiza con detenimiento la ley de control propuesta, es posible percatarse de que en el caso en el cual el error de velocidad sea cero, el torque resultante sería cero, y ello implicaría una detención brusca del robot, y por tanto no es posible mantener una velocidad constante; para eliminar este inconveniente se propone el empleo de una ley recursiva que garantice que

no existan detenciones abruptas en el funcionamiento del robot y mantener una velocidad constante.

$$\tau_i = \tau_{i-1} + K_p \tanh (K_s * error_velocidad) \quad (5.20)$$

Al analizar la ecuación (5.20), es posible percatarse de que en caso de un error igual a cero, el par generado será igual al par anterior, y de esta manera se logra evitar la detención abrupta del robot y se mantiene constante la velocidad de operación del eje del motor. En este caso por la naturaleza de la ley de control, la selección adecuada de K_p determina el tiempo que demorará en establecerse la velocidad deseada, mientras que K_s influye en la sensibilidad del control a los errores de velocidad. Por estas razones se llega a una solución de compromiso a la hora de establecer las ganancias.

5.2.4. Software

Se empleará el código “D” para la implementación del algoritmo de control anteriormente señalado. Con anterioridad fueron especificados los registros, puertos y dispositivos con los cuales se pueden desarrollar los algoritmos, junto con las respectivas operaciones matemáticas.

En este caso se comienza con la lectura del encoder 1 en PT1, con el objetivo de determinar la posición actual. Una vez se determina la posición actual, se pasa a leer de la memoria RAM, el valor de posición anterior, este valor se encuentra almacenado en la localización 40. Con los valores de posición ya conocidos, se procede a determinar el valor de la velocidad actual en revoluciones por segundo, ver el diagrama de flujo en la figura 5.14, la base de tiempo empleada como se mencionó es de 10 ms.

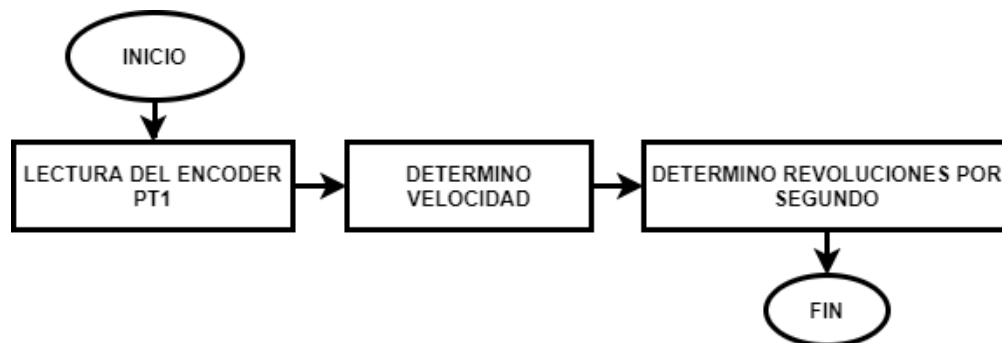


Figura 5.14: Diagrama a flujo para determinar la velocidad del eje del motor.

Seguidamente se presenta el correspondiente software desarrollado en código D que describe lo anteriormente especificado.

<pre> \ LECTURA DEL ENCODER LPOR PT1 R5 \ NUMERO DE CUENTA ACTUAL R5 = INT2FP R5 </pre>	<pre> \ NUMERO DE CUENTA ANTERIOR LRAM 40 R6 \ DETERMINAR VELOCIDAD R6 = R5 - R6 </pre>	<pre> R6 = R6 / 10 R6 = R6 * 1000 \ VELOCIDAD EN REVOLUCIONES POR SEGUNDO R6 = R6 / 64 </pre>
---	---	---

Una vez que se ha determinado el valor de velocidad actual, se procede a realizar la lectura de la velocidad deseada; el dato de velocidad deseada es introducido desde LabView por el usuario, y ya toma en cuenta el factor de multiplicación por 30 que introduce la rejilla, como se muestra en la figura 5.15.

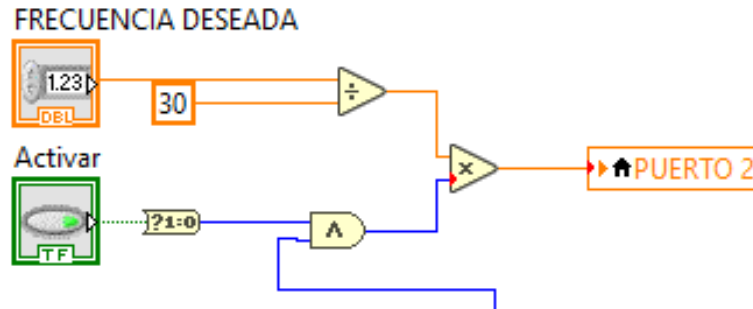


Figura 5.15: Envío de la frecuencia de trabajo deseada a través de LabView.

Con el valor de velocidad deseada, se procede a determinar el error de velocidad, $error_{velocidad} = velocidad_{deseada} - velocidad_{actual}$, y se aplica la ley de control anteriormente señalada, ecuación (5.20), ver diagrama en la figura 5.16.

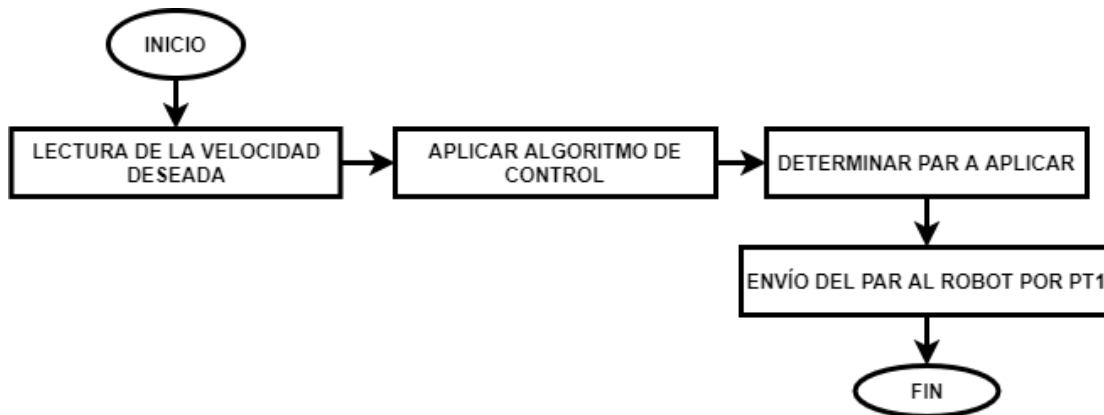


Figura 5.16: Diagrama a flujo del funcionamiento del robot.

Seguidamente se presenta el correspondiente software desarrollado en código D que describe lo anteriormente especificado.

```

\ LECTURA DE LA VELOCIDAD DESEADA
\ LECTURA DE KP = 40
\ R3 = 30
LRAM 2 R5
R6 = 40
\ ENDIF
\ DETERMINANDO ERROR DE VELOCIDAD
R5 = R5 - R6
\ CONFIRMO QUE NO SE ESTE EN LA RUTINA DE DRENAJE
\ LECTURA DEL PAR ANTERIOR
LRAM 41 R3
\ DETERMINO EL PAR ACTUAL
R3 = R3 + R5
\ GUARDO PAR ACTUAL
\ IF R3 < 0
R6 = 0.01
\ LECTURA DE KS = 0.01
R3 = 0
ENDIF
R5 = R5 * R6
\ IF R3 < 0
ERAM R3 41
R5 = TANH R5
    
```

El resultado del cómputo corresponde al valor del ciclo de trabajo del PWM que se aplica al robot.

5.3. Conclusiones del capítulo

A partir del estudio del modelo dinámico del pulsador mecánico se obtuvo un patrón de comportamiento para la evaluación experimental del robot diseñado. Con base a la caracterización del motor realizada se garantiza la respuesta lineal de la planta facilitando las labores de control. Se presentó el diagrama de control y su implementación en código D para su posterior evaluación.

Capítulo 6 : Integración general del sistema

Se presenta la propuesta de integración de los subsistemas para la semi automatización de la operación del espectrómetro fotoacústico. Se presentan las diferentes relaciones entre los lazos diseñados y la adquisición y el procesamiento de los datos obtenidos.

6.1. Integración del sistema

En la figura 6.1 se presenta el diagrama instrumental general del proceso de integración de la semiautomatización del espectrómetro fotoacústico. Es necesario señalar que las etapas iniciales, es decir, el encendido y la sintonización adecuada del láser, se continuará realizando de manera manual debido a los propios requerimientos del experimento, tal como se especificó anteriormente en el epígrafe 1.2. Desarrollo del experimento.

Una vez que se concluya con la etapa inicial: encendido del láser, generación del plasma y sintonización de la línea de emisión; se pasará a control automático el resto de las operaciones de los diferentes sistemas que han sido desarrollados en la presente investigación, aunados a los esfuerzos realizados en una investigación paralela, desarrollada por el Ing. Jasid Israel Aguirre Arróniz, para la adquisición y la manipulación de los datos provenientes del propio experimento, como se especificó con anterioridad en el epígrafe 1.3. Propuestas para semiautomatizar el experimento. 1.3. Propuestas . La complejidad del sistema es elevada y se pretende realizar al unísono una etapa que incluya el análisis y el procesamiento de los resultados arrojados, esto motivó la separación del proceso investigativo en dos tesis complementarias.

Se observa además, la nueva configuración implementada para el sistema de enfriamiento (resaltado de color azul), Capítulo 4, en este caso la entrada de agua del servicio universitario está conectada a los tanques de almacenamientos descritos en el Capítulo 3, logrando de esta manera la independencia de la disponibilidad de agua. Se recordará que en ese mismo capítulo se presentó el sistema de llenado-drenaje diseñado para garantizar la disponibilidad del refrigerante. Se observa además la posición del pulsador mecánico diseñado en el Capítulo 5; este se encuentra colocado sobre uno de los robots de desplazamiento horizontal diseñado en la otra tesis. En función del experimento que se desarrolle se colocará o retirará al pulsador mecánico de la línea de incidencia de la radiación.

El robot lineal se encarga de posicionar de manera adecuada al chopper al tiempo que evita que la manipulación por parte de los investigadores pueda ocasionar un accidente. Por otro lado, se considera la presencia del segundo robot lineal para el posicionamiento de elementos, en ese caso, para colocar y retirar la cerámica de óxido de circonio que se utiliza para bloquear el haz del láser. Todos los dispositivos mencionados son controlados desde la tarjeta FPGA en la cual se han programado los diferentes algoritmos de control explicados con anterioridad, y a los que se le han añadido los desarrollados para la adquisición y el procesamiento de datos.

En la figura 6.2 se presenta el diagrama general instrumentado considerando la inclusión de todos los subsistemas desarrollados en el transcurso de la investigación. Se observa la relación existente entre cada uno y como las labores de control se desarrollarán desde el sistema embebido.

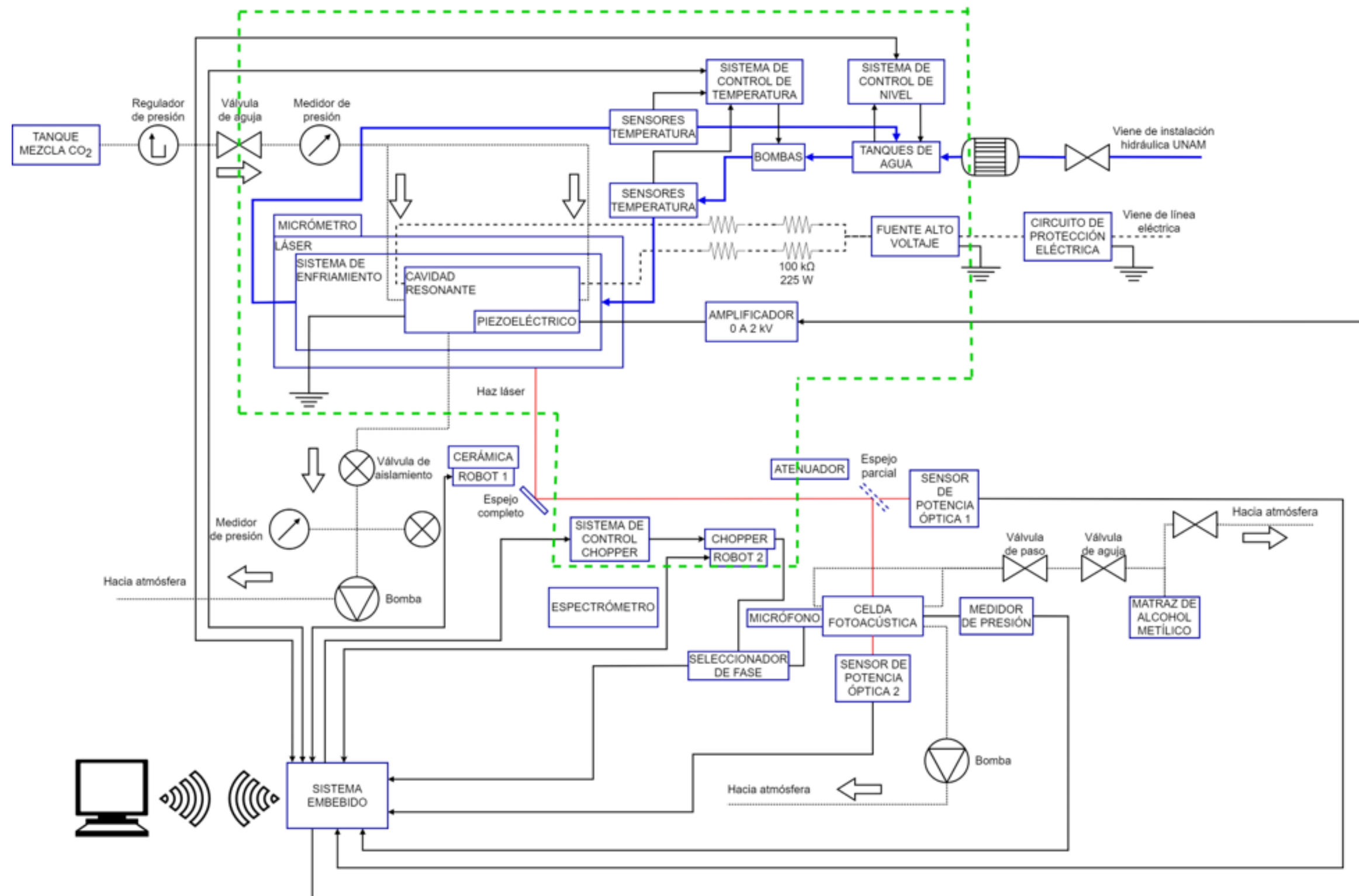


Figura 6.1: Diagrama instrumental de la integración del sistema.

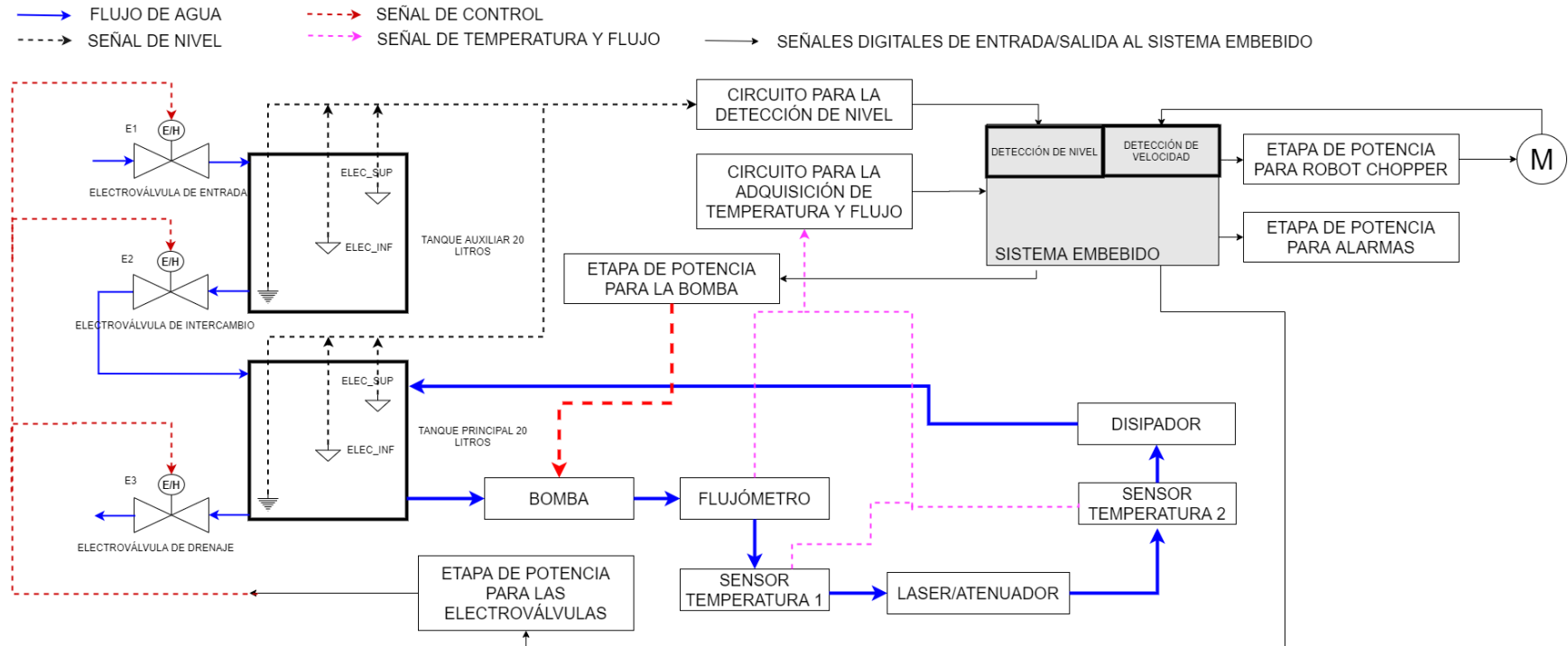


Figura 6.2: Diagrama general de la instrumentación.

En la figura 6.3 se presenta el diagrama general para la adquisición, procesamiento y monitoreo de datos considerando la integración de los sistemas propuestos. En el esquema se detalla la información a procesar por parte del sistema embebido, y en función de los resultados obtenidos, se procederá a efectuar las acciones de control a través de los puertos de salida especificados que se extrapolan a las terminales de la tarjeta FPGA.

La asignación de los recursos dentro de la tarjeta se realizó en función del diseño de los bloques funcionales, así como de los puertos o periféricos que se conectan. En este caso se procesan 3 señales de posición: una para determinar la velocidad actual de operación para el pulsador mecánico empleando la conocida fórmula de Euler, Capítulo 4, y las restantes dos para determinar la posición de cada uno de los robots lineales, esta información es procesada dentro de la tarjeta en los Decoder. Para cerrar los lazos de control, el par calculado en cada uno de los sistemas modifica el ciclo de trabajo de los PWM disponibles conectados a las diferentes etapas de potencias de los robots.

Por otro lado, se obtiene el valor de temperatura proveniente de cada uno de los sensores conectados a la tarjeta. Los sensores se encuentran conectados al bloque de One-Wire diseñado, epígrafe 2.1.3. Bloque One-Wire, el cual, como se explicó, permite la configuración y la selección de cada uno de los sensores de manera indistinta. Esta información es procesada y se utiliza para modificar el ciclo de trabajo de los PWM conectados a las etapas de potencia de cada una de las bombas, con las cuales se controla el flujo de agua circulante.

La detección de nivel se realiza directamente, y con esta información y en función de las acciones que defina el usuario, se controlan las electroválvulas, tal como se especificó en el Capítulo 3. En función de los parámetros analizados al interior del FPGA, se evalúa la ocurrencia de cualquiera de los eventos que generan alarmas, y se activa el circuito correspondiente utilizando para ello las terminales disponibles del conversor digital-analógico.

En todo momento, la comunicación con el módulo de procesamiento para configurar parámetros de operación se realizará vía WIFI, garantizando de esta manera, la movilidad del personal calificado, a la vez que se estará monitoreando el comportamiento de las variables físicas de los diferentes controles.

En la figura 6.4 se presenta el algoritmo lógico general implementado en la presente investigación para resolver los procesos antes señalados. Se comienza con la descarga, a la memoria RAM del FPGA, de los diferentes parámetros de configuración o acciones a realizar, posteriormente se pasa a analizar la disponibilidad de agua, si no hay agua disponible no es posible efectuar el experimento y se debe emitir una alerta. Una vez se ha determinado el nivel de agua, corresponde el turno a determinar los valores de temperatura en el láser, en el divisor de potencia y a la salida de los tinacos de agua. Posteriormente se comienzan a analizar las acciones correspondientes en función de lo que desee realizar el investigador. Lo primero que se verifica es que no se esté en uno de los ciclos o rutinas que intervienen en el llenado-drenaje, de ser el caso, se espera hasta que concluya esta rutina, de lo contrario, se pasa a analizar los controles de temperatura y, por último, el control de frecuencia. Es importante señalar que los controles de temperatura pueden funcionar al unísono con el control de frecuencia, no así en el caso de los controles de nivel que por diseño trabajan exclusivamente solos.

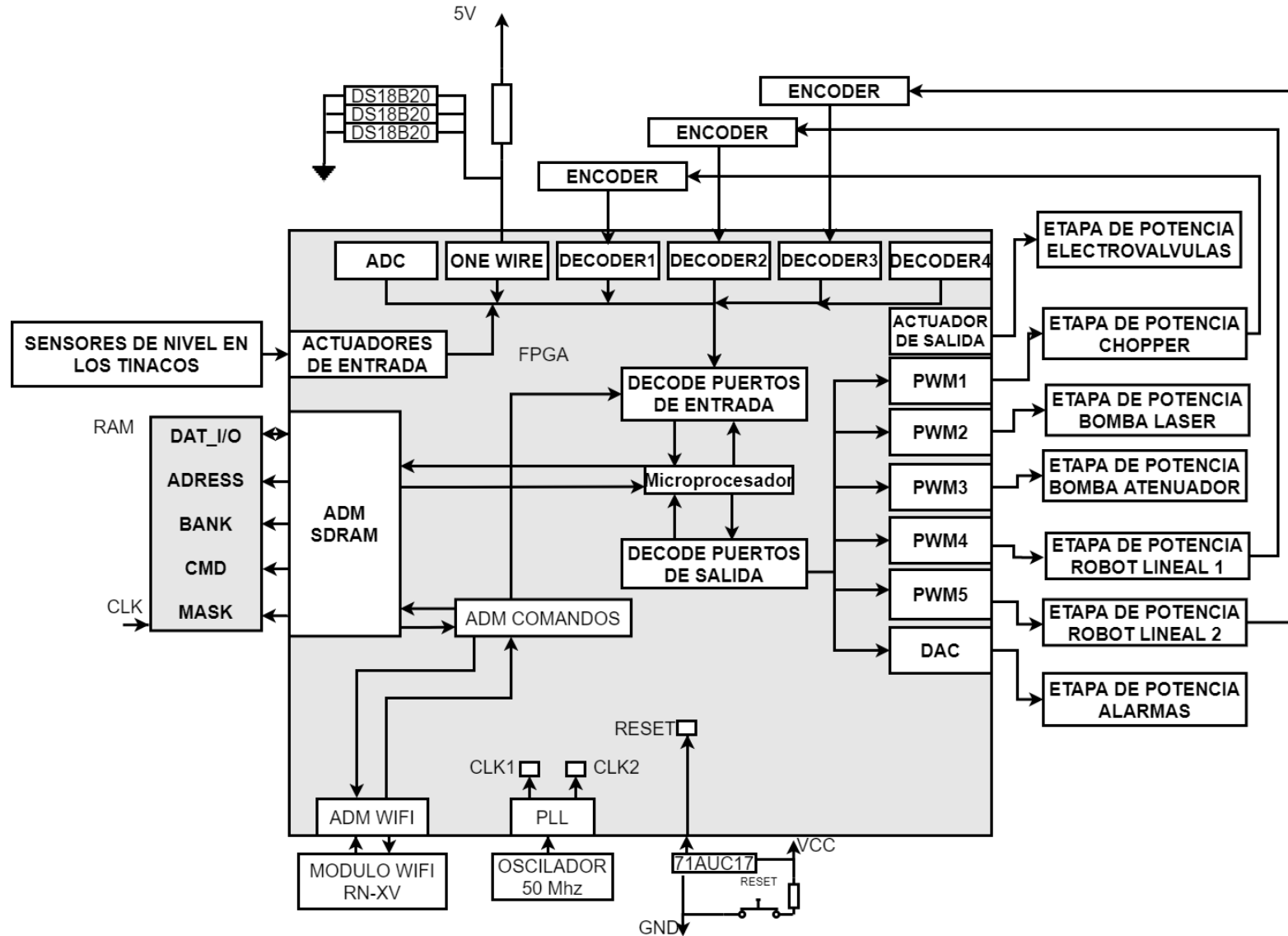


Figura 6.3: Sistema de adquisición, procesamiento y monitoreo de datos.

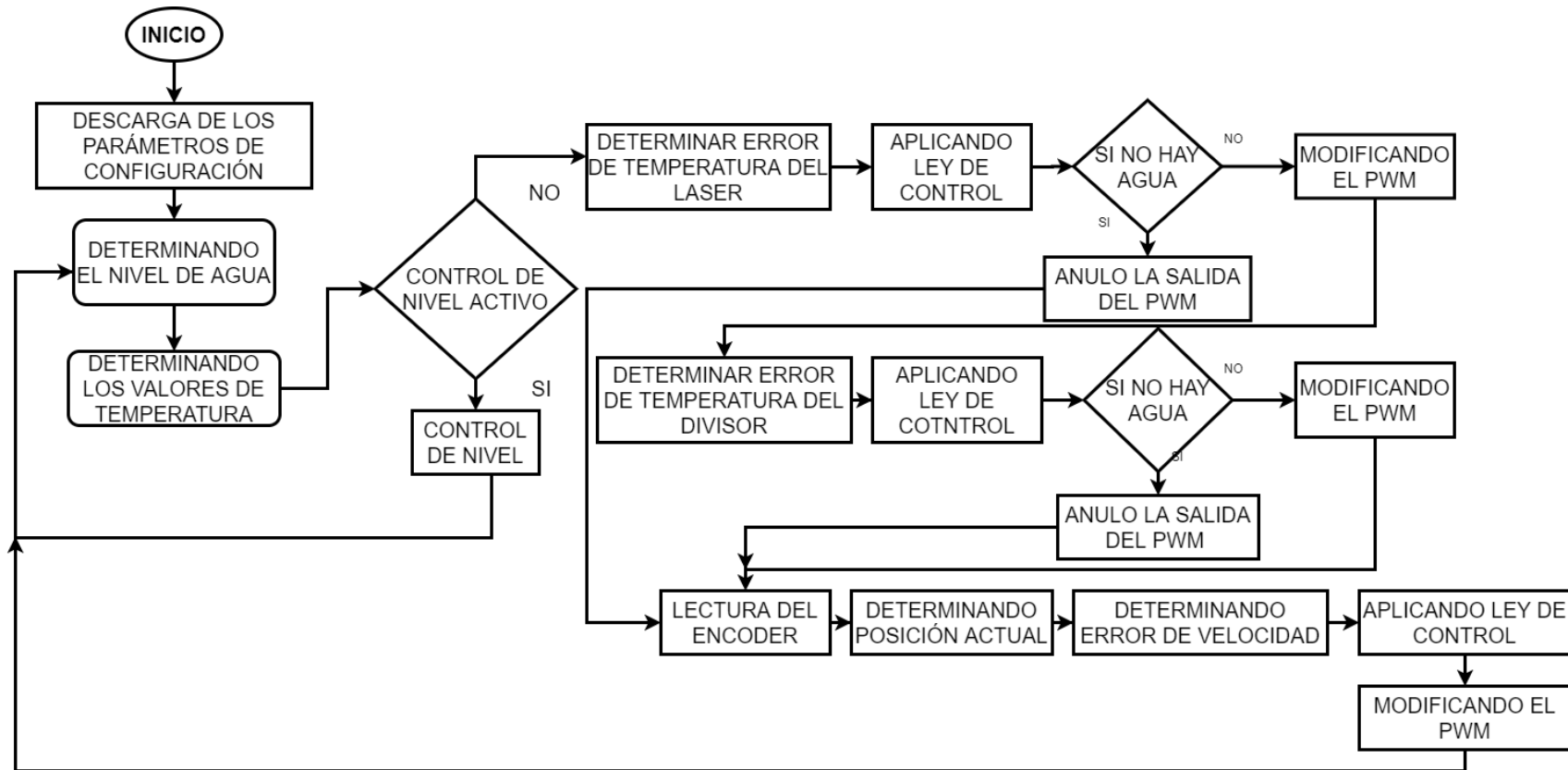


Figura 6.4: Diagrama de flujo general.

En la figura 6.5 se presenta la implementación práctica de la electrónica desarrollada para el correcto funcionamiento de los diferentes sistemas. La electrónica fue dividida en módulos para su correcta identificación y para que de esta manera la detección de fallas, así como su corrección, pueda ser realizada de manera simple:

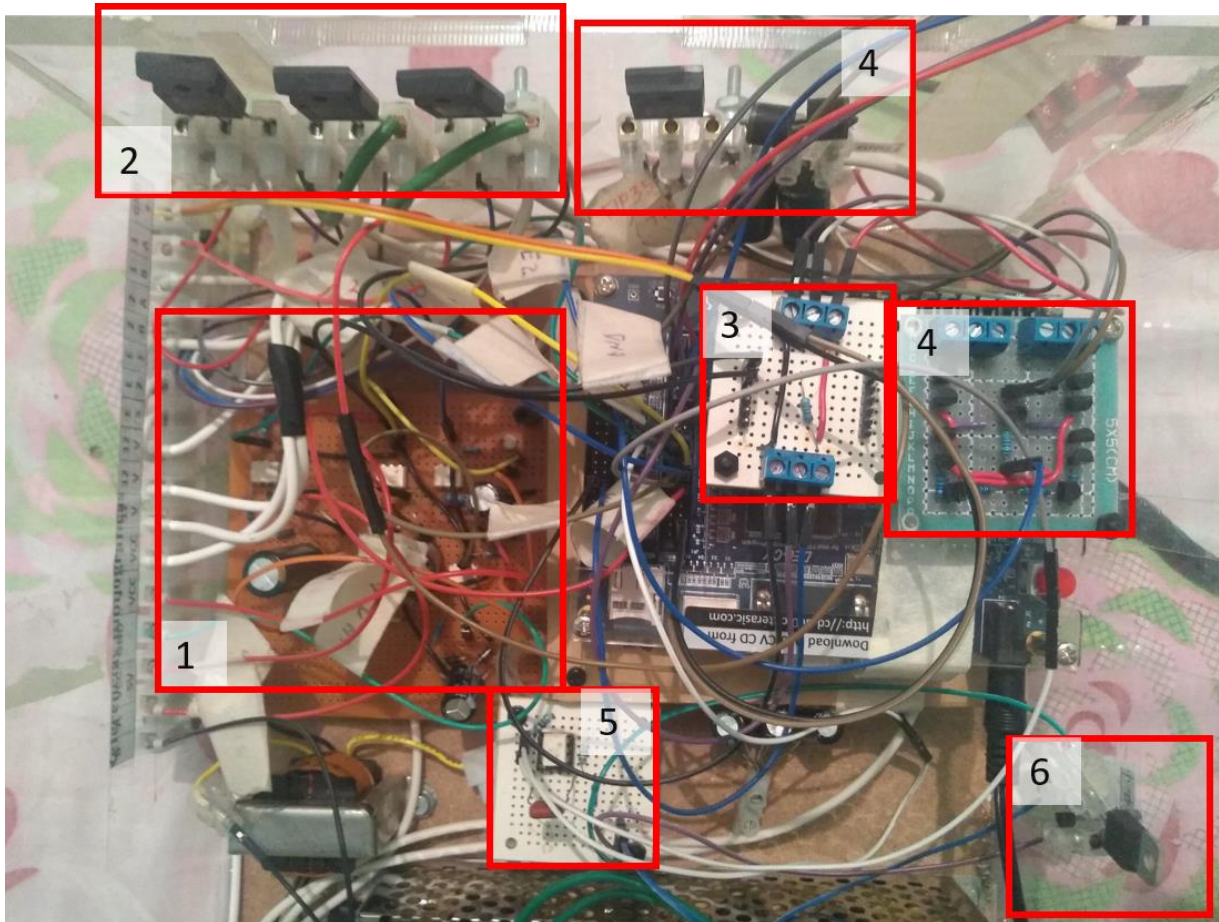


Figura 6.5: Electrónica del sistema integrado. Implementación práctica.

1. Circuito para la detección de nivel con corriente alterna.
2. Etapa de potencia para el control de las electroválvulas.
3. Circuito para la configuración y operación del sensor ds18b20 y el sensor Yf-s201.
4. Etapa de potencia para el control del pulsador mecánico.
5. Etapa de potencia para el control sobre la bomba de agua.
6. Circuito para el control de las alarmas.

6.2. Programación de las alarmas

Una vez se ha procedido a integrar los sistemas diseñados, resulta preciso considerar la inclusión de un sistema de alarmas ante las causales señaladas:

1. Nivel de agua no adecuado para realizar el experimento.
2. Flujo de agua insuficiente.
3. Temperatura del espectrómetro no adecuada.

4. Temperatura no adecuada en el tanque de agua principal.

En la tabla 6.1 se presenta un resumen de las alarmas que han sido implementadas y las causales por las cuales se dispararían; además, se han consignado las acciones que, a consideración del autor, se deben realizar en cada uno de los casos en que ocurra alguna de estas causales.

Tabla 6.1: Resumen de alarmas implementadas.

Alarmas	Significado	Acciones recomendadas a los investigadores
1	No existen reservas de agua suficiente en el tanque principal.	Supervisar el proceso de llenado del tanque principal y supervisar el nivel real existente. Por seguridad no se activarán las bombas de agua y se escuchará un indicador sonoro.
2	A partir del conocimiento del valor máximo de flujo generado por la bomba, se considera cuando el flujo circulante cae un 10 %	Se sugiere revisar si no existe rotura en los sistemas o conexiones, y en caso negativo, se procede a realizar un mantenimiento preventivo por la posible acumulación de sales en las tuberías.
3	Se considera cuando la temperatura de operación del láser supere el valor máximo de operación seguro, 35 grados.	Se sugiere revisar que se encuentren funcionando adecuadamente las bombas de agua, y comprobar las mediciones de temperatura por si se ha deteriorado algún sensor de temperatura.
4	Cuando por cualquier causal aumenta la temperatura del agua almacenada en el tanque principal, y no se garantiza el correcto funcionamiento del sistema de enfriamiento.	Se recomienda comprobar el valor del agua acumulada por si se ha deteriorado el sensor, en caso negativo debe detenerse el experimento hasta tanto se determine la causa.

En cualquiera de las causales anteriormente señaladas, se emite una alerta visual y sonora utilizando el indicador de la figura 6.6 para que los investigadores puedan supervisar en cada caso y tomen las respectivas decisiones.



Figura 6.6: Indicador visual y sonoro.

Seguidamente se presenta el correspondiente software desarrollado en código D que describe lo anteriormente especificado.

```
\ **** SUBRUTINAS DE ENDIF IF R3 > 559
ALARMAS *****
\ COMPROBACION DE NIVEL DE \ COMPROBACION DE FLUJO \ TEMPERATURA DE DIVISOR
AGUA TANQUE PRINCIPAL DIVISOR MAYOR DE 35
LRAM 45 R3 LRAM 43 R3 R4 =E 2063
LRAM 1 R5 IF R3 < 27 EPOR R4 PT2
IF R3 = 3 R4 =E 2063 ENDIF
IF R5 = 0 EPOR R4 PT2 \ COMPROBACION
R4 =E 2063 ENDIF TEMPERATURA DE ENTRADA
EPOR R4 PT2 \ COMPROBACION LRAM 48 R3
TEMPERATURA LASER \ TEMPERATURA DE ENTRADA
MAYOR DE 25
ENDIF LRAM 46 R3 IF R3 > 400
ENDIF \ TEMPERATURA DEL LASER R4 =E 2063
MAYOR DE 35 EPOR R4 PT2
\ COMPROBACION DE FLUJO IF R3 > 559 ENDIF
LASER R4 =E 2063
\ FLUJO INFERIOR A 3.6 LITROS -- EPOR R4 PT2 \ **** SUBRUTINAS DE
1620/450 ENDIF ALARMAS *****
LRAM 42 R3
IF R3 < 27 \ COMPROBACION
R4 =E 2063 TEMPERATURA DIVISOR
EPOR R4 PT2 LRAM 47 R3
```

6.3. Interfaz de usuario

Seguidamente se presentan las modificaciones realizadas a la interfaz de usuario presentada en el epígrafe 1.4.2. Interfaz de usuario básica para permitir el envío de los parámetros de configuración, así como la activación de los diferentes lazos de control. Por otro lado, se muestran las subrutinas para la visualización de las diferentes variables analizadas tanto en lenguaje D como en la interfaz de LabView.

6.3.1. Interfaz para el envío de parámetros de configuración

Con anterioridad fue presentado el software general desarrollado, siendo modificado y adaptado a los requerimientos de la presente investigación. Como se muestra en la figura 6.7 se han modificado los Tolbox para cada uno de los parámetros de configuración y acciones a desarrollar.

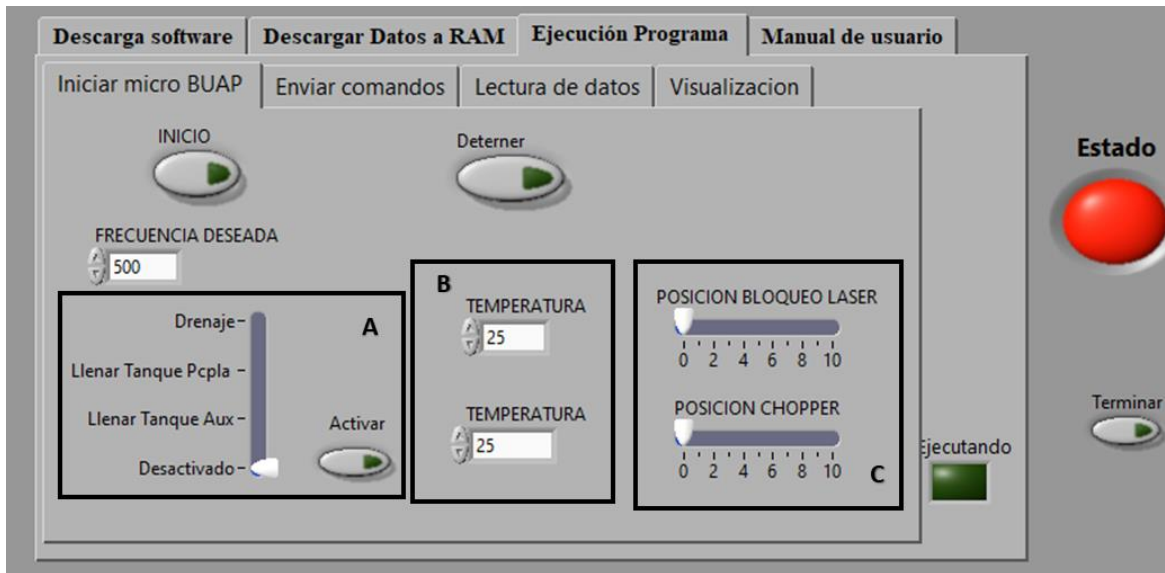


Figura 6.7: Interfaz de usuario. Envío de los parámetros y acciones de configuración.

El Tolbox de frecuencia ya se encuentra limitado a los valores de trabajo prácticos definidos con anterioridad, de esa manera se garantiza la operación adecuada del sistema desarrollado. Por otra parte, en esta interfaz se pueden definir las temperaturas deseadas (recuadro “B”), así como la selección de las diferentes acciones a desarrollar en el control de nivel (recuadro “A”). Han sido incorporadas las acciones de los lazos de control desarrollados por el Ing. Aguirre para el posicionamiento de los robots lineales (recuadro “C”).

Los datos o parámetros que se envían y codifican en el FPGA dependen de las acciones de control que se pretendan realizar, como se muestra en la figura 6.8. En ese caso se aprecia que en el momento en el cual se están ejecutando los algoritmos de control de nivel, el resto de los parámetros se mantienen en nivel nulo y viceversa.

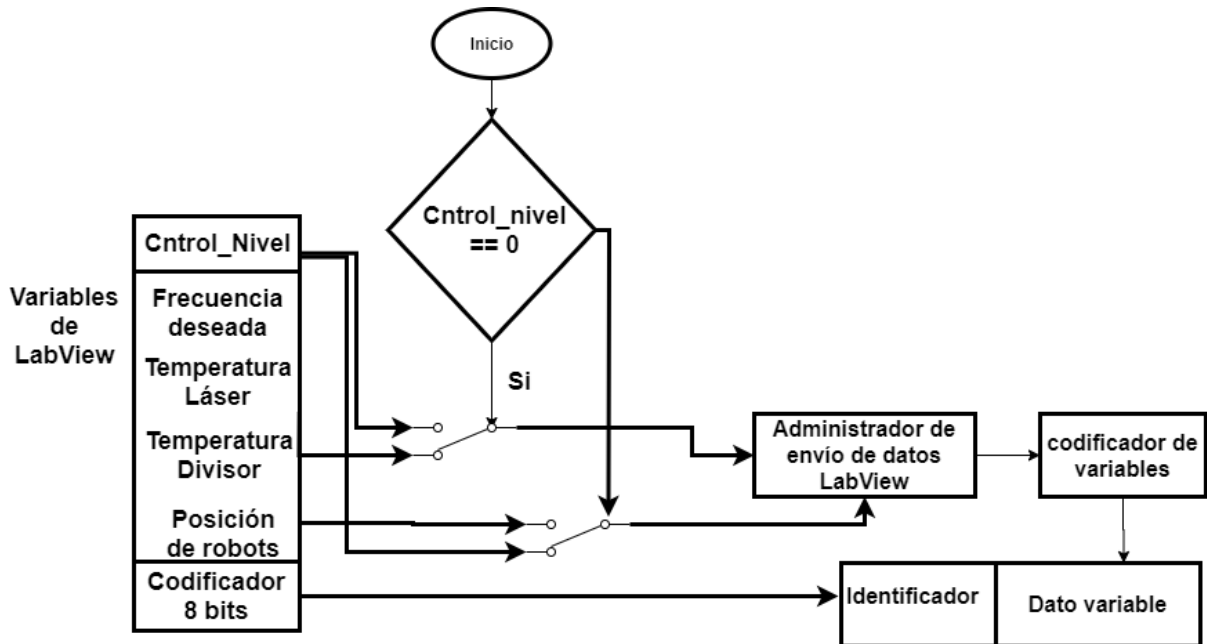


Figura 6.8: Envío de los parámetros y acciones de configuración.

Los algoritmos de control de nivel resultan excluyentes con el resto de los procesos que se desarrolla, figura 6.9, ello debido a cuestiones prácticas: es imposible realizar el experimento o cualquier otro proceso si no se ha garantizado la disponibilidad de agua o si se está en el proceso para garantizarla.

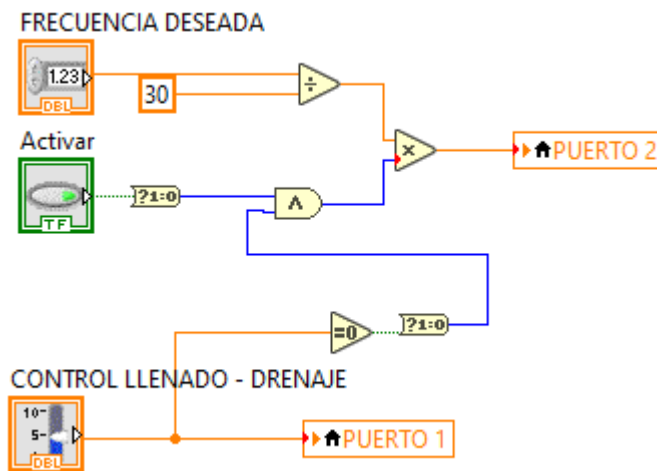


Figura 6.9: Envío de los parámetros de control de llenado y de control de frecuencia.

6.3.2. Interfaz para la visualización de parámetros

Otro de los aspectos modificados resultó la pestaña de visualización. La visualización de los datos es una de las cuestiones más importantes y permite a los investigadores el monitoreo de las acciones que se realizan al interior del procesador. Como resultan de interés la visualización de diferentes parámetros es necesario desarrollar un mecanismo de codificación que permita este proceso. Para su desarrollo se conforman palabras que son enviadas a través de la conexión inalámbrica, ahora bien, la formación de palabras requiere del desarrollo de un mecanismo mediante el cual sea posible su identificación y discriminación, para lo cual se le agregan etiquetas que indiquen el significado y el tratamiento a dar en cada uno de los casos.

En la figura 6.10 se presenta el algoritmo seguido para la conformación de las palabras que se manipulan en el proceso de visualización. En el caso de la primera palabra se envía la información concerniente a los valores de temperaturas (del divisor y del láser); así como los valores de nivel de agua. Se realiza un procesamiento matemático y se recorren mediante operaciones aritméticas la ubicación de cada una de las palabras. Una vez se ha definido la palabra y antes de su envío por la interfaz inalámbrica se procede a agregar su etiqueta o identificador (ha sido definida con una longitud de 3 bits que permite el envío de 8 palabras de 29 bits diferentes.). En el caso de la segunda palabra se realiza un proceso similar, solo se consideran las diferentes longitudes de las palabras que contienen a los valores de velocidad y flujo (en el láser y en el divisor) y se ajustan los corrimientos en función de este parámetro.

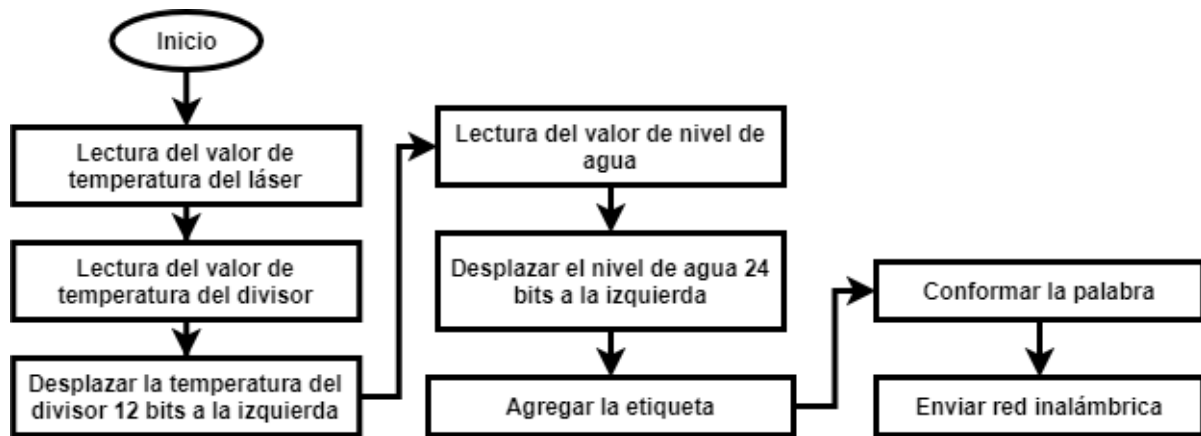


Figura 6.10: Conformación de la primera palabra para visualización.

Seguidamente se presenta el correspondiente software desarrollado en código D que describe lo anteriormente especificado.

```

\   ***   RUTINAS   PARA   IF R5 = 0   R4 = FP2INT R4
VISUALIZAR ****
                                     R4 = 1   LRAM 54 R3
\   LEO   INDICADOR   DE
VISUALIZACION   R6 = 268435456   R3 = R3 +E R4
LRAM 51 R5   R4 = R4 * R6   EPOR R3 PT0
    
```

```

ENDIF                                     \ FLUJO DIVISOR                             EPOR R3 PT0
IF R5 = 1                                 R6 = 65536                                     ENDIF
\FRECUENCIA ABAJO                         LRAM 43 R4                                     R6 = 1
LRAM 53 R3                                 R4 = R4 * R6                                   R5 = R5 + R6
R3 = FP2INT R3                             R4 = FP2INT R4                                 IF R5 > 1
R6 = 256                                   R3 = R3 +E R4                                 R5 = 0
\FLUJO LASER                              R6 = 268435456                               ENDIF
LRAM 42 R4                                 R4 = 2                                         R5 = 0
R4 = R4 * R6                               R4 = R4 * R6                                   ERAM R5 51
R4 = FP2INT R4                             R4 = FP2INT R4                                \   ***  RUTINAS   PARA
R3 = R3 +E R4                              R3 = R3 +E R4                                VISUALIZAR ****
    
```

Una vez se ha recibido el dato de 32 bits por la interfaz inalámbrica se procede a su manipulación dentro de LabView, para lo cual se decodifican cada una de las etiquetas, es decir se procesa el dato recibido y se le elimina la etiqueta (de 3 bits de longitud). Una vez se tiene el dato de 28 bits y en función de la etiqueta anteriormente señalada se procede a realizar la adecuada decodificación de la información recibida y a su posterior visualización en los diferentes Tolbox habilitados. En la figura 6.11, se presenta el proceso anteriormente descrito.

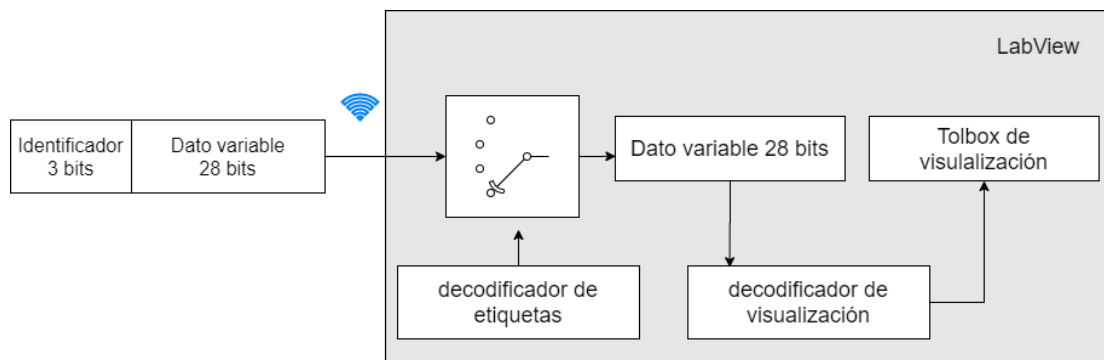


Figura 6.11: Procesamiento de datos en la interfaz de usuario para visualización.

En la tabla 6.2 se presentan las diferentes etiquetas utilizadas y los datos de cada palabra correspondiente, ello para el adecuado proceso de envío y posterior decodificación de la información transmitida.

Tabla 6.2: Etiquetas para visualización de parámetros en la interfaz gráfica de LabView.

Etiqueta	Datos enviados
01	Nivel de los tanques y temperatura en el láser y en el divisor
02	Frecuencia, Flujo de agua en el láser, Flujo de agua en el divisor
03	Temperatura en el tanque de almacenamiento

En la figura 6.12 se presenta el bloque de decodificación de los datos desarrollado en LabView. Se aprecia la lectura de los 32 bits de datos provenientes del puerto PT0 y su posterior manipulación empleando funciones lógicas y aritméticas para determinar el valor de las etiquetas. Una vez que han sido separadas las etiquetas se procede a enviar las palabras correspondientes para su procesamiento.

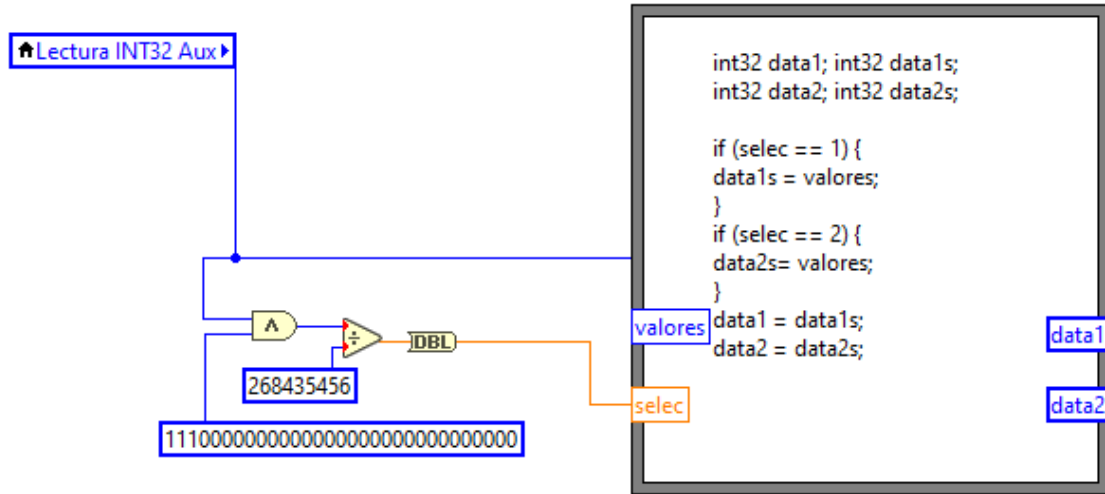


Figura 6.12: Bloque decodificador de etiquetas.

En la tabla 6.3 se presenta la estructura de la palabra enviada con etiqueta 2. En este caso se aprecia que los 8 primeros bits están ocupados con el valor de velocidad actual del rotor del robot chopper, mientras que los siguientes 16 bits corresponden a los valores de flujo detectados por cada uno de los sensores. Aún existe la posibilidad de enviar en esta palabra 12 bits de información adicional que no han sido de momento ocupados por no existir requerimientos al respecto.

Tabla 6.3: Estructura de la palabra para visualizar los valores de flujo y velocidad.

32 bit	[31..29] bit (Etiqueta)	[28..17] bit	[24..17] bit	[16..9] bit	[7..0] bit
No se usa	02	No se usa	Flujo del divisor	Flujo del laser	Velocidad actual

Con el adecuado conocimiento de la estructura de la palabra enviada, se procede a determinar cada uno de los parámetros, utilizando para ellos las operaciones lógicas y algebraicas disponibles en LabView.

En la figura 6.13 se presenta el proceso de decodificación de la frecuencia actual de trabajo del sistema. Se agrega el factor de 30 para considerar las ranuras con las cuales cuenta el robot tipo chopper.

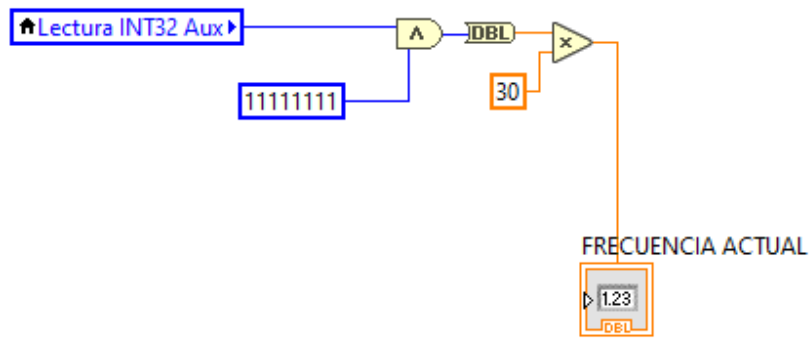


Figura 6.13: Decodificador de frecuencia.

Mientras que en el caso del flujo se procede como se muestra en la figura 6.14. En este caso el factor de multiplicación está en dependencia del sensor utilizado, para determinar este factor se parte de multiplicar por 60 para llevar las mediciones a la unidad de minutos y se divide entre la cantidad de pulsos que indican la circulación de un litro de agua.

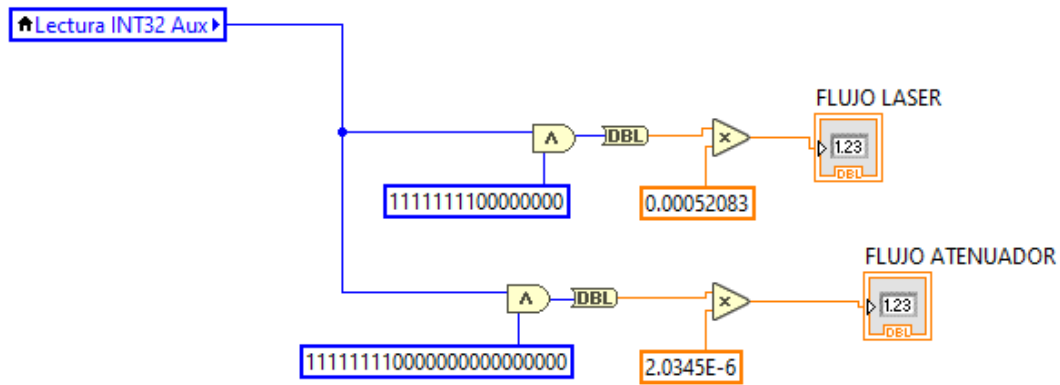


Figura 6.14: Decodificador de flujo.

De igual manera se presenta en la tabla 6.4 la estructura de la palabra que contiene los valores de temperatura y de nivel de agua. En este caso, el procesamiento debe de incluir la obtención de los valores reales de temperatura para lo cual se procede a implementar la ecuación (6.1). El procesamiento derivado de estos cálculos permite el conocimiento de los valores reales de cada uno de los sensores conectados al FPGA.

Tabla 6.4: Estructura de la palabra para visualizar los valores de temperatura y de nivel de agua.

32 bit	[31..29] bit (Etiqueta)	[28..25] bit	[24..13] bit	[12..0] bit
No se usa	01	Niveles de agua	Temperatura del divisor	Temperatura del láser

$$T (^{\circ}C) = \frac{dato[0]}{16} + \frac{dato[1]}{8} + \frac{dato[2]}{4} + \frac{dato[3]}{2} + dato[4] + dato[5] * 2 + \dots + dato[10] * 64 \quad (6.1)$$

En la Figura 6.15 se observa la implementación de los Tolbox para la visualización de los valores de temperatura; a la entrada del formula-node se encuentra la lógica combinatorial para obtener los 11 bits de interés que portan la información de temperatura proveniente de cada uno de los sensores.

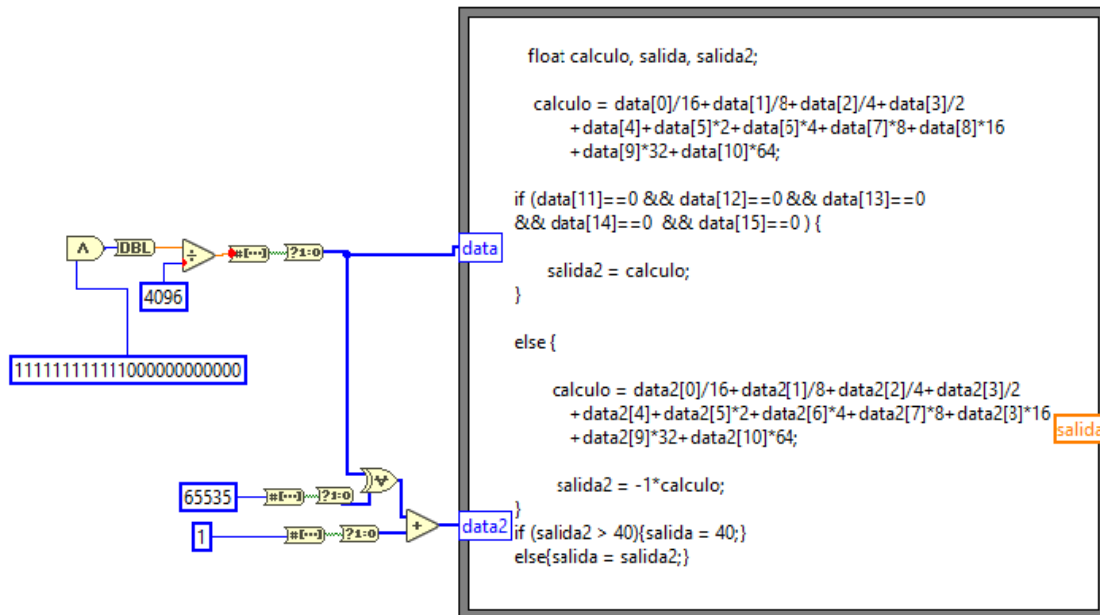


Figura 6.15: Toolbox para el procesamiento de los valores de temperatura.

En el interior del formula-node se implementa la ecuación (6.1), se desarrolla una estructura similar para cada uno de los sensores. De esta manera se convierte desde el formato entero original de los datos a un formato en °C por cuestiones prácticas al trabajar con la interfaz.

Acoplado al bloque anterior, se encuentra un bloque de control de visualización, figura 6.16. Este bloque permite la visualización de los valores de temperatura de manera gráfica, así como la implementación de una alarma sonora junto a la interfaz desarrollada. Por otro lado, se encuentra la lógica combinatorial para permitir el accionamiento de los leds indicadores de alarmas.

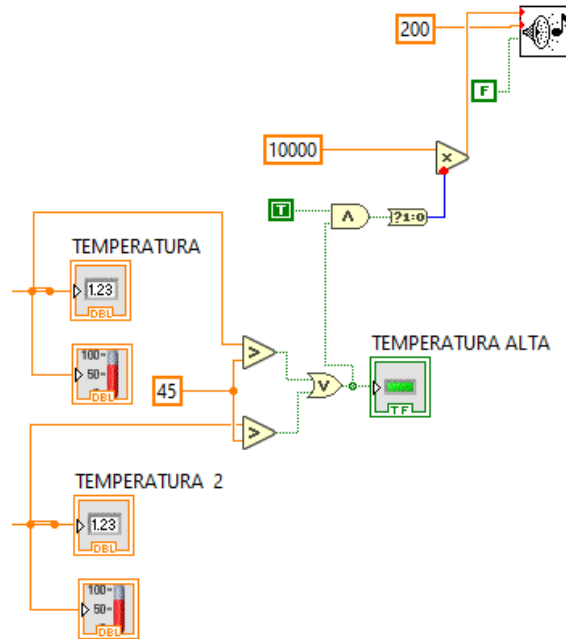


Figura 6.16: Control de los indicadores visuales de los valores de temperatura y el sistema auxiliar de alarmas.

En la figura 6.17 se observa las modificaciones realizadas a la sección de visualización que permiten a los usuarios el monitoreo de los parámetros de interés: niveles de refrigerante disponibles (recuadro “D”), así como las temperaturas (Temperatura 2 corresponde a la salida del láser y Temperatura a la entrada en el recuadro “C”) y la frecuencia de trabajo real y flujo de agua en el interior del espectrómetro (recuadro “A”) sirviendo esta sección para lograr una retroalimentación con el personal que trabaja en el laboratorio. Se incorpora además la visualización y señalización de las alarmas implementadas (recuadro “B”). Se aprecia cada uno de los Tolbox desarrollados y relacionados con las estructuras anteriormente descritas.

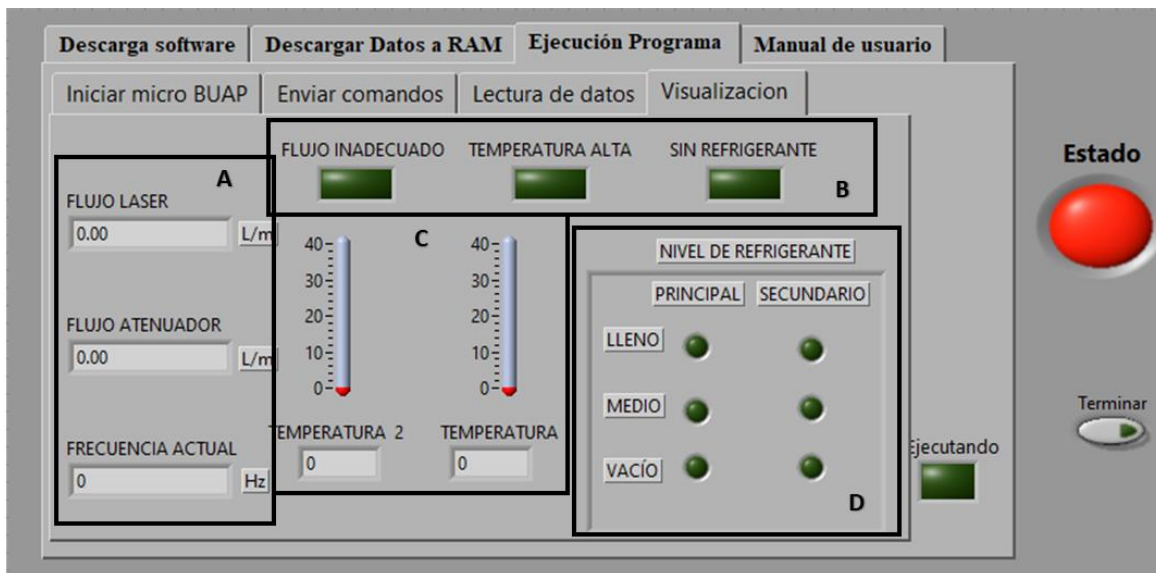


Figura 6.17: Interfaz de usuario. Visualización de variables.

6.4. Conclusiones del capítulo

De acuerdo con las características de los subsistemas desarrollados se procedió a realizar la integración electrónica de forma modular para una mejor comprensión del trabajo desarrollado y para permitir la fácil identificación y detección de fallas. El proceso de integración derivó en modificaciones a la interfaz de usuario para garantizar la interacción con el sistema desarrollado por parte de los investigadores, así como la visualización de los resultados preliminares. Con base en los requerimientos experimentales se presentó el sistema de alarmas desarrollado.

Capítulo 7 : Resultados experimentales

En el presente capítulo se presentan los principales resultados experimentales obtenidos en los sistemas desarrollados, así como su evaluación práctica.

7.1. Evaluación experimental del sistema de control de nivel de agua

Seguidamente se presentan los resultados experimentales obtenidos al evaluar los algoritmos de control descritos con anterioridad en el epígrafe 3.3. Algoritmos para el control de llenado dentro de la tarjeta de desarrollo. En la Figura 7.1 se puede observar la distribución de los diferentes elementos del sistema de control de nivel desarrollado. Se aprecia además las entradas de los electrodos de nivel a la caja de componentes electrónicos y las salidas para el control de las electroválvulas.

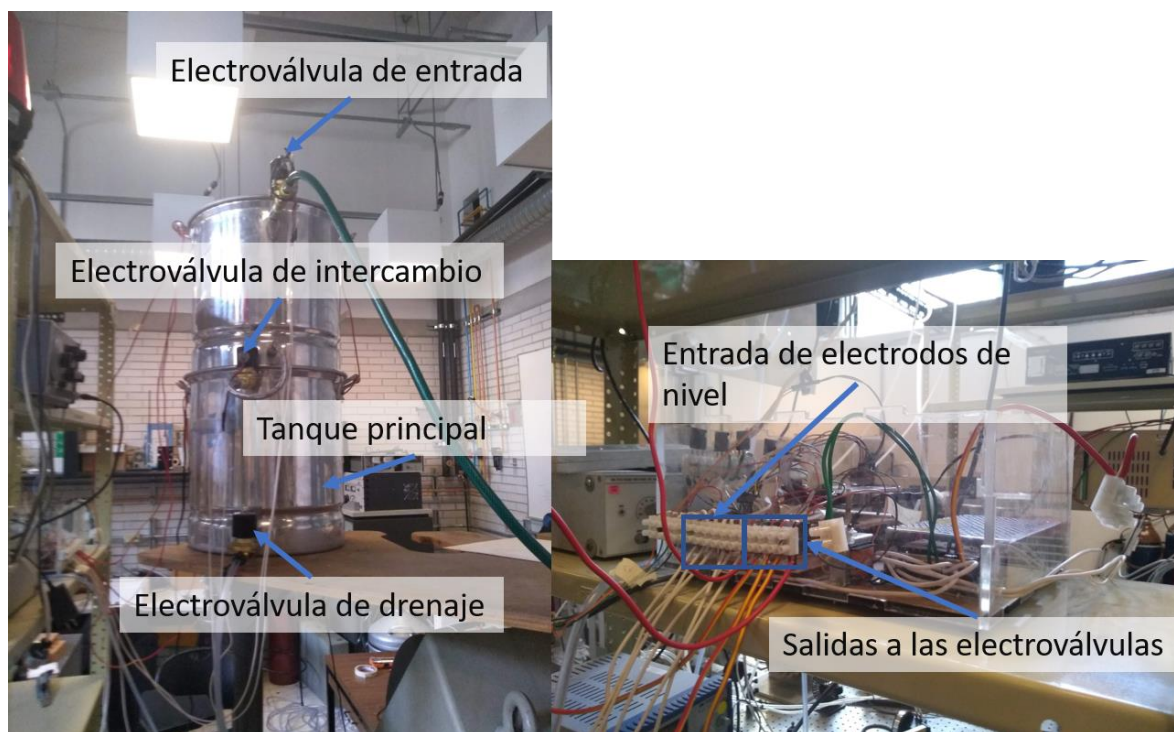


Figura 7.1: Distribución instrumental para el control de nivel.

En la figura 7.2 se presentan los resultados obtenidos durante la ejecución de la subrutina de llenado del tanque auxiliar. En el eje Y izquierdo: el nivel 0 corresponde al tanque vacío, el nivel 1 corresponde al tanque en niveles mínimos (el sensor se encuentra a una altura de 5 cm del fondo del tanque) y el nivel 2 corresponde al tanque completamente lleno (el sensor se encuentra a una altura de 20 cm del fondo del tanque). En el eje Y derecho: 1 corresponde a la electroválvula activa y 0 a la electroválvula inactiva.

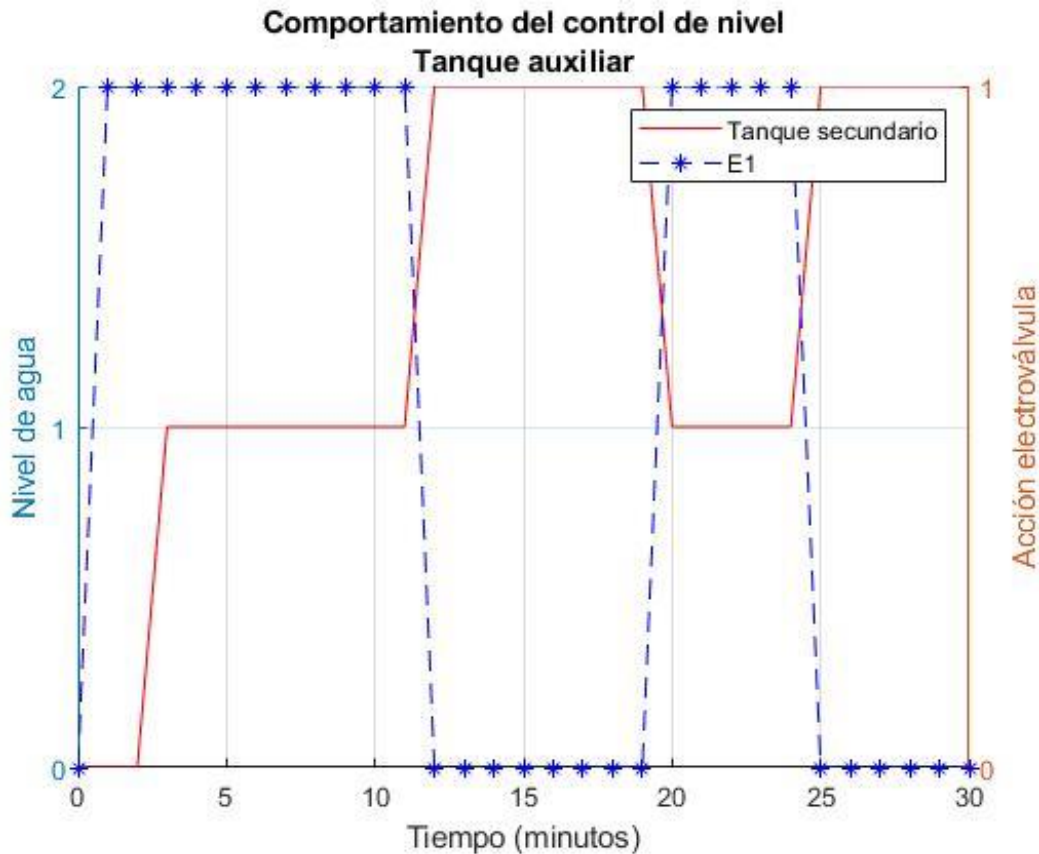


Figura 7.2: Resultados experimentales llenado del tanque auxiliar.

Como se observa, inicialmente el tanque se encontraba vacío, y la electroválvula de entrada se encontraba en estado lógico 0. Al iniciar la subrutina, ocurre un cambio de estado en la electroválvula y esta se activa, desde ese punto comienza a ejecutarse el programa diseñado.

Se aprecia como el nivel del agua contenida en el tanque comienza a modificarse y para los 2 minutos se ha alcanzado el primer nivel de agua cuantificable (nivel mínimo en los tanques), desde ese punto continúa abierta la electroválvula porque no se alcanza el nivel especificado en el proceso. A los 12 minutos, se alcanza el nivel de agua máximo y se observa como de manera simultánea ocurre una conmutación del nivel lógico de la electroválvula apagándose. De esta manera se completa el ciclo; mientras el nivel de agua en el tanque no se modifique la electroválvula continuará deshabilitada.

Se realizó una prueba para comprobar la robustez del sistema, para ello en el minuto 20 se procede a retirarle agua almacenada al tanque. Se observa que el sistema detecta una modificación en los niveles de agua almacenada (de máximo a medio), eso provoca que se active nuevamente la electroválvula de entrada para reestablecer el nivel de agua adecuada en el almacenamiento, esto se logra pasado unos 5 minutos y nuevamente se desactiva la válvula.

De esta manera se comprobó la robustez y la respuesta del sistema ante la variación de los niveles de agua que por cualquier motivo pueda afectarlos. Es necesario señalar el

comportamiento de la electroválvula, se aprecia que en los primeros 12 minutos se mantuvo siempre activa, sin importar las modificaciones en el nivel del tanque, sin embargo, ante una modificación del nivel del agua (minuto 20) se activa de manera inmediata. Este diseño le brinda robustez al trabajo realizado para garantizar la disponibilidad del agua.

Es necesario resaltar que los tiempos que demora en llenarse el tanque auxiliar pueden verse modificados en función del flujo de agua desde el sistema universitario debido al tipo de conexión física. El proceso de llenado el tanque principal es similar al descrito anteriormente.

En la Figura 7.3 se presentan los resultados experimentales al evaluar el proceso de drenaje, en los niveles de agua de los tanques (eje Y izquierdo) y en el funcionamiento de las electroválvulas (eje Y derecho). Es importante señalar que en este caso se ejecuta la secuencia una vez que se han verificados los protocolos de seguridad descritos en el epígrafe 3.3. Algoritmos para el control de llenado.

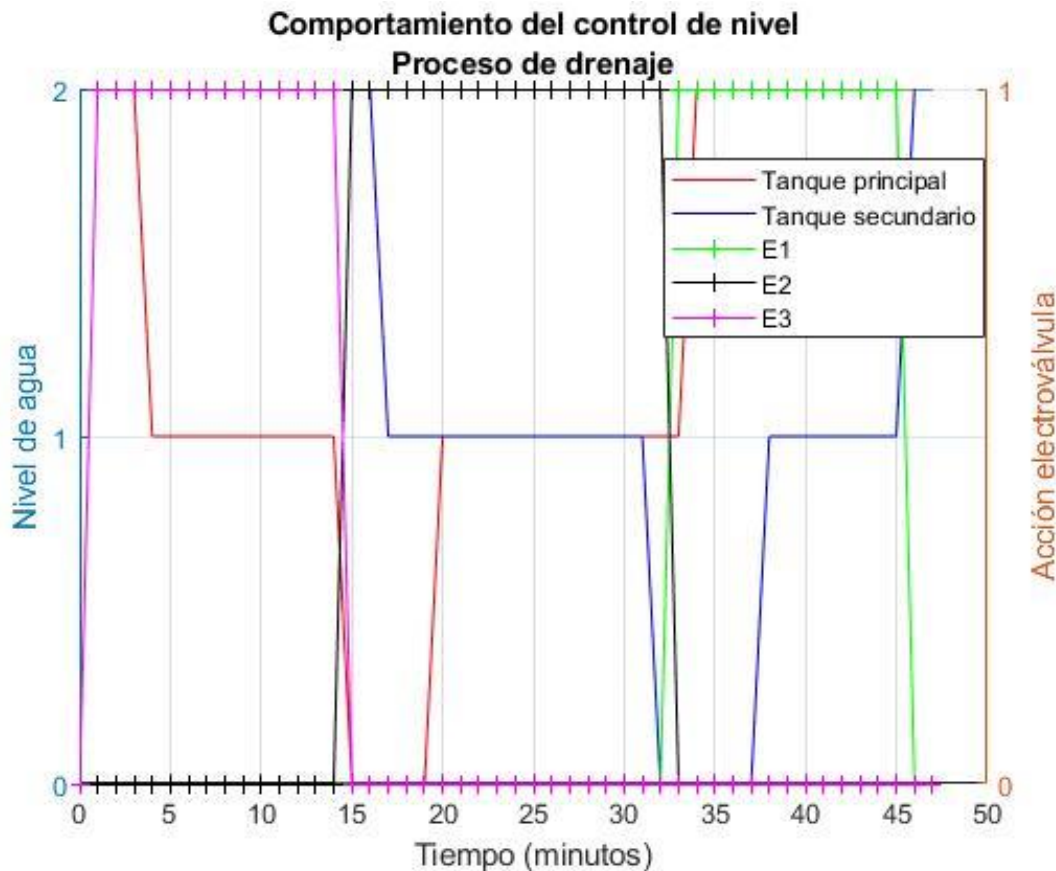


Figura 7.3: Resultados experimentales proceso de drenaje.

Inicialmente ambos tanques se encuentran en el máximo de su capacidad de almacenamiento (nivel 2 en los resultados experimentales). Cuando comienza el proceso de drenaje se activa la electroválvula de salida. Se observa cómo comienza a modificarse el nivel de agua contenido en el tanque principal. Se aprecia que sin importar el cambio en el nivel de agua de máximo a medio (minuto 4) no ocurre cambio alguno hasta tanto se ha drenado toda el

agua contenida en el tanque (minuto 15) en este momento, se desactiva la electroválvula y ha terminado la primera etapa del proceso.

La segunda etapa del proceso comienza cuando se ha alcanzado el mínimo de agua en el tanque principal, se observa cómo en ese momento se desactiva la electroválvula de salida y se activa la electroválvula intermedia. Una vez se ha activado esta electroválvula ocurre un proceso de transferencia de agua desde el tanque auxiliar al tanque principal, se aprecia la modificación en los niveles de agua hasta que el tanque principal se encuentra completamente lleno (minuto 35), se observa como la electroválvula modifica su estado y se desactiva. Este proceso demora 20 minutos y a diferencia del proceso de llenado del tanque auxiliar no existe ningún factor externo de presión que interfiera en la duración. De esta manera ha concluido la segunda etapa del proceso.

La tercera etapa del proceso se inicia una vez que se encuentra lleno el tanque principal y su objetivo es llenar el tanque auxiliar que se encuentra vacío. Se observa que esta etapa comienza los 32 minutos con la activación de la electroválvula de entrada, a partir de ahí ocurre un proceso similar al descrito con anterioridad en el llenado de este tanque.

En este caso todo el proceso tiene una duración de 45 minutos, sin embargo, esta duración puede ser modificada en función de la velocidad con la cual se llene el tanque auxiliar (recordar que depende de la conexión de agua externa).

De esta manera se realizó la evaluación experimental del sistema de control de nivel con resultados satisfactorios.

7.2. Evaluación experimental del sistema de control de temperatura

A partir de la caracterización inicial realizada en el epígrafe 4.2. Caracterización inicial del sistema de enfriamiento, se procede a evaluar el esquema de control propuesto en la presente investigación, ver el epígrafe 4.3. Algoritmo para el control de temperatura.

En la figura 7.4 se puede observar la distribución instrumental del sistema de temperatura diseñado, así como la ubicación de los sensores Temperatura 1 (a la entrada del láser) y Temperatura 2 (a la salida del láser). Resulta necesario que el sensor se encuentre en contacto con el agua, para ello se imprimió, utilizando una impresora 3D, una pequeña caja a través de la cual se hace circular el agua y en cuyo interior se posicionan los sensores.

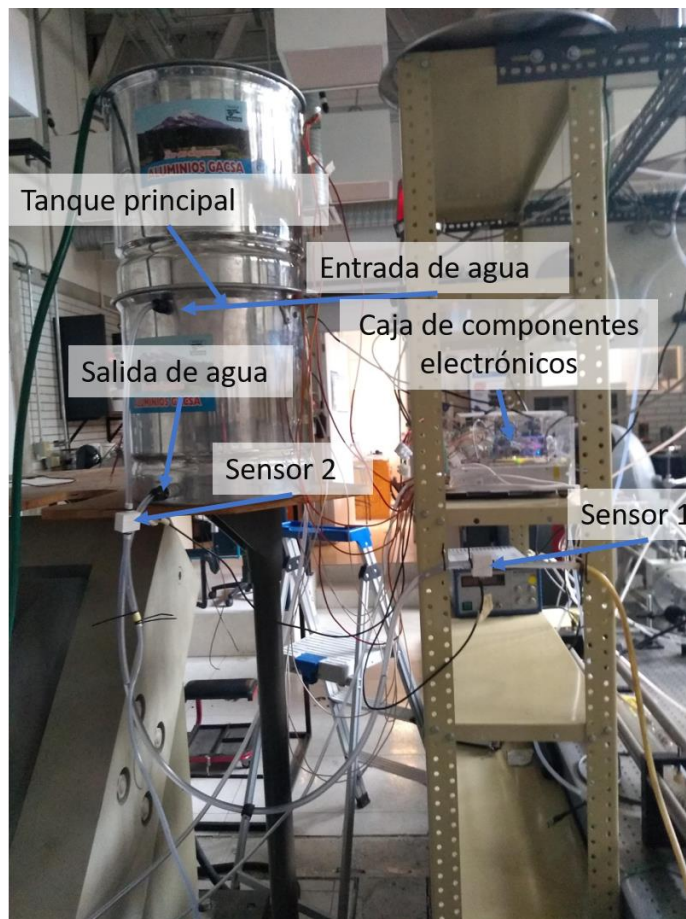


Figura 7.4: Distribución instrumental del sistema de control de temperatura.

En la figura 7.5 se muestran los resultados experimentales obtenidos en esa evaluación. Se observa que la temperatura de almacenamiento del agua se eleva debido al proceso de retroalimentación de esta; el sistema desarrollado no tiene la capacidad efectiva de disipar adecuadamente el calor extraído del interior del láser. Como la temperatura de almacenamiento se modifica y se eleva, ocurre un corrimiento de la temperatura de operación del láser, de color azul en la figura, y no se logra un control efectivo de este parámetro. Se aprecia además una diferencia de temperatura salida-entrada de 6 °C.

Se identifica una nueva problemática al observar cómo se eleva la temperatura de almacenamiento del agua debido a una insuficiente disipación de potencia. El aumento de la diferencia térmica está en relación con el flujo de agua circulante. De lo anterior se arriba a dos conclusiones o necesidades: primero la modificación del esquema de control para considerar una etapa de disipación de potencia más efectiva que evite el proceso de corrimiento térmico, y segundo valorar el aumento del flujo de agua circulante en el interior del láser, este proceso se detallará seguidamente.

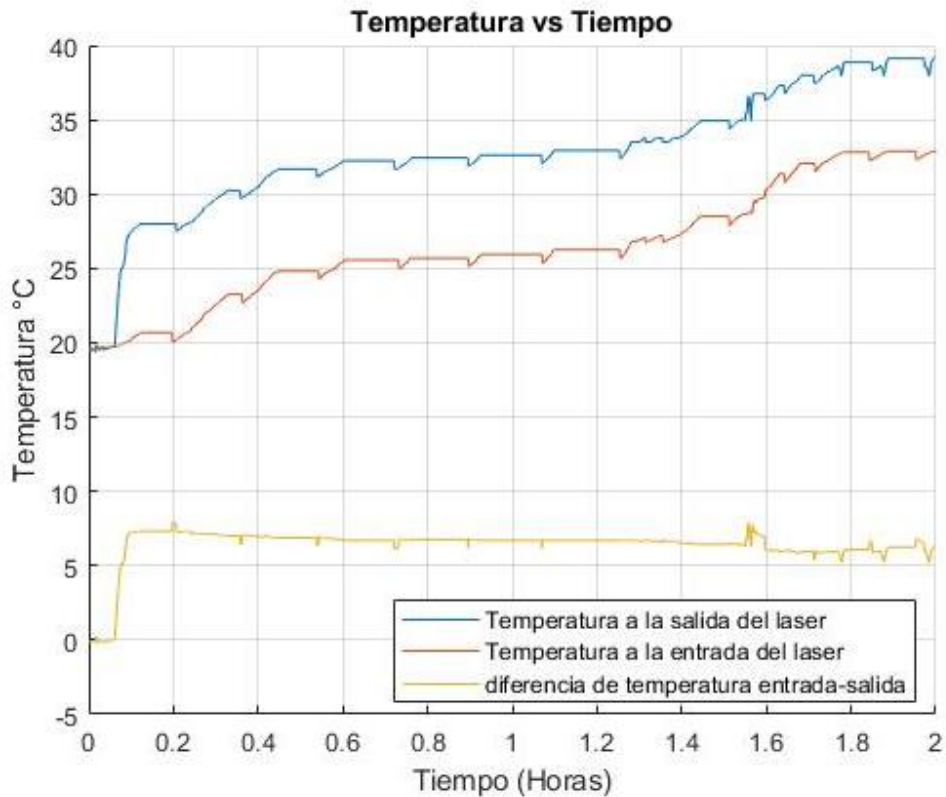


Figura 7.5: Resultados experimentales con el esquema de control inicial propuesto.

7.2.1. Modificación del esquema de control de temperatura

Considerando los resultados experimentales obtenidos en la evaluación inicial se realiza una modificación al diagrama para el control de temperatura propuesto en la figura 4.1. Se mantienen los elementos originales, pero se le agrega una etapa específica de disipación de potencia. Esta etapa tiene como objetivo disipar los 5 °C anteriormente señalados para evitar el corrimiento térmico del agua almacenada. En la figura 7.6 se presenta el nuevo esquema propuesto y seguidamente se procede a evaluar diferentes estructuras para permitir la disipación de la potencia térmica generada en el interior del láser.

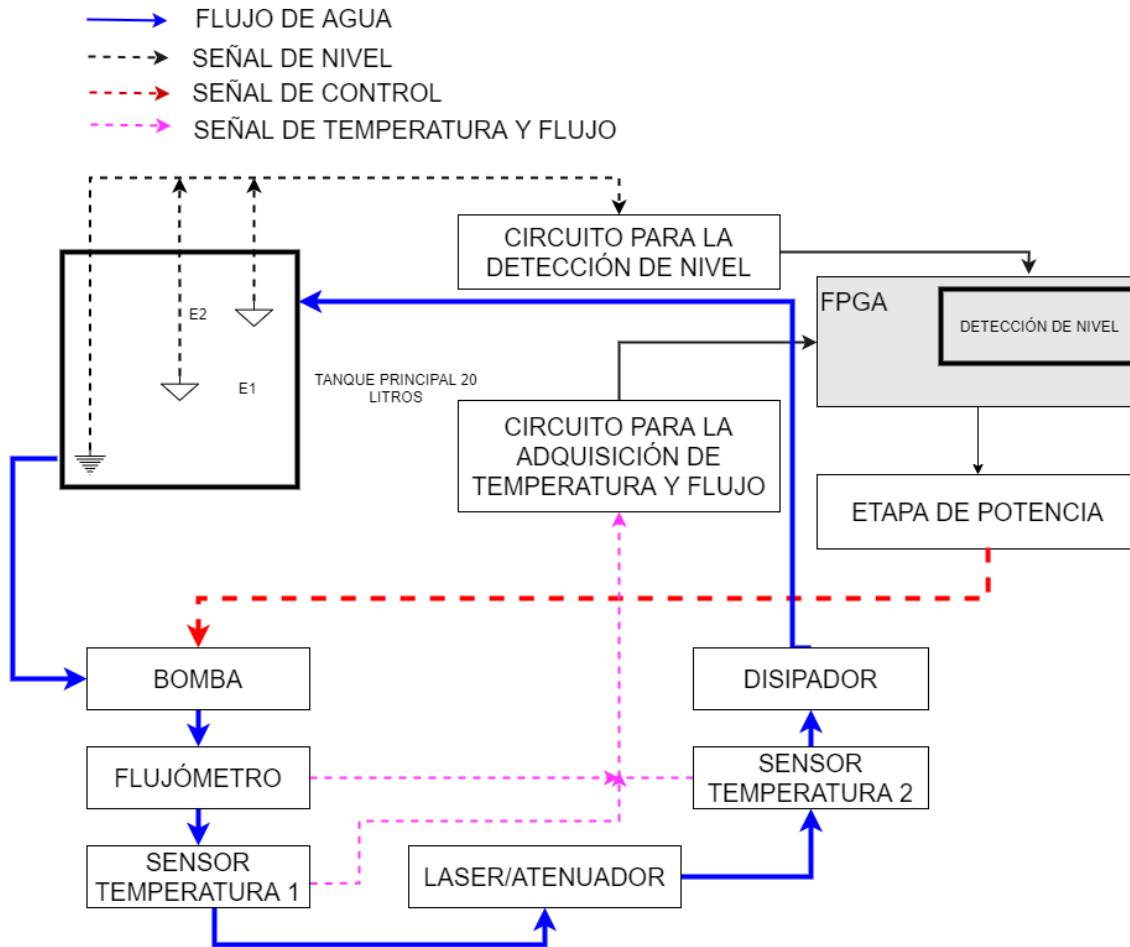


Figura 7.6: Diagrama general modificado para el control de temperatura.

7.2.2. Estructura de disipación con serpentín de cobre

La estructura de disipación inicialmente diseñada se presenta en la figura 7.7. Esta estructura se diseñó con el empleo de 15 metros de tubo flexible de cobre en forma de serpentín, con una separación entre cada una de las vueltas de 2 cm, de esta manera se aumenta la superficie de contacto del agua con el medio ambiente y se aprovechan las características térmicas del cobre como buen conductor del calor. Para aumentar la disipación de potencia, se incluye un sistema interior de aspas, las cuales son impulsadas por un motor de 12 volts. Las aspas aumentan la circulación de aire al interior de la estructura y de esta manera la capacidad para disipar el calor. La principal problemática que se tiene con esta estructura está dada por el hecho de que no se podría refrigerar más allá de la temperatura ambiente. Por otro lado, es necesario considerar que en la misma medida en la cual la temperatura del agua de salida del láser se aproxime a la temperatura ambiente, el gradiente o la capacidad de disipación térmica disminuirá.

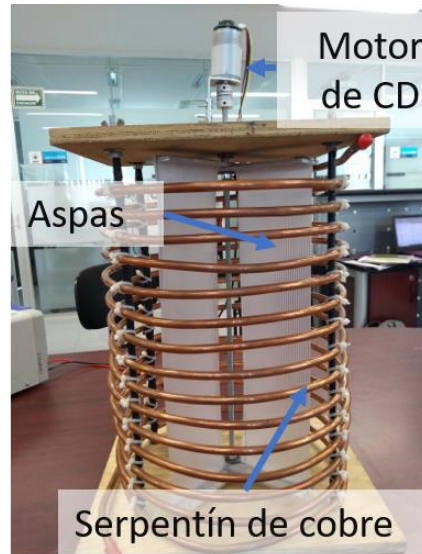


Figura 7.7: Estructura disipadora con serpentín de cobre y aspas.

En la figura 7.8 se pueden apreciar los resultados experimentales al evaluar el esquema de control considerando esta estructura de disipación. En este caso la evaluación práctica se realizó por un tiempo de 45 minutos.

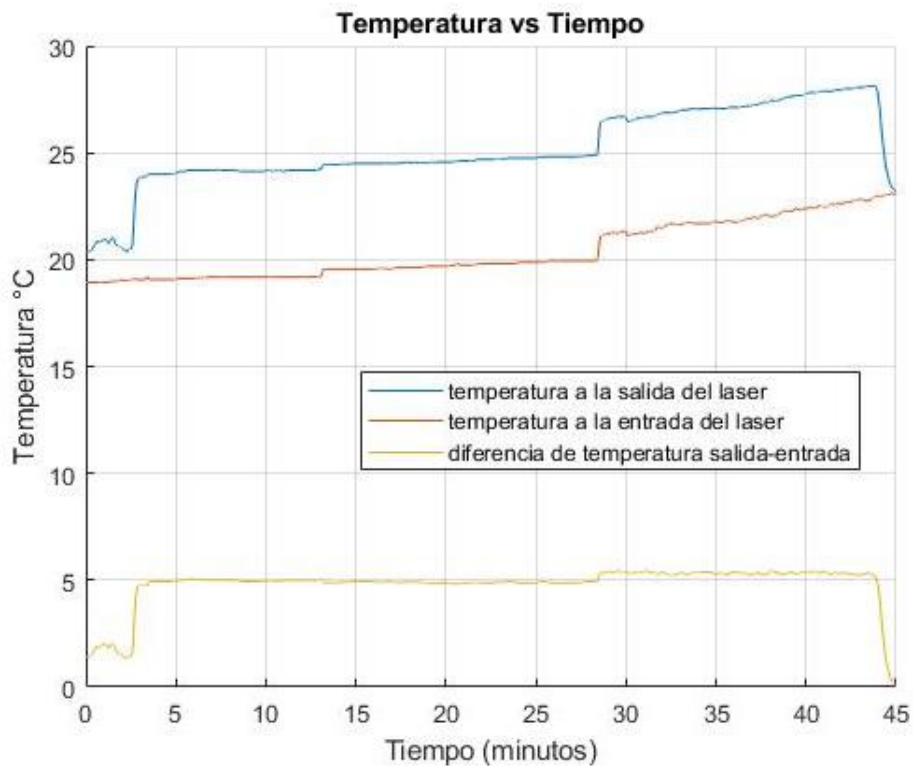


Figura 7.8: Resultados experimentales con estructura disipadora de serpentín de cobre.

Se observa, a pesar de la estructura de disipación, las temperaturas continúan elevándose de manera similar a los primeros resultados experimentales; sin embargo, al comparar los

resultados con los presentados en la Figura 7.5 donde se alcanza una temperatura de 27 grados a los 12 minutos, mientras que la misma temperatura se alcanza hasta los 40 minutos (en la figura 7.8). Los resultados mostrados evidencian que a pesar de que se disipa potencia utilizando la estructura de cobre, esta no resulta suficiente para evitar que suba la temperatura del tinaco al retroalimentar el agua. Bajo estos resultados, se considera el empleo de otra estructura, en este caso empleando el efecto termoeléctrico con dispositivos semiconductores.

7.2.3. Estructura de disipación con celdas Peltier.

El efecto termoeléctrico explica la conversión de la diferencia de temperatura en electricidad y viceversa. Este efecto abarca tres procesos identificados: el efecto Seebeck, el efecto Peltier y el efecto Thomson. En este caso el interés será crear una diferencia de temperatura al aplicar determinado voltaje (efecto Peltier). El efecto Peltier fue descubierto en 1834 por Jean Peltier y hace referencia a la creación de una diferencia de temperatura debido a una corriente eléctrica incidente. Sucede cuando una corriente fluye a través de dos metales o semiconductores conectados por dos juntas Peltier; la corriente genera una transferencia de calor de una junta a la otra: una cara se enfría mientras la otra se calienta. Una manera simple de explicar el proceso es considerar que cuando los electrones se mueven de una región de alta densidad a una región de menor densidad ocurre un proceso de expansión similar al de un gas ideal y ello redundaría en el enfriamiento de la región [47].

Cuando se hace fluir una corriente a través del circuito descrito en la figura 7.9, se genera calor en la unión superior (T2) y este es absorbido por la unión inferior (T1).

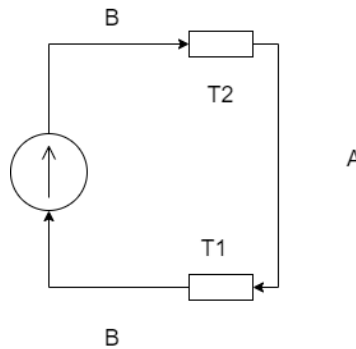


Figura 7.9: Circuito equivalente del efecto Peltier.

El calor absorbido en la región inferior por unidad de tiempo (\dot{Q}) viene especificado por la ecuación (7.1) [47]

$$\dot{Q} = \Pi_{AB}I = (\Pi_A - \Pi_B) I \quad (7.1)$$

Donde Π_{AB} es el coeficiente Peltier de todo el termopar, I es la corriente que circula entre las juntas, Π_A y Π_B son los coeficientes de cada uno de los materiales. Los coeficientes indican cuanto fluye el calor por unidad de carga a través de un determinado material. De forma

natural, los conductores estarán intentando retornar a su punto de equilibrio, por ello absorben energía de un lado y la liberan del otro. Un efecto interesante derivado de lo anterior viene dado por el hecho de que la dirección de transferencia de calor es controlada por la polaridad de la corriente; es decir, si se invierte la polaridad se modifica la dirección de transferencia energética y por tanto el signo del calor absorbido/generado. El principal inconveniente de este tipo de dispositivo es su alto consumo energético [47].

Luego, una celda Peltier es un dispositivo de estado sólido que transfiere calor de un lado a otro. En la figura 7.10 se muestra la estructura diseñada para la extracción de la potencia utilizando celdas Peltier.



Figura 7.10: Estructura disipadora con arreglo de celdas Peltier.

Para mejorar la eficiencia energética, se diseñó una estructura alrededor del serpentín de cobre. Esta estructura, fabricada de unigel, permite aislar la temperatura del medio externo de la temperatura interna del disipador. De esta manera, el arreglo Peltier que se considera, solo debe de extraer la temperatura del agua que circula por el serpentín. En la figura 7.11 se pueden visualizar los resultados experimentales al evaluar esta estructura.

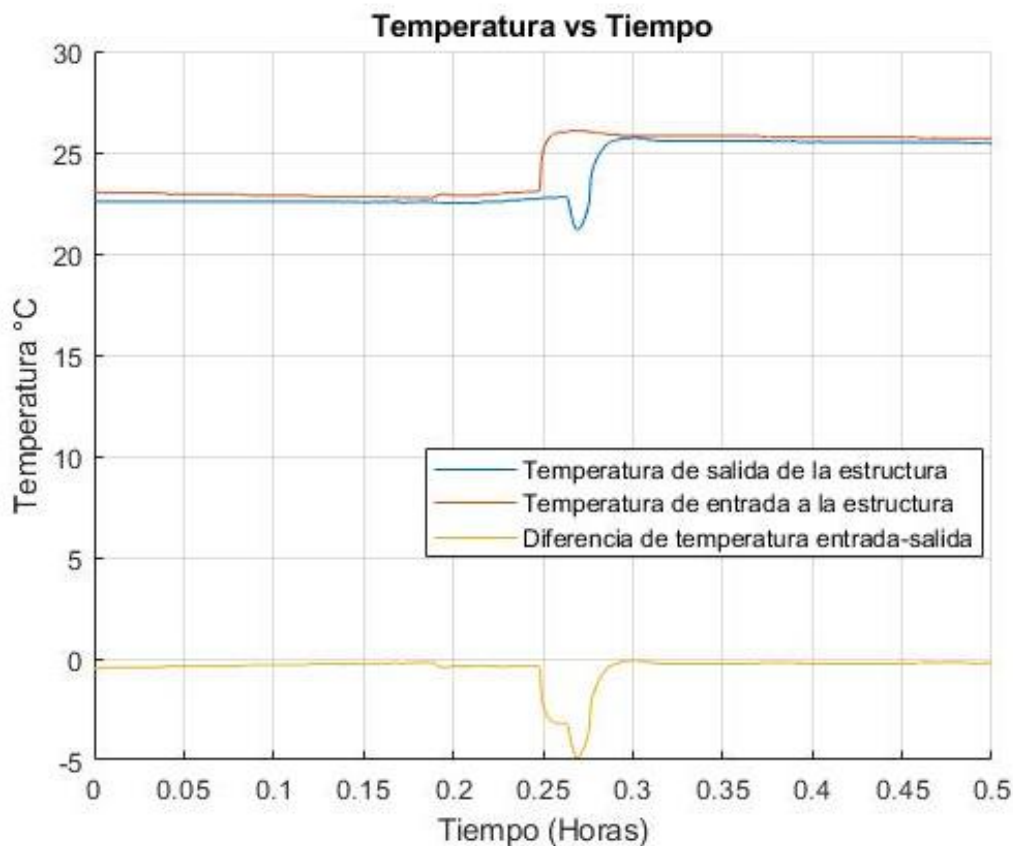


Figura 7.11: Evaluación experimental del sistema con celdas Peltier.

En la gráfica se muestra que, al iniciar la circulación del agua, se logra por un instante disminuir su temperatura en 5 °C (requerimiento del experimento), sin embargo, conforme comienza a circular el agua, la temperatura de salida prácticamente se iguala a la temperatura de entrada del líquido (la diferencia de temperatura salida-entrada de es de 0.4 °C). Lo que ha ocurrido es un desplazamiento de la región de trabajo de las celdas, esto se da porque la cantidad de energía a extraer es muy grande y se sobrepasa la capacidad de extracción. Luego para las condiciones de trabajo del experimento este segundo esquema de disipación no sería suficiente y no podría extraer la potencia necesaria. Es preciso considerar otro esquema de trabajo.

7.2.4. Estructura de disipación con arreglo de enfriadores comerciales

Con los resultados previos obtenidos, considerando que se necesita mantener refrigerado en todo momento el agua que se utiliza, se propone el empleo de un mini enfriador comercial para garantizar la temperatura en el almacenamiento. El enfriador propuesto es el que se presenta en la figura 7.12.



Figura 7.12: Mini-enfriadores para control de temperatura.

Este dispositivo tiene integrado un microprocesador para garantizar la temperatura del agua. Permite la programación de la temperatura deseada, realiza funciones de enfriamiento y calentamiento en función de las necesidades. Su programación es relativamente sencilla y permite definir el rango de operación necesario. Para su correcto funcionamiento se hace circular el agua en su interior con un flujo máximo de 3 l/min. En la tabla 7.1 se presentan sus principales características.

Tabla 7.1: Características del mini-enfriador Stc-200.

Modelo	Stc-200
Voltaje nominal	12V
Potencia	100 W
Flujo máximo	3litros/minuto
Dimensiones	115x110x190 mm
Control de temperatura	Automático
Rango de operación	10 °C – 40 °C (ajustable)
Alarma de temperatura alta	50-110 °C (Ajustable)

Se procedió a caracterizar el enfriador seleccionado, en la figura 7.13 se presentan los resultados obtenidos. Cada enfriador permite una diferencia térmica entrada-salida de 0.6°C. Para lograr disipaciones mayores es preciso utilizar arreglo de enfriadores conectados en serie.

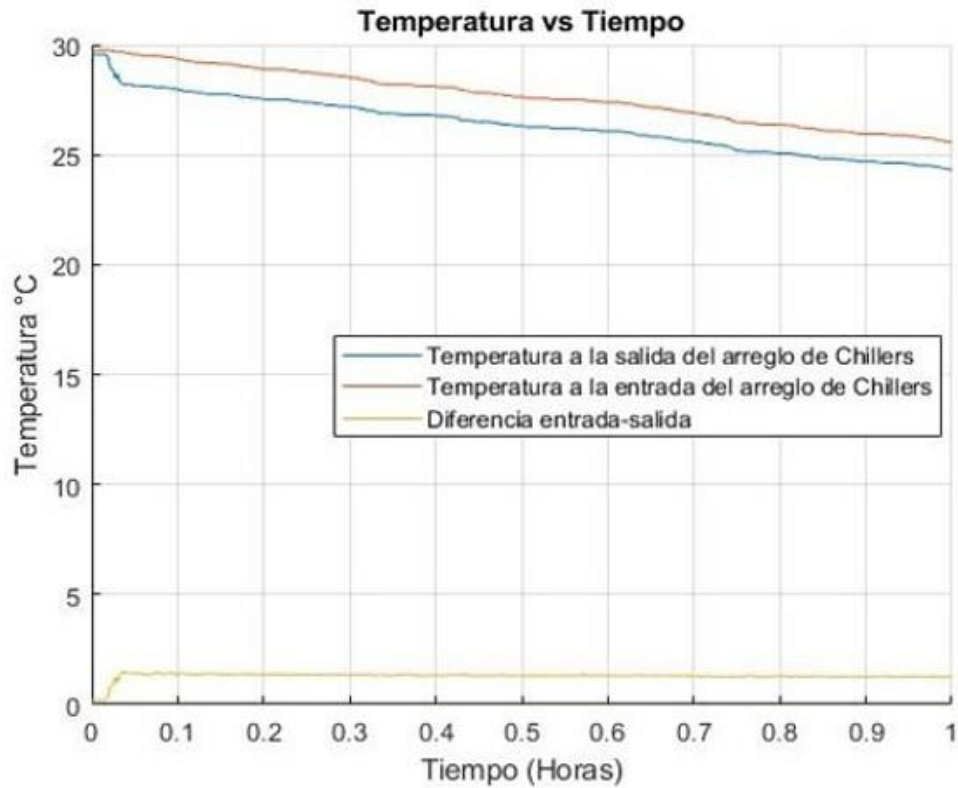


Figura 7.13: Caracterización del mini enfriador Stc-200.

El arreglo se construyó con los dispositivos colocados en serie, ver la figura 7.14, de esta manera cada uno de los dispositivos por los cuales circula el agua enfría al líquido en el factor mencionado con anterioridad elevando la eficiencia del sistema



Figura 7.14: Conexión de los mini-enfriadores.

. Entre las ventajas de utilizar este tipo de tecnología, en comparación con las anteriormente expuestas se señala que resulta posible disminuir la temperatura del almacenamiento a

valores por debajo de la temperatura ambiente, al ser un dispositivo comercial, el fabricante garantiza el control sobre los parámetros de configuración y por tanto permite mantener un valor constante de la variable física que se analiza. Los dispositivos tienen incluida una funcionalidad de alarma propia, lo cual les brinda mayor robustez a los sistemas y permiten el ahorro de portadores energéticos en comparación con la cantidad de energía necesaria para utilizar el arreglo de celdas peltier. De manera general, este arreglo exhibe una relación costo-beneficio-tiempo superior al resto de las tecnologías consideradas con anterioridad. Cuando nos referimos al factor tiempo consideramos el hecho de que solo requiere de la adecuada formación de los arreglos, a diferencia del resto de las variantes que se consideraron en las cuales existían factores externos o de eficiencia energética que las limitaban.

En la figura 7.15 se presenta la gráfica de comportamiento de la temperatura al utilizar un arreglo de dos enfriadores. Como se observa la temperatura inicial del agua era de 20°C y se logró en 1 hora disminuir esa temperatura hasta los 15°C. Por otro lado, es posible apreciar que este arreglo nos permite una disipación de 1.3°C. Es preciso considerar dos factores importantes al emplear este tipo de tecnología: el primero con relación al flujo de agua circulante en el interior del enfriador, de ser mayor al especificado por el fabricante se pierde la efectividad del sistema, y el segundo referido al espacio circundante al enfriador, es preciso un espacio de ventilación de 20 cm para lograr un intercambio óptimo de la temperatura.

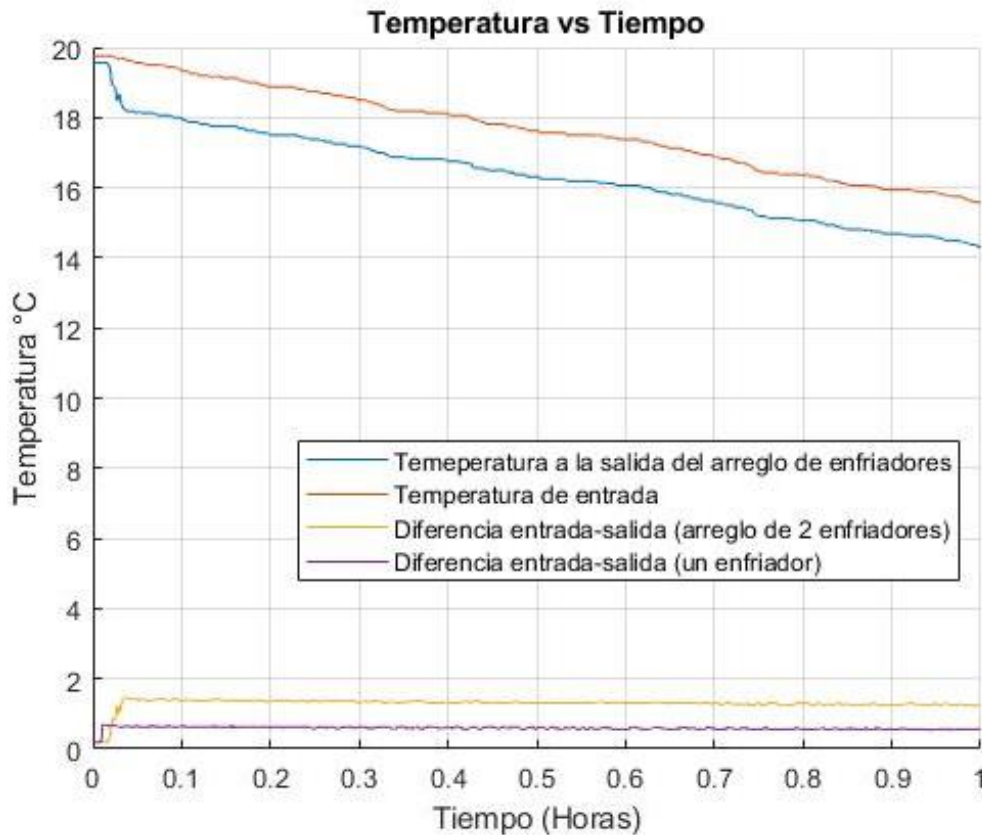


Figura 7.15: Evaluación experimental del arreglo de enfriadores.

En la Figura 7.16 se presentan los resultados experimentales de evaluar dos arreglos de mini-enfriadores de diferentes longitudes y con diferentes flujos de agua interno. Con una estructura formada por dos mini-enfriadores con un flujo de agua de 3 litros/minuto, se puede observar que se la diferencia de temperatura salida-entrada que se obtiene es de 1.3°C . Ahora se procedió a aumentar el número de elementos del arreglo a 3 y se disminuyó el flujo de agua en el interior de los dispositivos y se obtiene una diferencia de temperatura salida-entrada de 5.4°C .

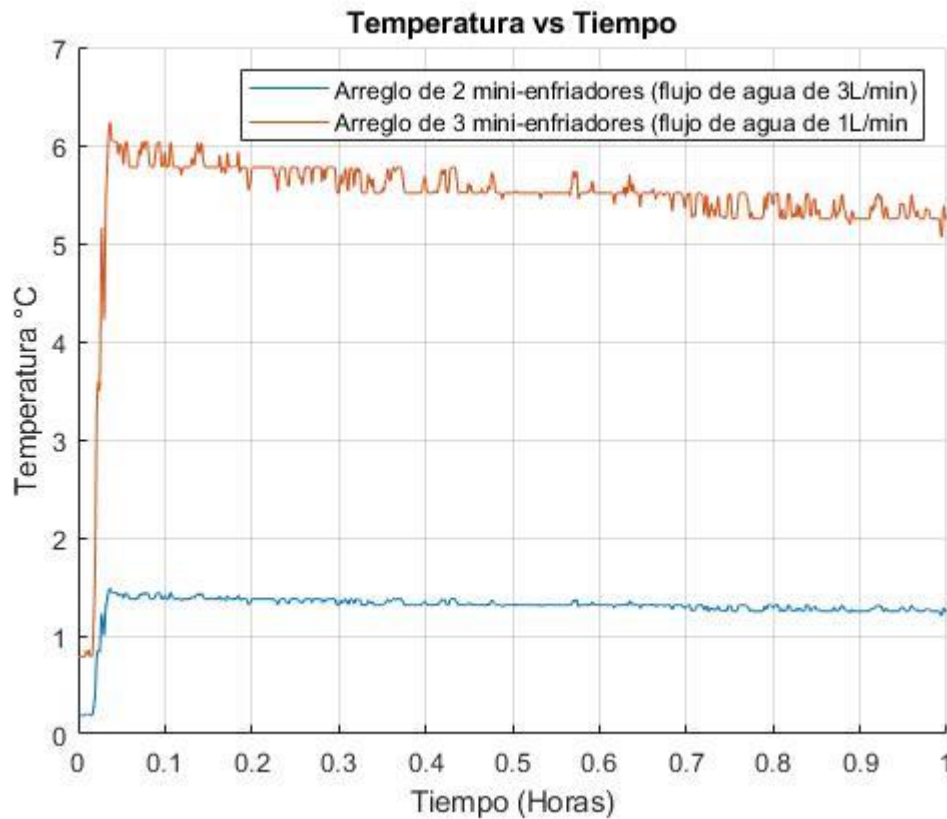


Figura 7.16: Disipación de energía con arreglos de mini-enfriadores de diferentes longitudes.

De esta manera, utilizando un arreglo de 3 mini-enfriadores, conectados en serie y con un flujo de agua interno de 1 litro/minuto, se obtiene la diferencia de energía suficiente para disipar la temperatura extraída del láser y de esta manera evitar los procesos de deriva anteriormente señalados, siendo suficiente bajo las condiciones planteadas.

7.3. Evaluación experimental del pulsador mecánico

Seguidamente se presentan los resultados experimentales obtenidos al evaluar el esquema de control propuesto en el epígrafe 5.2. Esquema de control. En la figura 7.17 se puede observar la integración realizada con el pulsador mecánico desarrollado y la caja en la cual se encuentra la electrónica que corresponde a su etapa de potencia.

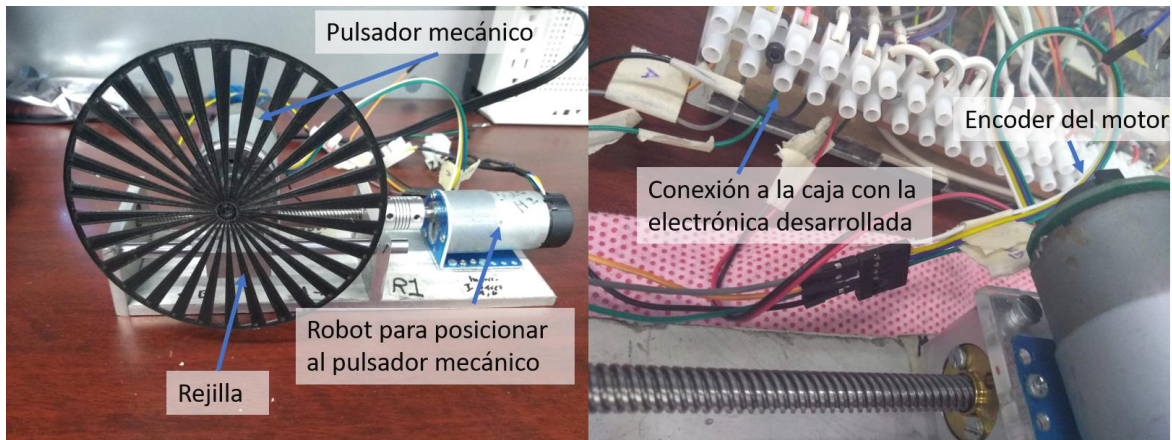


Figura 7.17: Integración del pulsador mecánico.

En la figura 7.18 se observa en el osciloscopio la señal en cuadratura proveniente del canal A del encoder del robot. Para determinar la frecuencia de operación real del Chopper, utilizando un osciloscopio, se considera la velocidad de rotación del eje, y se multiplica por el factor de rejilla, tal como se muestra en la ecuación (7.2).

$$Frecuencia_Chopper_{real} = \frac{Frecuencia_{en_cuadratura}}{16} * 30 \text{ (Hz)} \quad (7.2)$$

El proceso de estimación de la velocidad de operación del motor se realiza, como ha sido comentado, utilizando la diferenciación numérica y el conocido método de Euler. Esta técnica permite aproximar de manera sencilla y rápida la derivada de una función [48].

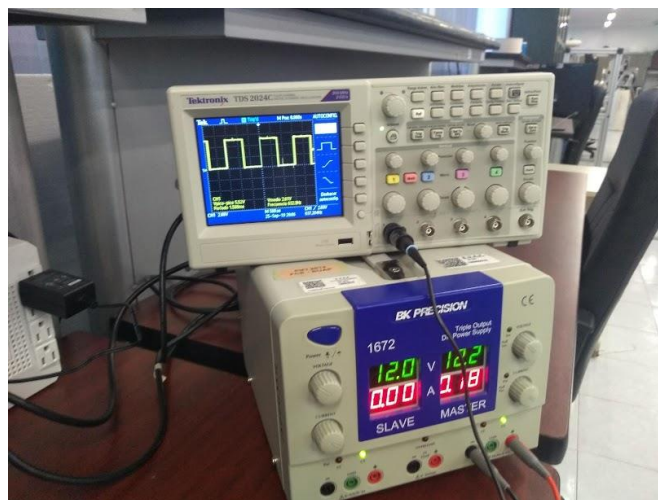


Figura 7.18: Obtención de la salida provenientes del canal A encoder del motor.

La velocidad del motor va a estar dada por:

$$Velocidad_{motor} = \frac{Posición_{actual} - Posición_{anterior}}{\Delta t * 64} \text{ rev/seg} \quad (7.3)$$

El valor de la base de tiempo se ha fijado en 10 ms, de esta manera se toman las muestras suficientes para un correcto cálculo de la velocidad. El método utilizado permite realizar la estimación numérica del comportamiento de la velocidad a partir del conocimiento de las posiciones en tiempo real [48]; sin embargo, es posible encontrar errores producto a la retroalimentación de armónicos o en casos de que el encoder del motor no responda de manera adecuada, ello redundaría en un mal cálculo de la velocidad actual, y por tanto, ocurre una perturbación en la respuesta de los sistemas.

En la figura 7.19, figura 7.21, figura 7.23 y figura 7.24 se presentan los resultados experimentales para las frecuencias de prueba 300 Hz, 600 Hz, 720 Hz y 1200 Hz respectivamente. Mientras que en la figura 7.20, figura 7.22 y figura 7.25 se muestra el corrimiento en frecuencia para las frecuencias de prueba 300 Hz, 600 Hz y 1200 Hz respectivamente. En todas las figuras se observa la ocurrencia de un proceso transitorio, en el cual se muestran varios sobretiros; estos sobretiros pueden ser mitigados disminuyendo el valor de la ganancia proporcional K_p ; sin embargo, el disminuir la ganancia implica que el tiempo de establecimiento sea mayor resultando perjudicial a los intereses experimentales. Los valores de corrimiento en frecuencia se obtuvieron a partir de la herramienta de Matlab para gráficos que permite determinar el desplazamiento máximo en relación con el valor centrar esperado.

En la figura 7.19 se observa el comportamiento oscilante de la frecuencia resultante, aunque los valores oscilan alrededor de la frecuencia deseada, existe un corrimiento de frecuencia máximo (Jitter) de 8.6 Hz que corresponde a 2.87%, figura 7.20.

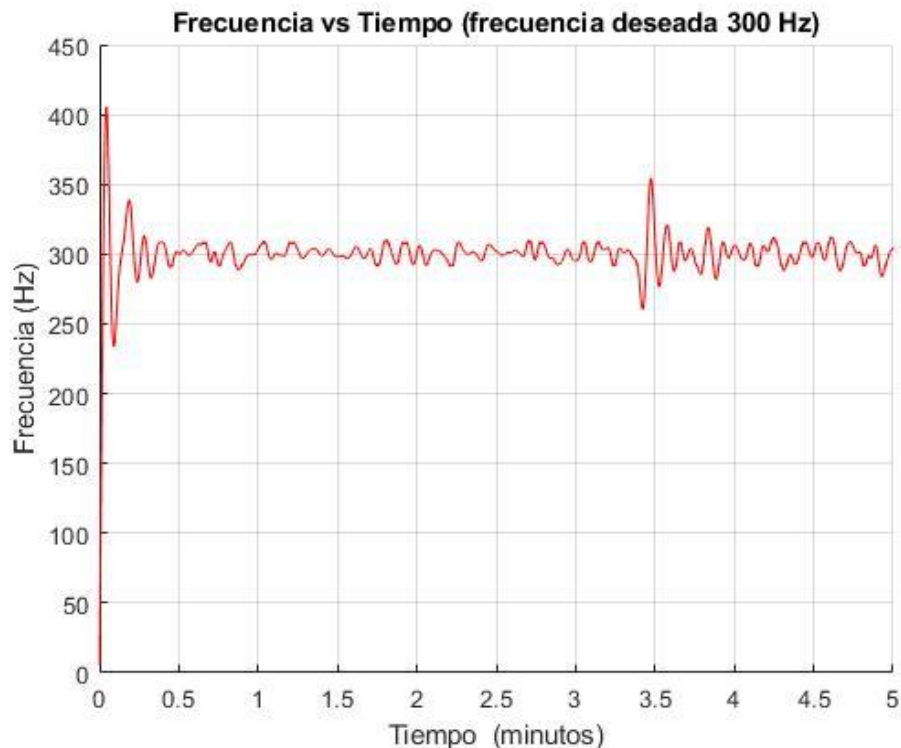


Figura 7.19: Respuesta del sistema, frecuencia deseada 300 Hz.

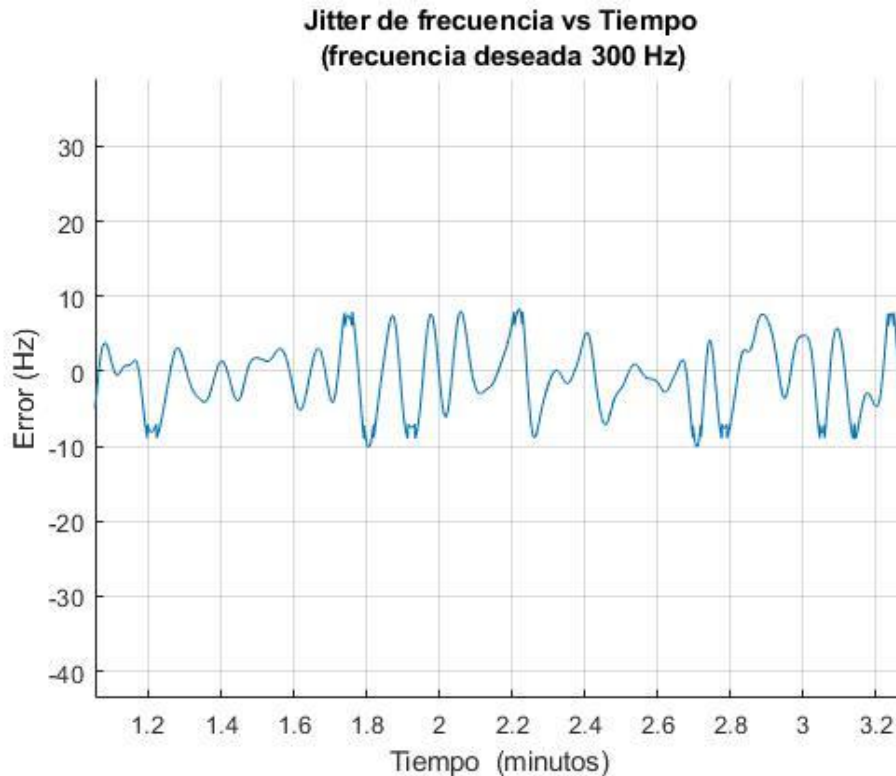


Figura 7.20: Corrimiento en frecuencia del sistema a 300 Hz.

Este comportamiento es el resultado de que el motor se encuentre trabajando en el límite práctico de trabajo. Este límite está impuesto por la propia fricción estática presente en el eje del motor; en este caso, el torque que suministra el controlador no es suficiente para vencer de forma satisfactoria esta fricción, y ello se evidencia en las oscilaciones presentes.

Al aumentar la frecuencia deseada, la fricción estática disminuye considerablemente, figura 7.21, en este caso se aprecia como el chopper funciona a la frecuencia deseada y el corrimiento de frecuencia máximo es de $\pm 1.412 \text{ Hz}$, figura 7.22, equivalente a un 0.2353 % de la frecuencia deseada, así como el sobretiro inicial en el tiempo de establecimiento. Conforme el tiempo avanza, el error tiende asintóticamente a cero.

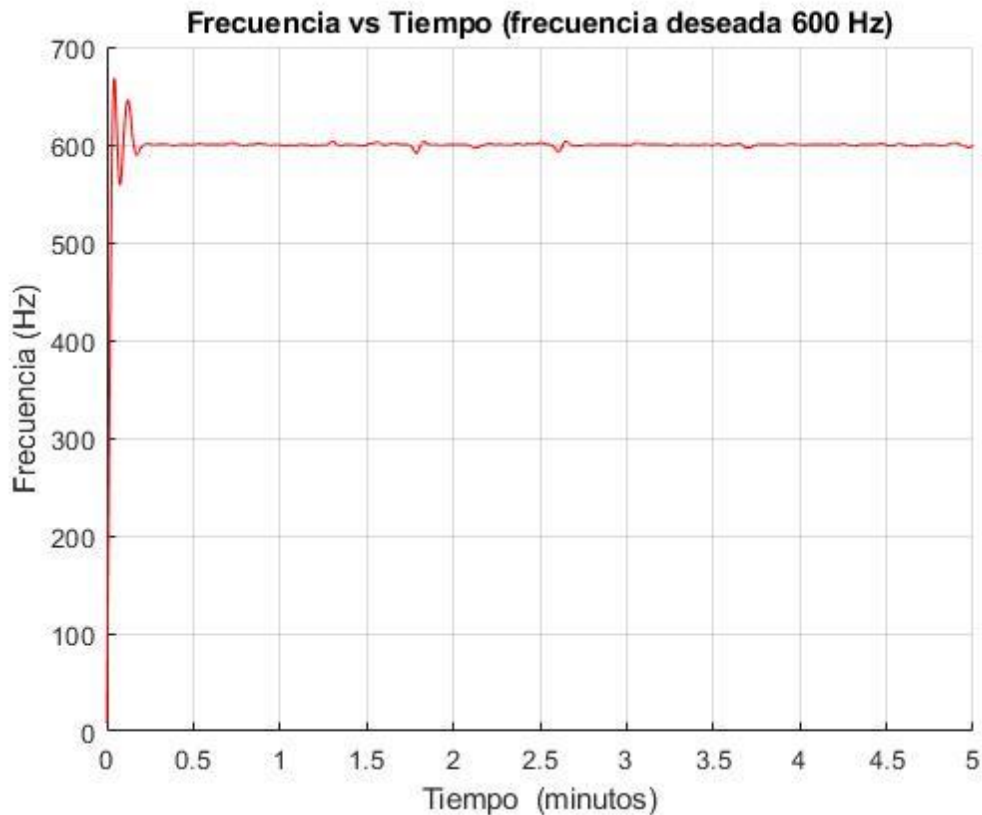


Figura 7.21: Respuesta del sistema, frecuencia deseada 600 Hz.

En la figura 7.23 se observa que existe un sobretiro durante el tiempo de establecimiento, sin embargo, en la etapa estacionaria, el sistema alcanza y mantiene la frecuencia deseada. Se debe significar que en este caso se presentan algunos corrimientos de frecuencia máximo de ± 6.840 Hz equivalente a un 0.95 %; en este caso estos corrimientos se deben a la propia vibración que introducen las rejillas del chopper al rotar a elevadas frecuencias.

En la figura 7.24 se observa el corto tiempo de establecimiento del sistema en la frecuencia deseada, ello se debe al hecho de que, en esta ocasión, la frecuencia deseada está mucho más próxima a la máxima frecuencia que alcanza el sistema en la etapa de establecimiento. Una vez que el sistema ha llegado a la etapa estacionaria ocurre un corrimiento en frecuencia máximo de ± 6.52 Hz, figura 7.25, equivalente a un 0.54%, debido en lo fundamental, a las vibraciones que introducen las rejillas al rotar a elevadas frecuencias y a la fricción de estas contra el aire circundante.

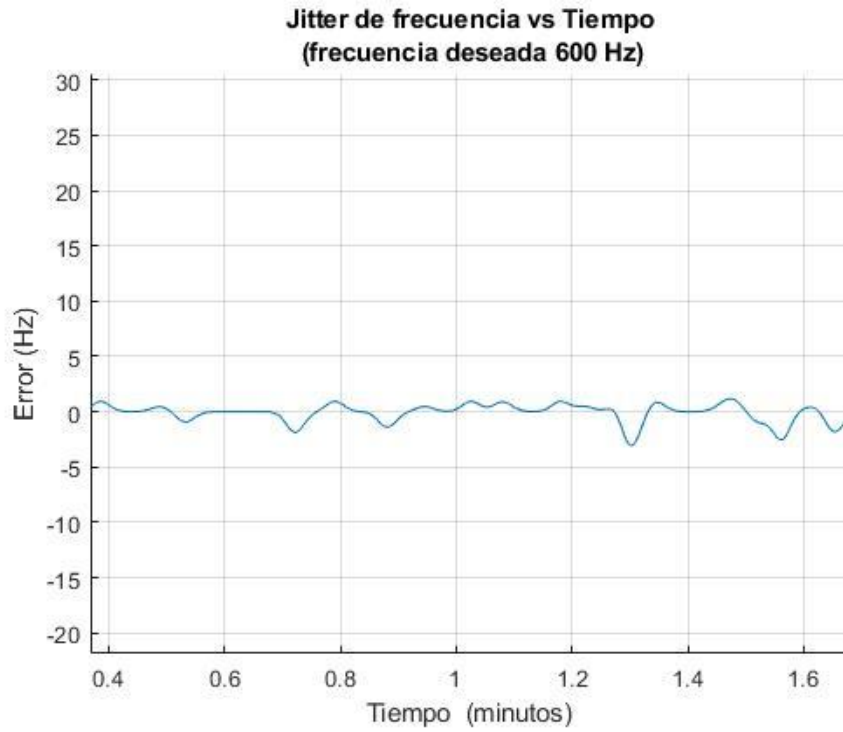


Figura 7.22: Corrimiento en frecuencia del sistema a 600 Hz.

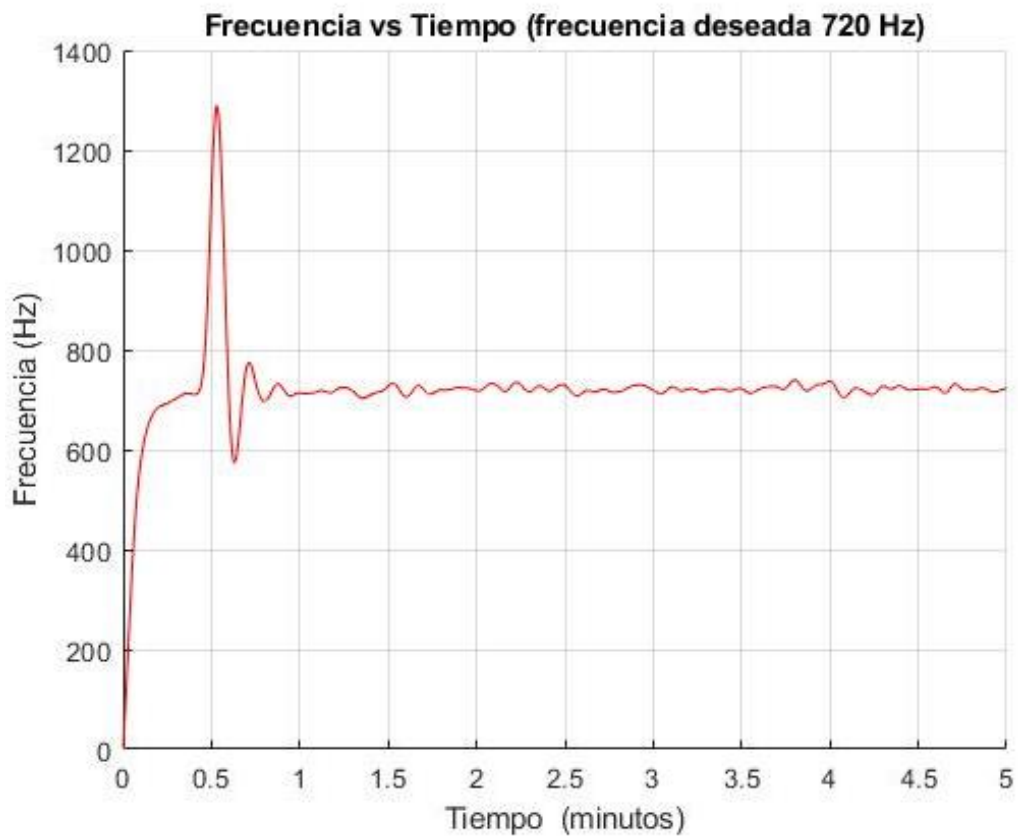


Figura 7.23: Respuesta del sistema, frecuencia deseada 720 Hz.

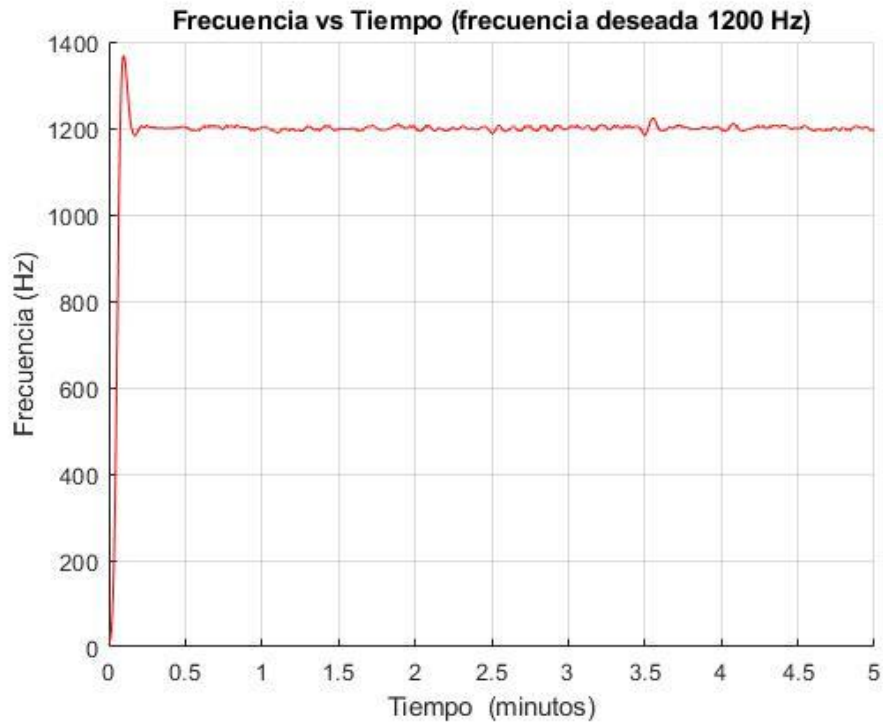


Figura 7.24: Respuesta del sistema, frecuencia deseada 1200 Hz.



Figura 7.25: Corrimiento en frecuencia del sistema a 1200 Hz.

En la figura 7.26 se observa el comportamiento del pulsador mecánico durante el proceso transitorio. Como se aprecia, el mayor tiempo de establecimiento se presenta para una frecuencia de 300 Hz, de acuerdo con lo anteriormente expuesto, así como que a medida que se aumentan las frecuencias disminuyen los sobretiros en el pulsador.

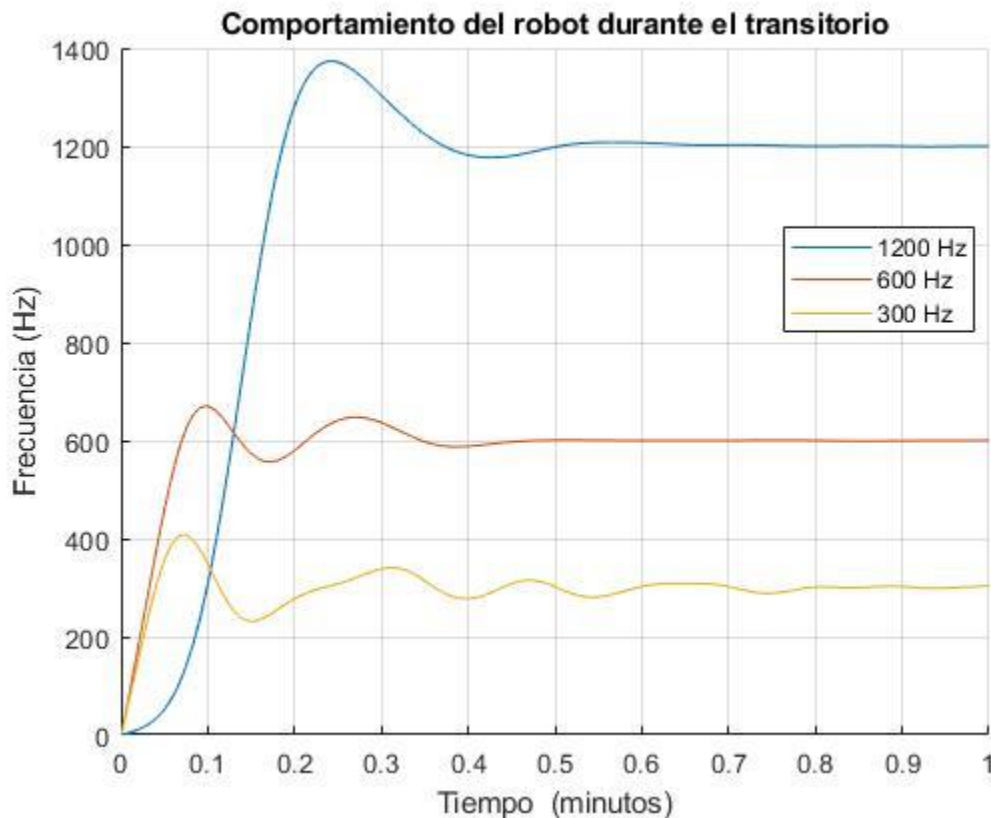


Figura 7.26: Comportamiento del proceso transitorio para diferentes frecuencias.

7.3.1. Comparación de los resultados experimentales y del modelo dinámico

En la figura 7.27 y la figura 7.28 se presenta una comparación entre los resultados teóricos obtenidos de la simulación del modelo dinámico utilizando la ecuación (5.15) y los resultados experimentales obtenidos para unas ganancias $K_p = 40$ y $K_s = 0.01$. La sintonización de las ganancias se realizó mediante un proceso de prueba y error.

Se aprecia algunas diferencias en el momento transitorio; en el caso de los resultados teóricos, este momento ocurre suavemente y sin presencia de sobretiros, no así en el caso de los resultados experimentales, donde se evidencia la existencia de sobretiros durante el establecimiento. No obstante, a medida que transcurre el tiempo, se observa cómo ambos modelos convergen al valor de frecuencia deseada.

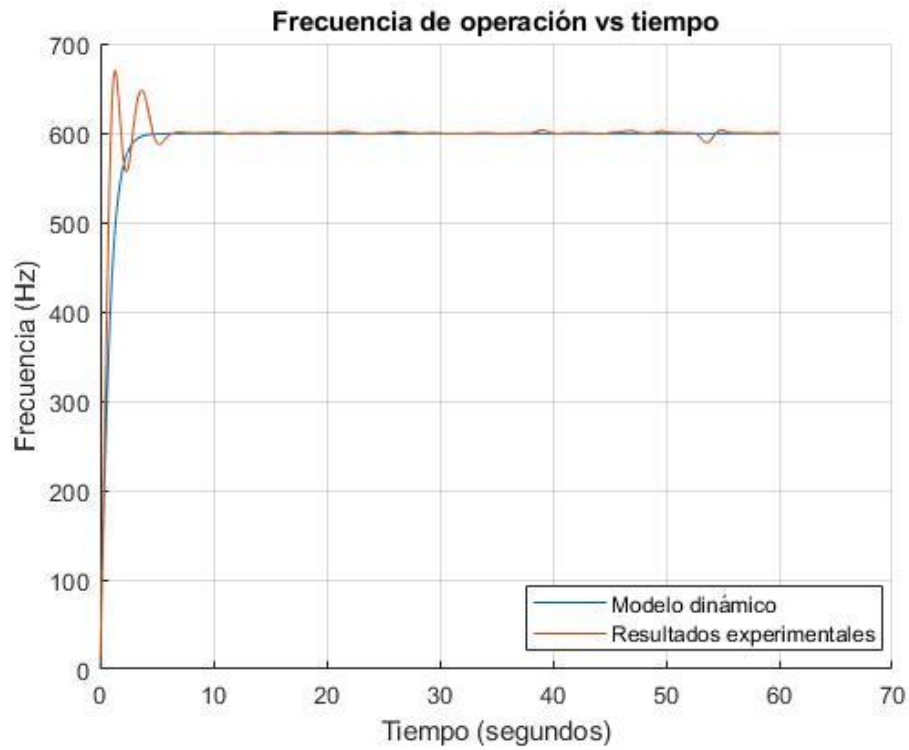


Figura 7.27: Comparación de los resultados experimentales con el modelo dinámico frecuencia de operación 600 Hz.

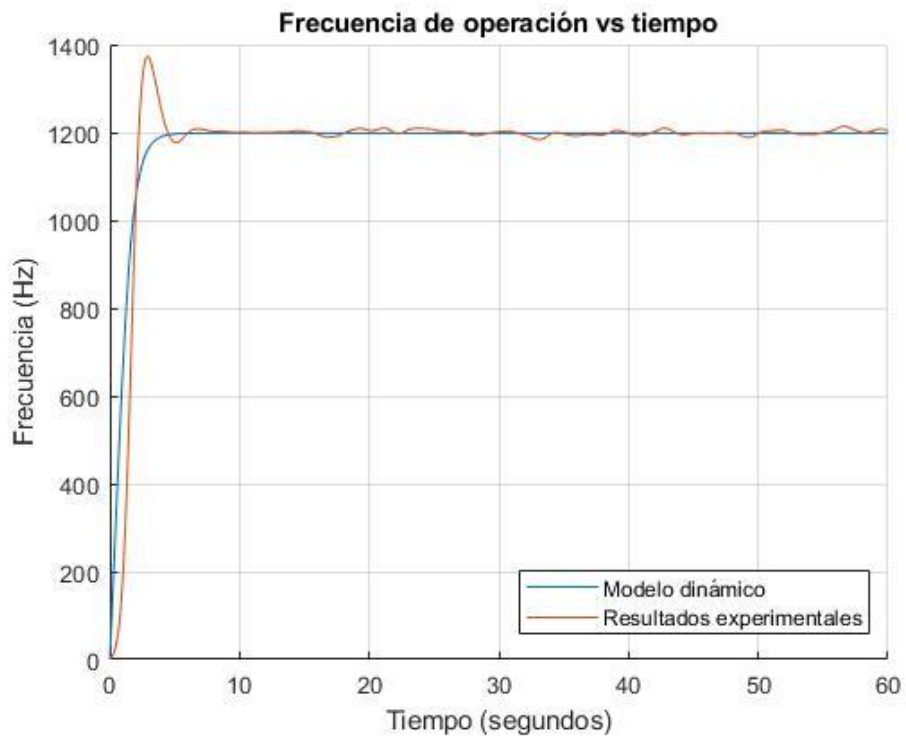


Figura 7.28: Comparación de los resultados experimentales con el modelo dinámico frecuencia de operación de 1200 Hz.

Se debe considerar la inclusión, en el modelado dinámico del robot, de la constante de torque inducida por la carga al sistema; y de los modelos de fricción que afectan al robot de manera general, para lograr una mejor aproximación del modelo dinámico a la realidad durante el proceso transitorio.

La propia naturaleza de la ecuación (5.20) le da una importancia determinante a la elección adecuada de la ganancia proporcional. Resulta necesario considerar que, al utilizar un control recursivo, la ganancia proporcional determina en que valor se incrementa la energía suministrada al robot en función del error de velocidad calculado y ello se manifiesta en el comportamiento de los procesos transitorios.

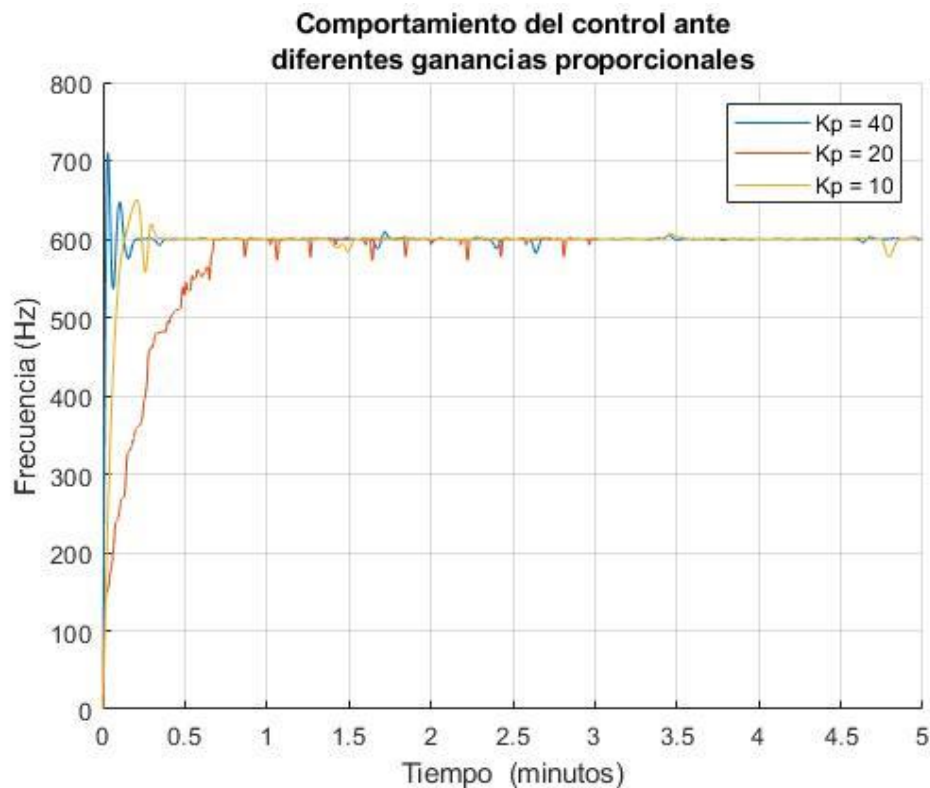


Figura 7.29: Comportamiento del robot ante diferentes ganancias proporcionales.

En la figura 7.29 se observa el comportamiento del robot ante diferentes ganancias aplicadas al controlador, como se aprecia siempre se logra llegar a la frecuencia deseada (debido a la naturaleza recursiva de la ecuación de control), sin embargo, tanto el proceso transitorio como el estacionario tienen algunas diferencias. Se comprueba que a ganancias superiores el tiempo de establecimiento de la salida disminuye, pero sin embargo aumentan los sobretiros en el proceso transitorio, mientras que, si se utilizan ganancias bajas, se llega a la frecuencia deseada de manera suave, pero se utiliza un mayor tiempo para ello.

Se considera otro aspecto, en caso de algún tipo de perturbación externa, demora más tiempo en reestablecerse la salida apropiada en función de la ganancia que se aplique, de ahí que la adecuada selección requiera de un compromiso entre costo-beneficio. En la presente

investigación, se decidió utilizar una ganancia mayor, aunque ello implique la existencia de algunos sobretiros en el establecimiento, pero a largo plazo resulta más efectivo lograr una respuesta rápida del controlador y un pronto establecimiento en caso de que existieran perturbaciones externas.

7.4. Conclusiones del capítulo

De acuerdo con las evaluaciones realizadas se comprobó el comportamiento adecuado del nivel de agua en cada uno de los tanques de acuerdo con cada una de las subrutinas desarrolladas. La evaluación del esquema inicial de control de temperatura evidenció la necesidad de realizar modificaciones a su diagrama de control, para ello se definió un bloque de disipación de potencia. Como consecuencia de la evaluación de diferentes estructuras de disipación se decidió el empleo de un esquema conformado por tres mini-enfriadores comerciales. La selección estuvo basada en sus ventajas técnicas y en la relación costo-beneficio. La evaluación del sistema de control de pulsado permitió definir un ancho de banda de trabajo de 300 Hz a 1986 Hz en el cual el corrimiento de frecuencias se encuentra por debajo del 1%.

Conclusiones Generales

De acuerdo con los resultados obtenidos, se considera que los objetivos trazados han sido satisfactoriamente cumplidos, y se ha logrado una propuesta para automatizar de manera parcial la operación del experimento desarrollado dentro del Taller de Resonancia y Luminiscencia Magnética en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Como consecuencia de las principales problemáticas en el desarrollo experimental: desarrollo manual del experimento (factor subjetivo), configuración y disposición espacial no adecuada del instrumental (factor objetivo); se identificaron las principales líneas de trabajo de manera que se limitaran los posibles errores de carácter subjetivo (debido al agotamiento de los investigadores o a lecturas incorrectas de los parámetros de funcionamiento del instrumental) al tiempo que se garantiza una apropiada distribución instrumental que permita la estabilidad de las potencias de emisión del dispositivo óptico, así como la seguridad y la integridad del instrumental en el interior del laboratorio.

En atención a la necesidad de realizar los procesos de control, el sistema de adquisición y procesamiento de los valores de nivel, temperatura y posición desarrollado; garantizó robustez al sistema, el procesamiento en tiempo real, así como la comunicación inalámbrica para las labores de monitoreo. Para garantizar su modificación, actualización y depuración de manera sencilla, el sistema es de arquitectura abierta.

De acuerdo con el comportamiento negativo de la corrosión, se definió el uso de tanques de plástico para realizar el almacenamiento del agua que se utiliza como refrigerante. Dentro del análisis para aumentar la confiabilidad del sistema se diseñó un circuito para la detección de nivel a partir de la corriente alterna para disminuir los efectos electrolíticos no deseables en el agua. En función de los requerimientos experimentales se diseñaron las diferentes subrutinas para lograr el control sobre el nivel de agua almacenada en cada uno de los tanques con resultados favorables.

Dentro del análisis se pudo observar que la dureza del agua del TRLM que provoca incrustaciones de sales con efectos negativos, si bien no se resolvió esa problemática, se incluyó un sistema de alarma que detecta esta acumulación y notifica a los investigadores.

De acuerdo con los requerimientos se propuso el empleo del sensor de temperatura ds18b20 con salida digital para prescindir del empleo de conversores analógico-digitales externos que pueden introducir errores en la adquisición de la temperatura. Con base a los resultados en la caracterización inicial se determinó la necesidad de disipar la diferencia de 5°C entre la temperatura de salida-entrada del láser y para ello se propuso un esquema de control inicial de esta variable física y su respectiva implementación en código D para su evaluación.

De acuerdo con la evaluación del comportamiento del control de temperatura, se modificó el esquema de control y se agregó una nueva etapa para la disipación de la temperatura. Se evaluaron diferentes estructuras de disipación. Se demostró que se obtienen los mejores resultados al utilizar un arreglo formado por 3 mini-enfriadores conectados en serie; la selección tuvo en cuenta aspectos relacionados con la eficiencia y la relación costo-beneficio.

La evaluación del control de velocidad implementado permitió definir un rango de operación adecuado del pulsador mecánico en función del comportamiento del sistema al variar las frecuencias de operación. En el ancho de banda propuesto (300Hz-1986Hz) se alcanzan desviaciones de frecuencia por debajo del 1% de la frecuencia solicitada, en frecuencias inferiores a las especificadas se observan desviaciones superiores al 3% debido a la fricción estática en el eje del motor.

La integración de la electrónica desarrollada se realiza de forma modular, de esta manera se garantiza la fácil identificación de las posibles fallas y su solución con un mínimo de intervención. Se definieron las posibles fallas que puede presentar el sistema y se agregó una propuesta de sistema de alarma para notificar a los investigadores. La decisión final sobre las acciones a realizar, ante cada eventualidad, estarán en manos de los investigadores en cada ocasión.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente trabajo se pudo demostrar que el manejo del agua, así como de los efectos corrosivos y del control de temperatura no resulta un trabajo trivial y requiere un análisis integral de los sistemas diseñados para garantizar su funcionamiento.

Referencias

- [1] A. Pérez Pacheco, J. Flores Mijangos , A. Juárez Reyes, M. G. González y E. López Moreno, «Detección fotoacústica de Bio-marcadores para el análisis de metabolitos en el aliento humano,» de *V Congreso Internacional de Tecnología aplicada a Ciencias de la Salud*, Tonantzintla, 2014.
- [2] M. A. González Cantellano y L. M. Montaña Zetina, «La espectroscopia y su tecnología: Un repaso histórico y su importancia para el siglo XXI,» *Latin American Journal of Physics Education* , vol. 9, n° 4, 2015.
- [3] R. Domínguez Gómez, R. Torralbas Marco, P. Escudero González y M. T. Martín Zánchez , «Los aparatos de Bunsen y su aplicación práctica,» *Revista de Química PUCP*, vol. 26, n° 12, 2012.
- [4] G. R. Kirchhoff, *Untersuchungen über das Sonnenspectrum und die Spectren der chemischen Elemente*, Berlin, 1861.
- [5] A. Graham Bell, «Upon the production and reproduction of sound by light,» *Journal of the Society of Telegraph Engineers* , vol. 9, n° 34, pp. 404 - 426, 1880.
- [6] E. Marín, «Escuchando la luz: breve historia y aplicaciones del efecto fotoacústico,» *Latin-American Journal of Physics Education*, vol. II, n° 2, p. 17, 2008.
- [7] G. A. Torchia, «Espectroscopía óptica y fotoacústica en monocristales de $\text{LiNbO}_3:\text{Cr}^{3+}:\text{ZnO},\text{MgO}$,» Universidad Nacional de la Plata. Facultad de Ciencias Exactas, Buenos Aires, 2010.
- [8] W. C. Röntgen, «On tones produced by the intermittent irradiation of a gas,» *Philosophical Magazine*, vol. XI, n° 5, pp. 308-311, 1881.
- [9] A. V. Ravi Kumar, «Applications of laser induced photoacoustic effect for the study of gases and solids,» India, 1992.
- [10] A. Rosencwaig, «Photoacoustic spectroscopy of solid,» *Optics Communications*, vol. 7, n° 4, pp. 305-308, 1973.
- [11] A. Rosencwaig , *Photoacoustics and photoacoustics spectroscopy*, New York: Wiley Interscience, 1983.
- [12] J. Martínez de Mendivil Varas, «Láseres integrados en dobles tungstos y niobato de litio basados en guías de onda ridge,» Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2015.

- [13] A. L. Schawlow y C. H. Townes, «Infrared and Optical Masers,» *Physical Review*, n° 112, pp. 1940-1949, 1958.
- [14] T. Maiman, « Stimulated Optical Radiation in Ruby,» *Nature*, n° 187, pp. 493-494, 1960.
- [15] E. Hecht, *Óptica*, Madrid: Addison Wesley Iberoamericana, 2000.
- [16] B. Perrett, G. Constant, M. Harris, G. N. Pearson y D. V. Willetts, «Remote chemical sensing by pulsed photoacoustic spectroscopy,» *Conference Digest. 2000 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe (Cat. No.00TH8505)*, 2000.
- [17] L. Dong, X. Yin, H. Zheng, H. Wu, S. Jia y F. K. Tittel, «Nitrogen dioxide detection by use of photoacoustic spectroscopy with a high power violet-blue diode laser,» de *2017 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, San Jose, CA, USA, 2017.
- [18] P. C. Morais, L. B. Silveira, J. G. Santos, A. C. Oliveira, A. L. Tronconi, R. L. Santos, E. C. Lima, J. M. Marchetti y T. C. Tedesco, «Use of the photoacoustic spectroscopy for surface characterization of nanometer-sized cobalt-ferrite particles,» *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 4, n° 10, pp. 3382 - 3384, 2005.
- [19] K. Liu, T. Wu, X. Gao, W. Zhang, E. Fertein y W. Chen, «Ethylene trace detection by quartz enhanced photoacoustic spectroscopy,» de *Conference on Lasers and Electro-Optics and 2009 Conference on Quantum electronics and Laser Science Conference*, Baltimore, MD, USA, 2009.
- [20] Z. Qi, Y. Yi, W. Qiaohua, W. Zhihao y L. Zhe, «Study on the Online Dissolved Gas Analysis Monitor based on the Photoacoustic Spectroscopy,» de *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Bali, Indonesia, 2012.
- [21] J. Yong Sim, C.-G. Ahn, E. Jeong y B. Kyu Kim, «Photoacoustic spectroscopy that uses a resonant characteristic of a microphone for in vitro measurements of glucose concentration,» de *2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Orlando, FL, USA, 2016.
- [22] Y. Tanaka, C. Purtill, T. Tajima, M. Seyama y H. Koizumi, «Sensitivity improvement on CW dual-wavelength photoacoustic spectroscopy using acoustic resonant mode for noninvasive glucose monitor,» de *2016 IEEE SENSORS*, Orlando, FL, USA, 2016.
- [23] A. Lay-Ekuakille, G. Vendramin y A. Trotta, «Photoacoustic spectroscopy of biomedical gas sensing: Adaptive filtering as calibration,» de *International Conference on Sensing Technology*, Tainan, Taiwan, 2008.
- [24] V. Domínguez-Rocha, A. Pérez-Pacheco, A. J. Reyes, J. Flores Mijangos, M. G. González y E. L. Moreno, «Diseño de una cavidad fotoacústica para aplicaciones

- médicas,» de *SOMI XXIX Congreso de Instrumentación*, Puerto Vallarta, Jalisco, México, 29-31 de Octubre, 2014.
- [25] Y. Minglin, «Realization of Fuzzy PID controller used in turbine speed control system with FPGA,» de *2010 International Conference on Future Information Technology and Management Engineering*, Changzhou, China, 2010.
- [26] Z. Huai-quan y L. Qian, «The automatic temperature system with fuzzy self-adaptive PID control in semiconductor laser,» de *2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Shenyang, China, 2009.
- [27] J. Juyuan y L. Lijing, «The research on the new boiler water level automatic control system,» de *2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, Hohhot, China, 2011.
- [28] M. Payak y S. R. Kumbhar, «FPGA based PWM control of Induction motor drive and its parameter estimation,» de *2015 International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT)*, Davangere, India, 2015.
- [29] C. F. Cotera, «Construcción, calibración y mediciones de potencia de un láser de CO₂ sintonizable,» Facultad de Ciencias UNAM, Ciudad de México, 1991.
- [30] R. H. Pierson, A. N. Fletcher y E. S. C. Gantz, «Catalog of infrared spectra for qualitative analysis of gases,» *Analytical Chemistry*, vol. 8, n° 28, pp. 1218-1239, 1956.
- [31] R. a. Alberty y F. Daniels, *Fisicoquímica versión SI*, Ciudad de México: Editorial Continental, 1989.
- [32] C. L. Carreon Diaz de Leon, «Diseño y construcción de un cuadricóptero guiado por control inalámbrico,» MCEA - FC- BUAP, Puebla, 2019.
- [33] D. M. Gonzalez Arriaga, «Diseño y construcción de un levitador magnético,» MECA - FC - BUAP, Puebla, 2019.
- [34] F. Reyes, *Robótica. Control de robots manipuladores.*, México: Alfaomega Grupo Editor, 2011.
- [35] M. I. Inc., «Ds18b20 Programmable resolution 1-wire digital thermometer,» 2008.
- [36] A. A. Torres Acosta, J. T. Pérez Quiroz, A. J. Ramírez Rentarías y M. Martínez Madrid, «Estudio de la corrosión en barras de acero inoxidable en concreto contaminado por cloruros cuando se le aplican esfuerzos residuales,» Secretaría de Comunicación y Transportes. Instituto mexicano del transporte, Sanfandila. Quintana Roo, 2006.

- [37] M. G. Fontana, Corrosion Engineering, United States of America: McGraw-Hill, 1987.
- [38] R. Winston Revie, Uhlig's Corrosion Handbook, United States of America: A John Wiley & Sons, 2011.
- [39] M. V. Ultrilla Esteban, «Estudio de la resistencia a la corrosión en distintos medios agresivos de los aceros inoxidables AISI 304L y 316L preparados por vía Pulvimetalúrgica,» Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Químicas, Madrid, 1995.
- [40] E. Medina, D. M. Bastidas y S. Fajardo, «Comportamiento ante la corrosión inducida por cloruros de armaduras de nuevos aceros inoxidables con bajo contenido en níquel,» *Ingeniería Química*, n° 499, pp. 80-84, 2011.
- [41] C. Mantell, Ingeniería Electroquímica, Barcelona: Reverté S.A, 1980.
- [42] A. J. Switzer, «Alternating Current Electrolysis at Semiconductor Electrodes,» *Electrochem*, vol. 136, n° 4, pp. 1009-1011, 1989.
- [43] Department of Commerce of United States of America, «Influence of frequency of alternating or infrequently reversed current on electrolytic corrosion,» *Technologic Papers of the Bureau of Standards*, n° 72, 1916.
- [44] B. C. Fabien, Analytical systems dynamics: Modeling and simulation, Seattle: Springer, 2009.
- [45] M. A. Vargas Treviño, J. López Gómez, S. Vergara Limón, A. Palomino Merino, R. Torres Reyes y P. García Ramírez, «A mechatronic approach for ball screw driven system: modeling, control, and validation on a FPGA-based architecture,» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019.
- [46] R. Kelly y V. Santibañez, «PD Control with Gravity Compensation,» *Control of Robot Manipulators in Joint Space. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*, 2005.
- [47] J. Mardini-Bovea, G. Torres-Díaz, M. Sabau, E. De-la-Hoz-Franco, J. Niño-Moreno y P. J. Pacheco-Torres, «A review to refrigeration with thermoelectric energy based on the Peltier effect,» *Dyna*, vol. 86, n° 208, pp. 9-18, 2018.
- [48] J. F. Reyes Cortés, Matlab aplicado a robótica y mecatrónica, Puebla: AlfaOmega, 2012.
- [49] V. Aboites, H. Sotelo, J. Castro, R. Alcántara, A. Saavedra y R. Flores, «Láser de CO₂,» *Revista Mexicana de Física*, n° 3, pp. 489-497, 1987.

- [50] I. Sadiq, T. Mikkonen, M. Vainio, J. Toivonen y A. Foltynowicz, «Optical Frequency Comb Photoacoustic Spectroscopy,» de *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, San Jose, CA, USA, USA, 2019.
- [51] A. Berrou, F. Marnas, M. Raybaut, A. Godard y M. Lefebvre, «Mid-IR photoacoustic spectroscopy by use of an entangled-cavity doubly resonant OPO,» de *Conference on Lasers and Electro-Optics and 2008 Conference on Quantum Electronics and Laser Science*, San Jose, CA, USA, 2008.
- [52] M. Lassen, L. Lamard, Y. Feng, A. Peremans y J. C. Petersen, «Quartz enhanced photoacoustic spectroscopy for human breath analysis,» de *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, San Jose, CA, USA, 2017.
- [53] N. L. Barreiro, A. Vallespi, V. B. Slezak, A. L. Peuriot, M. G. González y G. D. Santiago, «CARACTERIZACIÓN DE LA ESPECTROSCOPIA FOTOACÚSTICA PULSADA DEL NO₂ EN AIRE,» *Anales AFA*, vol. 20, pp. 53-57, 2008.
- [54] B. Coulbeck y C. H. Orr, «Optimal control of water supply,» de *IEE Colloquium on Control and Optimisation Techniques for the Water Industry*, London, UK, 1990.
- [55] F. J. Pérez, M. P. Hierro, C. Gómez, D. Duday y M. Romero, «Estudio de la corrosión de diferentes aleaciones en sales de carbonatos fundidos con la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica,» *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 3, n° 39, pp. 323-325, 200.
- [56] J. Marulanda, A. García y J. Vitola, «Protección contra la corrosión por sales fundidas de un acero la carbono por rociado térmico,» *DYNA*, vol. 76, n° 157, pp. 251-256, 2008.
- [57] J. Hayden, «Alternating-current electrolysi,» *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 26, n° 2, 1907.
- [58] F. Mustafa, A. Jaafar y H. Houssein, «The Effect of Laser Wavelength in Photodynamic Therapy and Phototherapy for Superficial Skin Diseases,» de *2011 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques*, Penang, Malaysia, 2011.
- [59] F. H. Tyas, J. G. Nikita, D. K. Apriyanto, Mitrayana y M. N. Amin, «The Performance of CO₂ Laser Photoacoustic Spectrometer In Concentration Acetone Detection As Biomarker For Diabetes Mellitus Type 2,» *Journal of Physics: Conference Series*, vol. MXI, n° 1, p. 012056, 2018.
- [60] W. Witterman, *The CO₂ laser*, Springer, 2013.
- [61] F. J. Harren, G. Cotti, J. Oomens y S. te Lintel Hekkert, «Photoacoustic spectroscopy in trace gas monitoring,» *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, vol. III, pp. 2203-2226, 2000.

- [62] C. Haisch, «Photoacoustic spectroscopy for analytical measurements,» *Measurement Science and Technology*, vol. XXIII, n° 1, p. 012001, 2011.
- [63] R. W. Fitzgerald, *Mecánica de materiales*, Fondo Educativo Interamericano, 1984.
- [64] M. Barr, «Introduction to Pulse Width Modulation (PWM),» Barr Group, 2001.
- [65] U. Caligulu, M. Taskin, H. Kejanli y A. Orhan, «Interface characterization of CO₂ laser welded austenitic stainless steel and low carbon steel couple,» *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 64, n° 4, pp. 196-207, 2012.
- [66] J. Flores Mijangos, «Espectroscopia por resonancia magnética láser de átomos y moléculas ligeras,» México, DF., 2000.
- [67] A. M. Bratu, *CO₂ Laser Photoacoustic Spectroscopy for Ultrasensitive Gas Detection*, Deutschland / Germany: Lambert Academic Publishing, 2014.
- [68] A. Miklos, P. Hess y Z. Bozoki, «Application of acoustic resonators in photoacoustic trace gas analysis and metrology,» *Review of scientific instruments*, vol. LXXII, n° 4, pp. 1937-1955, 2001.
- [69] R. Sekiguchi, Y. Sano y Y. Liu, «Thermal Equivalent Circuit of Peltier Device Considered Seebeck Effect and Driving Method Improving Cooling Efficiency of the Device.,» *Electronics & Communications in Japan*, vol. 101, n° 5, pp. 73-83, 2018.
- [70] A. Sakai, T. Kanno, K. Takahashi, H. Tamaki y Y. Yamada, «Power Generation and Peltier Refrigeration by a Tubular p-Type Thermoelectric Module,» *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, vol. 44, n° 11, pp. 4510-4215, 2015.

Anexo A: Constancia XVIII Simposio Internacional de Ingeniería Eléctrica SIE2019



El Comité Organizador de la
II Convención Científica Internacional UCLV 2019
otorga el presente

CERTIFICADO DE PARTICIPACIÓN

En el evento: XVIII SIMPOSIO INTERNACIONAL DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA

A: PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE
ENFRIAMIENTO DE UN LÁSER DE CO2 UTILIZADO EN
ESPECTROSCOPÍA

Autor: Autores: David Ferreiro Piñeiro, Dr. José Fernando Reyes Cortés, Dr.
Sergio Vergara Irmón, Dra. Amparo Dora Palomino Merino, Dra. Marcela
Dolores Grether González, Dra. María Aurora Díazcora Vargas Treviño


Dra. Osana Molerio Pérez
Rectora

Santa Clara
junio | 2019



Anexo B: Constancia Congreso Internacional Academia Journal Hidalgo 2019



Congreso Internacional de Investigación Academia Journals
Hidalgo 2019

CERTIFICADO

otorgado a

David Ferreiro Piñeiro
María Aurora Diozcora Vargar Treviño
Sergio Vergara Limón
Fernando Reyes Cortés
Marcela Dolores Grether González
Amparo Dora Palomino Merino

por su artículo intitulado

*Semiautomatización de la operación de un
espectrómetro fotoacústico*

Artículo No. HH502

La ponencia de este artículo fue presentada en el congreso llevado a cabo los días 2 al 4 de octubre del año 2019 en Hidalgo, México. El artículo se incluyó en las siguientes publicaciones: (1) los volúmenes de internet publicados por AcademiaJournals.com con ISSN 1946-5351, Vol. 11, No. 8, 2019 online e indexación en la base de datos Fuente Académica Plus de EBSCOHOST y (2) en el e-libro intitulado *Educación en la Educación Superior – Hidalgo 2019*, mismo que cuenta con ISBN 978-1-939982-52-0 online. Ambas publicaciones tienen enlaces para su libre acceso en el portal AcademiaJournals.com.



Dr. Rafael Moras
Editor, Academia Journals

Anexo C: Acreditación TOEFL

TOEFL ITP Score Report

Name of Institution: UPAEP PUEBLA

Name: FERREIRO DAVID

Student Number:

DOB: 10/24/1992

Sex: M Degree:

Times Taken TOEFL: None

Native Country: Cuba

Native Language: Spanish

Scaled Scores:

Listening Comprehension: 56

Test Date: 01/25/2020

Structure & Written Expression: 48

Form: TOEFL ITP

Reading Comprehension: 56

Total Score: 533



The face of this document has a security background. The back contains a watermark. Hold at an angle to view.

The TOEFL® ITP Assessment Series is designed to be used for placement, progress monitoring, and exit purposes. TOEFL® ITP scores can also be used for admissions to programs and institutions where English is not the dominant language of instruction for content courses. Learn more at www.ets.org/toefl_itp/use.

137012-16573 • FB619R100 • Printed in U.S.A.

I.N. 770462

Copyright © 2012 by Educational Testing Service.

Student's File Copy
Do Not Copy

Anexo D: Artículos publicados

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



XVIII SIMPOSIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
“SIE 2019”

**Propuesta de automatización del sistema de enfriamiento de un láser de
CO2 utilizado en espectroscopía**

*Proposal for automatization of the cooling system of a CO2 laser used in
spectroscopy*

**Ing. D. F. Piñeiro¹, Dra. M. A. Vargas², Dr. S. Vergara³, Dr. F. Reyes Cortés⁴, Dra.
M. D. Grether⁵, Dra. A. Palomino Merino⁶**

1- David Ferreiro Piñeiro. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. E-mail: davidfp9210@gmail.com

2- María Aurora Diozcora Vargas Treviño. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. E-mail: aurora.vargas@correo.buap.mx

3- Sergio Vergara Limón. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. E-mail: sergio.vergara@correo.buap.mx

4- Fernando Reyes Cortés. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. E-mail: fernando.reyes@correo.buap.mx

5- Marcela Dolores Grether González. Universidad Nacional Autónoma de México, México. E-mail: mdgg@ciencias.unam.mx

6- Amparo Dora Palomino Merino. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. E-mail: ampalomino@gmail.com

Resumen: Se realiza un estudio de los principios básicos de funcionamiento de los dispositivos láser, características de emisión, potencias y clasificaciones de acuerdo con el

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



medio activo que emplean, realizando hincapié en el láser gaseoso de CO₂ por ser sobre el cual se desarrollan los experimentos le será automatizado su sistema de enfriamiento. Se proponen los diagramas básicos de los diferentes lazos de control para el proceso de enfriamiento y se describe la lógica a implementar en la investigación. Se detallan 3 lazos de control, dos para la temperatura y un tercer lazo destinado a automatizar el sistema de llenado de los recipientes de agua para garantizar el enfriamiento. La principal motivación del trabajo va orientada a garantizar la seguridad de operación del experimento ubicado en el laboratorio de Resonancia y Luminiscencia de la UNAM a la vez que se garantiza minimizar las derivas en la emisión de la luz producto al aumento de la temperatura de operación.

Abstract: In the present research was studies the basic principles of operation the laser device, emission characteristics, powers and classification according to the active environment use, emphasizing in the gaseous CO₂ laser because for being on which the experiments are developed and the which will be automated your cooling system. The basic diagrams of the different control loop for the cooling process are proposed and the logic hat is proposed to be implemented in the development of the research process. 3 control loops are detailed, two for the temperature and third loop designed to automate the filling system of the water containers to guarantee cooling. The main motivation of the work is oriented to guarantee the safety operation of the experiment developed in the Resonance and Luminescence Laboratory of the UNAM, while minimizing the drift in the emission of the product light at the increase of the operating temperature.

Palabras Clave: control de temperatura, láser, CO₂, automatización.

Keywords: temperature control, laser, CO₂, automation.

1. Introducción

El avance de la ciencia y la técnica ha permitido el desarrollo de dispositivos cuánticos que emiten luz de forma coherente, monocromática y direccional. La conjunción de estas tres propiedades ha viabilizado la interdisciplinariedad entre diversas áreas del conocimiento, generando un sinnúmero de aplicaciones tanto en áreas de las ingenierías, como en las ciencias biológicas y exactas. El efecto fotoacústico fue descubierto en 1880 por Alexander Graham Bell (Graham Bell, 1880) y se basa en la conversión de la luz en energía térmica y ello en variaciones de presión que provocan sonidos al incidir sobre determinada muestra. Sus aplicaciones se extienden a la detección de contaminantes en la atmósfera o de productos maduradores en la fruticultura hasta la detección de componentes volátiles orgánicos, en

particular en el análisis de metabolitos en el aliento humano como área creciente en el desarrollo de la medicina (Pérez Pacheco, et al., 2014).

Este tipo de técnica de detección operan en el rango espectral de infrarrojo medio donde una gran cantidad de moléculas exhiben fuertes líneas de absorción correspondientes a sus transiciones rotacionales de vibraciones fundamentales. Para llevar a cabo este tipo de experimento se requieren condiciones específicas en cuanto a la fuente luminosa, para ello se utilizan los dispositivos láser.

El láser es un acrónimo del inglés Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, es decir, amplificación de luz por emisión estimulada de radiación, este dispositivo permite generar ondas electromagnéticas en el rango óptico. Si bien la emisión estimulada fue propuesta por Einstein en 1917 (Martínez de Mendivil Varas, 2015), no fue hasta 1960 cuando Maiman demostró la emisión estimulada a estas frecuencias empleando un cristal de Rubí (Maiman, 1960) (Hecht, 2000); desde entonces los avances han sido continuos.

En la actualidad existen diferentes tipos de láser que pueden ser clasificados en función del medio activo en el que se produce la emisión estimulada, entre ellos se pueden mencionar al láser gaseoso, el láser de estado sólido, los láseres semiconductores y los del tipo colorante. En el presente trabajo se realiza un estudio de los láseres gaseosos, específicamente un láser de CO₂.

El láser de CO₂ utilizado fue desarrollado y construido dentro del laboratorio de Resonancia y Luminiscencia de la UNAM y es de tipo axial, es decir, debido a las altas potencias que se manejan, la cavidad resonante debe de ser refrigerada con agua para evitar operaciones mal deseadas.

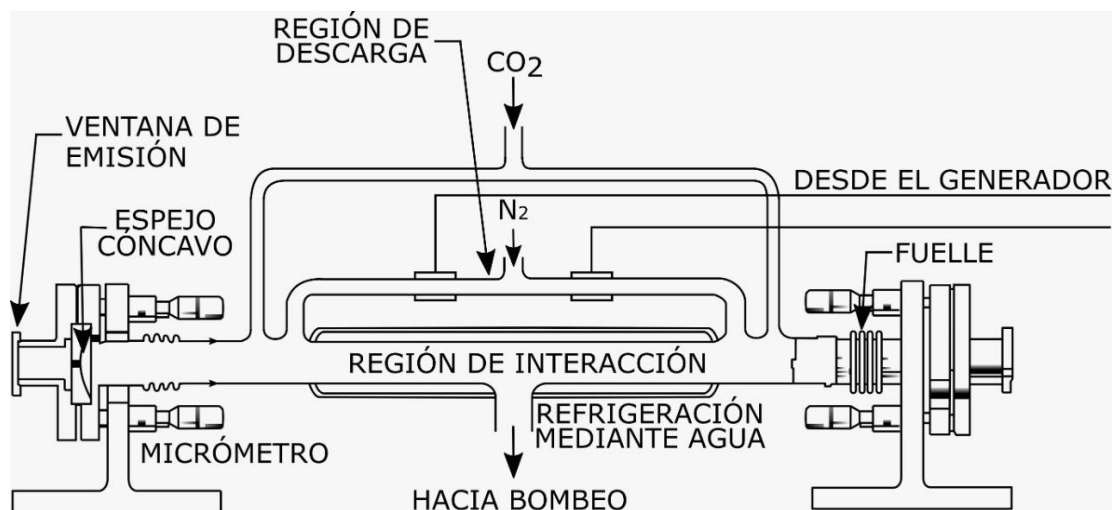


Figura 1: Esquema de un láser de CO₂

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



Los estudios que generalmente se realizan sobre este tipo de dispositivos, se enfocan en sus aplicaciones prácticas y relegan a un segundo plano la importancia de los sistemas de enfriamiento en (Anon., 2006) (Aboites, et al., 1987) (Canales Sánchez, 2007) (Williams, 1997) se menciona la necesidad de realizar el proceso de enfriamiento sin embargo no se reporta ningún sistema de control automático. No obstante, en (Çıklaçandır & İslser, 2018) se realiza una propuesta de sistema de enfriamiento, pero para un láser de estado sólido. En el presente trabajo se propone un diseño inicial de un sistema de control completo para evitar un sobrecalentamiento en la operación del dispositivo láser que comprometa el desarrollo de los experimentos y la integridad física del personal cualificado que trabaja con el mismo. Por otra parte, se pretende eliminar una deriva de emisión que se encuentra relacionada con la temperatura de operación del dispositivo.

2. Metodología

En un láser gaseoso de CO₂ los niveles de energía se deben al movimiento oscilatorio de la molécula de carbono y no por la distribución de los electrones. La molécula se representa como un arreglo lineal de átomos O-C-O que vibran cada uno respecto a los demás. Los diferentes modos de vibración originan un conjunto de niveles de energía con transiciones que se ubican en el infrarrojo.

Entre los procesos físicos que sustentan la operación del láser se significan:

- Absorción: ocurre cuando una onda electromagnética con energía $h\nu$ interactúa con un átomo o molécula que se encuentra en un nivel E_1 y se excita a un nivel superior de energía E_2 donde $h\nu \geq (E_2 - E_1)$.
- Emisión espontánea: Ocurre cuando un átomo o molécula, inicialmente con un nivel de energía E_1 es excitado a un nivel E_2 y después de un tiempo, el átomo o molécula decae al nivel E_1 emitiendo un fotón de energía $h\nu = (E_2 - E_1)$.
- Emisión estimulada: La emisión de un fotón por un átomo o molécula puede ser estimulada por una onda electromagnética con una energía igual o diferente a $(E_2 - E_1)$. Esto ocurre cuando un átomo o molécula es excitada a E_2 y después emite un fotón por emisión espontánea, este átomo o molécula interactúa con la onda electromagnética $h\nu = (E_2 - E_1)$.

Lo más complicado es lograr una inversión de población en el láser que nos garantice el mantenimiento de la emisión estimulada del láser. Ahora bien; al ser un láser de tipo gaseoso, el nivel de radiación obtenida depende en gran medida de la composición de la mezcla empleada. En el caso que nos ocupa se utiliza:

- Dióxido de carbono CO₂ (10 – 20%)
- Nitrógeno N₂ (10-20%)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



- Hidrógeno H₂ en pequeños porcentajes
- Helio He en cantidades suficientes para completar

Para un correcto funcionamiento se vuelve necesario mantener la temperatura de operación del láser por debajo de los 30 grados Celsius, temperaturas superiores podrían comprometer la estabilidad de todo el experimento, así como los resultados obtenidos.

En la Figura 2 se aprecia un diagrama general de la disposición de equipos en el laboratorio. Los equipos a los cuales es necesario controlar la temperatura son:

- Láser de CO₂
- Atenuador de potencias ópticas

Por cuestiones obvias la principal problemática está en el control de la temperatura del láser en el cual se generan las mayores potencias.

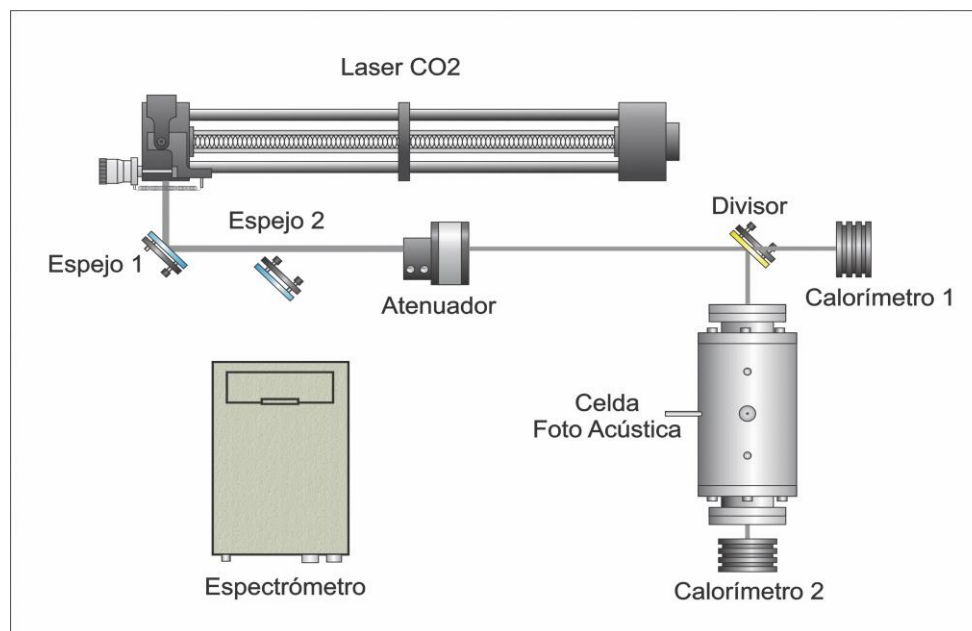


Figura 2: Diagrama general de funcionamiento del experimento

Con motivo de lo expresado anteriormente, se han propuesto tres lazos de control para esta aplicación:

- 1- Control de llenado de los reservorios de agua
- 2- Control de temperatura del láser
- 3- Control de temperatura del atenuador de potencias ópticas

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

En la Figura 3 se presenta el diagrama de control general propuesto. Se puede apreciar que se emplearán como transductores a medidores de flujo, así como sensores de temperatura y en el caso de los actuadores se encuentran las electroválvulas de entrada y salida para garantizar el funcionamiento de los sistemas, así como las bombas de agua para mantener el flujo constante. En todo momento será reciclada el agua empleada para evitar derrames de este líquido de manera innecesaria.

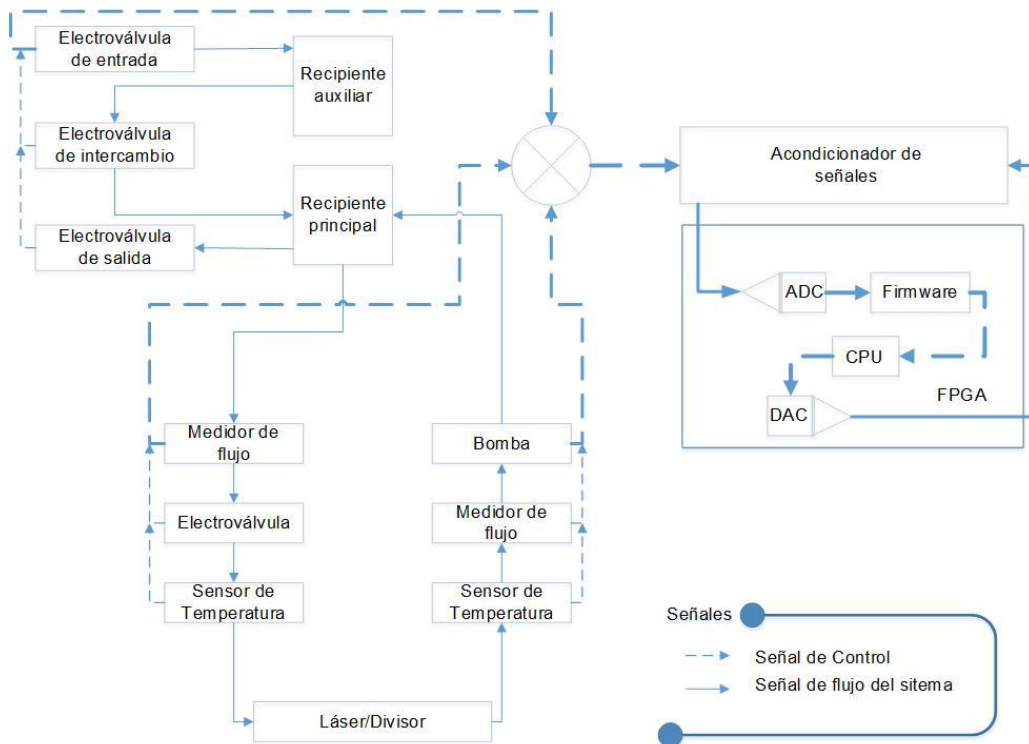


Figura 3: Diagrama general de control

Las principales problemáticas enfrentadas a la hora de realizar el diseño vienen dadas por las propias características del medio utilizado para realizar el enfriamiento. Como es bien conocido el agua tiene propiedades corrosivas que limitan el tiempo de vida útil de los sensores y electrodos que se encuentran en contacto con ella. En el diseño del control de llenado se pretende utilizar sensores de nivel, comercialmente nos encontramos que este tipo de circuitos se realizan sobre la base de CD sin embargo, las investigaciones han demostrado que cuando se le aplica CD al agua ocurre un proceso de reducción-oxidación que redundo en la ruptura de la molécula de agua generando O₂ y H₂, el aumento de la concentración de hidrógeno se traduce en la acidificación del agua en las proximidades de los electrodos y esto conlleva a su ruptura. Para evitar ese tipo de inconveniente se propone emplear para los

electrodos de nivel una alimentación de CA, investigaciones han demostrado que la cantidad de electrólisis del agua disminuye en tanto se aumenta la frecuencia de trabajo (Hayden, 1907) con lo cual se evita la problemática descrita con anterioridad.

3. Resultados y discusión

En la Figura 4 se presenta el esquema lógico propuesto para realizar el control de llenado de los reservorios de agua para el sistema de enfriamiento.

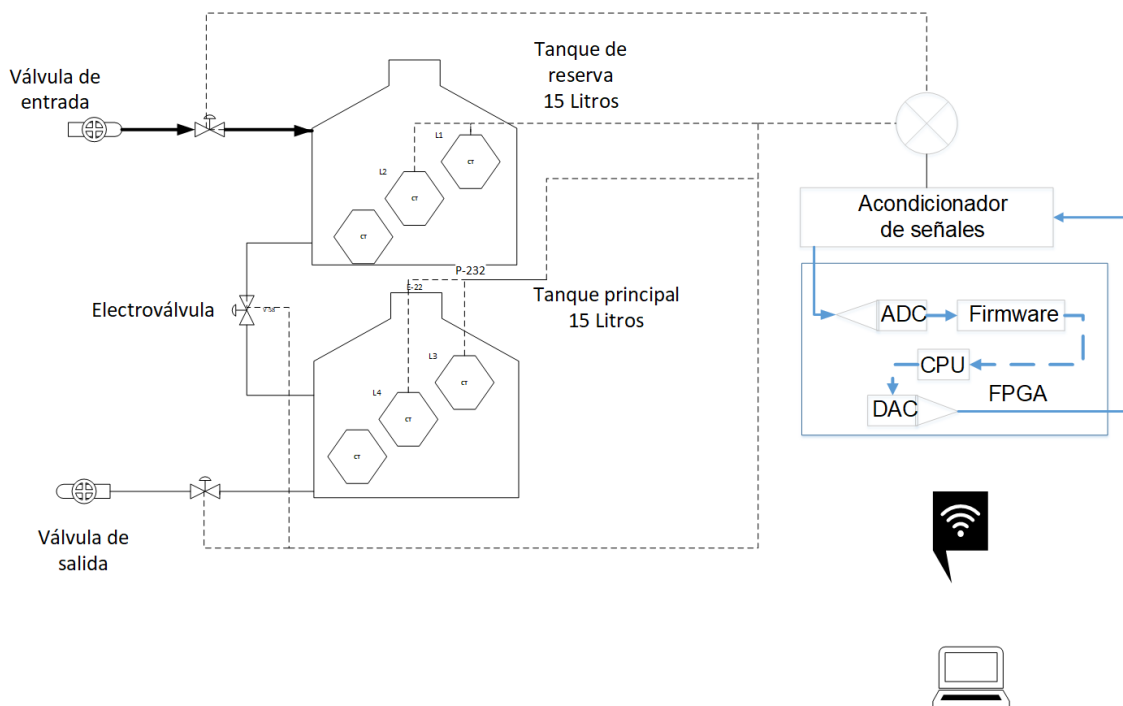


Figura 4: Diagrama de control del llenado de los recipientes.

Inicialmente se propone que los recipientes sean confeccionados de acero inoxidable con el objetivo de que sean resistentes a la acción corrosiva del agua y para que de manera general contribuyan al proceso de disipación de la temperatura.

El control por implementar será del tipo on/off de acuerdo con los ciclos de histéresis de llenado de los recipientes y para evitar de ese modo oscilaciones en el sistema que conlleven a inestabilidades o derrames.

La lógica propuesta para la programación de firmware se detalla a continuación:

- 1- El llenado del dispositivo de reserva se realizará en función de la disponibilidad de agua en la toma que llega del servicio público.

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



- 2- El proceso de desagüe se realizará con una periodicidad determinada de acuerdo con las características y especificaciones del experimento, pero teniendo en cuenta que solo se podrá realizar siempre y cuando el recipiente auxiliar cuente con disponibilidad de agua porque no se puede dar el caso de permitir el desagüe y que en su defecto no existan reservas para continuar con un adecuado funcionamiento del sistema.
- 3- El traspaso de agua de un recipiente a otro se hará bajo la lógica de garantizar en todo momento la disponibilidad del líquido porque en caso contrario no se puede realizar el experimento.
- 4- Todas las señales resultantes de los electrodos serán acondicionadas en el acondicionador de señales y desde ahí serán transmitidas al dispositivo FPGA.

Todo el proceso de control se realizará a través del FPGA haciendo uso de la lógica descrita con anterioridad.

En la Figura 5 se observa el diagrama lógico de funcionamiento del lazo de control de temperatura propuesto para el láser. Se puede significar el empleo de una bomba de agua, 2 medidores de flujo, 2 sensores de temperatura y una electroválvula, todos conectados a un acondicionador de señales y este al FPGA en el cual se va a programar el firmware de control.

Como sensores de funcionamiento tendremos a los medidores de flujo y a los termómetros, y los actuadores serán la bomba hidráulica y la electroválvula. Todo el firmware que se programe será incluido en un macro software de control de todo el experimento, por cuanto lo que se propone en el presente avance de tesis es una parte funcional del experimento de forma general. Todo el sistema contará con interfaz wifi que permitirá la portabilidad del software a interés del usuario y garantizará la movilidad absoluta dentro del rango de trabajo, aumentando las potencialidades.

La lógica propuesta se expone a continuación:

- 1- Se comienza el experimento, si no se cuenta con suficiente agua en los depósitos se emite una alerta y se cancela la operación. (Acción de seguridad)
- 2- Si se cuenta con suficiente agua, se procede a permitir el paso por la electroválvula de control de flujo y se acciona la bomba hidráulica para garantizar la circulación del agua mientras dure el experimento.
- 3- Se mantendrá todo el tiempo comprobando el valor de temperatura que emiten los sensores y comparándoseles con un valor máximo de 50°C con una tolerancia máxima de 1°C con vistas a garantizar que no se salgan de los valores adecuados.
- 4- Mientras no se detecte ningún parámetro fuera de lo normal (temperatura, flujo de agua) el sistema continuará funcionando como está programado, en caso contrario, se emite una alarma y se detiene el proceso por cuestiones de seguridad.
- 5- Al finalizar el experimento se debe de garantizar que se cierra el flujo de agua a través de la electroválvula al tiempo que se elimina todo resto del líquido de los conductores

para evitar que el agua estancada pueda generar algún perjuicio a largo plazo, teniendo en cuenta de que el experimento solo se ejecuta una vez a la semana.

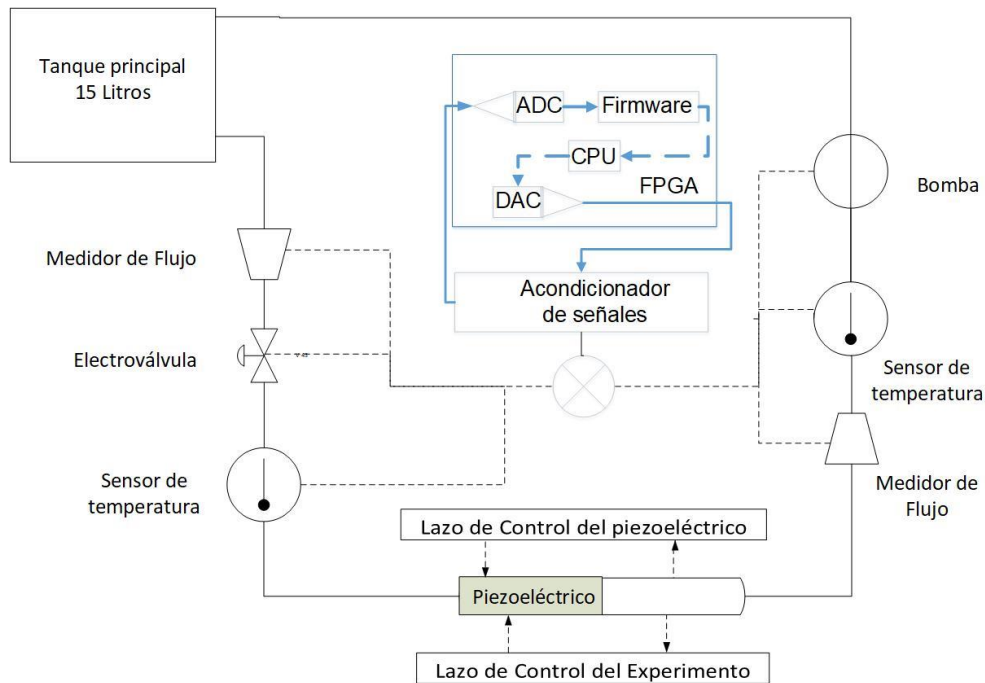


Figura 5: Diagrama de control de temperatura del láser.

Para realizar la implementación de los diferentes sistemas de control es necesario la caracterización de los componentes a utilizar entre los que podemos significar:

La tarjeta FPGA propuesta para desarrollar el firmware es la DE0CV, Figura 6.

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

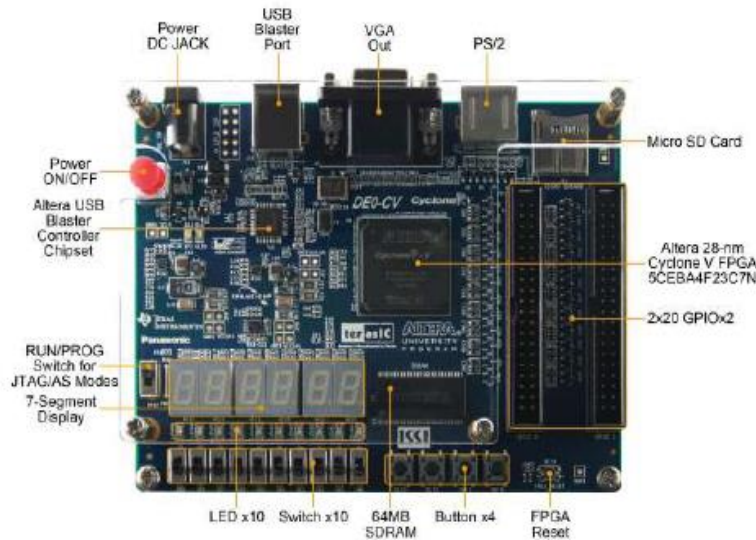


Figura 6: Tarjeta DE0CV

Esta tarjeta provee el siguiente hardware:

- FPGA 5CEBA4F23C7N de la familia de Altera Cyclone® V
- 49 K Elementos de lógica programable
- 3080 Kbits de memoria embebida
- Fuente de alimentación de 5 V
- Dispositivo de configuración serial de Altera EPCS64
- 64 Mbyte SDRAM, x 16 bits de bus de datos
- Dos bloques de 40 pines de expansión

En el caso de los sensores de temperatura se propone implementar un control utilizando el sensor DS18B20, Figura 7, este sensor es de tipo digital, configurable y permite obtener una resolución de 9 a 12 bits para una tensión de alimentación de 5 V. Por otro lado, posee una dirección de 64 bits por defecto única que permite identificar el dispositivo que se está utilizando dado el caso de que existan más de unos.

Para su comunicación utiliza el protocolo 1-Wire empleando la transmisión serie por un único terminal de datos. Es un sensor bien versátil y permite una respuesta lineal en un rango desde los -50° hasta los 125 °C

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



Figura 7: Sensor de temperatura

Aplicaciones del sistema propuesto

Este sistema permite realizar el control efectivo de la temperatura de operación del láser. Ello redundaría en garantizar la seguridad de operación del equipamiento y del personal que trabaja en el laboratorio. Es necesario realizar un proceso de cuantificación de manera práctica de en cuanto disminuye la deriva de las propiedades de emisión del láser una vez esté completado todo el sistema de enfriamiento para de esta forma realizar una valoración más acertada de los impactos de este en la calidad de los resultados obtenidos.

4. Conclusiones

Se presenta una propuesta inicial para un sistema de control de temperatura para un láser de CO₂ que se encuentra en el Laboratorio de Resonancia y Luminiscencia en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Se definen los lazos de control a implementar, así como los sensores, actuadores y otros componentes necesarios para realizar la implementación. Se realizó para ello un proceso de caracterización de cada uno de los mismos.

Los diagramas de control propuestos se diseñaron para lograr el control de la variable física de temperatura en función de los intereses de los especialistas que trabaja en el laboratorio. El esquema de control permitirá garantizar la seguridad de operación del láser a la vez que mejorará los resultados obtenidos por cuanto limitará la deriva en las características de emisión que presenta el dispositivo láser.

Una vez ocurra la implementación de todo el sistema se necesita cuantificar la manera real en la cual disminuyen las perturbaciones en las características de emisión del láser una vez haya sido controlado el comportamiento de la variable física. Los diagramas propuestos incluyen la utilización de interfaces inalámbricas que garantizarían la movilidad del personal del laboratorio y les permitiría no depender de los equipos de cómputos para realizar el procesamiento de los resultados. El proceso de automatización del sistema de enfriamiento

**II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”**

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



permitirá la operación sin riesgos, desde un punto de vista de la seguridad, del láser y de esta manera se ampliarán las posibilidades experimentales y sus aplicaciones.

5. Referencias bibliográficas

Çıklaçandır, S. & İşler, Y., 2018. Design of a New Mechanism in Medical Applications with Laser. Izmir, Turkey, s.n.

Aboites, V. y otros, 1987. Láser de CO₂. Revista Mexicana de Física, Issue 3, pp. 489-497.

Anon., 2006. Gas lasers. CRC Press.

Caligulu, U., Taskin, M., Kejanli, H. & Orhan, A., 2012. Interface characterization of CO₂ laser welded austenitic stainless steel and low carbon steel couple. Industrial Lubrication and Tribology, LIV (4), pp. 196-207.

Canales Sánchez, M. E., 2007. El láser de media potencia y sus aplicaciones en medicina. Plasticidad y Restauración neurológica, 6(1).

Chang, H., 2012. Is Water H₂O? s.l.: Springer, Dordrecht.

Domínguez-Rocha, V. y otros, 2014. Diseño de una cavidad fotoacústica para aplicaciones médicas. Puerto Vallarta, Jalisco, México, s.n.

Estévez, F. & Alonso, H., 2007. Effect of Co₂ Laser Radiation on Surface. Research Journal of Textile and Apparel, XI (3), pp. 42-47.

Graham Bell, A., 1880. Upon the production and reproduction of sound by light. 9(34).

Hayden, J., 1907. Alternating-current electrolysis. Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, 26(2).

Hecht, E., 2000. Óptica. Madrid: Addison Wesley Iberoamericana.

Maiman, T., 1960. Stimulated Optical Radiation in Ruby. Nature, Issue 187, pp. 493-494.

Martínez de Mendivil Varas, J., 2015. Láseres integrados en dobles tungstos y niobato de litio basados en guías de onda ridge, Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.

Pérez Pacheco, A. y otros, 2014. Detección fotoacústica de Bio-marcadores para el análisis de metabolitos en el aliento humano. Tonantzintla, s.n.

Schawlow, A. L. & Townes, C. H., 1958. Infrared and Optical Masers. Physical Review, Issue 112, pp. 1940-1949.

**II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"**

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



Williams, C., 1997. CO2 laser processing - an overview. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 69(1), pp. 43-52.

Yagci, M., 2017. Design of Microcontroller Controlled YAG Laser Device Cooling Systems using Thermoelectric Materials. s.l., s.n.

SEMIAUTOMATIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UN ESPECTRÓMETRO FOTOACÚSTICO

Ing. David Ferreiro Piñeiro¹, Dra. María Aurora Diozcora Vargas Treviño², Dr. Sergio Vergara Limon³, Dr. Fernando Reyes Cortés⁴, Dra. Marcela Dolores Grether González⁵ y Dra. Amparo Dora Palomino Merino⁶

Resumen— Se realizó un estudio del principio de funcionamiento de un láser gaseoso de CO₂ que emite en la región del mediano infrarrojo (de 9µm a 11µm) dicho láser se encuentra en el Taller de Resonancia y Luminiscencia Magnética de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y es parte central de un espectrómetro fotoacústico. Se realiza una caracterización del sistema, sus propias funcionalidades generan la necesidad de contar con un sistema de enfriamiento a base de agua que ofrezca un control eficiente de la temperatura, crucial en la estabilidad de su potencia de salida. De los procesos identificados se procede a presentar sus diagramas de funcionamiento, así como una propuesta inicial de implementación de los algoritmos de control. Todo el proceso de control se realiza sobre un microprocesador integrado dentro de una tarjeta FPGA, lo cual resulta altamente ventajoso a la vez que novedoso.

Palabras clave—espectrómetro fotoacústico, automatización, FPGA, sistema de enfriamiento.

Introducción

El desarrollo de técnicas o tecnologías que permitan la detección de componentes variados de manera no invasiva es una de las áreas en la investigación con mayor desarrollo y potencial, realizándose particular interés en la detección de metabolitos en el aliento humano como área creciente en las ciencias médicas (Pérez Pacheco, et al., 2014), (Tyas, et al., 2018).

Las principales técnicas desarrolladas operan en el rango espectral del infrarrojo medio (1-10 micras), en la cual una gran cantidad de moléculas exhiben fuertes líneas de absorción, las cuales corresponden a sus transiciones rotacionales fundamentales. Para este tipo de desarrollo se utiliza como base el efecto fotoacústico descubierto por Bell en 1880 (Graham Bell, 1880), (Marin, 2008). Este efecto explica la conversión de la energía luminosa en energía térmica y esto en variaciones de presión que generan sonidos al incidir sobre determinada muestra. Las moléculas iniciales de estudio en el experimento que se analiza es el CO₂ y sus isótopos estables, así como las cetonas; en este caso el interés radica en el amplio espectro de uso médico (Canales Sánchez, 2007), (Domínguez-Rocha, et al., 2014), (Tanaka, et al., 2016).

Para realizar este tipo de detección, se requiere de dispositivos que emitan un tipo de radiación con características especiales y bien definidas: coherencia, monocromaticidad y alta direccionalidad. La conjunción de estas tres propiedades de emisión ha viabilizado la interdisciplinariedad entre las diversas áreas del conocimiento, generando un sinnúmero de aplicaciones.

Este tipo de dispositivos normalmente operan a altas potencias, por lo que necesitan de sistemas automáticos de control y disipación de temperatura. El sistema que se está estudiando no cuenta en estos momentos con un sistema que garantice su temperatura de operación de manera eficiente de forma tal que repercute de manera perjudicial en la obtención de resultados, en la presente investigación se propone un sistema automático de control que elimine estas deficiencias.

¹ David Ferreiro Piñeiro es estudiante de la Maestría en Ciencias de la Electrónica opción en Automatización, en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla david.ferreiro@alumno.buap.mx (**autor corresponsal**)

² Dra. M. A. Vargas Treviño es profesora del área de Robótica y Control en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla aurora.vargas@correo.buap.mx

³ Dr. S. Vergara Limon es profesor del área de Robótica y Control en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla sergio.vergara@correo.buap.mx

⁴ Dr. Fernando Reyes Cortés es profesor del área de Robótica y Control en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla fernando.reyes@correo.buap.mx

⁵ Dra. Marcela Dolores Grether González es responsable del Taller de Resonancia y Luminiscencia de la Universidad Nacional Autónoma de México mdgg@ciencias.unam.mx

⁶ Dra. Amparo Dora Palomino Merino es profesora del área de Robótica y Control en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla ampalomino@gmail.com

Descripción del Método

El sistema objeto de estudio se encuentra ubicado dentro del Taller de Resonancia y Luminiscencia de la Facultad de Ciencias de la UNAM. El núcleo experimental se encuentra en un láser gaseoso de CO₂ porque es el que se encarga de generar la radiación con características necesarias para poder excitar a las moléculas dentro de una cavidad fotoacústica.

Dentro de la cavidad resonante del láser se genera un plasma con una potencia aproximada de 2000 W, lo cual se traduce en una elevada temperatura de operación y genera la necesidad de un sistema de enfriamiento adecuada, en este caso, al tratarse de un láser longitudinal, su enfriamiento se realiza a base de agua.

El sistema de enfriamiento actual se conecta directamente a la entrada de agua del servicio universitario. El método con el cual se cuenta para conocer de la circulación de agua es a través de un indicador de flujo. Esta configuración genera numerosas problemáticas debido a la propia inestabilidad del servicio de agua y a variaciones en su flujo, necesitando además que uno de los especialistas esté dedicado a observar en cada momento el estatus del sistema, lo cual influye de manera negativa en el experimento.

En otras cuestiones, las propias condiciones ambientales y la configuración actual del sistema provocan que la temperatura no se mantenga constante y se generen derivas en las líneas de emisión sintonizadas. Para contrarrestar lo anteriormente expresado se procede a ingresar una señal diente de sierra al cristal piezoeléctrico con el objetivo de determinar el momento preciso en el cual se logra sintonizar la línea de emisión, como se comprenderá esta operación genera la necesidad de cotejar en tiempo la generación de la señal de estímulo más los datos adquiridos, lo que a la postre se traduce en un mayor tiempo de cómputo y a la introducción de posibles errores.

La infraestructura disponible en el laboratorio permite realizar 3 configuraciones diferentes de operación. Sin embargo, solo uno de ellos resulta de interés actual para los investigadores. En este caso se busca evaluar la transmitancia de un gas de alcohol metílico ante la incidencia de la luz láser, a lo cual se le denomina espectroscopía por absorción en el infrarrojo medio del alcohol metílico, como se describe en la Figura 1.

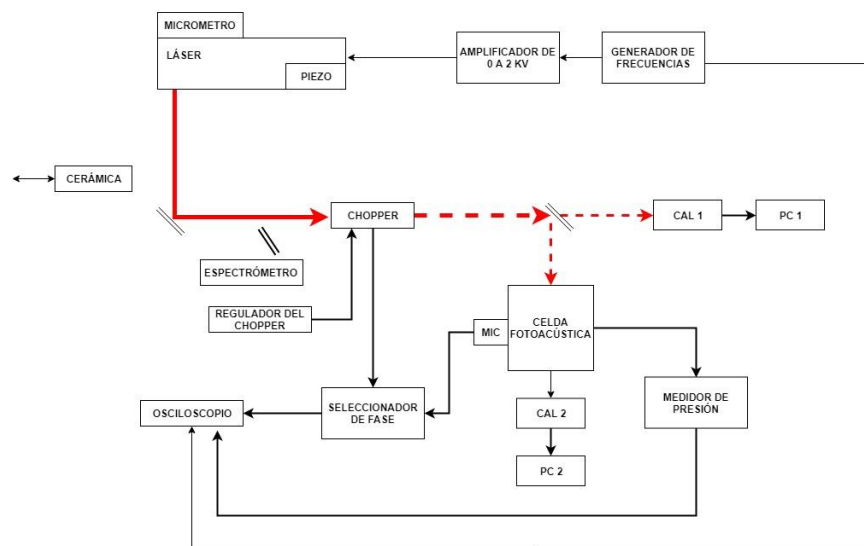


Figura 1: Modo de operación: espectroscopía por absorción en el infrarrojo medio

El objetivo perseguido es la reproducción de la transmitancia ya documentada del alcohol metílico para realizar una caracterización del láser basado en el experimento y de este modo comprobar la metodología utilizada. La transmitancia ante la incidencia de la luz es una razón entre la potencia transmitida y la potencia incidente. En el caso del experimento desarrollado estas potencias se encuentran directamente relacionadas con los calorímetros especificados en el esquema anterior y ubicados antes de la celda fotoacústica y el calorímetro de salida. Bajo las condiciones actuales en las cuales se realiza el experimento, la luz es absorbida y determina un coeficiente de absorción constante y esta será la que indique la cantidad de luz incidente absorbida por un determinado gas. Como la sintonía puede ser modificada a lo largo del experimento se busca encontrar la relación existente entre el coeficiente de absorción y la frecuencia de luz láser incidente; el espectrómetro registra si el material absorbe o no durante la sintonía.

Como se mencionó con anterioridad existe una problemática con el eficiente control de la temperatura, crucial en la estabilidad de la potencia de salida del láser. En la Figura 2 se presenta el diagrama propuesto para el sistema de control de temperatura; este extiende su funcionamiento tanto para el dispositivo láser como para el atenuador de señales ópticas, la única diferencia entre ambos casos está en la potencia a disipar. Resulta necesario realizar un proceso de detección de nivel de agua para un adecuado funcionamiento del sistema y verificar la disponibilidad del líquido refrigerante. Como actuadores se propone utilizar una bomba de agua para garantizar el flujo constante y de esta manera garantizar la temperatura, así como el empleo de 2 sensores de temperatura, uno colocado antes de la entrada al láser y uno posterior al sistema para determinar la temperatura promedio de trabajo del láser esto producto a la imposibilidad objetiva de obtener mediciones del interior de este. Todas las señales serán procesadas dentro de la tarjeta FPGA en la cual se han programado los algoritmos de control para la temperatura del láser y del divisor de potencia óptica, así como del proceso de circulación de agua por los recipientes de almacenamiento, además del firmware necesario para operar los componentes anteriormente mencionados.

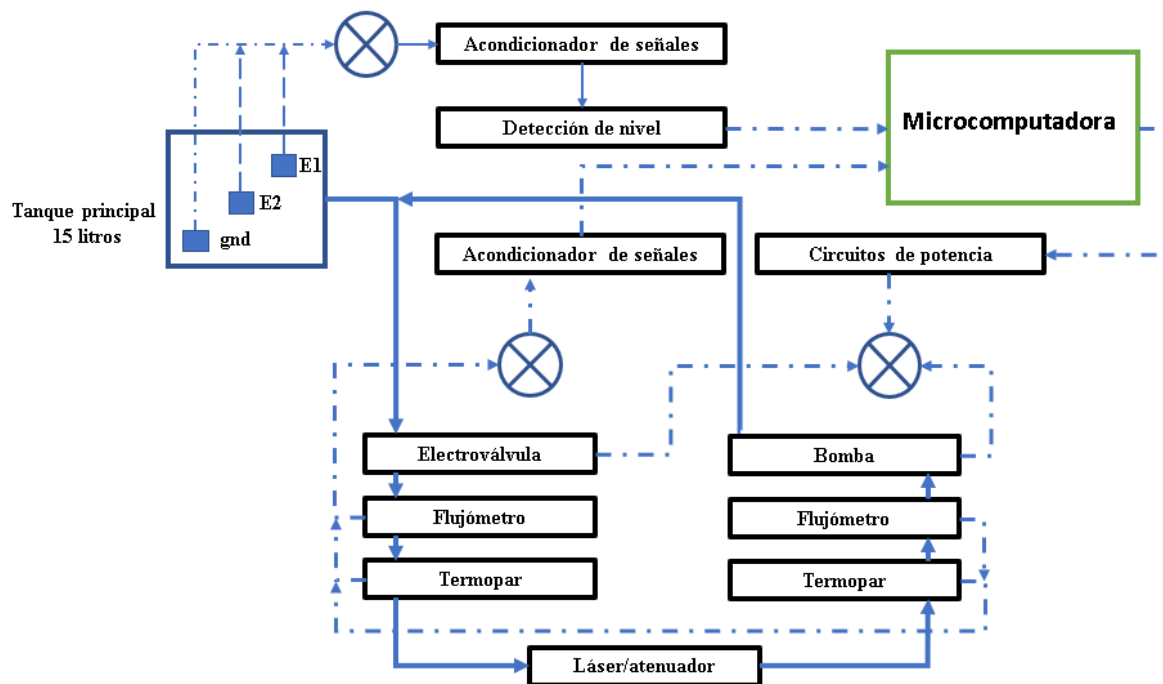


Figura 2: Diagrama para el control de la temperatura

En la implementación del control de temperatura se debe de considerar que no se tiene acceso físico al valor de la temperatura dentro del láser, por cuestiones objetivas. La práctica ha demostrado que el agua que circula no debe de sobrepasar un valor de aproximadamente 50 grados centígrados porque arriba de esa temperatura pueden ocurrir afectaciones en el funcionamiento del dispositivo. Por la anterior razón se considera que la temperatura máxima del refrigerante de entrada estará en el orden de los 35 grados centígrados. Esta temperatura será medida por el sensor que se encuentra antes de la entrada del láser. Se considera que al circular el agua ocurra una deriva de aproximadamente 10 grados. Con estos datos se procede a controlar el volumen agua circulante para de esta manera controlar la temperatura.

En la Figura 3 se muestra el diagrama de flujo para el control de temperatura del sistema, se puede apreciar que la metodología comienza con una subrutina para la comprobación del nivel de agua del tanque principal (NIVEL_2). De no contar con disponibilidad de agua no es posible realizar el experimento. Luego es preciso analizar el comportamiento del flujo de agua, al ser un sistema constante y sin perdidas cualquier diferencia en la lectura de los de los sensores de flujo determina una ruptura de los conductores de agua y pone en riesgo el funcionamiento del sistema. Luego se procede a analizar la deriva de la temperatura y en función de ello se controla el ancho de pulso suministrado a la bomba para controlar el flujo o caudal de agua.

En la Figura 4 se presentan los resultados experimentales preliminares obtenidos al implementar el mencionado control de temperatura. Como se observa, existe un sobre impulso en los primeros momentos, pero a medidas que avanza el tiempo la temperatura comienza a descender hasta que queda estabilizada en un valor próximo a los 35 grados centígrados. Aún con la existencia del mencionado sobre impulso no se pone en riesgo la operación del sistema debido a que la máxima temperatura alcanzada no alcanza los 50 grados centígrados que se establecieron como temperatura crítica.

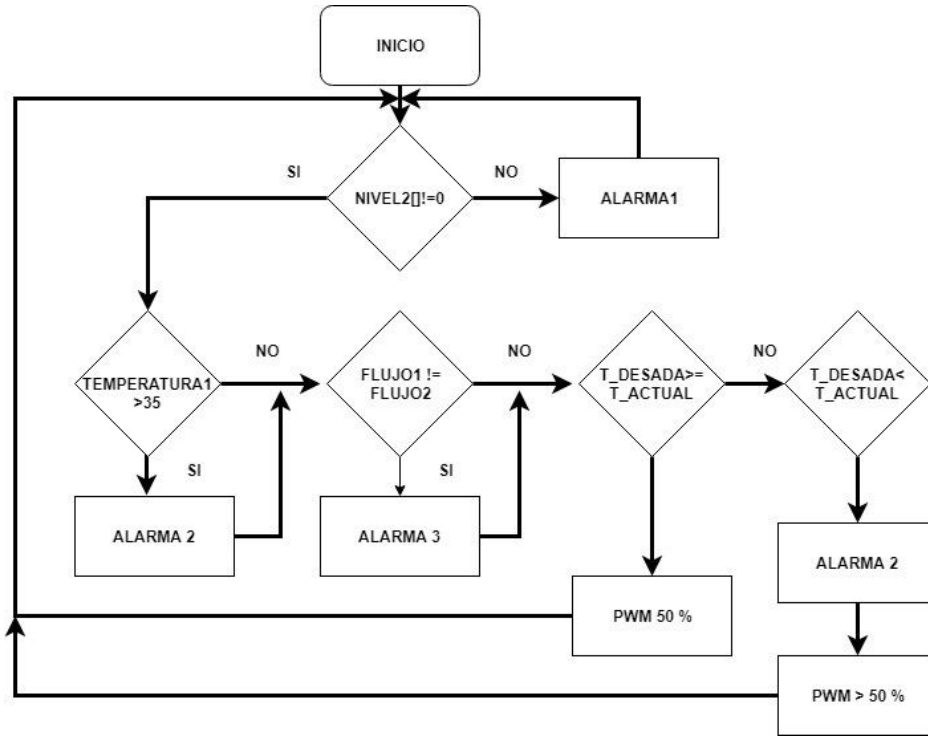


Figura 3: Diagrama de flujo del control de temperatura

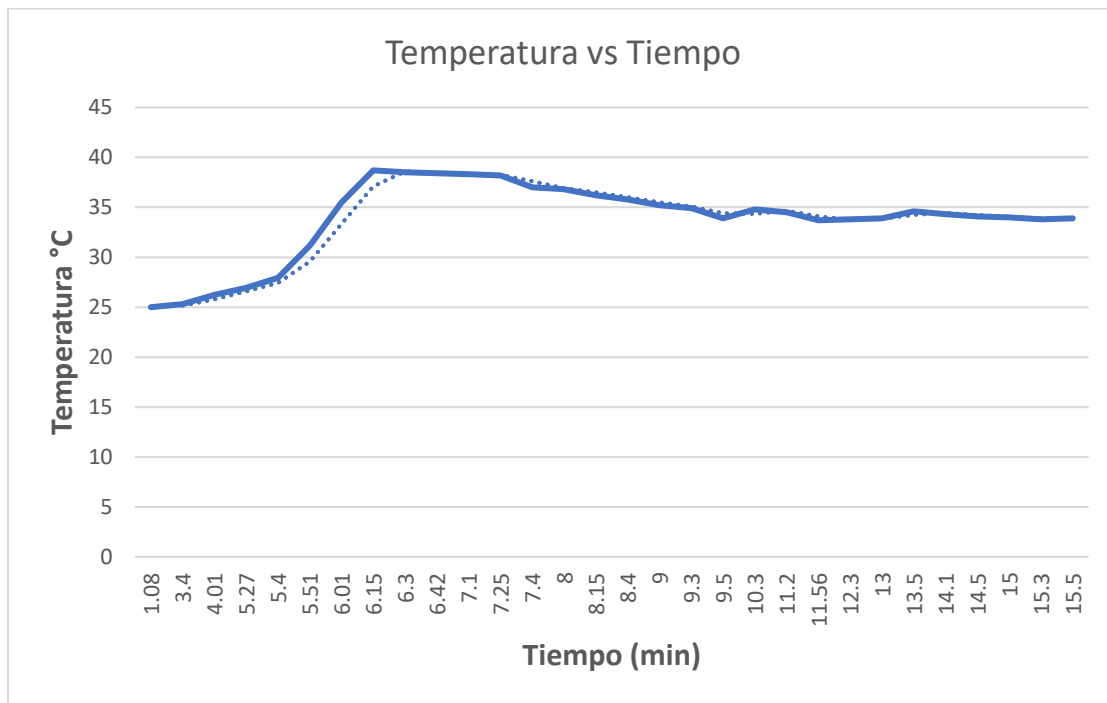


Figura 4: Resultados experimentales

Resumen de resultados

Se presenta una propuesta de sistema para controlar temperatura de un dispositivo láser que se encuentra en el Taller de Resonancia y Luminiscencia de la UNAM. Se realizó la implementación del sistema propuesto, y el diseño del firmware dentro de una tarjeta FPGA, así como los respectivos algoritmos de control. Se presentaron los resultados obtenidos.

Conclusiones

Se presentó una propuesta inicial para realizar un sistema de control de temperatura para lo cual se definieron los diagramas del respectivo lazo de control, Figura 2, fue preciso seleccionar tanto los sensores como los actuadores necesarios para una correcta implementación. Se realizó un proceso de caracterización de cada uno de los mismos.

El esquema de control diseñado y evaluado permite garantizar la temperatura de operación del dispositivo objeto de análisis a la vez que garantiza la seguridad en la operación. Resta cuantificar la influencia en la disminución de la deriva en las características de emisión (potencia de emisión y líneas espectrales) del sistema analizado.

Los diagramas propuestos incluyen la utilización de una interfaz analógica para garantizar la movilidad del personal de laboratorio por lo que les permitirá no depender de determinado equipo de cómputo.

La automatización del sistema de enfriamiento garantizará la operación de este sin riesgos, desde un punto de vista de la operación, del láser y de esta manera se ampliarán las posibilidades experimentales y sus aplicaciones.

Recomendaciones

Resultaría provechoso evaluar el impacto del control de temperatura en el proceso de sintonización del dispositivo láser y de esta manera conocer en cuánto disminuyen las derivas en las propiedades de emisión de este.

Referencias

- Qi, Z. y otros, 2012. Study on the Online Dissolved Gas Analysis Monitor based on the Photoacoustic Spectroscopy. Bali, Indonesia, s.n.
- Alberty, R. a. & Daniels, F., 1989. Físicoquímica versión SI. México: Compañía Editorial Continental.
- Barreiro, N. L. y otros, 2008. CARACTERIZACIÓN DE LA ESPECTROSCOPIA FOTOACÚSTICA PULSADA DEL NO₂ EN AIRE. Anales AFA, Volumen 20, pp. 53-57.
- Canales Sánchez, M. E., 2007. El láser de media potencia y sus aplicaciones en medicina. Plasticidad y Restauración neurológica, 6(1).
- Domínguez-Rocha, V. y otros, 2014. Diseño de una cavidad fotoacústica para aplicaciones médicas. Puerto Vallarta, Jalisco, México, s.n.
- Flores Mijangos, J., 2000. Espectroscopía por resonancia magnética. Láser de átomos y moléculas ligeras. CDMX: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Graham Bell, A., 1880. Upon the production and reproduction of sound by light. Journal of the Society of Telegraph Engineers, 9(34), pp. 404 - 426.
- Harren, F., Cotti, G., Oomens, J. & Hekkert, L., 2000. Photoacoustic Spectroscopy in Trace gas monitoring.
- Lassen, M. y otros, 2017. Quartz enhanced photoacoustic spectroscopy for human breath analysis. San Jose, CA, USA, s.n.
- Lay-Ekuakille, A., Vendramin, G. & Trotta, A., 2008. Photoacoustic spectroscopy of biomedical gas sensing: Adaptive filtering as calibration. Tainan, Taiwan, s.n.
- Marin, E., 2008. Escuchando la Luz: breve historia y aplicaciones del efecto fotoacústico. Latin American Journal Educational Physics, 2(2), pp. 209-215.
- Mustafa, F., Jaafar, A. & Houssein, H., 2011. The Effect of Laser Wavelength in Photodynamic Therapy and Phototherapy for Superficial Skin Diseases. Penang, Malaysia, s.n.
- Oliveres, R., 2016. What is a Laser Spectrum Analyzer? Resolution Spectra Systems.

Pérez Pacheco, A. y otros, 2014. Detección fotoacústica de Bio-marcadores para el análisis de metabolitos en el aliento humano. Tonantzintla, s.n.

Pierson, R. H., Fletcher, A. N. & Gantz, E. S. C., 1956. Catalog of infrared spectra for qualitative analysis of gases. Analytical Chemistry, 8(28), pp. 1218-1239.

Sadiek, I. y otros, 2019. Optical Frequency Comb Photoacoustic Spectroscopy. San Jose, CA, USA, USA, s.n.

Schawlow, A. L. & Townes, C. H., 1958. Infrared and Optical Masers. Physical Review, Issue 112, pp. 1940-1949.

Tanaka, Y. y otros, 2016. Sensitivity improvement on CW dual-wavelength photoacoustic spectroscopy using acoustic resonant mode for noninvasive glucose monitor. Orlando, FL, USA, s.n.

Tyas, F. H. y otros, 2018. The Performance of CO₂ Laser Photoacoustic Spectrometer in Concentration Acetone Detection as Biomarker for Diabetes Mellitus Type 2. Journal of Physics: Conference Series, MXI (1).

Yong Sim, J., Ahn, C.-G., Jeong, E. & Kyu Kim, B., 2016. Photoacoustic spectroscopy that uses a resonant characteristic of a microphone for in vitro measurements of glucose concentration. Orlando, FL, USA, s.n.

Notas Biográficas

Ing. David Ferreiro Piñero: titulado como Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica por la Universidad de Oriente, Cuba (2016), actualmente cursa sus estudios de maestría en el programa de Ciencias de la Electrónica, Opción en Automatización de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Dra. Aurora Vargas Treviño: profesora de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel I. Desarrolla trabajos de automatización con diferentes instrumentos y tarjetas para un sinnúmero de aplicaciones. Realiza trabajos en áreas de instrumentación para física de partículas teniendo una fuerte colaboración con el Centro Europeo para la investigación nuclear CERN.

Dr. S. Vergara Limon: profesor de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel II. Desarrolla trabajos de automatización con diferentes instrumentos y tarjetas para un sinnúmero de aplicaciones. Realiza trabajos en áreas de instrumentación para física de partículas teniendo una fuerte colaboración con el Centro Europeo para la investigación nuclear CERN.

Dr. Fernando Reyes Cortés: profesor de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel II. Máster en Ingeniería Electrónica (1984) por la BUAP y el INAOE, Doctor en electrónica (1997) por el CICESE. Sus áreas de interés van sobre el control de robots manipuladores con especial énfasis en las aplicaciones prácticas; ha publicado 4 libros y varios artículos científicos para conferencias tanto nacionales como internacionales.

Dra. Marcela Dolores Grether González: profesora de la Universidad Nacional Autónoma de México, realizó su doctorado en ciencias en aplicaciones a la superconductividad. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel I

Dra. Amparo Palomino Merino: profesora de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Realizó su doctorado en control automático en 2005, sus intereses de investigación incluyen el modelado y control de navegación de sistemas inerciales sistemas de robots autónomos y aplicaciones de control no lineal con el desarrollo de plataformas experimentales.