

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“Desarrollo de controladores e instrumentación virtual en el
monitoreo de fuentes de energía y su aplicación en la producción
de biodiésel”**

Tesis para obtener el grado de:
Maestro en Ingeniería

Presenta:
Samuel Godinez Martinez

Director
Dr. Moisés Jesús Castro Toscano

Codirector:
Dr. Conrado García González

Mexicali, B. C a 13 de diciembre del 2024

Dedicatoria

Principalmente a Dios, que ha sido mi motor principal desde siempre; por brindarme amor, paciencia, inteligencia, capacidad y más, para lograr este grado académico y la persona que soy.

Con muchísimo amor a mis padres, a mi madre que ha estado conmigo desde la etapa preescolar cuidándome, apoyándome, amándome y luchando para salir adelante en mi formación académica y personal. A mi padre que está en el cielo, por amarme, cuidarme y formar mi carácter durante mi niñez y adolescencia. A ambos por ser un ejemplo para mí y guiarme al buen camino de Dios. Eternamente agradecido con mis padres y especialmente dedicada a ellos.

Con muchísimo amor y agradecimiento, a mi mejor amiga y novia Byanca, que con su amor y paciencia me ha acompañado en este proceso. Por creer en mí, enderezarme y guiarme al camino de Dios y por ser una fuente de amor, motivación e inspiración para mí.

Y con todo el amor a la familia y a aquellas personas que aportaron a mi vida para que pudiera lograr este escalón y haberme brindado su apoyo en las buenas y en las malas. Siempre agradecido con ustedes.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por brindarme el apoyo económico mediante el apoyo de beca y así poder continuar y concluir mi posgrado. Asimismo, a la Facultad de Ingeniería y al Instituto de Ingeniería (UABC, Mexicali), por brindarme las aulas, los espacios y a los catedráticos en mi formación académica.

A mi director de tesis, Dr. Moisés Castro Toscano, por darle seguimiento a este proyecto de investigación, creer en mi capacidad, motivarme a ser un estudiante disciplinado y por compartirme su conocimiento respecto al campo de estudio y su experiencia. A mi Codirector de tesis, Dr. Conrado García González por trabajar en este proyecto de investigación, compartirme su conocimiento, espacios de trabajo y consejos. Y, sobre todo, por creer en mí desde la licenciatura y guiarme hacia el posgrado.

Al Dr. Roberto López Avitia, quien fue mi primer director de tesis y es mi amigo personal, agradecido siempre por brindarme su conocimiento, paciencia y amistad. Por brindarme material y espacios de trabajo, creer en mí y motivarme a aprender nuevas disciplinas.

Al Dr. Rogelio Ramos Irigoyen, sinodal y maestro, agradecido por su paciencia, conocimiento y tiempo que tuvo para mis dudas en clase y extra clase.

A cada uno de los maestros, compañeros, familiares y amigos durante mi formación académica en el posgrado.

Índice

<i>Dedicatoria</i>	I
<i>Agradecimientos</i>	II
Índice	III
Declaración de autoría	V
Resumen	VI
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	X
1. Introducción	1
1.1 Problemática y justificación	1
1.2 Antecedentes	4
1.2.1 Biodiésel	4
1.2.2 Parámetros óptimos para el biodiésel	7
1.2.3 Biodiésel con herramientas virtuales	11
1.3 Objetivo general	15
1.3.1 Objetivos específicos	15
1.4 Hipótesis	17
2. Fundamentos teóricos	18
2.1 Biodiésel	18
2.1.1 Reacción de transesterificación	19
2.1.2 Propiedades y especificaciones	20
2.1.3 Parámetros óptimos para la producción	22
2.1.4 Requerimiento energético de la producción	23
2.2 Teoría de control e instrumentación	24
2.2.1 Control abierto	25
2.2.2 Control retroalimentado	28
2.2.2.1 PID	31
2.2.3 Fundamentos de instrumentación	36

2.2.3.1 Sensores analógicos y digitales	41
2.2.3.2 Dispositivos de adquisición de datos	45
2.3 Instrumentación virtual; entornos gráficos	52
2.3.1 Softwares especializados	57
2.3.2 LabVIEW	63
3. Metodología	69
3.1 Medición y monitoreo de temperatura en la producción de biodiésel	70
3.1.1 PWM para el control de la temperatura de reacción	74
3.1.2 PID para la temperatura de reacción	76
3.2 Medición y monitoreo de las revoluciones en la producción de biodiésel	77
3.2.1 PWM para el control de la agitación	80
3.3 Medición y monitoreo de la corriente en la producción de biodiésel	82
3.3.1 Cálculos para el consumo energético en kWh	86
3.4 Integración de los instrumentos virtuales y la interfaz electrónica	88
4. Experimentos y resultados	91
4.1 Equipos, reactivos y materia prima en la producción de biodiésel	91
4.1.1 Montaje	95
4.2 Resultados de temperatura ambiente	99
4.3 Resultados de temperatura de reacción	101
4.4 Resultados de la agitación	103
4.5 Resultados del consumo energético	105
4.6 Producto final	107
5. Conclusiones y recomendaciones	109
Bibliografía	113

Declaración de autoría

Yo, Samuel Godinez Martinez, declaro que esta tesis titulada “Desarrollo de Controladores e Instrumentación Virtual en el Monitoreo de Fuentes de Energía y su Aplicación en la Producción de Biodiésel” y el trabajado presentado en ella es mío. Confirmando que este trabajo enviado para su evaluación es mío y se expresa en mis propias palabras. Cualquier uso que se haga dentro de las obras de otros autores en cualquier forma (por ejemplo, ideas, ecuaciones, figuras, texto, tablas, programas) se reconoce adecuadamente en cualquier momento de su uso. Se incluye una lista de referencias empleadas.

Firma: _____

Fecha: _____

Universidad Autónoma de Baja California

Resumen

Facultad de ingeniería
Campus Mexicali
Maestría en Ingeniería

Desarrollo de controladores e instrumentación virtual en el monitoreo de fuentes de energía y su aplicación en la producción de biodiésel

por Samuel Godinez Martinez

En este trabajo de tesis de maestría se presenta una propuesta para optimizar y realizar el proceso idóneo de la producción de biodiésel mediante la reacción de transesterificación por catálisis básica con el catalizador NaOH. Además, se analiza el consumo energético del proceso, con el objetivo de explorar la viabilidad de implementar fuentes alternativas de energía. Investigaciones acerca del tema han demostrado que implementar herramientas virtuales de control y/o monitoreo a las variables del proceso de producción de biodiésel dan resultados positivos a la optimización y a la calidad final del producto. Este documento detalla el desarrollo y la implementación de una interfaz electrónica que gestiona los controladores de fuentes de energía. Además, se describe el desarrollo de una instrumentación virtual utilizando LabVIEW® y el dispositivo de adquisición de datos USB 6009. Esta configuración permite el monitoreo y control integrado de las variables críticas en el proceso de producción de biodiésel, incluyendo las temperaturas de reacción y ambiente, la agitación y el consumo energético. Las principales contribuciones de este documento son el desarrollo del instrumento virtual que controlará y monitoreará todas las variables de manera integrada, el desarrollo e integración de la interfaz electrónica requerida, y su aplicación práctica en el proceso mencionado.

Índice de figuras

2.1	Proceso de producción de biodiésel empleando Metanol como alcohol	19
2.2	Reacción de transesterificación	20
2.3	Diagrama de bloques de un sistema con control abierto	27
2.4	Diagrama de bloques de un sistema con control retroalimentado	30
2.5	Diagrama de bloques de controlador PID	31
2.6	Gráfica del comportamiento del componente proporcional	32
2.7	Gráfica del comportamiento del componente integral	34
2.8	Gráfica del comportamiento del componente derivativo	35
2.9	Diagrama del funcionamiento y comportamiento de los sensores analógicos	43
2.10	Diagrama del funcionamiento y comportamiento de los sensores digitales	44
2.11	Dispositivo de adquisición de datos USB 4704	48
2.12	Dispositivo de adquisición de datos USB 205	49
2.13	Dispositivo de adquisición de datos U2351A	49
2.14	Dispositivo de adquisición de datos NI 9202	52
2.15	Dispositivo de adquisición de datos sbRIO 9263	52
2.16	Dispositivo de adquisición de datos USB 6009	53
2.17	Diagrama de bloques de la adquisición de datos	56
2.18	Procesamiento de una señal analógica sin filtrar	57
2.19	Diagrama de bloques del control abierto y control retroalimentado	58
2.20	Panel frontal, diagrama de bloques y paleta de funciones del software LabVIEW®	60
2.21	Logo del software LabVIEW® 2024	60

2.22 Interfaz del software MATLAB/Simulink	61
2.23 Logo del software MATLAB/Simulink	61
2.24 Interfaz de ejemplo del software de sistemas SCADA	62
2.25 Interfaz de ejemplo del software de programación PLC	63
2.26 Interfaz del software Arduino IDE	63
2.27 Logo del software Arduino IDE	64
2.28 Interfaz del sistema operativo Raspberry Pi OS	64
2.29 Logo del sistema operativo Raspberry Pi OS	64
2.30 Panel frontal, diagrama de bloques y paleta de funciones del software LabVIEW®	65
2.31 Ventana de ejecución del software LabVIEW®	65
3.1 Sensor analógico LM35 para medición de temperatura	72
3.2 Diagrama de conexiones del sensor LM35 con el USB 6009	73
3.3 Adquisición de señal de temperatura de ambiente y de reacción	74
3.4 Operaciones para el análisis de alerta de temperatura máxima de reacción	75
3.5 Panel frontal del instrumento virtual de monitoreo de temperatura ambiente y reacción	76
3.6 Modulación por ancho del pulso para la plancha calefactora	77
3.7 Esquemático de la interfaz electrónica para el PWM con la plancha calefactora	77
3.8 Función PID acondicionada con el PWM para la plancha calefactora	78
3.9 Sensor codificador rotatorio óptico incremental bifásico para medición de revoluciones	79
3.10 Diagrama de conexiones del sensor del codificador rotatorio óptico incremental con el USB 6009	80
3.11 Operaciones para obtener revoluciones por minuto	81
3.12 Modulación por ancho del pulso para la batidora eléctrica	83
3.13 Esquemático de la interfaz electrónica para el PWM con la batidora eléctrica	83
3.14 Sensor de corriente ACS711EX	84
3.15 Diagrama de conexiones del sensor ACS711EX con el USB 6009	85
3.16 Adquisición de señal de corriente del aparato eléctrico y los 5 V del USB 6009	86

3.17 Cálculos para obtener el valor de la corriente consumida	87
3.18 Señal de corriente enviada a SubVI de corriente RMS	87
3.19 Cálculos para obtener la corriente RMS consumida	88
3.20 Adquisición de datos de las 5 señales analógicas	90
3.21 Diagrama de conexiones en conjunto de los sensores y el USB 6009	91
4.1 Plancha calefactora HYCC SH-2	94
4.2 Batidora de mano RCA RC-093	94
4.3 Materiales esenciales para la preparación de la producción de biodiésel	95
4.4 Reactivos y materia prima para la preparación de la producción de biodiésel	95
4.5 Montaje de los equipos y sensores para la reacción de transesterificación	97
4.6 Montaje del armazón de la interfaz electrónica junto con la DAQ 6009	98
4.7 Montaje de la computadora y el monitor	99
4.8 Montaje final	100
4.9 Monitoreo de la temperatura ambiente en el proceso de producción de biodiésel	101
4.10 Monitoreo y control de la temperatura de reacción en el proceso de producción de biodiésel	103
4.11 Monitoreo y control de la agitación en el proceso de producción de biodiésel	105
4.12 Monitoreo del consumo energético total del proceso de producción de biodiésel	107
4.13 Esteres metílicos de ácidos grasos (biodiésel y glicerina)	109

Índice de tablas

2.1 Especificaciones del biodiésel según la ASTM y su método ASTM D6751	21
2.2 Puntos de ebullición de los alcoholes más utilizado en la reacción de transesterificación	22
2.3 Sintonización Ziegler-Nichols, utilizando el método de oscilación	36

Capítulo 1

1. Introducción

Este capítulo destaca los acontecimientos más relevantes relacionados con el biodiésel. Se abordan las problemáticas asociadas al uso y dependencia de los combustibles fósiles, así como los desafíos específicos en el proceso de síntesis del biodiésel. Además, se describen las condiciones óptimas para la producción de biodiésel mediante la reacción de transesterificación por catálisis básica. Finalmente, se discute la necesidad de proponer soluciones a estos problemas e integrar un instrumento virtual para monitorear y controlar las variables del proceso. De la misma manera, se presenta una hipótesis, justificación y objetivos de la presente investigación de maestría.

1.1 Problemática y justificación

Actualmente, el elevado precio del petróleo, su tendencia al aumento y la disminución de las reservas están generando creciente preocupación entre los países para satisfacer sus demandas energéticas. Además, la situación actual se agrava debido a los altos niveles de contaminación, que aumentan día con día, en gran medida a causa de la emisión de gases provenientes de la quema de combustibles fósiles. Es bien sabido que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que genera la prestación de servicios energéticos han favorecido considerablemente al incremento histórico de las concentraciones de dichos gases en la atmósfera [1].

Una de las principales consecuencias por la utilización de combustibles posibles es el cambio climático a [2]. Este aumento en la contaminación eleva la probabilidad de fenómenos meteorológicos más violentos, sequías e incendios. También contribuye a la muerte de especies animales y vegetales, desbordamientos de ríos y lagos, y la aparición de refugiados climáticos. Además, provoca la destrucción de medios de subsistencia y

recursos económicos, especialmente en países en desarrollo.

Se pronostica que las reservas de petróleo y gas existentes solamente duren unas cuantas décadas más. El acelerado agotamiento de los combustibles fósiles, las elevadas magnitudes de las emisiones derivadas de la combustión de estos combustibles convectivos y sus crecientes costes han propiciado y orillado el surgimiento de los biocombustibles como fuente alternativa en materia energética.

Demirbas (2010) menciona que, debido al aumento en los precios del petróleo, especialmente después de la crisis del petróleo en 1973 y luego la Guerra del Golfo en 1991, la disponibilidad geográficamente reducida de petróleo y regulaciones gubernamentales más estrictas sobre las emisiones de escape, los investigadores han estudiado combustibles alternativos y métodos de solución alternativos [3]. Aproximadamente una década atrás, Montero et. al (2011) mencionan que, como resultado de la disminución de las reservas de petróleo en el mundo, el aumento de los precios de los combustibles fósiles y el crecimiento interés en el medio ambiente, creo una demanda considerable de combustibles alternativos [4]. En la actualidad, existe un gran acercamiento en las energías renovables y los biocombustibles para contribuir y combatir todas aquellas consecuencias que la dependencia hacia los combustibles fósiles ocasiona. De la misma manera, somos la evidencia viviente de confirmar como influyen las variables salientes (precio del combustible, precios derivados del petróleo, aceleramiento de las reservas del petróleo, conflictos políticos a nivel mundial, etc.) de la dependencia a los combustibles fósiles; lo vivimos con la pandemia del COVID19, los atentados de guerra, los cambios en el clima, etc. Por eso, existe la necesidad de no depender de los combustibles fósiles y seguir aplicando alternativas sustentables y sostenibles.

Uno de los biocombustibles con protagonismo hoy en día, es el biodiésel siendo un combustible alternativo de origen natural, renovable y más limpio que el diésel convencional. Este combustible alternativo es no tóxico y biodegradable, ya que se puede obtener a partir de aceite comestible usado. A diferencia de los combustibles fósiles, el aceite vegetal usado no es tan escaso actualmente. Uno de los métodos para su obtención es el proceso de transesterificación, una reacción química entre los triglicéridos del aceite y alcohol, que transforma a los primeros y proporciona un biodiésel fiable y con menos

inconvenientes para ser usado en motores [5]. Se puede decir que el biodiésel es sin duda el combustible sustituto del diésel en los motores de este tipo. Uno de los usos más habituales es la mezcla de biodiésel con diésel tradicional, en proporciones que suelen ser de B100 (100% biodiésel) o como B6 a B20 (94–80% de mezcla de diésel de petróleo con biodiésel) en un motor diésel con o sin cambios incluso más [6]. Una de las grandes ventajas de la producción del biodiésel es el subproducto que este genera; la glicerina, la cual se le puede dar aplicación en la fabricación de jabón o en la industria farmacéutica.

En los últimos años, se han implementado herramientas virtuales para el control y monitoreo de las variables que surgen en el proceso de la producción de biodiésel mediante la reacción de transesterificación. Variables como la temperatura aplicada son cruciales para el control y monitoreo del proceso. Es importante mantener la temperatura constante, ya que de ella depende la ebullición del alcohol. Aunque un condensador pueda retroalimentar el alcohol, un control y monitoreo adecuados son esenciales para evitar problemas que afecten las condiciones óptimas del proceso de reacción. Las herramientas virtuales tienen la finalidad de obtener biodiésel de alta calidad optimizando el proceso mediante los métodos de control y monitoreo virtual y aunque los resultados son exitosos, existe la oportunidad de monitorear y controlar la mayoría de variables involucradas en conjunto. Por lo regular, en el monitoreo y control de manera física en dicho proceso, surgen errores humanos que afectan al producto final. Uno de ellos es el ajuste manual de la energía suministrada (plancha calefactora), el ajuste de la agitación, los instrumentos de medición que tardan en medir más que sensores, entre otros factores que afectan directamente al tiempo invertido en el precalentamiento y durante la reacción de transesterificación.

Asimismo, Bharti et al. (2020) afirman que uno de los problemas en el proceso de producción de biodiésel es la considerable cantidad de energía requerida, lo que incrementa los costos de producción [5]. Por lo tanto, para abordar o contribuir a la solución de este problema, sería una excelente decisión desarrollar una herramienta virtual que monitoree y controle las variables relevantes en el proceso de producción de biodiésel mediante catálisis básica, eliminando así la necesidad de monitoreo y control físicos. Se contribuye a producir

un combustible alternativo mediante una herramienta virtual capaz de optimizar dicho proceso, crear un proceso idóneo con las mejores condiciones posibles y dar a conocer el requerimiento energético que consume dicho proceso creando la oportunidad a futuro de implementar otra energía alterna bajando costos finales.

1.2 Antecedentes

Esta sección presenta los aspectos más relevantes de la historia del biodiésel. Además, se describen los parámetros óptimos para la reacción de transesterificación y se revisan las diversas herramientas virtuales que se han investigado para la producción de biodiésel.

1.2.1 Biodiésel

El método de la reacción de transesterificación a partir de aceites vegetales fue desarrollado por los británicos E. Duffy y J. Patrick en el año 1853 con el principal objetivo de obtener glicerina y utilizarla como materia prima en la producción de jabón. Esto sucedió algunos años antes de que se hubiera inventado el motor diésel.

Este método se empleó originalmente para generar glicerina a partir de aceites de cacahuete, marihuana y maíz. No obstante, hoy en día se utiliza para obtener glicerina como también biodiésel de diversas materias primas, como lo son: aceites de girasol, algodón, linaza, soja, oliva, uva, coco, colza, ricino y piñón, entre otros. También ha demostrado ser eficaz con grasas animales y aceite comestible residual. [7].

En la segunda mitad del siglo XIX, empezaron a desarrollarse los primeros motores automotrices modernos. El 10 de agosto de 1893, el inventor francés R. Diesel patentó un motor de combustión interna que utilizaba aceite de cacahuete como combustible. Este invento le otorgó el primer premio en la Feria Internacional de París del año 1900.

Hasta principios del siglo XX, los motores automotrices funcionaban tanto con combustibles derivados del petróleo como con biocombustibles. Sin embargo, en 1920, la penalización internacional de la marihuana favoreció la explotación y comercialización de los derivados del petróleo, así como el desarrollo de tecnologías dependientes de estos combustibles, incluido el motor diésel. El biodiésel, conocido técnicamente como metil-ésteres y obtenido mediante el método de transesterificación, se utilizó por primera vez en

motores automotrices en Europa durante la Segunda Guerra Mundial, como resultado de la escasez de productos derivados. [8].

Luego, entre finales de los años 70 y principios de los 80, la preocupación por los elevados precios del petróleo motivó una amplia experimentación con el método de producción de biodiésel. Asimismo, se investigaron diversas fuentes de aceites vegetales y grasas animales para procurar fuentes de energía alterna [9].

Posteriormente, en 1913, Rudolph Diesel comentó: *"El uso de aceites vegetales como combustibles puede parecer irrelevante en la actualidad. No obstante, con el paso del tiempo, podría llegar a ser tan relevante como lo son hoy el petróleo o el carbón"* [10]. En la actualidad, los biocombustibles obtenidos de fuentes vegetales son reconocidos como una alternativa para reducir el impacto ambiental.

Diversos estudios que han investigado el uso de aceite de cocina reciclado como materia prima han analizado la eficacia de catalizadores sólidos, especialmente hidróxido de sodio e hidróxido de potasio. Asimismo, han examinado el funcionamiento de reactores de membrana, columnas de destilación y fluidos supercríticos. También se ha estudiado el impacto de diferentes tipos de alcohol en la reacción de transesterificación y su influencia en las emisiones del combustible. Las conclusiones indican que el rendimiento al utilizar aceite vegetal reciclado es comparable al de aceite virgen (superior al 90 %), pero con una reducción de costos de entre el 60 y el 90 %, alcanzando una pureza cercana al 99.8 % cuando se emplean fluidos supercríticos [11], [12].

El biodiésel se produce a partir de aceites vegetales mediante un proceso común conocido como transesterificación, que implica la reacción de estos aceites con alcohol metílico e hidróxido de sodio, generando un compuesto que puede ser utilizado directamente en motores diésel y quemadores sin necesidad de modificaciones adicionales. Durante esta reacción, la glicerina se forma como un subproducto, lo que añade valor al proceso, ya que la glicerina tiene aplicaciones en diversas industrias, incluyendo la farmacéutica y la de detergentes, entre otras [13]. Esta versatilidad en el uso de los subproductos subraya el

potencial del biodiésel como una alternativa sostenible en el contexto energético actual.

Actualmente, la producción comercial del biodiésel ha crecido de una manera significativa y se espera que en los próximos años sustituya parcial o totalmente la utilización del diésel derivado del petróleo. Hoy en día, la utilización del biodiesel es objeto de debate a nivel mundial, ya que tanto gobiernos como empresas están haciendo hincapié en presentar los biocombustibles como alternativas ambientalmente amigables. Esto ha llevado a la creación de metas políticas para fomentar el uso de energías renovables.

1.2.2 Parámetros óptimos para el biodiésel

En la última década, se han presentado diversas investigaciones acerca de las condiciones óptimas para la reacción de transesterificación. Todas las investigaciones y estudios establecen parámetros óptimos dependiendo de la materia prima como de los alcances establecidos. A continuación, se mencionan algunas de las investigaciones más relevante de la última década:

Sulaiman et al. (2013) presentaron un estudio de la extracción reactiva de residuos sólidos de coco para la producción de biodiésel mediante el cual utilizaron residuos de coco con metanol y KOH como catalizador alcalino. El mayor rendimiento generado fue del 88.5 % en peso y, a su vez, los análisis de glicéridos y glicerol muestran que se produjo biodiésel de alta calidad. Para lograr tal rendimiento, establecieron condiciones óptimas con 2.0 % en peso de catalizador KOH, metano como alcohol anhidro, 700 rpm de agitación y una temperatura de 62 °C [14]. Durante el mismo año, Sánchez et al. (2013) investigaron el potencial de producción de biodiésel mediante la microalga *Isochrysis galbana* (T-ISO). Los parámetros óptimos para la reacción de transesterificación establecidos por los autores fueron los siguientes: el aceite de microalgas se mezcló con metanol con una relación molar de 12:1 y 1% g de NaOH/g de aceite durante 3 h en un reactor a una temperatura de 62 °C. La mejor cosecha que obtuvieron muestra una concentración de biomasa de $0.305 \frac{g}{L}$ con un contenido de FAME de 12.5%. Un detalle importante es que después de la reacción,

la mezcla se enfrió a temperatura ambiente para evaporar el solvente [15].

Dos años más tarde, Cai et al. (2015) desarrollaron un nuevo proceso para la producción de biodiésel utilizando aceite de cocina usado, que consistió en dos etapas. En la primera etapa se realiza la esterificación y en la segunda, la transesterificación. Para esta última, utilizaron el producto de la esterificación, transfiriéndolo a un matraz de fondo redondo y boca única de 250 ml. A este matraz se añadió el 0.33% en peso de NaOH, basado en el peso del aceite de cocina usado, y metanol en una relación molar de 6:1 respecto al aceite esterificado, para reaccionar con los ésteres de glicérido presentes. La mezcla se calentó a una temperatura de 40 °C y se agitó a una velocidad de 300 rpm durante 1 h teniendo un rendimiento final de 93.1%. Y concluyeron que este proceso propuesto tiene ventajas en comparación con los métodos tradicionales de dos pasos, incluido un menor costo de catalizador para los procesos de esterificación y transesterificación, menor consumo de energía para la recuperación de metanol, reciclaje del subproducto de glicerol y el catalizador y no requiere de anti equipo corrosivo [16].

Kakati y Gogoi (2016) produjeron biodiésel a partir del aceite de semilla de la fruta Kutkura donde caracterizaron y compararon con otros biodiésel a base de semillas de árboles. La producción de biodiésel la realizaron en un recipiente reactor de 2 L equipado con un condensador de reflujo, un termómetro y un puerto de muestreo. Emplearon un agitador magnético con posibilidad de ajuste de velocidad para el calentamiento uniforme del aceite. El recipiente del reactor se colocó sobre un calentador con un termostato para controlar la temperatura de reacción al nivel deseado. Utilizaron 1 L de aceite de semilla de fruta Kutkura el cual se calentó primero a 60 °C y luego se agregó metóxido conformado por 300 ml de metanol y 8 g de NaOH y después se mantuvo a una temperatura de 63 °C en un periodo de 2 h de manera continua y una agitación en la mezcla de 600 rpm. Teniendo como resultado 700 ml de biodiesel a partir de 1 L de aceite vegetal puro luego de la transesterificación, separación del glicerol y lavado con agua [17].

Tras un año, Kudre et al. (2017) investigaron la optimización y caracterización de la producción de biodiésel a partir de aceite de pescado extraído de desechos de

procesamiento de rohu (*Labeo rohita*). Las condiciones óptimas para la máxima producción de biodiésel con un rendimiento del 95.9% fue mediante la transesterificación usando metanol y KOH como alcohol y catalizador, respectivamente. KOH al 0.75% (p/v), una relación de aceite a metanol de 1:05, una temperatura continua de 55 °C, un tiempo de reacción de 1 h y una velocidad de agitación de 200 rpm. Uno de sus resultados fue que mediante el método de reducción húmeda mostró el mayor rendimiento de aceite (95.2%, v/v), en comparación con otros métodos ($P < 0.05$) [18].

Sadaf et al. (2018) investigaron y realizaron la conversión de aceite de cocina usado en biodiésel. Lograron un rendimiento de FAME del 94% con una relación de metanol a aceite de 1:3, una dosis de KOH con metanol del 1%, una temperatura de reacción de 60 °C durante 1 h junto con su respectiva agitación [19]. En el mismo año, Satyanarayana et al. (2018) produjeron biodiésel a partir de aceite de cocina usado y aceite de mostaza mediante el proceso de transesterificación. Obtuvieron un rendimiento de biodiésel del 92% con aceite de cocina usado en las condiciones de una relación de metanol a aceite de 7:1, una temperatura de 60 °C, un catalizador de KOH al 1.5% en un periodo de 90 minutos [20].

Un año más tarde, Su et al. (2019) estudiaron la extracción con solvente asistida por enzimas para extraer grasa de la biomasa BSFL (Black soldier fly larvae) y la grasa BSFL extraída se transesterificó en biodiésel. Los parámetros óptimos para la producción de biodiésel fueron de una relación molar de metanol a grasa de 6:1; catalizador con NaOH al 0.8%, y una temperatura de 65°C durante 1 h [21]. Durante el mismo año, da Costa et al. (2019) produjeron biodiésel utilizando como materia prima aceite de pescado y etanol en presencia de hidróxido de sodio. Para la reacción de transesterificación, se utilizaron como catalizadores etanol anhidro al 99.8% e hidróxido de sodio al 0.7%. Las pruebas se realizaron en un matraz de tres bocas equipado con un agitador mecánico de 170 rpm a 2000 rpm y un termómetro. El matraz se sumergió en un baño termostático para que la temperatura se mantuviera constante donde fue de 54 °C con una agitación de 350 rpm durante 90 min. Los resultados obtenidos revelaron que las características fisicoquímicas del EE producido a partir de aceite de pescado cumplen con todos los estándares exigidos por la ANP (Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles) [22]. Estando aun en el mismo año, Elango et al. (2019) realizaron biodiésel a escala de lotes utilizando

aceite de ricino a través de un proceso de transesterificación catalizado por álcali. Optimizaron con éxito los parámetros requeridos por el proceso mediante un método de diseño compuesto central basado en estadísticas dando como resultado que las condiciones óptimas para la reacción de transesterificación eran una temperatura de reacción de 60 °C, un catalizador de KOH al 1.25 % en peso, una 1 h como tiempo de reacción y una relación molar de aceite a metanol de 1:12 obteniendo un contenido de FAME del 94.9 % [23].

Pérez et al. (2022) realizaron una revisión de investigaciones en los últimos años acerca de las materias primas y el efecto de las condiciones de operación en el rendimiento y mecanismos que se presentan en el proceso de producción de biodiésel mediante la reacción de transesterificación al utilizar catálisis básica, acida y heterogénea. Mencionan que las condiciones y cantidades idóneas es utilizar NaOH y KOH en proporciones del 0.6 a 1% P con una relación molar mínima de 3:1 empleando metanol o etanol como el alcohol. Con una temperatura que sería por debajo del punto de ebullición del alcohol empleado con una agitación entre 800 y 1200 rpm o 250 y 450 rpm durante 1 h. Y concluyeron en general que para tener un proceso idóneo dependerá de las materias primas y lo equipos disponibles, utilizando la menor cantidad de energía, tiempo e insumos. Apuestan por la transesterificación con ultrasonido y un catalizador heterogéneo [24].

La mayoría de las investigaciones sobre los parámetros óptimos necesarios para la reacción de transesterificación muestran coincidencias o similitudes en variables tales como la temperatura, el tiempo, y las condiciones de la relación molar del metóxido y del peso. Sin embargo, otros factores tienden a variar más, ya que dependen de la materia prima utilizada para producir biodiésel. Por esta razón, incluso los parámetros que generalmente son similares pueden diferir debido a la naturaleza específica de cada materia prima. Por consecuencia, el proceso idóneo de la reacción de transesterificación de la catálisis básica dependerá de los equipos de laboratorio, materias primas y emplear la menor cantidad de energía y tiempo posible.

1.2.2 Biodiésel con herramientas virtuales

Se han implementado diversas herramientas virtuales para monitorear y dar seguimiento a distintas variables en el proceso de producción de biodiésel, con el objetivo de hacerlo eficiente y optimizar su producción. A continuación, se mencionan investigaciones realizadas al respecto:

Ellis et al. (2008) presentaron un método de seguimiento continuo de la reacción de transesterificación hasta su punto final midiendo los cambios en la viscosidad de la mezcla de reacción. El viscosímetro de estado sólido de onda acústica permitió la medición in situ de la viscosidad a medida que se lleva a cabo la conversión del éster metílico en un reactor. La aplicabilidad de este método fue probada desde escala de laboratorio hasta escala de planta piloto [25].

Dos años más tarde, Reddy et al. (2010) presentaron un método cuantitativo para la estimación de glicerol durante la transesterificación de aceite para formar biodiésel. El reactivo utilizado para derivatizar el glicerol fue 9.9-dimetoxifluoreno. El glicerol se estimó mediante métodos de espectrofotometría UV-visible y cromatografía líquida de alta resolución. Utilizando el método anterior, se establecieron límites de detección de 0.05 % p/p de glicerol en biodiésel. La validación del método desarrollado se realizó utilizando el método de Greenhill para la determinación del glicerol libre formado durante la reacción de transesterificación. Afirmaron que es un método eficiente y novedoso para monitorear la transesterificación y evaluar la producción de biodiésel mediante la estimación de glicerol [26].

Al siguiente año, Stanislav (2011) diseñó un sistema simple para la transesterificación utilizando un controlador lógico programable y un controlador de dos posiciones con penalización. Este ajuste se realizó tras identificar la respuesta de paso en un dispositivo real. Como resultado, el proceso se pudo controlar fácilmente a través del panel táctil LCD, remotamente mediante un navegador web, o por envío de mensajes SMS. Esto no solo aumentó la eficiencia de producción y ahorró tiempo, sino que también permitió un control

efectivo de la variable de agitación [27].

Xiong et al. (2015) desarrollaron plataformas de hardware y software de adquisición de información obteniendo el monitoreo dinámico en tiempo real de temperatura y presión, la adquisición automatizada de datos de monitoreo, el procesamiento previo de los datos de monitoreo y el procesamiento analítico en línea de la confiabilidad de los datos, logrando el efecto del ahorro de energía y la protección del medio ambiente. El sistema de monitoreo remoto de biodiesel se utilizó principalmente para el monitoreo en tiempo real de las variables ambientales en el proceso de producción de biodiésel, como la temperatura del proceso, la presión y la condición de reacción (velocidad de agitación), etc. El sistema constaba principalmente de dos subsistemas: sistema de monitoreo de transmisión de datos en tiempo real basado en arquitectura C/S (Cliente/Servidor) y sistema de monitoreo y análisis de datos remotos basado en arquitectura B/S (Brower/Server). La arquitectura C/S y la arquitectura B/S juegan sus funciones correspondientes en el sistema de monitoreo remoto de biodiésel [28].

López et al. (2017) desarrollaron un método mediante un sensor virtual basado en el Filtro Kalman Extendido (EKF) y el modelo de un reactor de biodiesel discontinuo para la estimación de concentraciones de triglicéridos (TG), diglicéridos (DG), monoglicéridos (MG), éster metílico (E), alcohol (A) y glicerol (GL) en tiempo real mediante la medición de la temperatura y el pH. La estimación de TG, DG, MG, E, A y Gl a través de este método elimino la necesidad de sensores adicionales y permitió el uso de diferentes tipos de control. Para el análisis de rendimiento del sensor virtual, los datos obtenidos del EKF se compararon con los datos experimentales informados en la literatura, y luego se calculó el error cuadrático medio de la estimación. Además, los resultados de este enfoque se pueden implementar en un sistema real, ya que solo utilizo las medidas disponibles en un reactor, como la temperatura y el pH [29].

En ese mismo año, Resende et al. (2017) plantearon y desarrollaron una planta a escala laboratorio para la producción de esteres alquílicos mediante materiales de bajo costo y la aplicación técnica del control de temperatura. La planta desarrollada está compuesta por un reactor discontinuo de acero inoxidable, bomba volumétrica, sistema de termosifón solar y

un sistema de control de temperatura. Para la reacción de transesterificación, los autores utilizaron 200 ml de aceite usado de cocina, como catalizador usaron 80 ml de etanol anhidro con 1.1 gr de NaOH y una temperatura en el rango de 35 °C a 40 °C durante 1 hora a 300 rpm. Los procesos de monitoreo y control mantuvieron las condiciones de temperatura deseadas y demostraron resultados satisfactorios con un rendimiento de 51.85. Monitorearon la temperatura del proceso con un sensor de temperatura tipo NTC 10K en la reacción. La adquisición de datos y el control automático de la temperatura fue mediante Arduino, a través de la comparación de las temperaturas medidas y deseadas, encendiendo y apagando la bomba de agua. Este, a su vez, fue extrayendo agua del reservorio, utilizada en el reactor encamisado, calentada por medio del termosifón solar. Y concluyeron que el sistema de monitoreo y control diseñado fue exitoso manteniendo estables las temperaturas de las reacciones haciendo que la planta automáticamente realizara los ajustes necesarios para alcanzar la temperatura deseada cuando había perturbaciones externas. En cada uno de los experimentos, la variación de temperatura fue de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ [30].

Baesso et al. (2018) desarrollaron un método preciso, robusto y de bajo costo que pudo ser aplicado en una línea de proceso para monitorear la transesterificación de aceite de soya con metanol, catalizada por KOH. El seguimiento de la transesterificación en línea permitió optimizar los parámetros experimentales de la reacción para obtener mejores rendimientos y reducir los costes globales de producción de biodiésel. Se utilizó un ultrasonido de baja potencia y un método de pulso/eco para monitorear la velocidad ultrasónica. En tal esquema experimental, las señales de pulso ultrasónicas emitidas por el transductor ultrasónico pasaron mediante la muestra dentro del reactor, alcanzando el reflector en el fondo del reactor y regresando al mismo transductor. El estudio fue realizado con la ayuda de un transductor con frecuencia nominal de 1 MHz y diámetro de 12.7 mm (modelo A303S, NDT-Panametrics-Olympus Corporation, Japón), un generador de forma de onda (modelo 33250A, Agilent Technologies, CA, EE. UU.) , un osciloscopio (modelo DSO-X 3012A, Agilent Technologies, CA, EE. UU.), una unidad de adquisición de datos (modelo 34970A, Agilent Technologies, CA, EE. UU.) y una computadora con un programa desarrollado en LabView™ (National Instruments, Austin, TX, EE. UU.) [31].

Cuatro años más tarde, de Andrade et al. (2022) presentaron un enfoque innovador que utiliza estándares virtuales para construir un modelo PLS (partial least squares) de contenido FAAE (fatty acid alkyl esters) para el monitoreo en línea de la producción de lotes de biodiésel a partir de aceite de semilla de algodón utilizando un espectrómetro NIR (near infrared) en miniatura (MicroNIR-1700, VIAVI). Con fines de seguimiento, desarrollaron modelos predictivos de PLS basados en mediciones NIR para cuantificar el contenido de FAAE del medio de reacción. Inicialmente, los modelos PLS se construyeron utilizando mezclas sintéticas preparadas en diferentes concentraciones. Luego, desarrollaron estándares virtuales para parecerse a las mezclas sintéticas y se emplearon en la construcción de un nuevo modelo de PLS. Además, se demuestra el potencial del enfoque propuesto para realizar predicciones en tiempo real del perfil de concentración de los ésteres de alquilo durante los procesos por lotes [32].

En general, hay pocas herramientas virtuales que permitan el monitoreo y control conjunto de variables en el proceso de producción de biodiésel mediante la reacción de transesterificación por catálisis básica. Comúnmente, estas herramientas se centran en otras características del producto.

1.3 Objetivo general

Programar e implementar un instrumento virtual de monitoreo y control con su interfaz electrónica en el proceso de producción de biodiésel por catálisis alcalina.

1.3.1 Objetivos específicos

1. Programar un instrumento virtual de monitoreo y control basado en LabVIEW® para la temperatura de la reacción de transesterificación y de la temperatura ambiente junto con su interfaz electrónica.
2. Programar un instrumento virtual de monitoreo y control basado en LabVIEW® para las revoluciones de la agitación junto con su interfaz electrónica.
3. Programar un instrumento virtual de monitoreo basado en LabVIEW® para el consumo energético de todo el proceso junto con su interfaz electrónica.
4. Programar un algoritmo de control PID para el instrumento virtual de monitoreo y control basado en LabVIEW® para la temperatura de la reacción de transesterificación.
5. Realizar la integración de los instrumentos virtuales generados, así como las interfaces electrónicas en una placa con el dispositivo de adquisición de datos USB 6009.
6. Diseñar un armazón protector y portátil de la interfaz electrónica, así como trabajar en la adecuación de los sensores para su medición.

7. Realizar pruebas físicas de la producción de biodiésel aplicando el instrumento virtual con la interfaz electrónica.

1.4 Hipótesis

La implementación de una interfaz electrónica avanzada que integra control y monitoreo de variables críticas mediante instrumentación virtual basada en LabVIEW® y el dispositivo de adquisición de datos USB 6009, permitirá una gestión eficiente de variables críticas como la temperatura de reacción, agitación y el consumo energético total en el proceso de transesterificación por catálisis básica y mejora significativamente la eficiencia energética del proceso, en comparación con métodos convencionales sin este tipo de tecnología integrada.

Capítulo 2

2. Fundamentos teóricos

En este capítulo, se presenta el marco teórico conceptual que sustenta el proyecto de maestría. Se abordan secciones fundamentales, como una introducción al biodiésel y una explicación detallada de la reacción de transesterificación, que será utilizada en el proceso. Además, se exploran conceptos de teoría de control e instrumentación, incluyendo diversos controles existentes y los fundamentos de la instrumentación. Finalmente, se describen los diferentes entornos gráficos y el software necesario para la ejecución del proyecto.

2.1 Biodiésel

El biodiésel es un biocombustible generado a partir de aceites vegetales y grasas animales, generalmente se obtiene por el proceso de transesterificación. De acuerdo con la ASTM (American Society for Testing and Materials), el biodiésel está constituido por ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga provenientes de aceites vegetales o grasas animales, y se conoce como B100.

El biodiésel es un biocombustible que ofrece una opción sostenible frente a los combustibles fósiles debido a que puede ser elaborado a partir de recursos renovables. Además, su uso en motores no necesita de modificaciones relevantes [33].

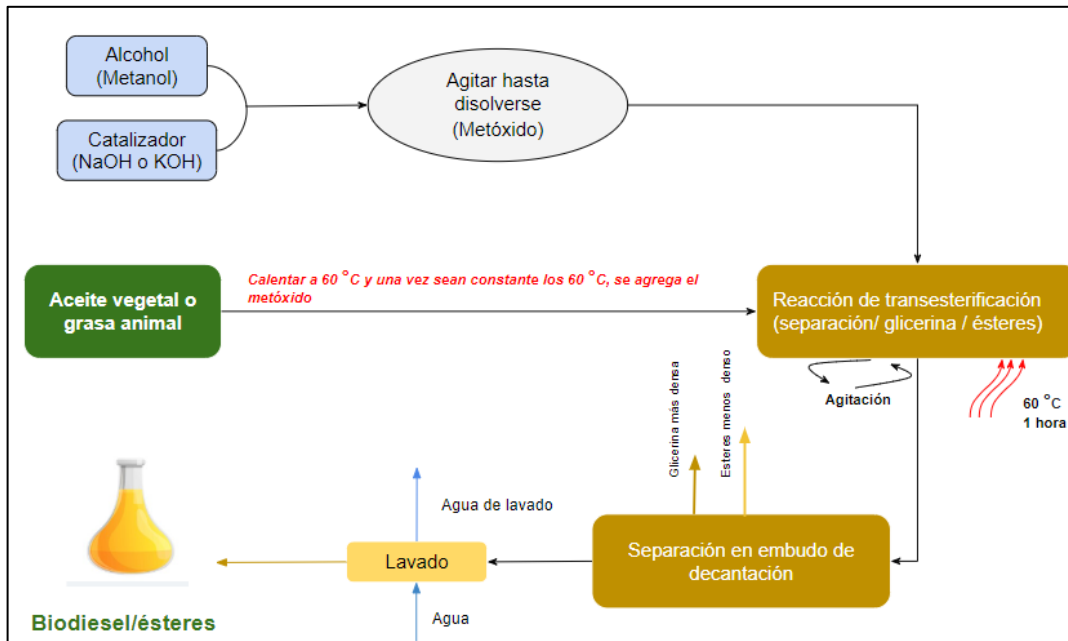


Figura 2.1 Proceso de producción de biodiésel empleando Metanol como alcohol.

2.1.1 Reacción de transesterificación

La reacción de transesterificación catalizada por base es el proceso que transforma el aceite residual de cocina en biodiésel. Las grasas y aceites son triésteres del glicerol (triglicéridos), compuestos por tres ácidos grasos de cadena larga, lo que les otorga una alta masa molecular y baja volatilidad. Este proceso, que regularmente utiliza metanol como alcohol y NaOH como catalizador, convierte las grasas y aceites en ésteres de metilo de los tres ácidos grasos individuales. Estos ésteres, que tienen masas moleculares aproximadamente un tercio de las del triglicérido original, son más volátiles y operan de manera efectiva en motores diésel. [34].

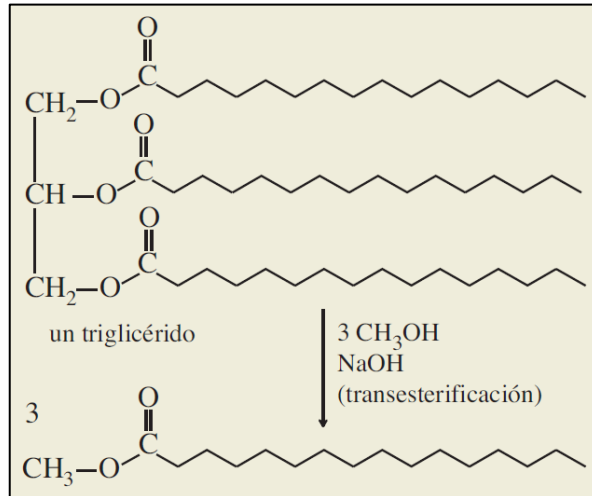


Figura 2.2 Reacción de transesterificación.

El proceso general es normalmente una secuencia de tres reacciones reversibles consecutivas. Durante la primera reacción, los triglicéridos se transforman en diglicéridos. Luego, a partir de diglicéridos, se producen monoglicéridos en la segunda reacción y en la última reacción se obtiene glicerol a partir de monoglicéridos. En todas estas reacciones se producen los ésteres que son los productos utilizados como biodiésel, que finalmente como producto resultante hay que depurar.

Generalmente, la reacción se lleva a cabo a una temperatura de 50 °C a 75 °C y completado en 2 h. El biodiésel y el glicerol se separan por gravedad o centrifuga (Shahid y Jamal, 2011; El Mashada et al. 2008) [35], [36].

2.1.2 Propiedades y especificaciones

Las propiedades de biodiésel de buena calidad se prueban mediante estándares para ver si cumple con las especificaciones de uso. De acuerdo a la ASTM (American Society for Testing and Materials), existe un método legal llamado ASTM D6751 que establece las especificaciones para el uso del biodiésel en motores diésel. El método prescribe métodos de prueba específicos para analizar la composición química, las propiedades físicas y los

contaminantes del biodiesel. Estas pruebas estandarizadas garantizan coherencia, precisión y confiabilidad en la evaluación de la calidad del biodiesel y el cumplimiento de la norma. Por lo tanto, el método ASTM D6751 desempeña un papel fundamental para garantizar la integridad y el rendimiento de la mezcla de combustible biodiesel. Al establecer especificaciones integrales, procedimientos de prueba y límites de contaminantes, fomenta la confianza en el biodiésel como una alternativa renovable y sostenible al combustible diésel convencional, entrando al camino para un futuro más limpio y verde en el transporte y la energía.

En la tabla 2.1 se puede observar las propiedades de biodiésel como las pruebas adecuadas a efectuar [37].

Tabla 2.1 Especificaciones del biodiésel según la ASTM y su método ASTM D6751.

ASTM D6751			
Propiedad	Método	Límite	Unidades
Punto de ignición	D93	130 mín.	°C
Agua y sedimento	D2709	0.05 máx.	% volumen
Viscosidad cinemática	D445	1.9 - 6.0	$\frac{mm^2}{s}$
Ceniza sulfatada	D874	0.02 máx.	% en peso
Azufre total	D5453	0-05. máx.	% en peso
Corrosión de la tira de cobre	D130	No. 3 máx.	
Numero de cetano	D613	47 mín.	
Punto de nube	D2500	Reportado	°C
Residuo de carbono	D4530	0.05 máx.	% en peso
Numero de acido	D664	0.8 máx.	$\frac{mgKOH}{g}$
Glicerina libre	D6584	0.02	% en peso
Glicerina total	D6584	0.24	% en peso
Fosforo	D4951	0.001	% en peso
Punto final de la destilación al vacío	D1160	360 °C, 90	% destilado

2.1.3 Parámetros óptimos para la producción

Existen diversos parámetros que surgen en la producción de biodiésel por medio de la reacción de transesterificación. Así también, se deben establecer estos parámetros en las variables involucradas y los factores externos durante el proceso. Las variables principales son la temperatura, el tiempo y la agitación mientras que los factores externos es la temperatura ambiente, el monitoreo y control de la(s) persona(s) que llevan a cabo el proceso de producción de biodiésel.

El proceso idóneo sería con los siguientes parámetros: la temperatura del proceso estaría ligeramente por debajo o cercana al punto de ebullición del alcohol empleado. Los puntos de ebullición de los alcoholes comúnmente utilizados se muestran en la tabla 2 [38], [39], [40]. El tiempo de reacción sería de aproximadamente 1 hora y la agitación oscilaría entre 800 y 1200 rpm o entre 250 y 450 rpm. Se recomienda utilizar NaOH o KOH como catalizador en proporciones del 0.6 a 1% P con una relación molar mínima de 3:1 empleando metanol o etanol como el alcohol [24].

Tabla 2.2 Puntos de ebullición de los alcoholes más utilización en la reacción de transesterificación.

Alcohol	Punto de ebullición @1atm
Metanol	64.7 °C
Etanol	78.2 °C
Propanol	97 °C

Un proceso ideal para la producción de biodiésel es aquel que se adapta de manera óptima a las materias primas disponibles y a los equipos disponibles en el laboratorio. Esto implica seleccionar cuidadosamente los reactivos y utilizar métodos eficientes que minimicen el consumo de energía y el tiempo de reacción. Además, es importante tener en cuenta la disponibilidad de insumos y buscar formas de reducir al mínimo su uso, lo que no solo

contribuye a la eficiencia del proceso, sino también a la sostenibilidad ambiental.

El éxito de un proceso de producción de biodiésel radica en encontrar el equilibrio adecuado entre materias primas, equipos disponibles en el laboratorio, energía, tiempo y recursos, con el objetivo de obtener un producto de alta calidad de manera rentable y sostenible.

2.1.4 Requerimiento energético de la producción

El consumo de energía de la producción de biodiésel puede variar dependiendo de varios factores, incluida la materia prima utilizada, el método de producción empleado y la eficiencia de la instalación de producción. Generalmente, la producción de biodiésel implica varios pasos, como la preparación de la materia prima, la transesterificación, la purificación y el secado, cada uno de los cuales consume energía.

En este caso, específicamente se toma en cuenta la producción (reacción de transesterificación). Agee et al. (2014) utilizaron un medidor de potencia para la producción de biodiésel y la purificación del glicerol. La reacción de transesterificación utilizó 0.357 kWh requiriendo una temperatura de 75 °C durante 1 h [41]. Asimismo, Gupta et al. (2018) realizaron cálculos de la reacción de transesterificación, arrojando un consumo energético de 0.214 kWh requiriendo de 1 h y 10 min a una temperatura de 60 °C [6].

Es importante conocer el requerimiento energético para crear oportunidad en sustituir la electricidad por el método convencional por fuentes de energías renovables con la finalidad de una reducción significativa de la duración de la reacción y una producción más económica de biodiésel. Otras fuentes de energía son viables desde el punto de vista financiero, ambiental y tecnológico para producir biodiésel [42].

2.2 Teoría de control e instrumentación

La teoría de control es un campo de la ingeniería que se ocupa del diseño y análisis de sistemas que ordenan el comportamiento de otros sistemas dinámicos. Su objetivo es mantener o modificar el comportamiento de un sistema. El control en ingeniería se refiere al proceso de regular el comportamiento del sistema mediante el uso de algoritmos de control, que ajustan las entradas en función de la retroalimentación de la salida del sistema para lograr el rendimiento deseado [43]. El control es la acción de manipular las variables de un sistema para mantener o alcanzar un estado deseado, utilizando bucles de retroalimentación y estrategias de control [44]. El control es la disciplina encargada de gestionar el comportamiento de sistemas dinámicos, asegurando la estabilidad y el rendimiento mediante la aplicación de diversas estrategias y algoritmos de control [45]. El control se refiere a la regulación sistemática de las variables del sistema para lograr el rendimiento deseado, a menudo a través de mecanismos de retroalimentación que ajustan las entradas en función de las mediciones de salida [46]. Esto se logra mediante el uso de retroalimentación para comparar la salida del sistema con una referencia deseada y ajustar la entrada en consecuencia.

Por otro lado, la teoría de instrumentación se refiere al conjunto de dispositivos y técnicas utilizados para medir, monitorear y controlar procesos físicos que se presentan en el entorno. La instrumentación es el uso de instrumentos para medir, monitorear y controlar cantidades físicas en sistemas de ingeniería, proporcionando datos que pueden usarse para el análisis y la toma de decisiones [47]. La ingeniería de instrumentación es la rama de la ingeniería que se centra en el diseño y la aplicación de instrumentos que miden y controlan variables como la presión, el flujo y la temperatura en los procesos industriales [48]. La instrumentación es el empleo de dispositivos electrónicos y sensores para medir, analizar y controlar parámetros físicos como voltaje, corriente, temperatura y presión [49]. La instrumentación implica el diseño y la aplicación de instrumentos electrónicos para la medición y el control precisos de diversos procesos de ingeniería, asegurando la precisión y la fiabilidad en la adquisición de datos [50]. Los instrumentos pueden ser simples como sensores, válvulas, transmisores y pueden ser muy complejos como controladores,

analizadores, amortiguadores y sistemas de adquisición de datos entre otros.

Todo aquel fundamento básico que influya en la instrumentación como los anteriores mencionados, se detallará en las secciones posteriores dando énfasis en la sección 2.2.3 Fundamentos de instrumentación. De la misma manera, se profundiza en secciones posteriores lo relacionado con control.

En general, la teoría de control y la instrumentación son disciplinas interrelacionadas que juegan un papel fundamental en el control y la supervisión de sistemas dinámicos en una amplia variedad de aplicaciones.

2.2.1 Control abierto

Los sistemas de control abierto son aquellos que la salida medida del proceso no es comparada con la señal de referencia. El control de ciclo abierto en sistemas de ingeniería se refiere a una estrategia de control en la que la acción de control está predeterminada y no se ajusta en función de la retroalimentación de la salida del sistema. Implica enviar un comando o punto de ajuste al sistema sin monitorear la salida real para realizar ajustes [45]. El control de ciclo abierto es un esquema de control en el que la entrada al proceso se ajusta en función de un programa o punto de ajuste predeterminado sin monitorear la salida del proceso. Se utiliza en procesos donde el control de retroalimentación es innecesario o poco práctico [51]. El control de ciclo abierto implica la ejecución de secuencias de acciones predefinidas sin considerar el estado real o la retroalimentación de los sensores. Se utiliza comúnmente para tareas donde el control preciso de la salida del sistema no es crítico [52]. El control de ciclo abierto es donde la salida no se retroalimenta para ajustar la entrada, lo que significa que no existe un mecanismo de corrección basado en la salida del sistema [46]. En cambio, la acción de control está determinada únicamente por los comandos de entrada, sin considerar la salida real o la respuesta del sistema. No son estables ni precisos como lo pueden ser los sistemas de control retroalimentado. Aun así, tienen su uso en ciertas aplicaciones donde la precisión no es crítica. En varios aspectos de nuestras rutinas

diarias, encontramos casos de sistemas de control de ciclo abierto, donde la acción de control está predeterminada y no está influenciada por la retroalimentación. A continuación, se muestran algunos ejemplos ilustrativos:

- **Control del termostato:** el termostato de su hogar funciona en circuito abierto, respondiendo al ajuste de temperatura que ingresa. Activa sistemas de calefacción o aire acondicionado basándose únicamente en la temperatura preestablecida, sin considerar la temperatura real de la habitación.
- **Electrodomésticos de cocina:** los electrodomésticos como hornos y microondas suelen contar con controles de temporizador. Cuando configura el temporizador para una duración específica, el aparato funciona durante ese período de tiempo independientemente del progreso real de cocción de los alimentos, lo que ejemplifica el control de circuito abierto.
- **Semáforos:** los sistemas de semáforos en las intersecciones funcionan en ciclos de tiempo fijos. Las luces cambian de verde a amarillo, a rojo y viceversa según intervalos de tiempo predeterminados, independientemente del flujo de tráfico real en la intersección.
- **Sistemas de riego doméstico:** los sistemas de riego doméstico se pueden configurar con temporizadores para regar el césped o los jardines en momentos específicos. Operan según horarios programados, sin tener en cuenta las condiciones climáticas en tiempo real o los niveles de humedad del suelo.
- **Lavadoras:** la mayoría de lavadoras permiten a los usuarios seleccionar ciclos de lavado con duraciones predefinidas. Una vez iniciada, la máquina avanza a través del ciclo seleccionado sin ajustarse en función de factores como la cantidad de suciedad en la ropa o el progreso real del lavado.

En un sistema de control abierto, el controlador se encuentra en serie con el proceso y su

función principal es manipular las entradas del sistema para intentar alcanzar la zona de operación deseada. A diferencia del sistema de control cerrado, donde se retroalimenta información sobre el estado actual del proceso para ajustar las acciones del controlador, en un sistema de control abierto, el controlador opera de manera independiente y no recibe información en tiempo real sobre las condiciones del proceso.

Esta falta de retroalimentación en tiempo real puede llevar a una mayor susceptibilidad a perturbaciones externas y errores en la operación del sistema. Por ejemplo, cambios en las condiciones ambientales o en las propiedades de los materiales pueden afectar significativamente el rendimiento del proceso, ya que el controlador no puede ajustar sus acciones en función de estos cambios. Aunque los sistemas de control abierto pueden ser más simples y económicos de implementar en algunos casos, también son menos robustos y menos precisos que los sistemas de control cerrado. Por lo tanto, su aplicación se limita a situaciones donde la precisión y la estabilidad del proceso no son críticas, o donde la retroalimentación en tiempo real no es factible o necesaria. En la figura 2.3 se puede observar el modo general de operación de un sistema con control abierto.

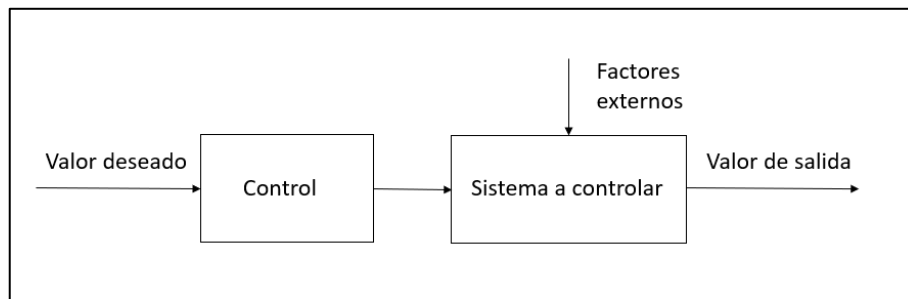


Figura 2.3 Diagrama de bloques de un sistema con control abierto.

2.2.2 Control retroalimentado

Un sistema de control retroalimentado o también conocidos como control cerrado, emplea una señal de retroalimentación para comparar el resultado deseado con la señal actual, es

decir, el sistema monitorea continuamente la señal de salida y efectúa los ajustes necesarios al control de entrada, garantizando que se mantenga el nivel de salida deseado. El control de retroalimentación es una estrategia de control en la que la salida de un sistema se mide y se compara con una señal de referencia deseada. El error entre las salidas deseadas y reales se utiliza para ajustar la entrada de control, con el objetivo de minimizar el error y mantener la estabilidad [44]. El control de retroalimentación es el proceso de utilizar sensores y actuadores digitales para monitorear y ajustar el comportamiento del sistema, asegurando un desempeño de control preciso y confiable [49]. El control de retroalimentación implica el uso de bucles de retroalimentación para ajustar los parámetros del sistema o las respuestas basadas en mediciones de sensores en tiempo real, lo que garantiza el comportamiento y el rendimiento deseados del sistema [53]. El control de retroalimentación es el ajuste de los parámetros de procesamiento de señales en función de la retroalimentación de la señal procesada, asegurando las características deseadas de la señal o el rendimiento del sistema. Por lo tanto, permite una mayor precisión y estabilidad en comparación con los sistemas de control abierto. Estos sistemas son utilizados para regular y controlar procesos automatizados de manera precisa y eficiente.

En un sistema de control retroalimentado, la salida del proceso o sistema controlado se mide continuamente utilizando sensores y se compara con un valor de referencia deseado. Esta diferencia, conocida como error, se utiliza para ajustar la entrada al proceso mediante un controlador. El controlador calcula y aplica la acción de control necesaria para minimizar el error y mantener la salida del proceso lo más cercana posible al valor deseado.

Este enfoque de control permite una respuesta rápida y precisa a las perturbaciones y cambios en las condiciones del proceso, ya que el sistema ajusta continuamente la entrada para mantener la salida dentro de los límites deseados.

Los sistemas de control retroalimentado se utilizan en una variedad de aplicaciones industriales, incluyendo el control de temperatura en hornos y procesos de fabricación, el control de velocidad en motores eléctricos y sistemas de transporte, y el control de nivel en tanques y sistemas de almacenamiento, entre muchos otros. Los sistemas de control de retroalimentación son fundamentales para optimizar la eficiencia y el rendimiento en

numerosos aspectos de nuestras rutinas diarias, utilizando información en tiempo real para ajustar y perfeccionar las operaciones [46]. A continuación, se muestran algunos ejemplos:

- **Máquina de café automática con sensor de preparación:** las máquinas de café con sensores de preparación emplean control de retroalimentación para ofrecer preparaciones consistentemente satisfactorias. El sensor detecta factores como la temperatura del agua y la intensidad del café, ajustando el proceso de preparación para una extracción óptima del sabor.
- **Control de cruceo adaptativo en vehículos:** los sistemas automotrices, como el control de cruceo adaptativo, utilizan la retroalimentación de los sensores para mantener una distancia segura con respecto a los vehículos que circulan por delante. Al monitorear continuamente la distancia y la velocidad de los vehículos circundantes, el sistema ajusta la velocidad del vehículo en consecuencia, mejorando la seguridad y la comodidad.
- **Navegación GPS para teléfonos inteligentes:** los sistemas de navegación GPS de los teléfonos inteligentes se basan en comentarios en tiempo real para proporcionar una guía de ruta precisa. Estos sistemas rastrean continuamente la ubicación y la velocidad del usuario, ofreciendo ajustes dinámicos de ruta según las condiciones del tráfico y los cierres de carreteras.
- **Rastreadores de actividad física con monitorización de frecuencia cardíaca:** los rastreadores de actividad física equipados con monitores de frecuencia cardíaca emplean control de retroalimentación para rastrear y analizar la frecuencia cardíaca de los usuarios durante la actividad física. Esta retroalimentación en tiempo real permite a los usuarios ajustar la intensidad de su ejercicio para obtener resultados óptimos de salud y rendimiento.

En la figura 2.4 se puede observar el modo general de operación de un sistema con control retroalimentado donde el valor medido es llevado a un comparador generando un error, el cual entra al controlador y debido a ese error el controlador sabrá si debe abrir o cerrar la señal de control con el objetivo de hacer cero dicho error.

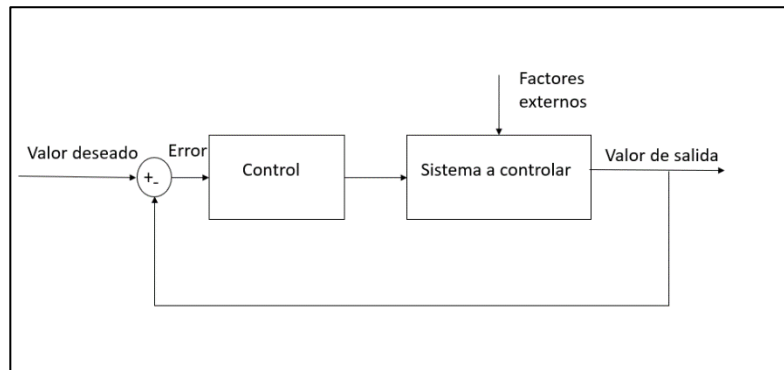


Figura 2.4 Diagrama de bloques de un sistema con control retroalimentado.

Los sistemas de control retroalimentado son una herramienta esencial en la automatización industrial, permitiendo un control preciso y confiable de una amplia variedad de procesos y sistemas. Su capacidad para ajustarse dinámicamente a las condiciones cambiantes del proceso los hace indispensables en entornos industriales donde se requiere un alto nivel de precisión y rendimiento [49].

Además de los sistemas de control retroalimentado, uno de los enfoques más comunes para implementar este tipo de control es a través del control proporcional-integral-derivativo (PID). El control PID es un método ampliamente utilizado que combina tres componentes clave: el control proporcional, que ajusta la salida en proporción al error presente; el control integral, que elimina el error acumulado a lo largo del tiempo; y el control derivativo, que predice y compensa las tendencias futuras del error. Esta combinación de componentes proporciona un control preciso y adaptable en una amplia gama de aplicaciones. En conjunto, los sistemas de control retroalimentado y el control PID son fundamentales para la automatización industrial, garantizando un rendimiento óptimo y una eficiencia mejorada

en los procesos automatizados [54].

2.2.2.1 PID

El método de control proporcional-integral-derivativo (PID) se destaca como el algoritmo más utilizado en sistemas de control industrial, siendo ampliamente aceptado para regular y mantener variables dentro de rangos deseados. El control PID se basa en un sistema de retroalimentación, donde la lectura de un sensor proporciona la información necesaria para calcular la salida deseada del actuador [54]. Este cálculo se realiza considerando las respuestas proporcional, integral y derivada, que se suman para determinar el valor de salida. Los tres términos principales del control PID son: el control proporcional, que ajusta la salida en proporción al error presente; el control integral, que elimina el error acumulado a lo largo del tiempo; y el control derivativo, que anticipa y contrarresta las tendencias futuras del error. Esta combinación de términos proporciona un control dinámico y adaptable que es efectivo en una amplia variedad de aplicaciones. Su popularidad se debe a su buen rendimiento en diversas condiciones operativas y a su sencilla funcionalidad [55].

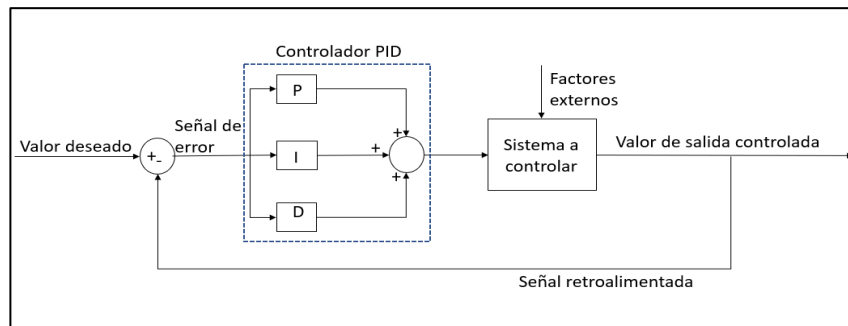


Figura 2.5 Diagrama de bloques de controlador PID.

Como su nombre lo indica, el algoritmo PID se basa en tres coeficientes fundamentales: proporcional, integral y derivativo. Estos coeficientes se ajustan para lograr la mejor respuesta. A continuación, se menciona el significado de estos tres coeficientes fundamentales:

Componente proporcional: se refiere a la diferencia entre el punto de referencia y la variable del proceso, es decir, el error. La ganancia proporcional, conocida como K_p , determina con qué fuerza responde la salida a esta señal de error, es decir:

$$\text{señal controlada} = K_p * \text{error} (t) \quad (1)$$

Por ejemplo, si el error es de magnitud 10 y la ganancia proporcional es de 5, la respuesta de salida sería de 50.

En términos generales, incrementar la ganancia proporcional mejorará la velocidad de respuesta del sistema de control. No obstante, si la ganancia proporcional se establece en un nivel demasiado alto, la variable del proceso empezará a oscilar. Si se aumenta aún más K_p , las oscilaciones se intensificarán y el sistema podría volverse inestable, llegando a oscilar fuera de control. En la figura 2.6 se muestran comportamientos diferentes de K_p . La primera gráfica tiene un $K_p = 50$ y la segunda gráfica tiene un $K_p = 100$.

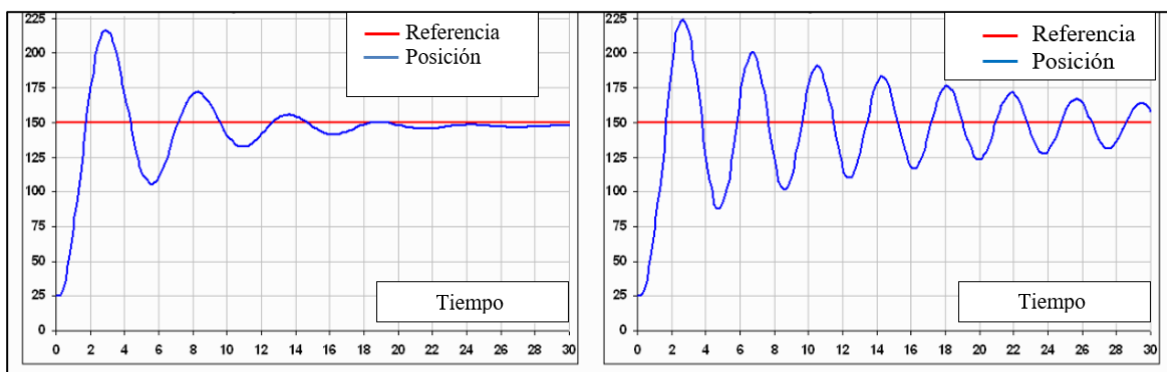


Figura 2.6 Gráfica del comportamiento del componente proporcional.

El componente integral: es aquel que acumula el error con el tiempo conocido como K_i . Esto significa que incluso un pequeño error irá acumulando gradualmente el componente integral. A menos que el error sea cero, la respuesta integral sigue creciendo de manera constante con el tiempo. Su función principal es eliminar cualquier error restante en estado estacionario, que es la diferencia fundamental entre la variable del proceso real y el punto de ajuste deseado. Este tipo de error surge cuando la salida del proceso no coincide exactamente con el valor deseado, incluso después de que el error inicial se haya corregido. El componente integral actúa de manera continua para corregir este error residual, asegurando que la variable del proceso se mantenga lo más cerca posible del punto de ajuste deseado [55].

Una de las características distintivas del componente integral es su capacidad para mantener el sistema en equilibrio incluso en presencia de perturbaciones externas. Esto se debe a que el componente integral acumula gradualmente el error a lo largo del tiempo y, por lo tanto, puede compensar cambios lentos o imperceptibles en el sistema. Su expresión matemática es:

$$\text{señal controlada} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2)$$

Sin embargo, existe una situación compleja conocida como "liquidación integral". Esto sucede cuando la acción integral satura un controlador sin reducir efectivamente la señal de error a cero. En términos más simples, el componente integral sigue creciendo sin control, lo que genera resultados indeseables en el sistema de control. En la figura 2.7 se muestran comportamientos diferentes de K_p y K_i . La primera gráfica tiene un $K_p = 50$ y un $K_i = 20$ y en la segunda gráfica tiene un $K_p = 50$ y un $K_i = 50$.

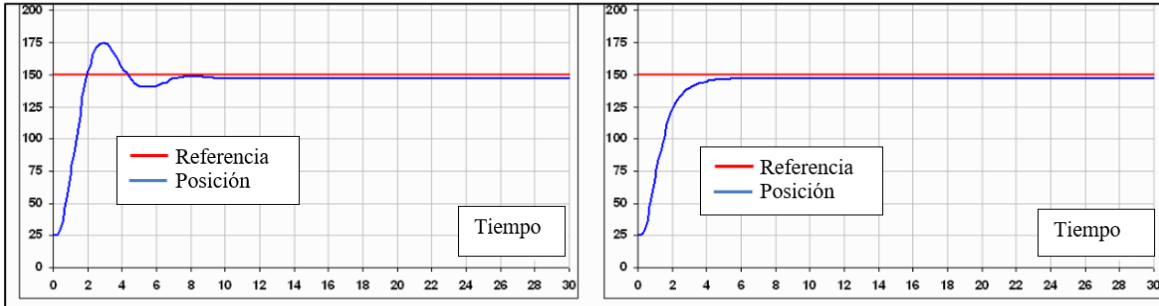


Figura 2.7 Gráfica del comportamiento del componente integral.

El componente derivativo: El componente derivativo, dentro del control PID, desempeña un papel crucial al regular la respuesta del sistema ante cambios bruscos en la variable del proceso. Su función principal es proporcionar una acción de control que sea proporcional a la velocidad de cambio de la variable del proceso. Es decir, el componente derivativo responde rápidamente a las fluctuaciones en la variable del proceso y contribuye a mantenerla en el punto de ajuste deseado [55].

Ajustar el parámetro de tiempo derivativo (T_d) puede tener un impacto significativo en la sensibilidad y la estabilidad del sistema de control. Un valor más alto de T_d aumenta la sensibilidad del sistema a los cambios en la señal de error, lo que resulta en una respuesta más rápida del sistema ante perturbaciones. Sin embargo, es importante tener en cuenta que un tiempo derivativo demasiado alto puede aumentar la susceptibilidad del sistema al ruido en la señal de retroalimentación. Se suele utilizar un valor pequeño para el tiempo derivativo (T_d) en los sistemas de control. Esto se debe a que la respuesta derivativa es altamente sensible al ruido en la señal de la variable de proceso. Si la señal de retroalimentación del sensor está afectada por el ruido o si la velocidad del ciclo de control es demasiado lenta, la acción derivativa puede introducir oscilaciones no deseadas en la salida del sistema, lo que puede desestabilizar el control y afectar su rendimiento [54]. Su expresión matemática es:

$$\text{señal controlada} = T_d \frac{d\text{error}(t)}{d(t)} \quad (3)$$

A continuación, se muestra la figura 2.8 que representan comportamientos diferentes de K_p y K_d . La primera grafica tiene un $K_p = 15$ y un $K_d = 5$ y en la segunda grafica tiene un un $K_p = 15$ y un $K_d = 10$. Ambas cuentan con un error de 10.

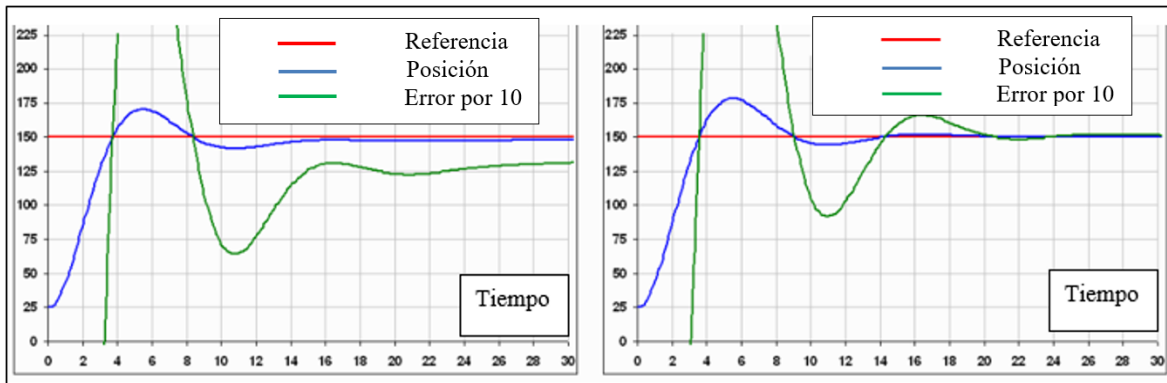


Figura 2.8 Gráfica del comportamiento del componente derivativo.

Por otro lado, el ajuste de las ganancias proporcional (P), integral (I) y derivada (D) para lograr el mejor rendimiento posible de un sistema de control se le conoce como sintonización. Se utilizan varios métodos para este propósito, y nos centraremos en dos: el método intuitivo de "prueba y error" y el método sistemático de Ziegler-Nichols.

En el método de prueba y error, se establecen los términos integral (I) y derivada (D) en cero. Luego, se aumenta gradualmente la ganancia proporcional hasta que la salida del sistema comienza a oscilar. Aumentar la ganancia proporcional hace que el sistema responda más rápido. Una vez que se ha encontrado una ganancia proporcional que da la respuesta rápida deseada, se introduce el término integral para amortiguar las oscilaciones. Después de establecer los términos proporcional (P) e integral (I) para lograr la respuesta rápida deseada con un error mínimo en estado estacionario, se establece el término derivativo. Y el método Ziegler-Nichols, otro método ampliamente utilizado para ajustar un controlador PID, tiene similitudes con el método de prueba y error. Inicialmente, los términos integral (I) y derivada (D) se fijan en cero y el término proporcional (P) aumenta gradualmente hasta que se producen oscilaciones [55]. Una vez que comienzan las oscilaciones, se observan y registran la ganancia crítica K_c y el período de oscilaciones P_c . P, I y D. Posteriormente se ajustan según la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Sintonización Ziegler-Nichols, utilizando el método de oscilación. Fuente: National Instruments.

Control	P	Ki	Td
P	0.5 Kc	-	-
PI	0.45 Kc	Pc/1.2	-
PID	0.60 Kc	0.5 Pc	Pc/8

2.2.3 Fundamentos de instrumentación

La instrumentación abarca métodos, herramientas y estrategias con el fin de crear dispositivos que mejoren la percepción humana y la eficacia de la comunicación. Se divide en dos áreas principales: instrumentación de medición e instrumentación de control. Al diseñar sistemas de medición, el enfoque principal es el manejo de señales o magnitudes de entrada. Esto implica seleccionar y utilizar sensores y transductores para capturar datos con precisión [56].

Por otro lado, en el diseño de sistemas de control se presta atención a la gestión de las señales de salida. Así mismo, el principal enfoque gira en base a los actuadores, que son los dispositivos responsables de efectuar cambios en el sistema en función de la entrada recibida

Los siguientes elementos tienen un papel importante en los fundamentos esenciales de la instrumentación: lazo de control, perturbación, actuador, transductor, transmisor, controlador, sensor, variable controlada y manipulada [57].

El lazo de control sirve para regular y mantener el comportamiento deseado del sistema, asegurando estabilidad, precisión y eficiencia en diversos procesos. Un ciclo de control consta de tres componentes principales: un sensor, un controlador y un actuador. El sensor detecta la salida del sistema o la variable de proceso y envía esta información al controlador. El controlador compara la variable de proceso con el punto de ajuste deseado, que representa el valor objetivo. En base a esta comparación, el controlador genera una

señal de error, que cuantifica la diferencia entre la variable de proceso y el ajuste deseado. Utilizando lógica o algoritmos de control predefinidos, el controlador calcula la acción de control adecuada necesaria para minimizar o eliminar este error. Una vez que se determina la acción de control, el controlador envía comandos al actuador, que ajusta la entrada del sistema o la variable manipulada en consecuencia. El actuador altera físicamente el funcionamiento del sistema, como ajustar una válvula, la velocidad de un motor o un elemento calefactor, para acercar la variable de proceso al ajuste deseado. Este proceso continúa en tiempo real, con el controlador monitoreando continuamente la variable de proceso y ajustando la variable manipulada según sea necesario para mantener el sistema dentro de los límites deseados [56].

Los ciclos de control pueden funcionar en varios modos, incluido el control de ciclo abierto y ciclo cerrado. En el control de ciclo abierto, la salida del controlador está determinada únicamente por la señal de entrada, sin retroalimentación de la salida del sistema. En el control de ciclo cerrado, la retroalimentación de la salida del sistema se utiliza para ajustar la salida del controlador [58].

Una perturbación se refiere a cualquier influencia o cambio externo que interrumpa el funcionamiento o comportamiento normal de un sistema. Las perturbaciones pueden surgir de diversas fuentes, incluidos factores ambientales, vibraciones mecánicas, ruido eléctrico, variaciones de procesos e interacciones humanas. Estas perturbaciones pueden tener impactos significativos en el rendimiento, la precisión y la estabilidad del sistema, lo que hace que su identificación, caracterización y mitigación sean esenciales en las aplicaciones de instrumentación.

Las perturbaciones pueden manifestarse como picos o fluctuaciones repentinas en las entradas o salidas del sistema, lo que lleva a desviaciones de los puntos de ajuste o condiciones operativas deseadas. Por ejemplo, en un sistema de control de temperatura, un cambio repentino en la temperatura ambiente o una subida de tensión podrían introducir perturbaciones que afecten la precisión y la capacidad de respuesta de la regulación de la temperatura. Los efectos de las perturbaciones se pueden mitigar mediante diversas estrategias, incluido el filtrado de sensores, el acondicionamiento de señales, el control de

retroalimentación y los algoritmos adaptativos. Las técnicas de filtrado de sensores, como los filtros de promedio, suavizado o reducción de ruido, pueden ayudar a eliminar ruidos no deseados o interferencias de las señales de los sensores, mejorando la calidad y confiabilidad de la señal.

Un actuador juega un papel crucial al traducir señales de control en acciones físicas para manipular el comportamiento de un sistema. Actuando como interfaz entre el sistema de control y el proceso controlado, los actuadores convierten señales eléctricas, neumáticas, hidráulicas o mecánicas en movimiento o fuerza mecánica para ajustar las variables del proceso y lograr los resultados deseados. Los actuadores vienen en diversas formas, incluidos motores eléctricos, solenoides, cilindros neumáticos, pistones hidráulicos, válvulas y relés, cada uno de ellos adaptado a aplicaciones y condiciones de funcionamiento específicas [58].

Los actuadores son componentes integrales de los ciclos de control y trabajan en conjunto con sensores y controladores para regular las variables del proceso y mantener los puntos de ajuste deseados. Los actuadores desempeñan un papel fundamental en la instrumentación al convertir las señales de control en acciones físicas, lo que permite un control y manipulación precisos de los procesos en diversas industrias y aplicaciones.

El transductor funciona como puente entre el mundo físico y el dominio electrónico, convirtiendo fenómenos físicos como temperatura, presión, desplazamiento o flujo en señales eléctricas que pueden medirse, procesarse y analizarse mediante instrumentos electrónicos. Los transductores desempeñan un papel fundamental en la detección y monitoreo de una amplia gama de parámetros en diversas aplicaciones, desde automatización industrial y monitoreo ambiental hasta diagnóstico médico e investigación científica.

Los transductores vienen en varios tipos y configuraciones, cada uno de ellos diseñado para requisitos de medición y condiciones de operación específicos. Los tipos comunes de transductores incluyen transductores resistivos, capacitivos, inductivos, piezoeléctricos y

ópticos, cada uno de los cuales utiliza diferentes principios de operación para convertir entradas físicas en señales eléctricas. Los transductores normalmente constan de un elemento sensor, que interactúa con el fenómeno físico que se mide, y un circuito de acondicionamiento de señal, que amplifica, filtra o linealiza la señal eléctrica producida por el elemento sensor. Luego, la señal condicionada se envía a un sistema de adquisición de datos, sistema de control o dispositivo de visualización para su posterior procesamiento o análisis.

El transmisor sirve como interfaz entre un sensor o transductor y un sistema de adquisición de datos, sistema de control o dispositivo de visualización, transmitiendo las señales medidas o procesadas a largas distancias de manera confiable y precisa. Los transmisores desempeñan un papel crucial en diversas aplicaciones, desde el control y monitoreo de procesos industriales hasta la detección ambiental y las telecomunicaciones.

Los transmisores están diseñados para amplificar, acondicionar y transmitir señales de sensores o transductores para garantizar la compatibilidad con equipos posteriores y superar la atenuación o interferencia de la señal que puede ocurrir en largas distancias de transmisión. Vienen en varios tipos y configuraciones, incluidos transmisores analógicos, digitales, cableados e inalámbricos, cada uno de ellos adaptado a requisitos de medición y condiciones ambientales específicos.

El controlador sirve como componente central de un sistema de control, responsable de regular y mantener las variables o puntos de ajuste deseados del proceso en diversas aplicaciones, que van desde la automatización industrial y la robótica hasta el control ambiental y los sistemas automotrices. Los controladores reciben señales de entrada de sensores o transductores, las comparan con los puntos de ajuste deseados y generan señales de salida para accionar actuadores o dispositivos que ajustan el comportamiento del sistema en consecuencia [57].

Los controladores vienen en varios tipos y configuraciones, cada uno de ellos adecuado para tareas de control y condiciones de operación específicas. Los tipos comunes de

controladores incluyen controladores proporcional-integral-derivado (PID), controladores lógicos programables (PLC), microcontroladores y sistemas de control distribuido (DCS), cada uno de los cuales ofrece diferentes características, funcionalidades y capacidades. Los sensores son dispositivos que detectan y miden fenómenos físicos en el entorno circundante, convirtiendo estas mediciones en señales eléctricas que pueden procesarse, analizarse y utilizarse para diversos fines. Los sensores desempeñan un papel crucial en una amplia gama de aplicaciones.

Los sensores vienen en diversos tipos y configuraciones, cada uno diseñado para medir parámetros específicos como temperatura, presión, humedad, luz, sonido, movimiento, proximidad y composición química. Los tipos comunes de sensores incluyen termopares, termistores, transductores de presión, acelerómetros, fotodetectores, sensores de proximidad y sensores de gas, entre otros. Estos sensores utilizan varios principios de funcionamiento, como resistencia, capacitancia, inductancia, piezoelectricidad y absorción óptica, para detectar y cuantificar cambios en el entorno físico. Los sensores son componentes integrales de los sistemas de medición y control y proporcionan datos valiosos e información sobre el mundo físico. Permiten monitoreo, análisis y toma de decisiones en tiempo real, lo que facilita la optimización de procesos, el control de calidad y la mejora del rendimiento en diversas industrias y aplicaciones [56].

La variable controlada es un componente crítico en los sistemas de control, representando el parámetro o condición que el sistema de control busca regular o mantener dentro de los límites deseados. También conocida como variable de proceso, la variable controlada es el foco principal de las acciones de control y los mecanismos de retroalimentación destinados a lograr un resultado específico u objetivo de desempeño en un sistema determinado.

En diversas aplicaciones, la variable controlada puede abarcar una amplia gama de parámetros, que incluyen temperatura, presión, caudal, velocidad, posición, nivel, concentración y más. Las variables controladas son fundamentales para el funcionamiento de los sistemas de control de retroalimentación, donde las desviaciones de los puntos de ajuste deseados desencadenan acciones correctivas para devolver el equilibrio al sistema.

Al monitorear y ajustar continuamente la variable controlada en respuesta a cambios o perturbaciones, los sistemas de control pueden optimizar el rendimiento, mejorar la eficiencia y garantizar la coherencia en una amplia gama de aplicaciones.

La variable manipulada es un concepto fundamental en los sistemas de control, que representa el parámetro o condición que el sistema de control ajusta o manipula activamente para influir en el comportamiento del proceso o sistema controlado. También conocida como variable de control o variable de entrada, la variable manipulada es la variable clave que el sistema de control puede modificar para lograr el rendimiento deseado del sistema, cumplir objetivos operativos o mantener puntos de ajuste específicos.

En los sistemas de control, la variable manipulada normalmente abarca una amplia gama de parámetros, que incluyen, entre otros, caudales, posiciones de válvulas, velocidades del motor, niveles de calefacción y corrientes eléctricas. Su selección depende de la naturaleza del proceso controlado, los requisitos del sistema y los resultados deseados del sistema de control.

El sistema de control monitorea continuamente la variable controlada, que representa la salida o respuesta del sistema, y ajusta la variable manipulada basándose en la retroalimentación de los sensores y algoritmos de control predefinidos. Este proceso iterativo permite que el sistema de control mantenga la estabilidad, optimice el rendimiento y logre los resultados deseados en tiempo real.

2.2.3.1 Sensores analógicos y digitales

En el ámbito de la electrónica, los sensores son componentes esenciales que actúan como los principales medios de percepción en los sistemas. Estos dispositivos, que pueden variar desde simples termopares hasta complejos sensores de imagen, desempeñan un papel fundamental al convertir las magnitudes físicas del entorno en señales eléctricas que pueden ser procesadas y analizadas por otros componentes del sistema.

Los sensores se pueden clasificar en dos categorías principales: analógicos y digitales. Los sensores analógicos generan señales que varían de forma continua en relación con la magnitud que están midiendo. Por ejemplo, un sensor de temperatura analógico proporcionará una señal de voltaje que cambia de manera proporcional a la temperatura ambiente medida. Estas señales analógicas suelen ser precisas y proporcionan una representación detallada de la magnitud medida [59].

Por otro lado, los sensores digitales producen señales discretas que representan datos en forma binaria, utilizando únicamente valores de cero y uno. Estas señales digitales son más fáciles de procesar y almacenar, ya que se pueden codificar y decodificar de manera más eficiente. Un ejemplo común de un sensor digital es un sensor de proximidad que envía una señal digital cuando detecta la presencia de un objeto [60].

Las diferencias entre las señales analógicas y digitales no solo se limitan a su forma de representación, sino también a sus características de transmisión y procesamiento. Las señales analógicas son susceptibles a la degradación y al ruido durante la transmisión, mientras que las señales digitales son más robustas y pueden viajar distancias más largas sin degradarse.

A continuación, se profundiza la descripción de estos dos tipos de sensores:

Los sensores analógicos son componentes fundamentales en una amplia variedad de aplicaciones, ya que permiten medir cualidades físicas como la temperatura, la presión o los niveles de sonido y convertirlas en señales eléctricas que pueden ser interpretadas por otros dispositivos [60]. Estos sensores se presentan en una amplia gama de formas y tecnologías, desde instrumentos básicos como termómetros hasta dispositivos más sofisticados como galgas extensométricas y sensores de presión piezoeléctricos.

La salida de los sensores analógicos suele ser una representación directa del atributo medido y se presenta en forma de señal eléctrica continua y variable en el tiempo. Esta señal analógica puede ser proporcionada en forma de voltaje, corriente o resistencia,

dependiendo del tipo de sensor y del método de medición utilizado. Sin embargo, esta salida analógica requiere un procesamiento adicional para su interpretación y análisis.

Aunque los sensores analógicos ofrecen una representación más precisa y detallada de la magnitud medida, también pueden ser más susceptibles a interferencias y ruido durante la transmisión de la señal. Además, la necesidad de convertir la señal analógica en información digital para su procesamiento puede introducir cierta complejidad en el sistema.

A pesar de estas limitaciones, los sensores analógicos siguen siendo ampliamente utilizados en una variedad de aplicaciones donde se requiere una medición precisa y continua de las magnitudes físicas. Su versatilidad y fiabilidad los convierten en una opción popular en campos como la industria, la medicina, la meteorología y la investigación científica [50].

A continuación, se presenta un diagrama del funcionamiento y comportamiento de un sensor analógico:

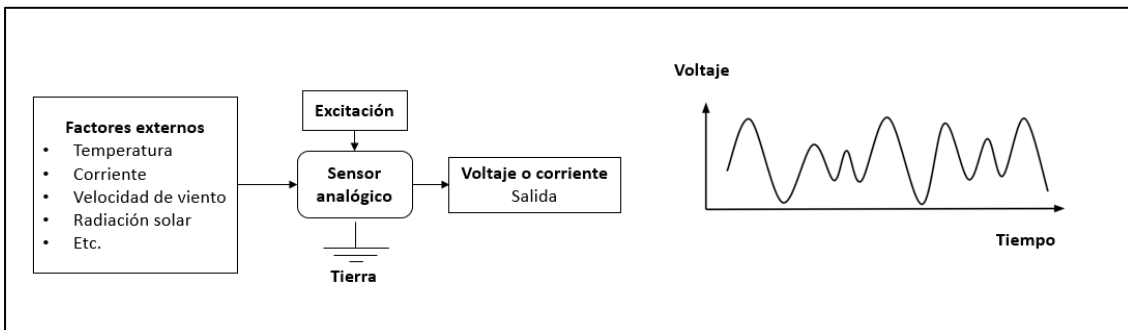


Figura 2.9 Diagrama del funcionamiento y comportamiento de los sensores analógicos.

Los sensores digitales son dispositivos esenciales en una amplia gama de aplicaciones, ya que permiten medir cantidades físicas y convertirlas en señales digitales que pueden ser procesadas y analizadas por otros componentes electrónicos. Estos sensores funcionan detectando variaciones en el entorno, como cambios de temperatura, presión u ondas sonoras, y luego convierten estos datos en un formato digital, que consiste en una serie de valores discretos representados por números binarios [57].

Existen numerosos tipos de sensores digitales, cada uno diseñado para medir un atributo específico. Por ejemplo, los termistores son sensores digitales comúnmente utilizados para medir la temperatura, mientras que los cristales piezoeléctricos son ideales para medir la presión. Los micrófonos, por otro lado, son ejemplos de sensores digitales utilizados para medir el sonido.

Uno de los sensores digitales más importantes es el convertidor analógico a digital (ADC, por sus siglas en inglés), que desempeña un papel fundamental al convertir señales analógicas procedentes de dispositivos o entornos físicos en formatos digitales que pueden ser procesados por sistemas electrónicos. El ADC muestrea la señal analógica a intervalos regulares y asigna un valor digital correspondiente a cada muestra, utilizando una técnica conocida como cuantización [59], [60].

La principal ventaja de los sensores digitales radica en su capacidad para proporcionar mediciones precisas y estables, así como en su inmunidad al ruido y las interferencias electromagnéticas. Además, los datos digitales son más fáciles de procesar y almacenar que las señales analógicas, lo que los hace ideales para su uso en aplicaciones donde se requiere una alta precisión y confiabilidad. Su capacidad para proporcionar mediciones precisas y estables, así como su compatibilidad con sistemas electrónicos modernos, los convierte en una opción popular en el campo de la electrónica y la ingeniería [60]. A continuación, se presenta un diagrama del funcionamiento y comportamiento de un sensor digital:

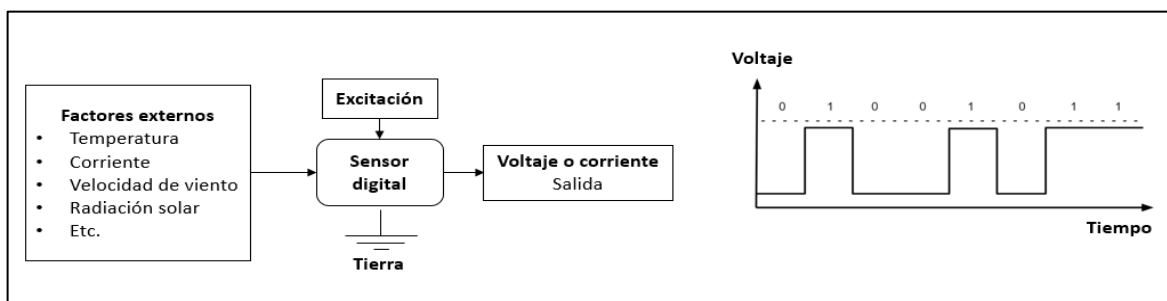


Figura 2.10 Diagrama del funcionamiento y comportamiento de los sensores digitales.

Los sensores analógicos y digitales son componentes esenciales en la medición y adquisición de datos en una amplia variedad de aplicaciones. Mientras que los sensores analógicos proporcionan mediciones continuas y detalladas de magnitudes físicas, los sensores digitales convierten estas mediciones en señales discretas y numéricas, que son más fáciles de procesar y almacenar. Sin embargo, tanto los sensores analógicos como los digitales tienen sus propias ventajas y limitaciones, y la elección entre ellos depende del contexto específico de la aplicación.

Para adquirir y procesar datos de manera eficiente, se utilizan dispositivos de adquisición de datos, que actúan como interfaces entre los sensores y los sistemas de procesamiento de datos. Estos dispositivos son versátiles que permiten la conexión de múltiples sensores y la conversión de sus señales en datos digitales que pueden ser procesados por computadoras u otros dispositivos electrónicos. Con una amplia gama de funciones y capacidades, los dispositivos de adquisición de datos son herramientas indispensables en campos como la investigación científica, el control de procesos industriales y la monitorización [47].

2.2.3.2 Dispositivos de adquisición de datos

Los dispositivos de adquisición de datos (DAQ), también conocidas como placas DAQ o tarjetas DAQ, son componentes de hardware que se utilizan para recopilar, medir y analizar señales analógicas y digitales de varios sensores, instrumentos y dispositivos. Estas tarjetas generalmente interactúan con una computadora y proporcionan entrada y salida analógica (E/S), E/S digital y, comúnmente, otras funcionalidades especializadas, como capacidades de contador/temporizador [61].

La historia de los dispositivos DAQ comerciales se remonta a finales de los años 1970 y principios de los 1980, cuando la demanda de sistemas de control y medición basados en computadora comenzó a crecer. Los primeros dispositivos DAQ comerciales se diseñaron típicamente para su uso con las primeras computadoras personales y ofrecían capacidades

básicas de E/S analógicas y digitales. Estos dispositivos regularmente utilizaban interfaces paralelas o seriales para comunicarse con la computadora y tenían velocidades de muestreo y resoluciones limitadas en comparación con los dispositivos DAQ modernos. Una de las empresas pioneras en el desarrollo de dispositivos DAQ comerciales fue National Instruments (NI), fundada en 1976. NI introdujo sus primeros productos DAQ en la década de 1980, ofreciendo sistemas DAQ modulares basados en PC/AT, conocido como computadora personal/AT. Estos primeros dispositivos DAQ se utilizaron principalmente en entornos de prueba y laboratorio para aplicaciones de control y adquisición de datos [62].

Los dispositivos DAQ vienen en varias configuraciones para satisfacer las diversas necesidades de los usuarios y las aplicaciones. Las variaciones pueden incluir diferencias en el número de canales, tasas de muestreo, resolución, rangos de voltaje, tipos de entrada/salida (analógica, digital, termopar, etc.), factores de forma (PCI, PCIe, USB, Ethernet, etc.) y características especializadas (muestreo simultáneo, acondicionamiento de señal, aislamiento, etc.) [63]. Algunos dispositivos DAQ están diseñadas para aplicaciones de uso general, mientras que otras están diseñadas para industrias o casos de uso específicos.

Los dispositivos de adquisición de datos son componentes fundamentales en sistemas de medición y control, utilizadas en una variedad de aplicaciones que van desde la investigación científica hasta el monitoreo.

Estos dispositivos actúan como interfaces entre los sensores físicos y los sistemas de procesamiento de datos, permitiendo la adquisición, conversión y procesamiento de señales analógicas provenientes de los sensores en datos digitales que pueden ser manipulados por computadoras u otros dispositivos electrónicos. Con una amplia gama de funciones y capacidades, los dispositivos de adquisición de datos son herramientas esenciales para la captura precisa y eficiente de datos en tiempo real, lo que las convierte en elementos clave en el desarrollo y la implementación de sistemas de control y monitoreo [64].

Los dispositivos de adquisición de datos sirven como puente entre una computadora y las señales físicas. Reciben datos de sensores y convierten señales del mundo real en códigos digitales. Esto permite que los sistemas digitales, como computadoras o dispositivos electrónicos, comprendan señales analógicas.

De la misma manera se puede decir que la adquisición de datos DAQ implica capturar mediciones de sucesos eléctricos o físicos como voltaje, temperatura, presión o sonido. Una DAQ o dispositivo de adquisición de datos es un dispositivo electrónico diseñado para adquirir, procesar y almacenar señales analógicas y digitales de sensores y dispositivos externos. Estos dispositivos están equipados con convertidores analógico-digitales (ADC) y digitales-analógicos (DAC), así como circuitos de acondicionamiento de señales, entradas y salidas digitales, y conexiones para diversos tipos de sensores y actuadores. Estos dispositivos pueden variar en tamaño, capacidad y especificaciones para adaptarse a diferentes necesidades y aplicaciones, desde pequeños dispositivos USB de bajo costo hasta sistemas modulares de alta gama con capacidades avanzadas de multiplexación y sincronización. Un sistema DAQ típico comprende sensores para detectar estos fenómenos, hardware de medición DAQ y una computadora equipada con software programable para administrar e interpretar los datos adquiridos [61].

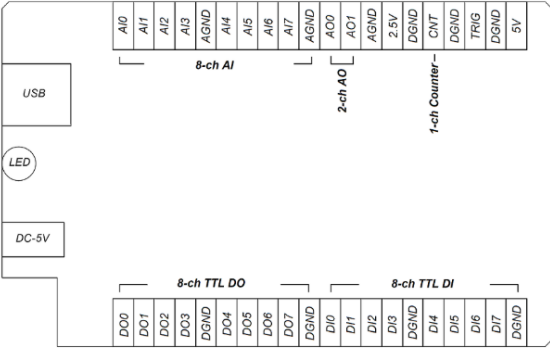
Los dispositivos de adquisición de datos suelen constar de tres componentes principales: el circuito de acondicionamiento de señal, que prepara la señal entrante para la conversión, el convertidor analógico a digital (ADC), responsable de convertir señales analógicas en datos digitales y el bus informático, que facilita la comunicación entre el dispositivo de adquisición de datos y el ordenador [61], [64].

Asimismo, existen varios fabricantes de dispositivos de adquisición de datos (DAQ), cada uno de los cuales ofrece una variedad de productos con diferentes características, especificaciones y capacidades. A continuación, se menciona una descripción general de algunos otros fabricantes destacados y sus dispositivos DAQ:

Advantech ofrece una amplia gama de dispositivos y módulos DAQ para aplicaciones de control, medición y automatización industrial. Sus productos DAQ incluyen dispositivos basados en PCI, PCIe, USB y Ethernet con E/S analógica y digital, así como módulos especializados para tipos de sensores y protocolos de comunicación específicos [65]. A continuación, se muestra el USB 4704, uno de los múltiples que ofrece como productos, así como su diagrama de conexiones:



a) USB 4704



b) Diagrama de conexiones del USB 4704

Figura 2.11 Dispositivo de adquisición de datos USB 4704.

Measurement Computing (MCC) se especializa en brindar soluciones DAQ confiables y asequibles para una amplia gama de industrias y aplicaciones. Su línea de productos DAQ incluye dispositivos basados en USB, Ethernet y PCI con entrada y salida analógica, E/S digital y capacidades de contador/temporizador. MCC también ofrece bibliotecas de software y controladores para una integración perfecta con lenguajes de programación y entornos de desarrollo populares [66]. A continuación, se muestra el USB 205, uno de los múltiples productos que ofrece, así como su diagrama de conexiones:



a) USB 205



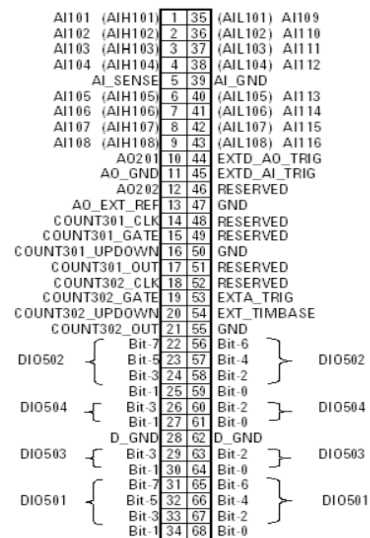
b) Diagrama de conexiones del USB 205

Figura 2.12 Dispositivo de adquisición de datos USB 205.

Keysight Technologies (anteriormente Agilent Technologies) ofrece dispositivos y módulos DAQ de alto rendimiento diseñados para aplicaciones de prueba y medición en la industria electrónica, aeroespacial, automotriz y otras industrias. Sus productos DAQ incluyen dispositivos basados en PCIe, PXI y USB con funciones avanzadas como muestreo de alta velocidad, sincronización multicanal y acondicionamiento de señal [67]. A continuación, se muestra el USB 2351A, uno de los múltiples productos que ofrece, así como su diagrama de conexiones:



a) U2351A



b) Diagrama de conexiones del U2351A

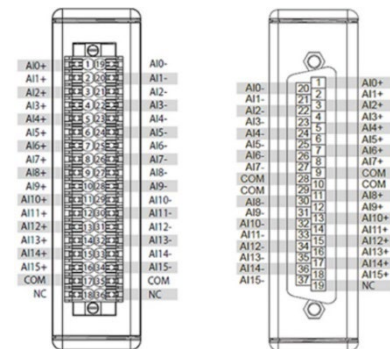
Figura 2.13 Dispositivo de adquisición de datos U2351A.

Asimismo, la empresa National Instruments es reconocida por su amplia gama de dispositivos de adquisición de datos. NI ofrece una amplia gama de soluciones de adquisición de datos diseñadas para satisfacer las necesidades y requisitos únicos de diferentes aplicaciones. Desde dispositivos basados en USB para configuraciones portátiles y de mesa hasta sistemas modulares para mediciones escalables y distribuidas.

A continuación, se muestran algunos dispositivos de los múltiples productos que ofrece NI [68], [69], [70], así como sus diagramas de conexiones:

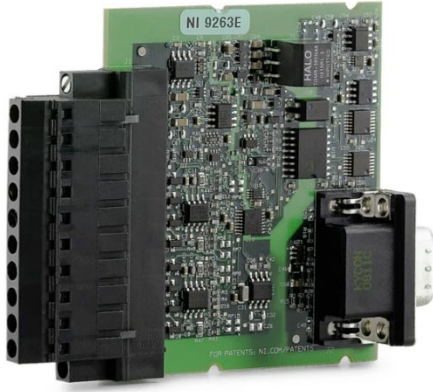


a) NI 9202

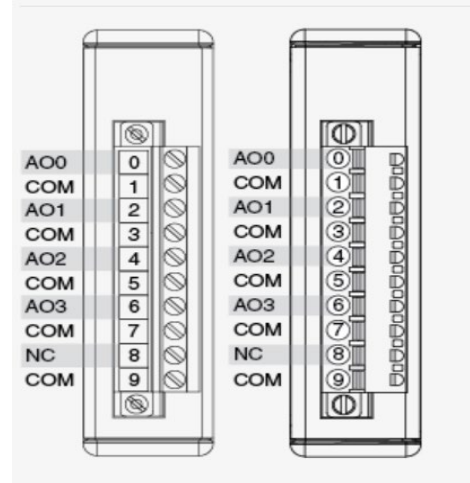


b) Diagrama de conexiones del NI 9202

Figura 2.14 Dispositivo de adquisición de datos NI 9202.



a) sbRio 9263

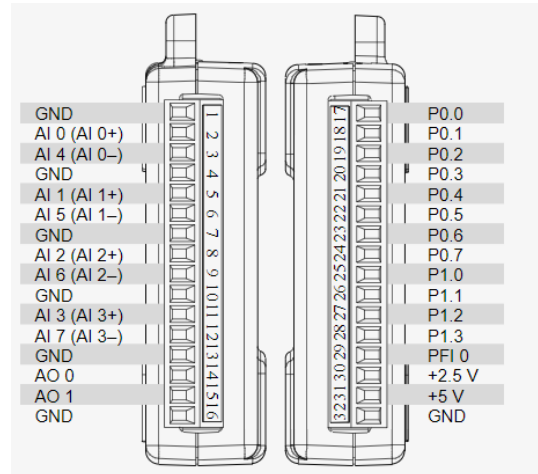


b) Diagrama de conexiones del sbRIO926

Figura 2.15 Dispositivo de adquisición de datos sbRIO 9263.



a) USB 6009



b) Diagrama de conexiones del USB 6009

Figura 2.16 Dispositivo de adquisición de datos USB 6009.

2.3 Instrumentación virtual; entornos gráficos

La instrumentación virtual se refiere al uso de herramientas y plataformas basadas en software para crear, controlar y analizar sistemas de medición y control. Implica la integración de componentes de software y hardware para diseñar sistemas de control y medición personalizados adaptados a aplicaciones específicas. Las plataformas de instrumentación virtual suelen incluir interfaces gráficas de usuario (GUI), hardware de adquisición de datos, algoritmos de procesamiento de señales y herramientas de análisis, todo ello integrado en un entorno de software. Las variaciones de instrumentación virtual incluyen: los instrumentos definidos por software (SDI) donde la funcionalidad está definida principalmente por software en lugar de hardware. Las IDE pueden emular instrumentos tradicionales como osciloscopios, analizadores de espectro o generadores de funciones utilizando software que se ejecuta en hardware informático de uso general. Los sistemas de adquisición de datos son los que capturan, miden y analizan datos de fenómenos físicos mediante sensores y transductores [71]. Regularmente incluyen convertidores de analógico a digital (ADC), capacidades de procesamiento de señales digitales e interfaces de software para visualización y análisis de datos. Los sistemas de control donde los algoritmos de software regulan el comportamiento de los sistemas físicos en función de la retroalimentación de los sensores. Estos sistemas se pueden aplicar en diversos ámbitos, incluida la automatización industrial, la robótica y el control de procesos. Por último, están los sistemas integrados donde las funciones de control y medición basadas en software se integran en plataformas de hardware dedicadas. Estos sistemas se utilizan a menudo en aplicaciones donde el rendimiento y la confiabilidad en tiempo real son críticos, como en la industria automotriz, aeroespacial y de electrónica de consumo [72].

Los instrumentos virtuales de control y monitoreo son una parte esencial de los sistemas modernos de adquisición y gestión de datos. Estas herramientas, basadas en software, ofrecen una interfaz intuitiva que permite a los usuarios visualizar, analizar y administrar datos provenientes de una amplia gama de sensores y dispositivos en tiempo real [71]. Al ejecutarse en computadoras o sistemas integrados, los instrumentos virtuales tienen la

capacidad de realizar diversas funciones, desde la adquisición inicial de datos hasta el procesamiento de señales y el control de los dispositivos asociados.

Una de las ventajas de los instrumentos virtuales es su flexibilidad y escalabilidad. Pueden adaptarse fácilmente a diferentes tipos de hardware y configuraciones, lo que los hace ideales para una variedad de aplicaciones en campos como la investigación científica, el monitoreo, la automatización de procesos y más. Además, su capacidad para trabajar en tiempo real permite a los usuarios tomar decisiones rápidas y efectivas basadas en la información actualizada [73].

Estos instrumentos virtuales suelen ofrecer una amplia gama de funciones, que van desde la simple visualización de datos hasta el análisis avanzado y la generación de informes. También pueden integrarse con otros sistemas y software para una mayor interoperabilidad y funcionalidad.

En lugar de dispositivos físicos, los instrumentos virtuales se ejecutan en computadoras o sistemas integrados y utilizan software para realizar tareas que tradicionalmente se realizaban mediante instrumentos de hardware. Estos instrumentos virtuales proporcionan una interfaz gráfica fácil de usar. Los instrumentos virtuales incluyen diversas funcionalidades, tales como: la adquisición de datos, procesamiento de señales, control, visualización y automatización [72].

La adquisición de datos implica la recopilación y captura sistemática de datos sin procesar de diversas fuentes, generalmente sensores, instrumentos o sistemas digitales. Estos datos recopilados pueden representar una amplia gama de fenómenos, incluidas mediciones, observaciones o registros, y a menudo se almacenan y analizan para su posterior procesamiento. El proceso de adquisición de datos normalmente implica convertir señales analógicas a formato digital, utilizando componentes de hardware como sensores, transductores y convertidores de analógico a digital. Estos componentes facilitan la captura y representación precisa de fenómenos del mundo real en un formato digital adecuado para su análisis e interpretación. Los sistemas de adquisición de datos también pueden incluir

etapas de preprocesamiento y acondicionamiento de señales para mejorar la calidad y confiabilidad de los datos adquiridos. Si bien la adquisición de datos es un paso fundamental en muchas aplicaciones, incluida la investigación científica, el monitoreo industrial, la atención médica y el análisis ambiental, su atención se centra principalmente en la recopilación y el procesamiento inicial de datos sin procesar en lugar de aplicaciones o análisis específicos. Por lo tanto, la adquisición de datos sirve como base para mayores conocimientos basados en datos y procesos de toma de decisiones en diversos campos y disciplinas [64]. A continuación, se muestra el diagrama de bloques de la adquisición de datos:

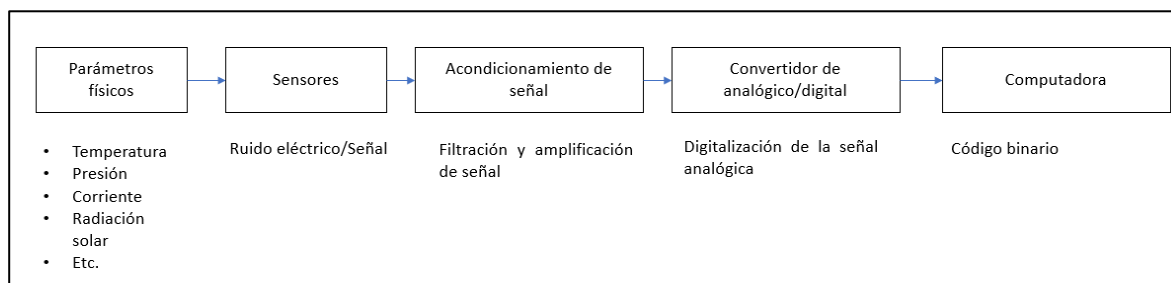


Figura 2.17 Diagrama de bloques de la adquisición de datos.

El procesamiento de señales implica la manipulación, análisis e interpretación de señales para extraer información significativa. Las señales pueden representar diversos fenómenos, como sonido, imágenes, lecturas de sensores o flujos de datos. El objetivo principal del procesamiento de señales es mejorar la calidad de las señales, eliminar ruidos o interferencias no deseadas y extraer rasgos o características relevantes para su posterior análisis. Las técnicas de procesamiento de señales se pueden clasificar en dos dominios principales: analógico y digital. El procesamiento de señales analógicas implica la manipulación directa de señales continuas utilizando circuitos y componentes eléctricos, mientras que el procesamiento de señales digitales implica la conversión de señales analógicas en formato digital para su procesamiento utilizando algoritmos implementados en hardware o software digital. Las operaciones comunes de procesamiento de señales incluyen filtrado, modulación, compresión y análisis, cada una de las cuales tiene diferentes propósitos en la mejora e interpretación de la señal [45], [51]. El procesamiento de señales

es esencial en numerosos campos, incluidos los de telecomunicaciones, procesamiento de audio y vídeo, imágenes médicas, sistemas de radar y más [60]. A continuación, se muestra el procesamiento de una señal analógica sin filtrar:

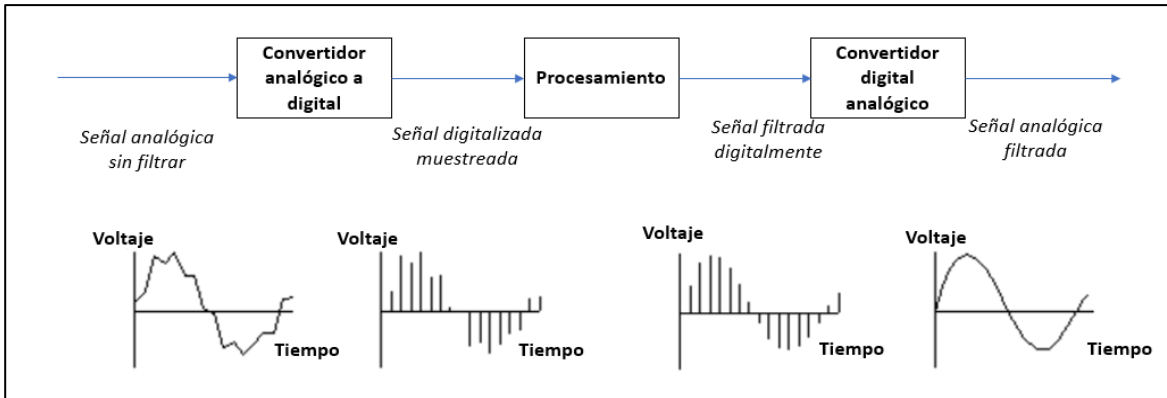


Figura 2.18 Procesamiento de una señal analógica sin filtrar.

El control se refiere al proceso de influir o regular el comportamiento de un sistema o proceso para lograr los resultados deseados. Implica monitorear las entradas y salidas del sistema, compararlas con una referencia o estado deseado y realizar ajustes en el comportamiento del sistema para mantener la estabilidad, el rendimiento o lograr objetivos específicos. Los sistemas de control se pueden encontrar en varios dominios, incluidos la ingeniería, la economía, la biología y las ciencias sociales [46]. En ingeniería, los sistemas de control son fundamentales para el funcionamiento de máquinas, robots, vehículos y procesos industriales. Garantizan que estos sistemas funcionen de forma segura, eficiente y fiable regulando parámetros como la velocidad, la temperatura, la presión o la posición. Las técnicas de control van desde un simple control de encendido y apagado hasta estrategias de control de retroalimentación y avance más complejas, implementadas utilizando medios mecánicos, eléctricos o computacionales [46]. En particular, prevalece el control de retroalimentación, donde la salida del sistema se mide y se utiliza para ajustar la entrada, asegurando que el comportamiento del sistema se mantenga dentro de los límites deseados.

A continuación, se muestra el diagrama de bloques de los 2 tipos de control existentes:

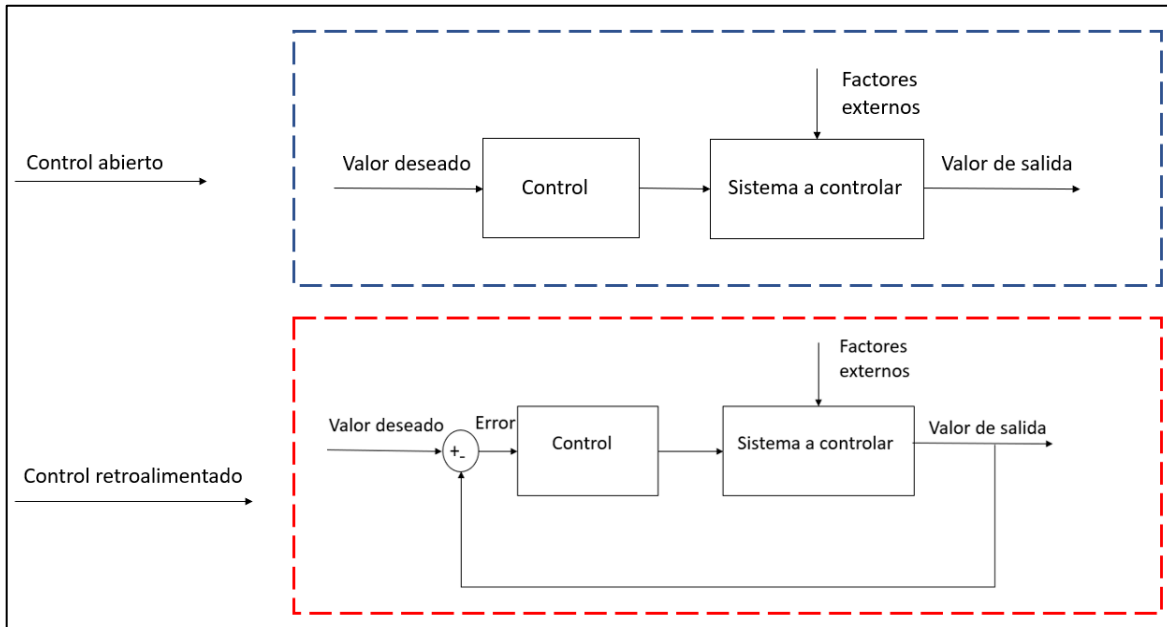


Figura 2.19 Diagrama de bloques del control abierto y control retroalimentado.

La visualización en instrumentos virtuales se refiere a la representación gráfica de datos y parámetros del sistema para proporcionar a los usuarios una comprensión clara del funcionamiento del instrumento y los procesos subyacentes que se monitorean o controlan. A través de interfaces gráficas, los usuarios pueden observar datos, tendencias y cambios en tiempo real en las variables del sistema, mejorando su capacidad para interpretar y analizar información de manera efectiva. Las herramientas de visualización en instrumentos virtuales pueden incluir gráficos, tablas, medidores, medidores y otros elementos gráficos que muestran datos dinámicamente en un formato fácil de usar [73]. Estas representaciones visuales permiten a los usuarios identificar patrones, anomalías y tendencias en los datos, lo que facilita los procesos de toma de decisiones y resolución de problemas. Además, la visualización ayuda en la presentación de información compleja de manera concisa e intuitiva, lo que facilita a los usuarios comprender e interactuar con la interfaz del instrumento. Al proporcionar retroalimentación visual y actualizaciones en tiempo real, la visualización mejora la experiencia del usuario, aumenta la eficiencia y respalda la toma de decisiones informadas en diversas aplicaciones, incluida la investigación científica, el monitoreo industrial y el control de procesos. Sin embargo, aquí la atención se centra en el concepto y los principios de visualización dentro de instrumentos virtuales, en lugar de

aplicaciones o implementaciones específicas [71].

La automatización es la integración de procesos y procedimientos automatizados para agilizar las operaciones y mejorar la eficiencia sin intervención humana directa. Abarca el uso de algoritmos de software, lenguajes de programación e interfaces de programación para automatizar tareas como la adquisición, el análisis y el control de datos dentro de sistemas de instrumentos virtuales. Al automatizar tareas rutinarias o repetitivas, la automatización reduce el esfuerzo manual, minimiza el error humano y aumenta la productividad. Los instrumentos virtuales equipados con capacidades de automatización pueden realizar operaciones complejas, ejecutar secuencias de acciones predefinidas y responder dinámicamente a condiciones cambiantes, todo sin la supervisión continua de los usuarios. Esto permite a los usuarios centrarse en tareas de nivel superior, como la interpretación de datos y la toma de decisiones, mientras que el instrumento virtual maneja las operaciones de rutina de forma autónoma. Además, la automatización permite la implementación de procesos y flujos de trabajo estandarizados, asegurando coherencia y reproducibilidad en la recopilación y análisis de datos [48], [51], [73].

2.3.1 Softwares especializados

Existe una variedad de softwares especializados con la capacidad de controlar y monitorear múltiples procesos y aplicaciones en la industria. A continuación, se muestran algunos de los más utilizados con su respectiva descripción:

LabVIEW: LabVIEW® es un entorno de programación visual desarrollado por National Instruments, diseñado para la adquisición de datos, control de instrumentos y automatización industrial. Fue lanzado por primera vez en 1986 y desde entonces ha pasado por más de 20 actualizaciones [62]. A continuación, se presenta la interfaz del panel frontal y diagrama de bloques del software como su logo:

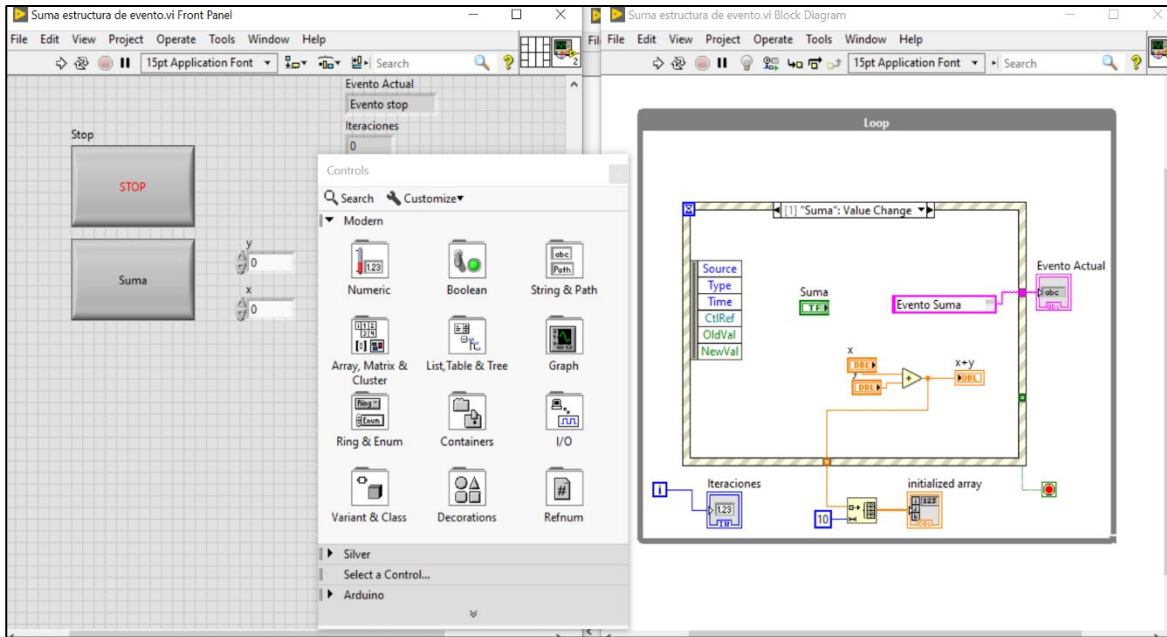


Figura 2.20 Panel frontal, diagrama de bloques y paleta de funciones del software LabVIEW®.



Figura 2.21 Logo del software LabVIEW® 2024.

MATLAB/Simulink: MATLAB, desarrollado por MathWorks, es un entorno de computación numérica, mientras que Simulink es una extensión para modelar sistemas dinámicos. MATLAB se lanzó en 1984 y Simulink se introdujo en 1990. Ambos han visto numerosas versiones lanzadas a lo largo de los años [74], [75]. A continuación, se presenta la interfaz del software como su logo:

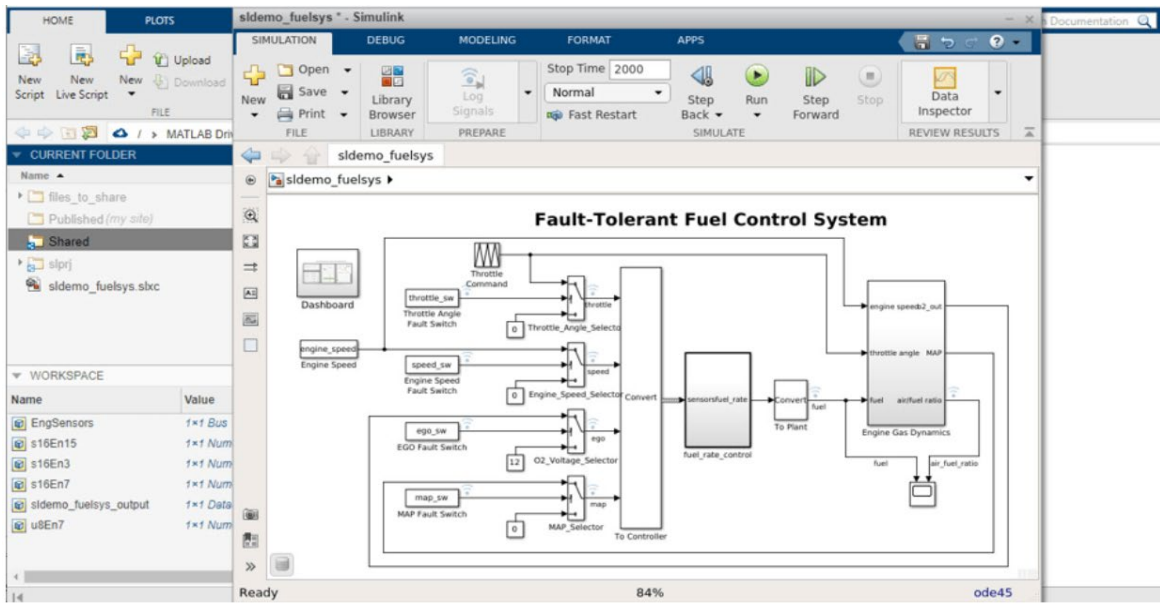


Figura 2.22 Interfaz del software MATLAB/Simulink.

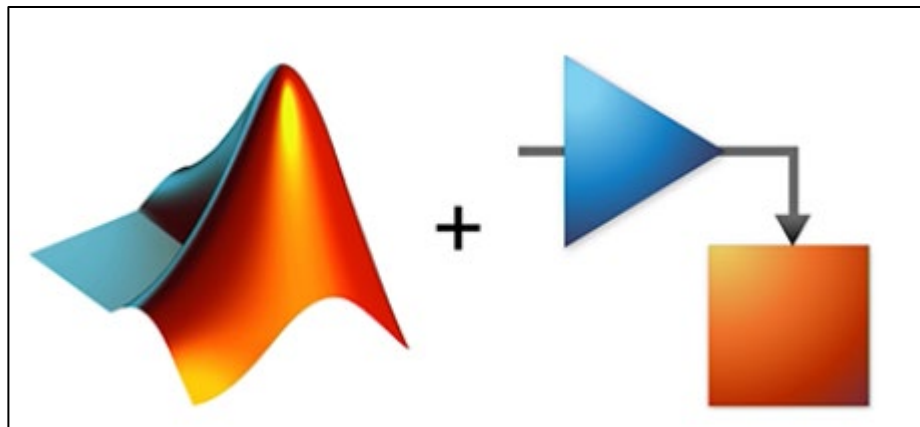


Figura 2.23 Logo del software MATLAB/Simulink.

Sistemas SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos): son fundamentales en el monitoreo y gestión de procesos industriales, abarcando funciones como recopilación, análisis y control de datos. Estos sistemas son producidos por una variedad de empresas, incluidos líderes de la industria como Siemens, Schneider Electric, Rockwell Automation y Wonderware. Originados en la década de 1960, los sistemas SCADA han experimentado un desarrollo y refinamiento continuo. A lo largo de los años, diferentes fabricantes han

lanzando numerosas versiones de software SCADA [76], [77]. A continuación, se presenta un ejemplo de interfaz del software:

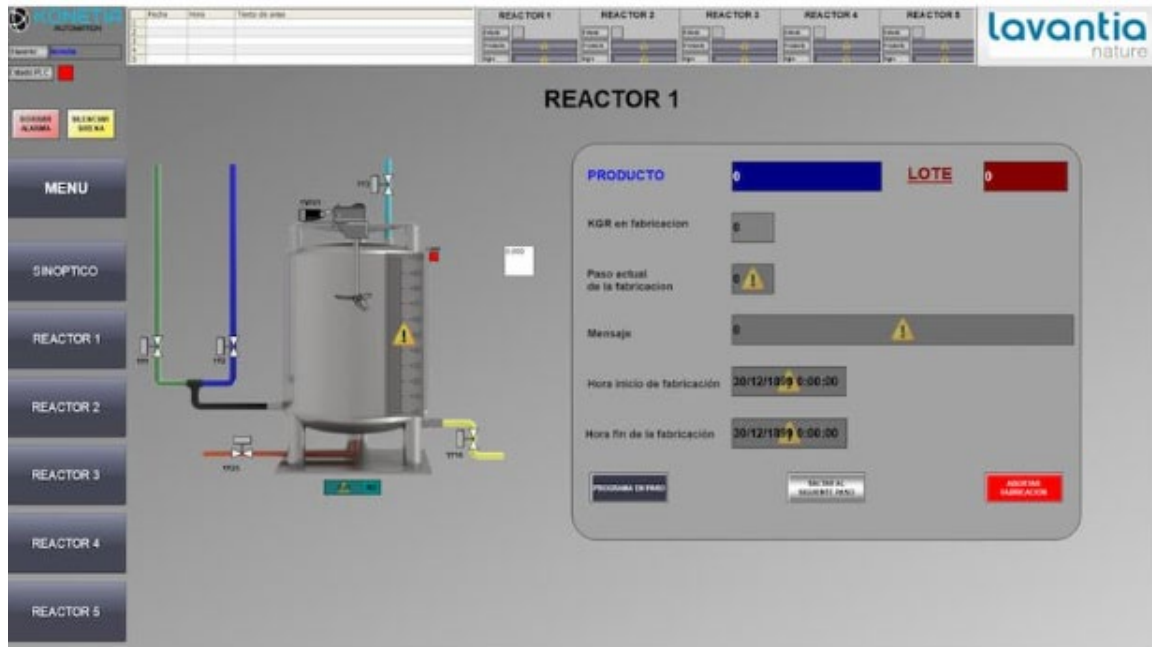


Figura 2.24 Interfaz de ejemplo del software de sistemas SCADA.

Software de programación de PLC: el software de programación de PLC se utiliza para desarrollar lógica de control para controladores lógicos programables (PLC) en la automatización industrial. Lo proporcionan fabricantes de PLC como Siemens, Rockwell Automation y Schneider Electric. Se han lanzado varias versiones desde las décadas de 1970 y 1980 [78], [79]. A continuación, se presenta la interfaz del software:

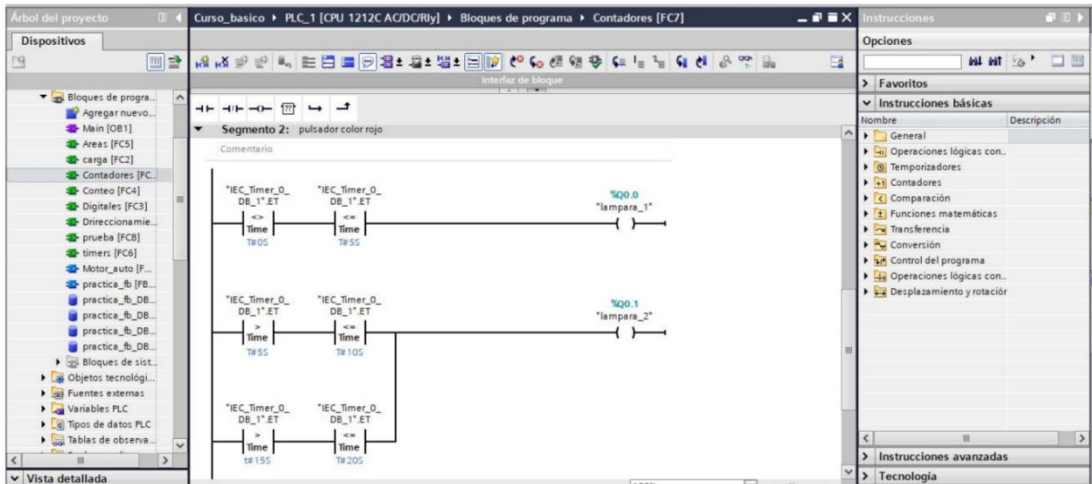


Figura 2.25 Interfaz de ejemplo del software de programación PLC.

Arduino IDE: Arduino IDE es una plataforma de código abierto para escribir, compilar y cargar código en placas de microcontrolador Arduino. Desarrollado por la comunidad Arduino, se lanzó por primera vez en 2005 y ha recibido numerosas actualizaciones desde entonces [80]. A continuación, se presenta la interfaz del software como su logo:

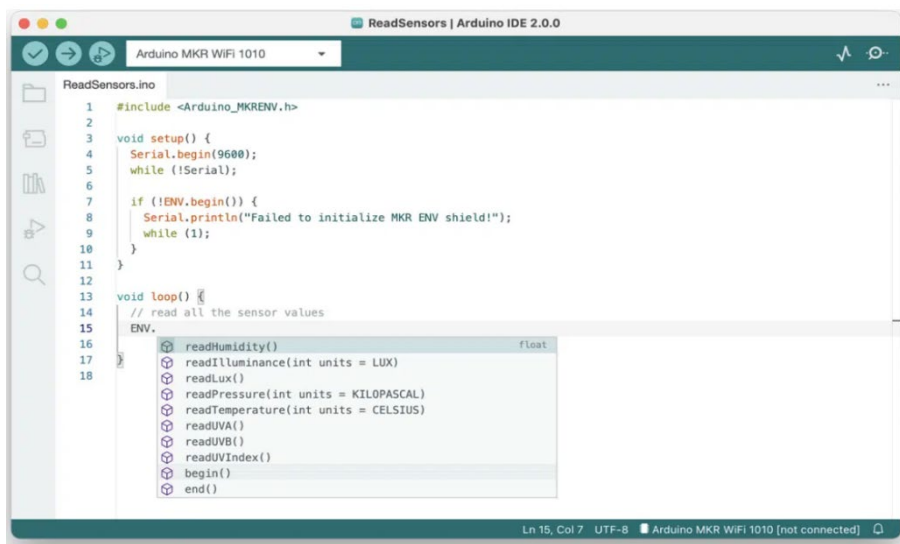


Figura 2.26 Interfaz del software Arduino IDE.



Figura 2.27 Logo del software Arduino IDE.

Raspberry Pi OS: Raspberry Pi OS es el sistema operativo oficial para computadoras de placa única Raspberry Pi, desarrollado por la Fundación Raspberry Pi. Se lanzó por primera vez en 2012 y desde entonces ha recibido múltiples actualizaciones [81]. A continuación, se muestra la interfaz del sistema operativo como su logo:

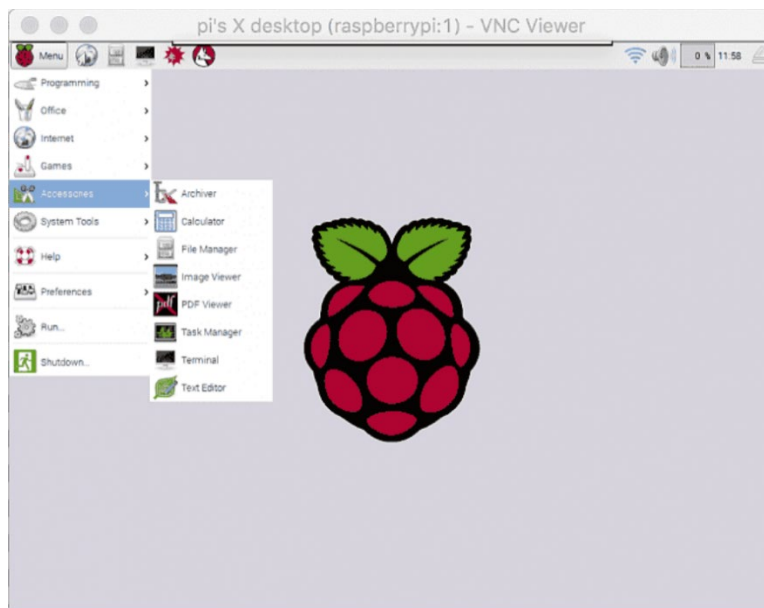


Figura 2.28 Interfaz del sistema operativo Raspberry Pi OS.



Figura 2.29 Logo del sistema operativo Raspberry Pi OS.

2.3.2 LabVIEW®

LabVIEW: LabVIEW® es un entorno de programación visual desarrollado por National Instruments, diseñado para la adquisición de datos, control de instrumentos y automatización industrial. Fue lanzado por primera vez en 1986 y desde entonces ha pasado por más de 20 actualizaciones [62], [82]. A continuación, se presenta la interfaz del panel frontal, el diagrama de bloques del software, así como la ventana de ejecución al abrirlo:

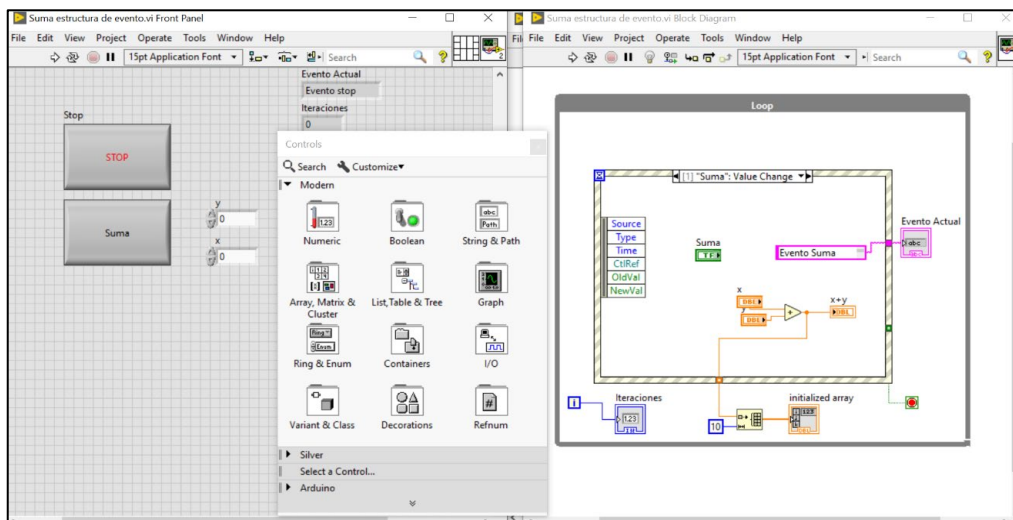


Figura 2.30 Panel frontal, diagrama de bloques y paleta de funciones del software LabVIEW®.



Figura 2.31 Ventana de ejecución del software LabVIEW®.

LabVIEW® desarrollado por National Instruments (NI), es un software de ingeniería de sistemas diseñado para aplicaciones que necesitan pruebas, mediciones y control, facilitando un acceso veloz a hardware y datos. El entorno de programación LabVIEW® facilita la integración de hardware en aplicaciones de ingeniería, ofreciendo un enfoque coherente para la adquisición de datos desde dispositivos de NI y de otros fabricantes. Con su entorno de programación gráfica intuitivo y poderoso, LabVIEW® ofrece una solución completa para la creación de instrumentos virtuales de control y monitoreo. Desde la adquisición de datos hasta el análisis y la visualización, LabVIEW® permite a los usuarios desarrollar sistemas de adquisición y procesamiento de datos personalizados de manera rápida y eficiente. Esto hace que el desarrollo de aplicaciones sea más rápido y accesible para una amplia gama de usuarios, incluidos ingenieros, científicos y técnicos. LabVIEW® es altamente compatible con una amplia gama de hardware de adquisición de datos y dispositivos de control, lo que permite a los usuarios aprovechar al máximo sus sistemas existentes y ampliar su funcionalidad según sea necesario. Esto proporciona una gran flexibilidad y escalabilidad a los sistemas desarrollados con LabVIEW®, lo que los hace adecuados para una variedad de aplicaciones y entornos, desde laboratorios de investigación hasta entornos industriales [37].

LabVIEW® simplifica la programación, permitiendo que los usuarios se concentren en sus problemas específicos. Ofrece la posibilidad de visualizar resultados de inmediato mediante la creación integrada de interfaces de usuario mediante arrastrar y soltar, así como visualizadores de datos. Para transformar los datos adquiridos en resultados comerciales concretos, se pueden desarrollar algoritmos para análisis de datos y control avanzado, utilizando propiedad intelectual en procesamiento de señales y matemáticas, o reutilizando bibliotecas propias de diversas herramientas. Además, LabVIEW® garantiza la compatibilidad con otras herramientas de ingeniería al poder interactuar y reutilizar bibliotecas de otros software y longitudes.

Una de las principales aplicaciones de LabVIEW® son las siguientes:

- Control y/o monitoreo de equipos y procesos industriales

- Monitoreo de condición
- Análisis y registros de resultados reales para aplicaciones en sectores como el automotriz, investigación de energía, entre otros
- Aplicaciones que requieren vibración y sonido, procesamiento de imagen, análisis de tiempo y frecuencia conjunta

LabVIEW® ofrece varias ventajas sobresalientes que lo convierten en la opción preferida de los ingenieros, científicos e investigadores en diversos campos [72], [73], [82]. A continuación, se muestran dichas ventajas:

Entorno de programación gráfica: el entorno gráfico está diseñado para facilitar la creación de sistemas de medición y control personalizados a través de programación visual. A diferencia de los lenguajes de programación tradicionales basados en texto, LabVIEW® emplea un enfoque gráfico donde los usuarios construyen programas conectando íconos gráficos, o nodos, en un lienzo de diagrama de bloques. Cada nodo representa una función u operación específica, lo que permite a los usuarios construir sistemas complejos organizando y conectando estos nodos. Este paradigma de programación visual ofrece varias ventajas, incluida una productividad mejorada, un diseño de sistema intuitivo y facilidad de comprensión para usuarios con diversos antecedentes técnicos. En general, el entorno de programación gráfica de LabVIEW® permite a los usuarios desarrollar sistemas sofisticados de medición y control de manera eficiente y efectiva, impulsando la innovación en diversas industrias y disciplinas.

Facilidad de uso: el software LabVIEW® es conocido por su excepcional facilidad de uso, debido a su entorno de programación gráfico intuitivo. Esta interfaz gráfica elimina la necesidad de una sintaxis y codificación complejas, lo que la hace accesible a usuarios con diversos antecedentes técnicos, incluidos ingenieros, científicos e investigadores. Además, LabVIEW® ofrece capacidades interactivas de depuración y simulación, lo que permite a los usuarios probar y solucionar problemas de sus programas en tiempo real, mejorando el flujo de trabajo de desarrollo. La facilidad de uso de LabVIEW® se ve mejorada aún más

por su documentación integral, tutoriales y recursos en línea, que brindan un amplio soporte para usuarios de todos los niveles. Además, la comunidad de LabVIEW® es activa y vibrante, con foros, grupos de usuarios y comunidades en línea donde los usuarios pueden buscar asesoramiento, compartir conocimientos y colaborar en proyectos. En general, la facilidad de uso de LabVIEW® permite a los usuarios desarrollar sistemas sofisticados de medición y control de manera rápida y eficiente, permitiéndoles concentrarse en resolver problemas complejos e impulsar la innovación en sus respectivos campos.

Modularidad y reutilización: la modularidad y la reutilización de LabVIEW® son características clave que contribuyen a su eficiencia y eficacia en el desarrollo de sistemas complejos de medición y control. La modularidad se refiere a la práctica de dividir un sistema en componentes o módulos más pequeños y manejables, mientras que la reutilización implica diseñar estos módulos de una manera que permita reutilizarlos fácilmente en diferentes proyectos o aplicaciones [72], [82]. La combinación de modularidad y reutilización en LabVIEW® genera varios beneficios. En primer lugar, acelera el desarrollo al reducir la redundancia y promover la reutilización del código, lo que permite a los usuarios aprovechar los módulos y componentes existentes en lugar de empezar desde cero para cada proyecto. En segundo lugar, mejora la capacidad de mantenimiento al aislar cambios en módulos específicos, minimizando el riesgo de efectos secundarios no deseados en otras partes del sistema. En tercer lugar, mejora la escalabilidad, ya que los diseños modulares se pueden ampliar o modificar fácilmente para adaptarse a requisitos cambiantes o funcionalidades adicionales.

Amplia biblioteca de funciones y herramientas: la biblioteca de funciones y herramientas de LabVIEW® es una colección completa de componentes prediseñados diseñados para agilizar el proceso de desarrollo y permitir a los usuarios crear sistemas sofisticados de medición y control de manera eficiente. Estas funciones y herramientas cubren una amplia gama de tareas y funcionalidades, incluida la adquisición de datos, procesamiento de señales, análisis, visualización e integración de sistemas. Una de las fortalezas clave de la biblioteca de LabVIEW® es su versatilidad y extensibilidad. Ofrece un amplio conjunto de funciones integradas para tareas comunes, como adquirir datos de sensores, generar señales,

realizar operaciones matemáticas y mostrar resultados gráficamente. Estas funciones están organizadas en categorías y subcategorías, lo que facilita a los usuarios encontrar las herramientas que necesitan para sus aplicaciones específicas. La biblioteca de funciones y herramientas de LabVIEW® también incluye una variedad de capacidades de visualización y análisis de datos, lo que permite a los usuarios procesar e interpretar datos de manera efectiva. Desde análisis estadístico básico hasta técnicas avanzadas de procesamiento de señales. LabVIEW® proporciona herramientas para analizar y visualizar datos de manera significativa, ayudando a los usuarios a obtener conocimientos y tomar decisiones informadas. Por lo tanto, la biblioteca de funciones y herramientas de LabVIEW® permite a los usuarios abordar tareas complejas de medición y control con confianza, ofreciendo una gran cantidad de recursos y capacidades para satisfacer las diversas necesidades de ingenieros, científicos e investigadores en diversas industrias y aplicaciones.

Integración de hardware: las capacidades de integración de hardware de LabVIEW® permiten a los usuarios interactuar con una amplia gama de dispositivos e instrumentos de hardware sin problemas, lo que permite la creación de sistemas sofisticados de medición y control. Ya sea que trabaje con sensores, actuadores, dispositivos de adquisición de datos o controladores industriales, LabVIEW® brinda soporte sólido para la integración de hardware a través de una variedad de mecanismos.

Una de las características clave de la integración de hardware de LabVIEW® es su extensa biblioteca de controladores integrados y API (interfaces de programación de aplicaciones) para instrumentaciones y dispositivos de hardware populares. Estos controladores y API permiten a los usuarios de LabVIEW® comunicarse con dispositivos externos utilizando protocolos de comunicación estándar de la industria como GPIB (Bus de interfaz de propósito general), USB (Bus serie universal), Ethernet y más. Además, LabVIEW® ofrece soporte para protocolos propietarios utilizados por fabricantes específicos, lo que garantiza la compatibilidad con una amplia gama de dispositivos de hardware. LabVIEW® también proporciona herramientas y utilidades para el control de instrumentos, permitiendo a los usuarios configurar, calibrar y controlar instrumentos externos directamente desde el entorno de LabVIEW®. Con características como descubrimiento de instrumentos, configuración automática y operación remota, LabVIEW® agiliza el proceso de interfaz

con instrumentos externos, reduciendo el tiempo y el esfuerzo de desarrollo. Y para los usuarios que trabajan con hardware personalizado o instrumentos especializados, LabVIEW® ofrece herramientas para desarrollar controladores e interfaces personalizados. A través de API, SDK (kits de desarrollo de software) y lenguajes de programación de bajo nivel como C/C++ y .NET, los usuarios pueden crear interfaces y controladores personalizados para comunicarse con dispositivos de hardware especializados o propietarios.

Soporte multiplataforma: el soporte multiplataforma de LabVIEW® permite a los usuarios desarrollar, implementar y ejecutar aplicaciones sin problemas en diferentes sistemas operativos, incluidos Windows, macOS y Linux. Esta flexibilidad permite a los usuarios aprovechar su sistema operativo preferido mientras acceden a las potentes funciones y capacidades de LabVIEW®. Una de las fortalezas clave del soporte multiplataforma de LabVIEW® es su experiencia de usuario consistente en todos los sistemas operativos. Independientemente de la plataforma, LabVIEW® proporciona una interfaz y un flujo de trabajo familiares, lo que garantiza una transición fluida para los usuarios que se mueven entre diferentes entornos. Esta consistencia se extiende al entorno de programación gráfica, las herramientas de desarrollo y el motor de ejecución de LabVIEW®, lo que permite a los usuarios trabajar de manera eficiente independientemente de la plataforma que estén utilizando. Además, LabVIEW® ofrece amplia compatibilidad con software y hardware de terceros, lo que permite una integración perfecta con una amplia gama de herramientas y dispositivos en todas las plataformas. Ya sea interactuando con dispositivos de hardware externos, comunicándose con otras aplicaciones de software o accediendo a recursos del sistema. Además, LabVIEW® ofrece soporte para desarrollo y pruebas multiplataforma, lo que permite a los usuarios desarrollar y depurar sus aplicaciones en una plataforma e implementarlas en otra, así como características como depuración remota, máquinas virtuales y pruebas basadas en la nube.

Capítulo 3

3. Metodología

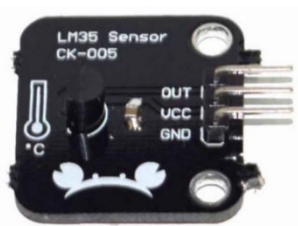
Esta sección presenta aquellos materiales y métodos utilizados para desarrollar los instrumentos virtuales de monitoreo y control, así como implementar la modulación por ancho de pulso (PWM) para controlar la temperatura de reacción y la agitación, y el algoritmo de control proporcional integral derivativo (PID) para regular la temperatura de reacción. Además, se detalla el procedimiento y la medición del consumo energético del proceso de producción de biodiésel mediante la reacción de transesterificación por catálisis básica con el catalizador NaOH. También se describe la adaptación del dispositivo de adquisición de datos USB 6009 y se explica el diseño y la creación de la interfaz electrónica. Por último, se documenta la integración de los instrumentos virtuales junto con la interfaz electrónica.

Esta sección describe los aspectos técnicos y metodológicos involucrados en la implementación de los instrumentos virtuales de monitoreo y control, así como en la configuración y puesta en marcha de la interfaz electrónica. Este análisis describe las bases para comprender el funcionamiento y la operación del sistema en su conjunto, y proporciona una sólida base para futuros desarrollos en este campo.

3.1 Medición y monitoreo de temperatura en la producción de biodiésel

Para la medición de la temperatura ambiente y la temperatura de reacción, se optó por utilizar el sensor LM35, el cual fue adaptado a un módulo soldado para su fácil integración en el sistema. Para la medición de la temperatura ambiente, se utilizó el sensor LM35 en su configuración estándar (módulo), mientras que, para la medición de la temperatura de reacción, se optó por la presentación encapsulado del sensor el cual protege al sensor LM35 del entorno de reacción. El sensor LM35 es un sensor de temperatura de señal analógica que opera en un rango de voltaje de 4 V a 30 V. Proporciona una salida lineal de $10 \frac{mV}{^{\circ}C}$ de cambio de temperatura y cuenta con una precisión calibrada de 1 °C. Su rango de medición abarca desde -55 °C hasta 150 °C, lo que lo hace adecuado para una amplia variedad de aplicaciones industriales.

En la Figura 3.1.a se muestra el sensor LM35 utilizado para medir la temperatura ambiente, mientras que en la Figura 3.1.b se presenta el mismo sensor adaptado para la medición de la temperatura de reacción, donde se observa su encapsulado para protegerlo de las condiciones adversas del proceso.



a) Sensor LM35 en módulo



b) Sensor LM35 encapsulado

Figura 3.1 Sensor analógico LM35 para medición de temperatura.

Para la adquisición de datos con la interfaz electrónica, se adecuó el sensor LM35, el USB 6009 y la resistencia de 220 Ω . La terminal de voltaje de entrada del LM35 se conectó directamente a los 5 V suministrados por el USB 6009, mientras que las terminales de voltaje de salida y GND del sensor se conectaron a través de una resistencia de 220 Ω para mitigar posibles interferencias de ruido. Esta disposición ayuda a garantizar mediciones más estables y precisas.

En la Figura 3.2 se presenta el diagrama de conexiones detallado del sensor LM35 con el USB 6009, proporcionando una guía visual clara para la implementación de la configuración. Este enfoque permite una fácil integración de los componentes y una adquisición de datos confiable para monitorear y controlar las temperaturas de manera efectiva en el proceso.

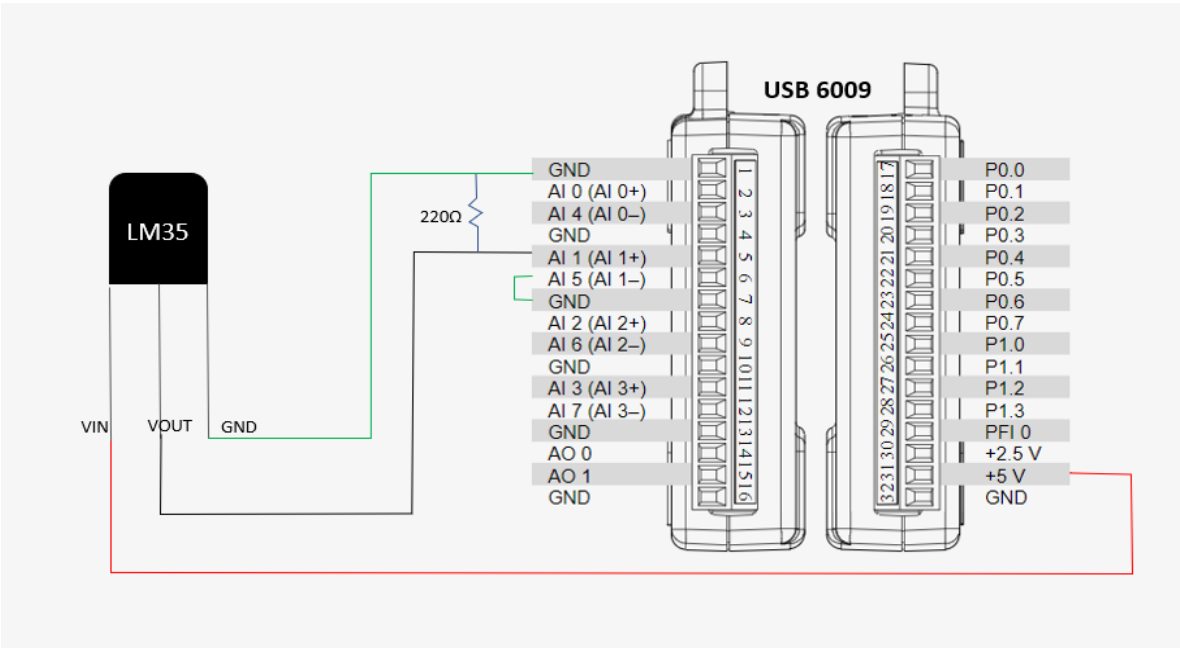


Figura 3.2 Diagrama de conexiones del sensor LM35 con el USB 6009.

Como se puede observar en la figura 3.2 la terminal representada es la entrada analógica AI1, la cual está configurada para medir la temperatura ambiente. Además, se ha conectado a tierra la entrada analógica AI5 para garantizar la estabilidad de la medición. Esta misma configuración se aplica para la medición de la temperatura de reacción, utilizando la entrada analógica AI2 para esta función y conectando a tierra la entrada analógica AI6. La

disposición de la resistencia de 220Ω entre las entradas de voltaje de salida y GND se mantiene sin cambios.

Así mismo, se procedió a realizar el instrumento virtual de monitoreo en LabVIEW®. En primer lugar, se estableció un bucle principal While y se integró la función DAQmx Start Task.vi, la cual inicia la tarea principal. Esta tarea, denominada "2detemperatura", fue configurada para medir dos entradas analógicas en un rango de -10 V a 10 V con un solo muestreo (On Demand). Luego, dentro del bucle principal, se añadió la función DAQmx Read.vi, configurada para leer datos analógicos de un solo canal y un solo muestreo, junto con la función "Index Array" para procesar ambas señales leídas. Posteriormente, se realizó la normalización de estos valores dividiéndolos por un valor constante de 0.01, debido a la salida lineal del sensor LM35, como se ilustra en la figura 3.3.

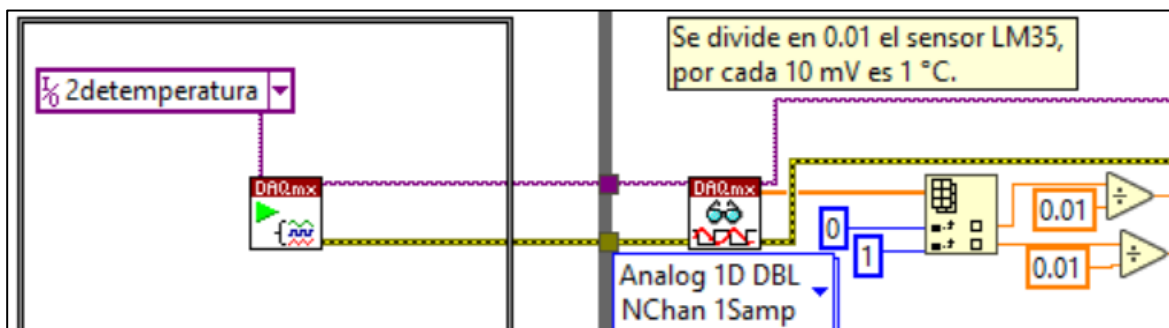


Figura 3.3 Adquisición de señal de temperatura de ambiente y de reacción.

Una vez procesadas las señales, se enviaron a una gráfica para su visualización en tiempo real y a indicadores para mostrar sus valores numéricos actuales. Esto proporciona al usuario una representación clara y dinámica de las temperaturas medidas. Finalmente, para evitar problemas de recursos y liberar la memoria utilizada por la tarea de adquisición de datos, se cerró el canal fuera del bucle principal mediante el uso de las funciones DAQmx Stop Task.vi y DAQmx Clear Task.vi. Este paso es importante para garantizar un funcionamiento eficiente y estable del instrumento virtual.

El proceso de generar una alerta de temperatura máxima se realizó utilizando herramientas específicas en LabVIEW®. Se utilizó un enfoque que incluyó el uso de Shift Registers, operaciones condicionales y aritméticas, así como un Case Structure para manejar la lógica de la alerta en tiempo real. También se empleó un nodo de invocación llamada Blinking para el parpadeo del indicador de la alarma y una Simulate Signal para generar el sonido de la misma. Esto es con la finalidad de no sobrepasar un límite de temperatura en base a la temperatura de ebullición del alcohol a utilizar en la reacción de transesterificación (figura 3.4).

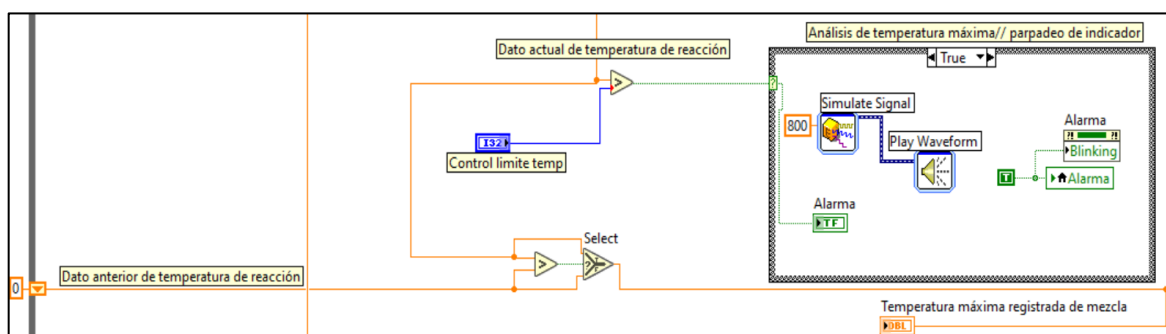


Figura 3.4 Operaciones para el análisis de alerta de temperatura máxima de reacción.

En el Case Structure, solo se muestra la ventana de True. En la ventana de False se realizó solamente la invocación de nodo de Blinking con una constante False.

Finalmente, en la figura 3.5 se muestra funcionando el panel frontal final del instrumento virtual de monitoreo de temperatura ambiente y de reacción.

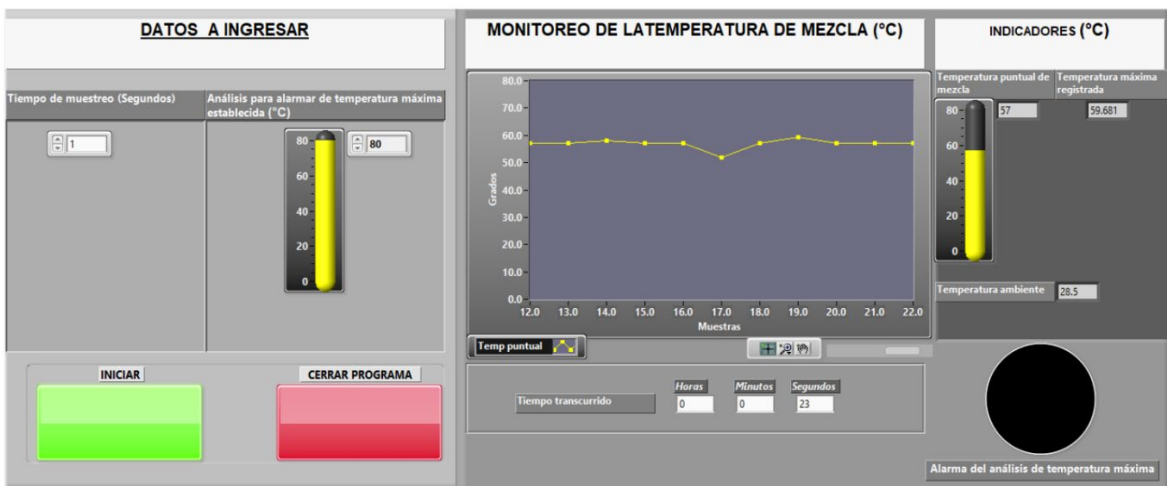


Figura 3.5 Panel frontal del instrumento virtual de monitoreo de temperatura ambiente y reacción.

3.1.1 PWM para el control de la temperatura de reacción

Se agregó al instrumento virtual de monitoreo la modulación por ancho de pulso (PWM) como método de control abierto para regular la temperatura de la plancha calefactora, encargada de proporcionar calor durante la reacción de transesterificación. Para implementar este control abierto, se utilizó el Express VI llamado 'Simulate Signal' dentro del While Loop principal.

La señal simulada se adaptó a una señal cuadrada con modificaciones internas para acondicionarla de 0 a 5 volts. Se añadió un valor constante de 2.5 para la Phase y el Offset de la señal cuadrada. La frecuencia se estableció en un valor constante de 0.35, de manera a prueba y error, esto con la finalidad de las variaciones de la corriente alterna.

El proceso inicia con la configuración de la señal simulada mediante el VI Simulate Signal dentro del bucle principal. Luego, fuera del bucle, se declara un VI DAQmx Create Channel (AO-Voltage-Basic).vi con valores constantes que van desde 0 hasta 5 voltios. Seguidamente, se añade la función DAQmx Write (Analog DBL 1Chan 1Samp).vi para escribir y enviar la señal generada. Esta señal, utilizada como control, se establece en la terminal analógica AO1 del USB 6009, tal como se muestra en la figura 3.6.

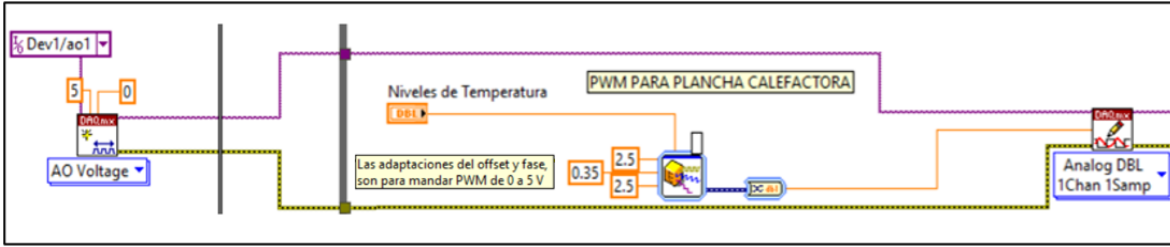


Figura 3.6 Modulación por ancho del pulso para la plancha calefactora.

Finalmente, se procedió a cerrar el canal fuera del bucle principal utilizando las funciones DAQmx Stop Task.vi y DAQmx Clear Task.vi.

Para la interfaz electrónica del PWM con la plancha calefactora, se dispusieron los siguientes componentes: MOC3021, TRIAC BTA06 600V, resistencias de $510\ \Omega$ y $220\ \Omega$, y el USB 6009. Estos elementos se organizaron junto con la alimentación de corriente alterna de 127 V y el circuito de retroalimentación con la plancha calefactora, como se ilustra en la figura 3.7.

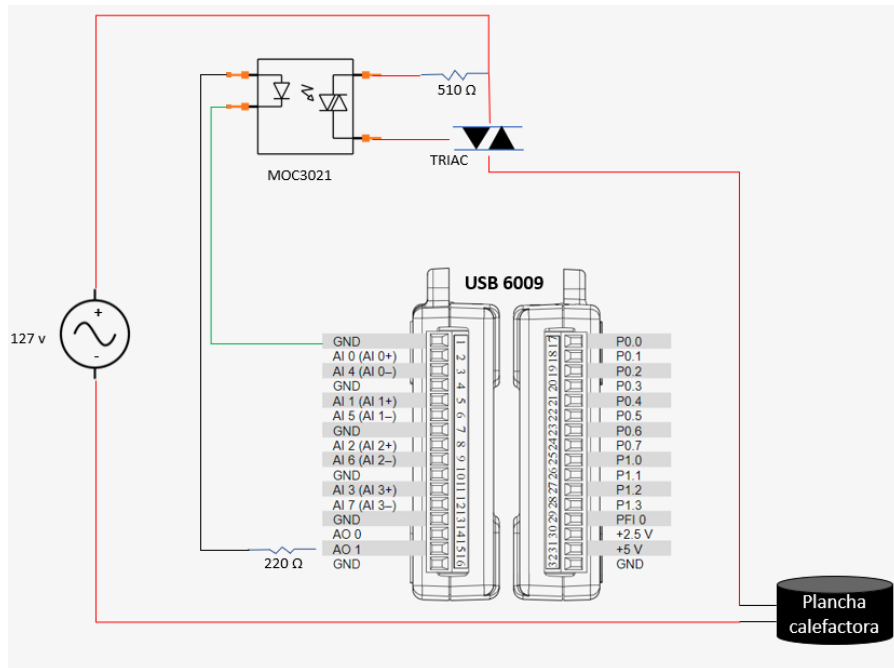


Figura 3.7 Esquemático de la interfaz electrónica para el PWM con la plancha calefactora.

3.1.2 PID para la temperatura de reacción

El controlador proporcional, integral y derivativo (PID) se integró en el sistema para regular el Duty Cycle del PWM generado previamente. Para esto, se utilizó la función NI_PID_pid.lvlib:PID.vi, la cual se configuró con un rango de salida de 0 a 100, coincidiendo con el rango del Duty Cycle del PWM. Además, se establecieron valores constantes para las ganancias del PID, con valores de 1 para la ganancia proporcional, 0.01 para la ganancia integral y 0 para la ganancia derivativa. Dichos valores se establecieron mediante experimentaciones en tiempo real aplicando un enfoque empírico considerando el comportamiento de la plancha calefactora y el control PWM debido a que la plancha calefactora calienta en exceso y es necesario mandar inmediatamente un PWM con valor de 0 para apagarse. Los valores entre la ganancia proporcional y la ganancia integral producen un control PID con una respuesta relativamente rápida. No obstante, se prestó especial atención a la velocidad de respuesta, asegurando que fuera rápida, pero sin excederse, con el fin de evitar inestabilidades o sobrecalentamientos.

La variable de temperatura actual de la reacción se introdujo en la entrada Process Variable de la función PID, mientras que en la entrada Setpoint se estableció el valor deseado de temperatura, en grados Celsius. Esto permite que el controlador PID ajuste dinámicamente el Duty Cycle del PWM para mantener la temperatura de la reacción lo más cercana posible al valor establecido. En la figura 3.8 se puede apreciar la configuración del controlador PID adaptado al PWM existente. Este enfoque proporciona un control preciso y adaptable de la temperatura de la reacción, lo que es crucial para mantener las condiciones óptimas del proceso de transesterificación.

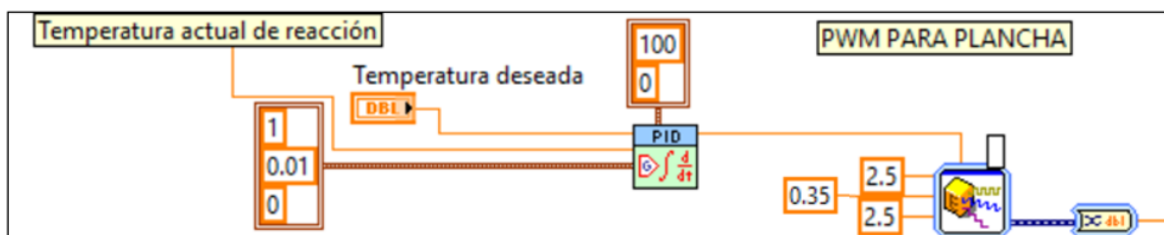


Figura 3.8. Función PID acondicionada con el PWM para la plancha calefactora.

3.2 Medición y monitoreo de las revoluciones en la producción de biodiésel

Para medir las revoluciones de la batidora eléctrica, se optó por utilizar un sensor codificador rotatorio óptico incremental bifásico. Este tipo de sensor es comúnmente utilizado para la detección de movimiento rotacional en aplicaciones industriales y de automatización. Funciona emitiendo pulsos eléctricos a medida que el eje rotativo al que está conectado se mueve, lo que permite calcular la velocidad de rotación.

El sensor seleccionado opera con una señal digital y funciona dentro de un rango de voltaje de 5 V a 24 V. Ofrece una salida de 600 pulsos por minuto, lo que proporciona una precisión confiable en la medición de las revoluciones por minuto (RPM). Con un alcance máximo de 5000 rpm, este sensor es adecuado para aplicaciones que requieren una alta velocidad de rotación, como en el caso de una batidora eléctrica.

En la figura 3.9.a, se puede apreciar el diseño del sensor, destacando su tamaño compacto y su estructura robusta, lo que lo hace adecuado para entornos industriales. Además, en la figura 3.9.b se muestra cómo se adaptó el sensor a la flecha rotatoria de la batidora eléctrica, asegurando una conexión segura y precisa para una medición confiable de las revoluciones.



a) Codificador rotatorio óptico incremental bifásico b) Codificador rotatorio óptico incremental bifásico con aspa adaptada a la batidora eléctrica

Figura 3.9. Sensor codificador rotatorio óptico incremental bifásico para medición de revoluciones.

En la figura 3.9.b se puede observar un acoplamiento tipo prisionero en la flecha rotatoria con la flecha del sensor. Esta adaptación tiene la finalidad de medir adecuadamente las revoluciones que brinda la batidora eléctrica mientras que con la otra flecha rotaria agita la reacción; las 2 flechas rotarias de la batidora eléctrica giran a la misma velocidad.

Para llevar a cabo la adquisición de datos con la interfaz electrónica, se acondiciono el sensor codificador rotatorio óptico incremental, un amplificador LM324N, el dispositivo de adquisición de datos USB 6009 y una resistencia de 91 kΩ. La terminal de voltaje de entrada del codificador y el amplificador, se conectan directamente a los 5 V que suministra el USB 6009. En el caso voltaje de salida del codificador, se envía la señal a la entrada del amplificador para elevar el voltaje de la misma. La terminal GND se conecta en ambos componentes y finalmente se conecta la resistencia de 91 kΩ a la salida del voltaje de salida del amplificador para leer la señal digital en la terminal PFI0. En la figura 3.10 se muestra el diagrama de conexiones del codificador rotatorio óptico incremental con sus componentes necesarios para su buen funcionamiento.

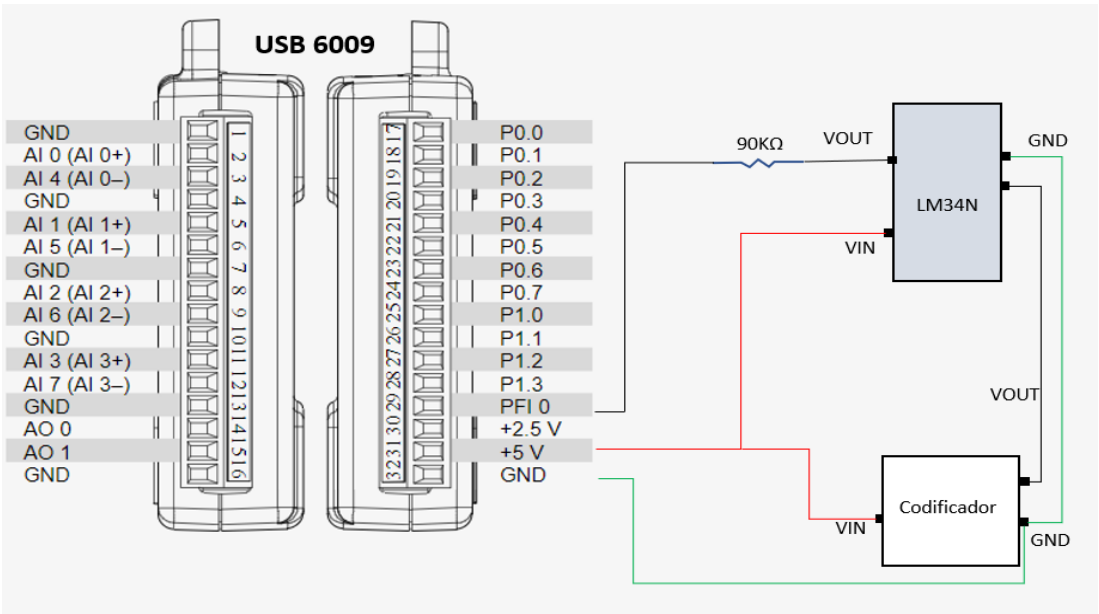


Figura 3.10. Diagrama de conexiones del sensor del codificador rotatorio óptico incremental con el USB 6009.

Para desarrollar el instrumento virtual de monitoreo en LabVIEW®, se inició creando un bucle principal que formaría la base del programa. Dentro de este bucle, se utilizó la función 'DAQmx Create Channel (CI-Count Edges).vi' para configurar un canal de entrada digital que recibiría las señales del sensor codificador rotatorio óptico incremental. Se definieron valores constantes, como 'Count Up' y 'Falling', que serían esenciales para el conteo de pulsos.

Posteriormente, se añadió la función 'DAQmx Read (Counter DBL 1Chan 1Samp).vi' dentro del bucle principal para leer la señal digital proveniente del sensor. Esta señal se procesó a través de un 'Case Structure' que incluía operaciones aritméticas para calcular las revoluciones por minuto (RPM). El 'Case Structure' se activó mediante un cronómetro creado con un 'Elapsed Time', lo que permitió que las mediciones se actualizarán cada medio segundo, garantizando una respuesta rápida y actualizada en tiempo real.

En la figura 3.11 se detallan las operaciones llevadas a cabo dentro del 'Case Structure', proporcionando una representación visual de cómo se procesan los datos del sensor para calcular las RPM.

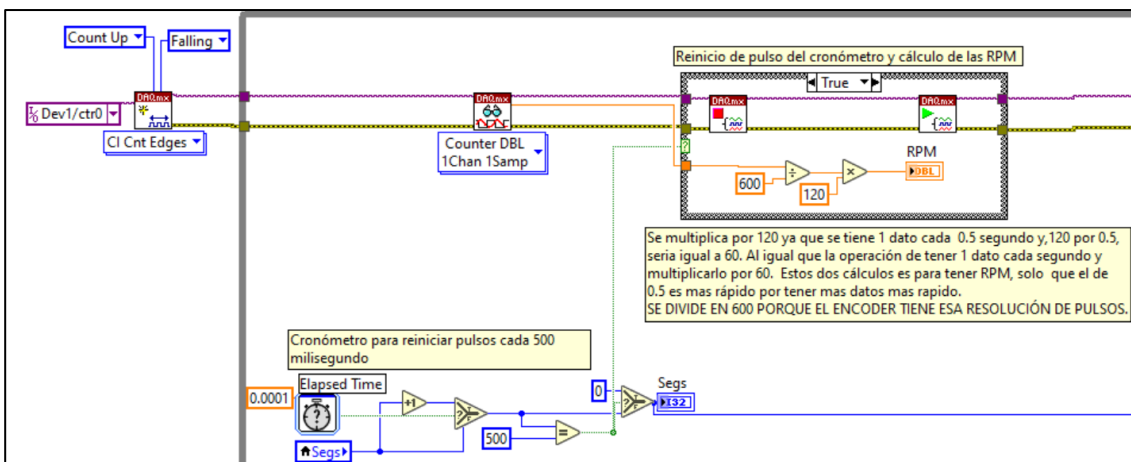


Figura 3.11 Operaciones para obtener revoluciones por minuto.

Como se puede observar en la figura 3.11, las funciones de DAQmx Stop Task.vi y DAQmx Clear task.vi. dentro del Case Structure, tienen la finalidad de no acumular los

pulsos en la terminal PF10 del USB 6009 y empezar nuevamente a contar de 0 cada medio segundo.

Finalmente, fuera del While Loop principal, se cierra el canal conectando a las funciones DAQmx Stop Task.vi y DAQmx Clear task.vi.

3.2.1 PWM para el control de la agitación

Se agregó al instrumento virtual de monitoreo la modulación por ancho de pulso (PWM) como control abierto de la batidora eléctrica que brindará las revoluciones por minuto como agitación a la reacción de transesterificación. Para este control abierto se empleó el Express VI llamado Simulate Signal dentro del While Loop principal .

El proceso de adaptación de la señal simulada a una señal cuadrada con modificaciones internas para acondicionarla a un rango de 0 a 5 volts se realizó de la siguiente manera: primero, se ajustó un valor constante de 2.5 para la fase y el offset de la señal cuadrada. Esto aseguró que la señal estuviera centrada en el rango deseado. Luego, se estableció la frecuencia en un valor constante de 1, determinado mediante prueba y error, con el propósito de adecuar las variaciones de la corriente alterna. Este proceso garantizó que la señal simulada estuviera preparada para su uso en el sistema de adquisición de datos, proporcionando una representación precisa de los datos obtenidos.

Una vez teniendo la configuración de la Simulate Signal, se declaró fuera del While Loop principal un DAQmx Create Channel (AO-Voltage-Basic).vi con valores constantes de 0 a 5 volts. Después, se agregó la función DAQmx Write (Analog DBL 1Chan 1Samp).vi para escribir la señal enviada. Esta señal escrita y enviada como control se estableció en la terminal analógica AO0 del USB 6009 como se puede ver en la figura 3.12.

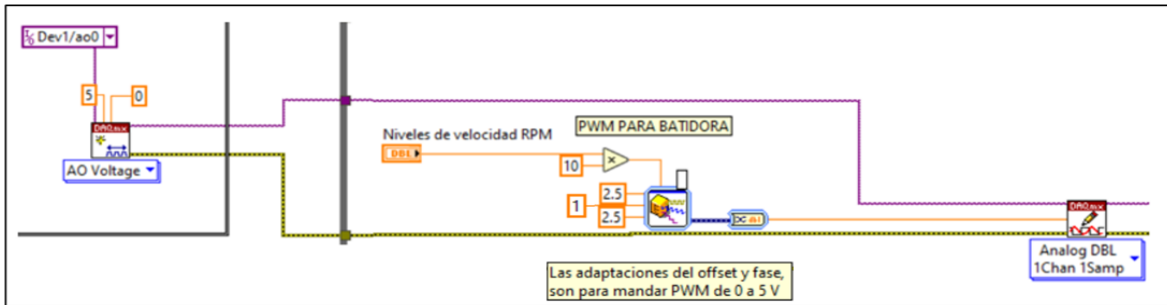


Figura 3.12 Modulación por ancho del pulso para la batidora eléctrica.

Por último, se cierra el canal fuera del bucle principal con las funciones DAQmx Stop Task.vi y DAQmx Clear task.vi.

Para la interfaz electrónica del PWM con la plancha calefactora, se acondiciono con los siguientes componentes: MOC3021, TRIAC BTA06 600 V, resistencias de 510Ω y 220Ω y el USB 6009. Estos elementos se conectaron a la alimentación de corriente alterna de 127 V y se integraron en el circuito retroalimentado con la batidora eléctrica, como se muestra en la figura 3.13.

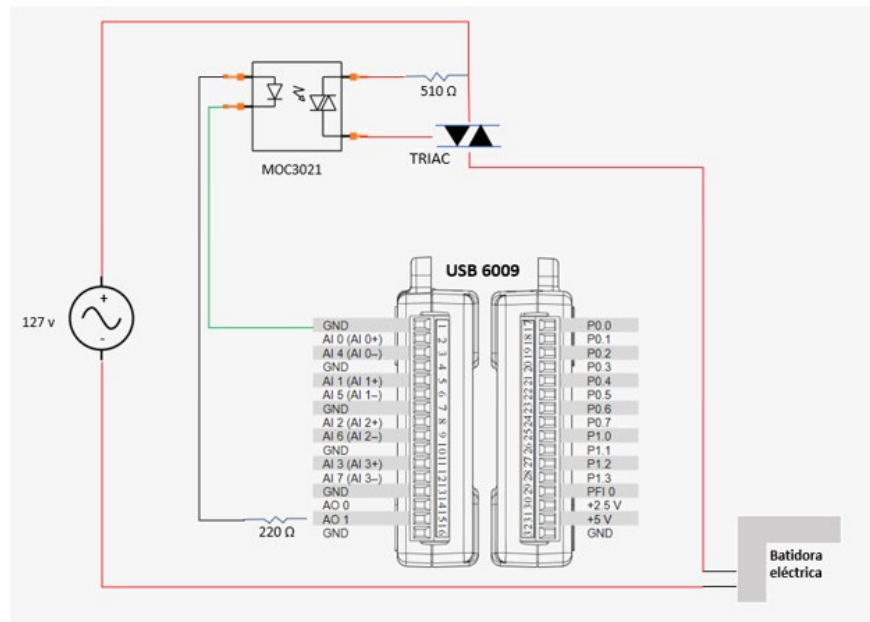


Figura 3.13 Esquemático de la interfaz electrónica para el PWM con la batidora eléctrica.

3.3 Medición y monitoreo de la corriente en la producción de biodiésel

Para la medición y monitoreo de la corriente en la producción de biodiésel, se optó por utilizar el sensor ACS711EX para medir la corriente consumida tanto por la plancha calefactora como por la batidora eléctrica. Este sensor, diseñado para ofrecer mediciones que operan en un rango de voltaje de 3 V a 5.5 V, lo que le permite adaptarse fácilmente a diferentes sistemas de alimentación. Su capacidad para medir corrientes en un amplio rango de -31 a 31 Amperios lo convierte en una opción versátil para aplicaciones que requieren monitoreo preciso de la corriente. La figura 3.14 muestra el sensor montado en su placa correspondiente, listo para ser integrado directamente en el sistema de adquisición de datos y control.

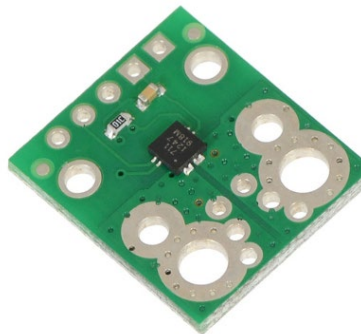


Figura 3.14 Sensor de corriente ACS711EX.

La parte de la adquisición de datos con la interfaz electrónica, se adecuo el sensor ACS711EX, el USB 6009 y la resistencia de 10 k Ω . La terminal de voltaje de entrada, se conecta directamente a los 5 V que suministra el USB 6009 y, a su vez, la resistencia pasa a través de los 5 V que conectan en la terminal FAULT del sensor. El voltaje de salida y la GND se conectan directamente en su respectiva terminal.

Task.vi que entra al While loop principal. En esta, se creó una tarea llamada voltaje5 que mide 2 entradas analógicas de -10 V a 10 V con 1 sample (On Demand). Después, se agregó dentro del While Loop principal la función DAQmx read.vi configurándola a Analog 1D DBL NChan 1Samp y la función llamada Index Array para que ingresen ambas señales leídas. En la figura 3.16 se puede observar lo anterior mencionado.

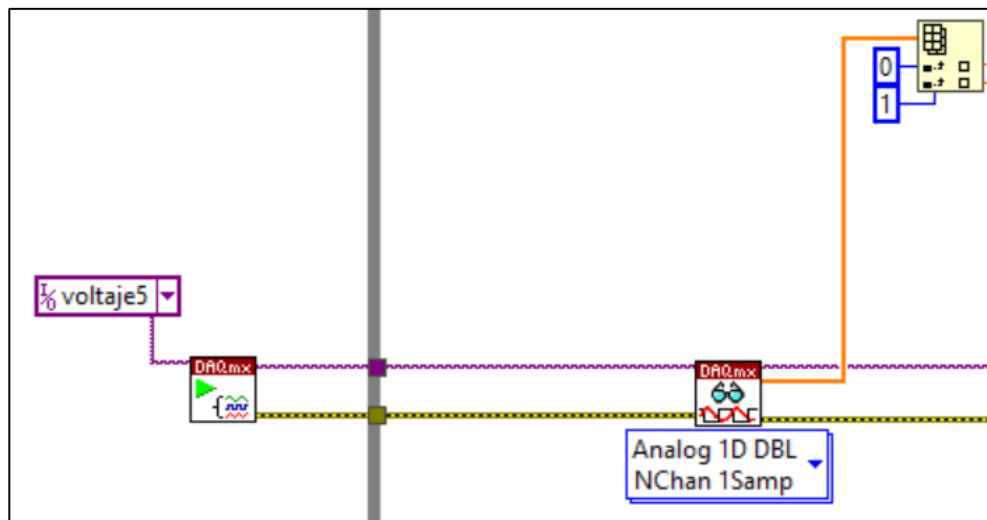


Figura 3.16 Adquisición de señal de corriente del aparato eléctrico y los 5 V del USB 6009.

Posteriormente, se realizaron los cálculos mediante operaciones aritméticas y condicionales para obtener la corriente real y la corriente Root Mean Square (RMS). El valor de 5 V se leyó desde una terminal del USB 6009 debido a que no son 5 V constantes; siempre oscila. Los diferentes cálculos se realizaron con la ayuda de la hoja de datos del sensor ACS711EX y cálculos establecidos para la onda senoidal. A continuación, se muestra la ecuación de voltaje de salida como la de corriente según las conexiones eléctricas en base a la hoja de datos:

$$V_{out} = \frac{V_{cc}}{2} + i * \frac{V_{cc}}{73.3 A} \quad (4)$$

$$i = 73.3A * \frac{V_{out}}{V_{cc}} - 36.7 A \quad (5)$$

En la figura 3.17 se observa y detalla dichos cálculos.

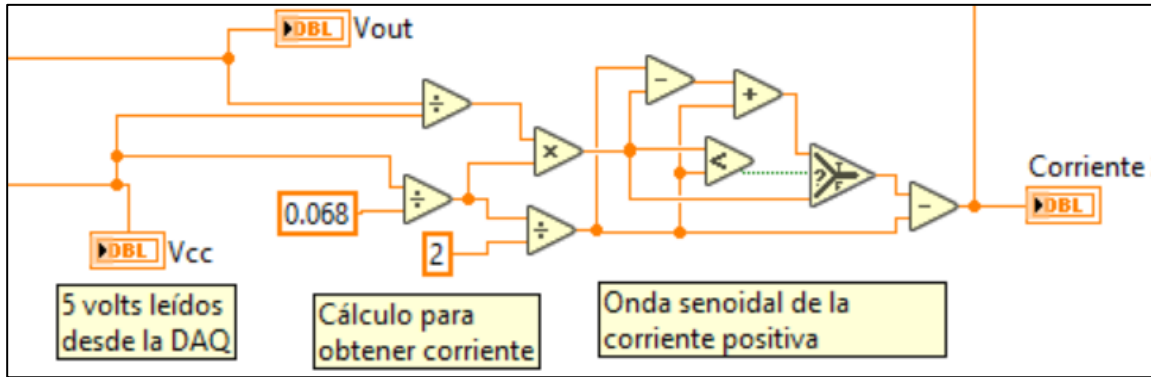


Figura 3.17 Cálculos para obtener el valor de la corriente consumida.

Una vez obtenida la corriente, se procedió a realizar un SubVI con los cálculos establecidos para la corriente RMS consumida por el aparato eléctrico. Se tomó el valor calculado de la corriente y se envió al SubVI de operaciones aritméticas, condicionales y shift registers. En la figura 3.18 se puede observar cómo se envía al SubVI y en la figura 3.19 se muestran los cálculos para obtener la corriente RMS.

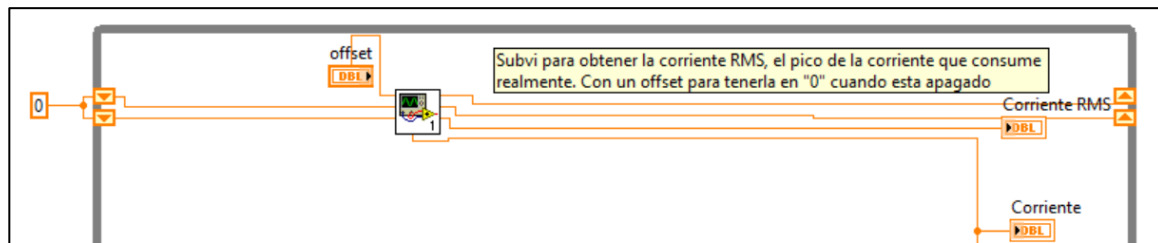


Figura 3.18 Señal de corriente enviada a SubVI de corriente RMS.

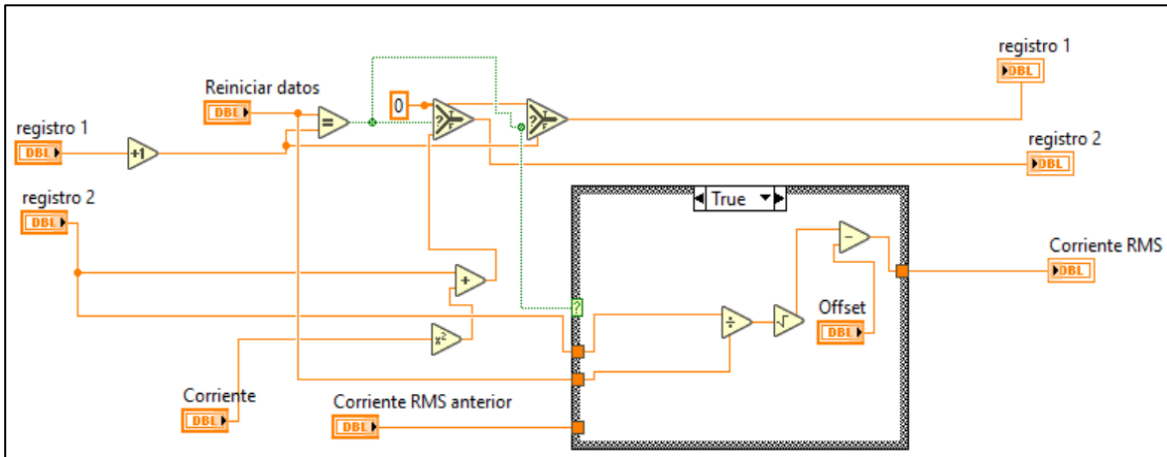


Figura 3.19 Cálculos para obtener la corriente RMS consumida.

En la figura 3.19, se toman los cálculos por el método gráfico para obtener el valor de la corriente RMS. La ecuación (6) demuestra la obtención de la corriente RMS y corrobora el diagrama de bloques de la figura 3.19. La ecuación (6) se puede definir como “La raíz cuadrada del promedio (media) de la suma de los valores de las ordenadas al cuadrado” y expresarla como:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{(I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_{n1}^n)}{N \text{ veces de } I}} \quad (6)$$

Por último, se cierra el canal fuera del While Loop principal con las funciones DAQmx Stop Task.vi y DAQmx Clear task.vi.

3.3.1 Cálculos para el consumo energético en kWh

Partiendo de la Ley de Ohm, que establece que el voltaje a través de un conductor es directamente proporcional a la corriente que fluye a través de él, dada una resistencia constante (ecuación 7). Se concluye que la potencia medida en Watts, es la velocidad a la que un circuito transfiere energía eléctrica.

$$V = I * R \quad (7)$$

Donde V es igual a voltaje, I a la corriente en amperes y R a la resistencia en Ohms.

Por lo tanto, para calcular la potencia consumida de un aparato eléctrico es necesario conocer la corriente y el voltaje consumido y después multiplicarse entre sí para obtener potencia en Watts. En la ecuación (8) se muestra la fórmula de potencia

$$P = V * I \quad (8)$$

Donde P es igual a potencia en Watts, V al voltaje en volts e I a la corriente en amperes.

Una vez teniendo la fórmula de potencia, se procedió a multiplicarse por el tiempo en horas para obtener Wh y dividirse entre 1000 para agregar el prefijo Kilo. Estas unidades son para un mejor manejo de las mismas como los estándares internacionales establecidos por organizaciones como la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) y el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Por lo tanto, se toma la corriente RMS del sensor ACS711EX y se multiplica por el valor constante de 127 haciendo referencia a los 127 V suministrados de la línea eléctrica alterna. Después, se multiplica por la constante $\frac{1}{3600}$ que es el tiempo en horas calculada cada segundo transcurrido (1 hora tiene 3600 segundos) y finalmente se divide en 1000 para obtener kWh (ecuación 9).

$$P = \frac{V * I_{RMS}}{1000} * horas = kWh \quad (9)$$

Finalmente, la ecuación (9) se agrega al instrumento virtual de medición y monitoreo de corriente en la producción de biodiésel y se mide en tiempo real el consumo energético de ambos aparatos eléctricos.

3.4 Integración de los instrumentos virtuales y la interfaz electrónica

Una vez funcionando independientemente los instrumentos virtuales de monitoreo y control, se procedió a unirlos en un solo instrumento virtual. Todos los diagramas de bloques se mantuvieron idénticos a excepción de la adquisición de datos de las señales analógicas y se creó un único While Loop principal. Asimismo, la interfaz electrónica se mantuvo idéntica añadiéndole tomacorrientes para los aparatos eléctricos, disipadores para los tiristores y trasladándola a una placa fenólica perforada con su armazón protector.

Las señales analógicas se declararon en una DAQmx Start Task.vi que entra al While loop principal. En esta, se creó una tarea llamada 5señales que mide 5 entradas analógicas de -10 V a 10 V con 1 sample (On Demand). Después, se agregó dentro del While Loop principal la función DAQmx read.vi configurándola a Analog 1D DBL NChan 1Samp y la función llamada Index Array para que ingresen las 5 señales leídas. Por último, se envía cada una a su algoritmo establecido mencionado en las secciones anteriores. En la figura 3.20 se muestra la adquisición de datos de las señales analógicas.

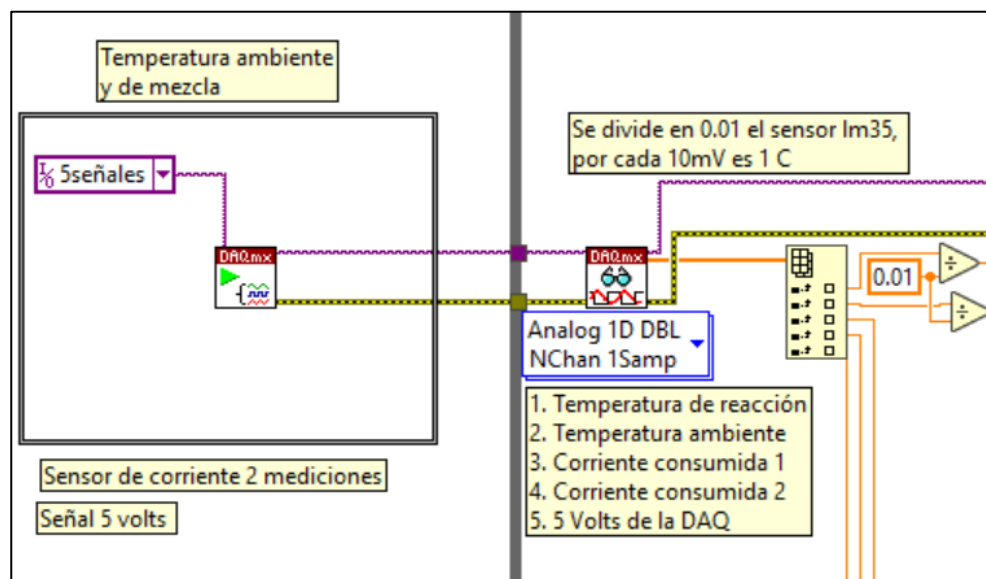


Figura 3.20 Adquisición de datos de las 5 señales analógicas.

El proceso de implementación de la interfaz electrónica comenzó con pruebas preliminares en un protoboard para garantizar el funcionamiento adecuado de los circuitos electrónicos junto con la fuente de 5 V del USB 6009 y la conexión a tierra (GND). Una vez confirmado su correcto funcionamiento, todos los componentes se trasladaron a una placa fenólica perforada para una disposición más permanente y ordenada. Se estableció una fuente principal de 5 V para cada componente que requiere alimentación, mientras que la conexión a tierra (GND) se definió como un punto de referencia común para todas las terminales a ser conectadas a tierra.

Los tomacorrientes necesarios para la conexión de la plancha calefactora y la batidora eléctrica fueron incorporados en la interfaz electrónica, junto con un armazón protector para garantizar la seguridad durante el funcionamiento. Además, se añadió cable calibre #16 para manejar la corriente de 127 V de manera segura y eficiente. El diagrama de conexiones de la interfaz electrónica para un solo instrumento virtual se muestra en la figura 3.21, proporcionando una representación visual de la configuración final del sistema.

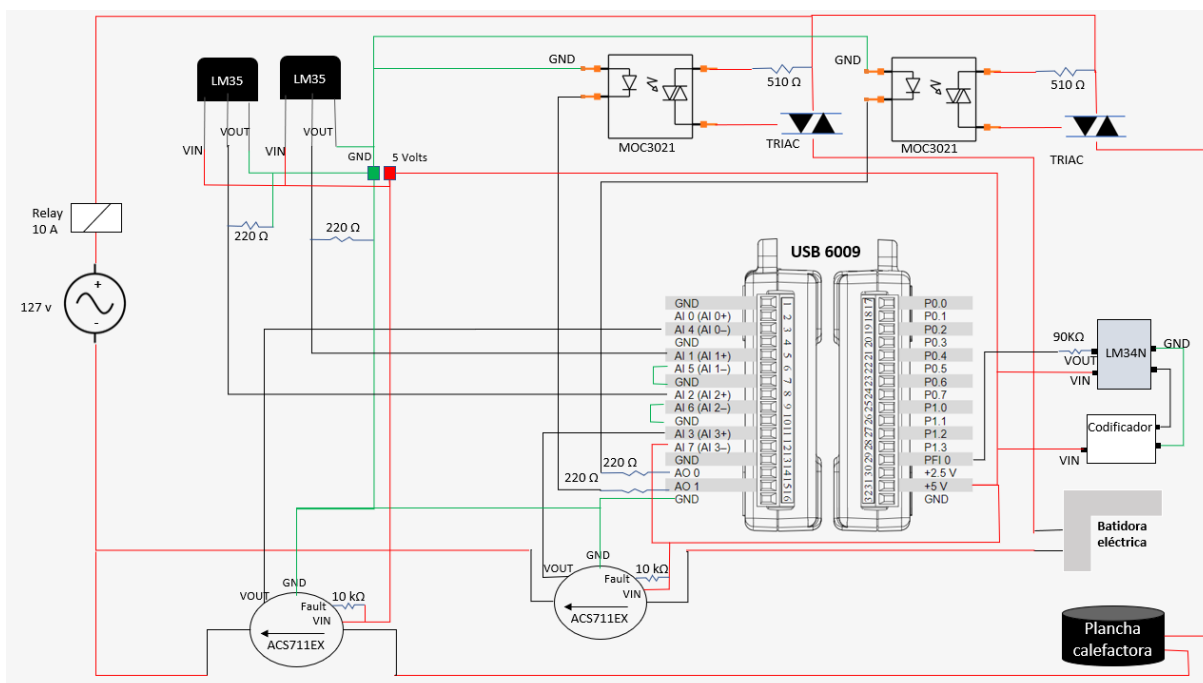


Figura 3.21 Diagrama de conexiones en conjunto de los sensores y el USB 6009.

En la próxima sección, se detallará la experimentación realizada utilizando esta interfaz electrónica, así como los resultados obtenidos. Se analizarán en profundidad los datos recopilados y se discutirán las conclusiones derivadas de estos resultados, lo que permitirá una comprensión más completa del funcionamiento y la eficacia del sistema integrado.

Capítulo 4

4. Experimentos y resultados

Esta sección presenta el montaje de los equipos y materiales necesarios para llevar a cabo la aplicación del instrumento virtual de control y monitoreo en la producción de biodiésel. Además, se muestran los resultados del comportamiento de las variables monitoreadas y controladas (temperatura ambiente, temperatura de reacción, agitación y consumo energético) obtenidos de la generación de un archivo tipo Excel.

La experimentación se llevó a cabo en el laboratorio de Biopelículas en el Instituto de Ingeniería de Mexicali durante 1 hora y 10 minutos con una tasa de muestreo cada segundo. Se emplearon 250 ml de aceite residual, 0.875 gr de NaOH y 50 ml de metanol.

4.1 Equipos, reactivos y materia prima en la producción de biodiésel

Para el calor necesario de la reacción de transesterificación, se empleó la plancha calefactora HYCC modelo SH-2. Tiene una potencia de calentamiento de 180 W y una temperatura máxima de 380 °C. Funciona con 127 Volts y 60 Hertz. Por último, cuenta con agitador magnético ajustable de 100 a 2000 RPM, pero en este caso solo utilizaremos el calentamiento mediante el control PID que manipula el PWM. A continuación, se presenta la plancha calefactora HYCC SH-2.



Figura 4.1 Plancha calefactora HYCC SH-2.

Del mismo modo, para la agitación necesaria del proceso y lograr medir y controlar las revoluciones, se utilizó la batidora de mano modelo RC-093 de la marca RCA como el agitador de proceso. Cuenta con 7 velocidades, y 2 entradas para espas. Por último, tiene una potencia de 100 Watts y funciona con 120 Volts y 60 Hertz. A continuación, se presenta la batidora RCA RC-093.



Figura 4.2 Batidora de mano RCA RC-093.

Por otro lado, los materiales esenciales para la preparación de la producción de biodiésel fueron los siguientes: vaso precipitado, probeta y tubo de ensayo. En la figura 4.3 se presentan dichos materiales.



a) Vaso precipitado de 500 ml

b) Tubo de ensayo de 50 ml

c) Probeta de 50 ml

Figura 4.3 Materiales esenciales para la preparación de la producción de biodiésel.

La figura 4.3.a ilustra el vaso precipitado donde sucedió el precalentamiento del aceite de cocina usado como la reacción de transesterificación. La figura 4.3.b es donde se generó el metóxido entre el hidróxido de sodio y el metanol. Por último, la figura 4.3.c muestra la probeta donde se midió los mililitros a emplear del aceite de cocina usado.

Por último, en la figura 4.4 se presentan los reactivos y materia prima utilizados para la reacción de transesterificación.



a) Hidróxido de Sodio (NaOH)

b) Alcohol Metílico (Metanol)

c) Aceite residual

Figura 4.4 Reactivos y materia prima para la preparación de la producción de biodiésel.

La figura 4.4.a ilustra el catalizador empleado; hidróxido de sodio. La figura 4.4.b muestra el alcohol empleado; metanol. Por último, en la figura 4.4.c muestra el aceite residual que fue la materia prima que se utilizó para convertirse en biodiésel.

4.1.1 Montaje

Primeramente, se montó y se sujetó el agitador en una barra de laboratorio de tal manera que proporcionara la agitación adecuadamente y, a su vez, midiera correctamente la señal del codificador. Además, se centró la plancha calefactora junto con el vaso precipitado donde se llevó a cabo la reacción de transesterificación. Luego, se colocó el sensor de temperatura dentro del vaso precipitado para registrar la señal correspondiente.

Finalmente, se organizaron todos los cables eléctricos de los equipos y sensores para mejorar la visualización y facilitar la manipulación. En la figura 4.5 se puede observar el montaje del área de trabajo con todo lo mencionado anteriormente; aquí es donde tuvo lugar la reacción de transesterificación.



Figura 4.5. Montaje de los equipos y sensores para la reacción de transesterificación.

Asimismo, se acomodó el armazón de la interfaz electrónica junto con la DAQ 6009 en una posición estratégicamente centrada respecto a los equipos, sensores y computadora, en donde se pudieran conectar los cables de los aparatos eléctricos al armazón, los cables de los sensores entre los aparatos eléctricos y el armazón, el cable de la corriente alterna hacia el armazón y el cable USB A-B de la DAQ 6009 a la computadora.

Por último, se acomodaron todos los cables para una mejor visualización y facilidad de manipularlos. En la figura 4.6 se puede apreciar el armazón de la interfaz electrónica junto con la DAQ 6009.

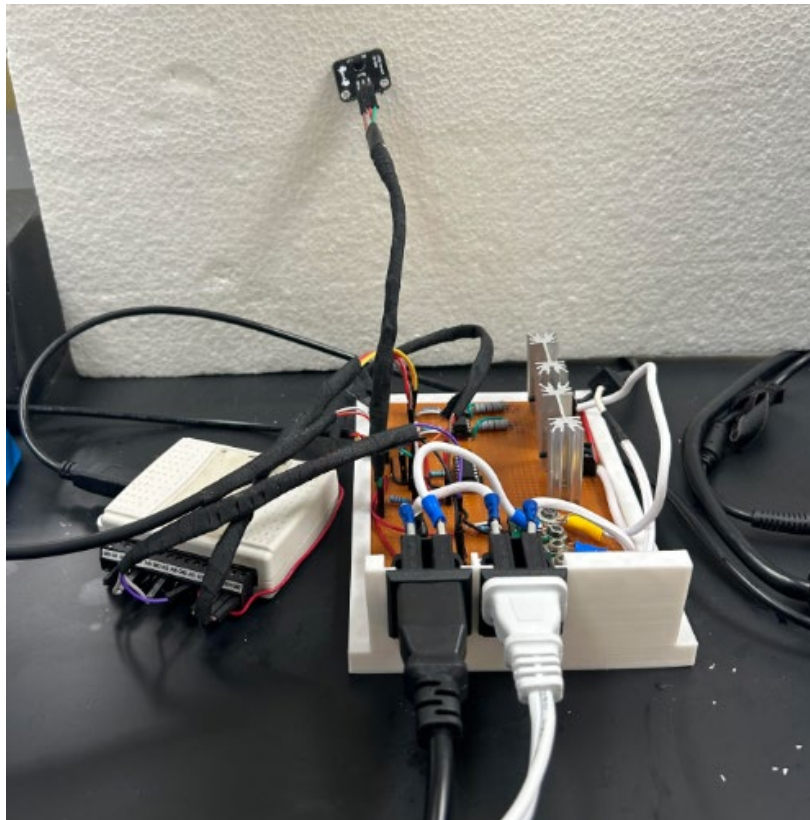


Figura 4.6 Montaje del armazón de la interfaz electrónica junto con la DAQ 6009.

Posteriormente, se montó la computadora a la derecha de la interfaz electrónica para facilitar el acceso y la operación. Además, se conectó un monitor adicional para mejorar la visualización del panel frontal del instrumento virtual de control y monitoreo, lo que

permitió una supervisión más detallada y precisa de los parámetros experimentales.

La computadora estaba conectada con varios cables esenciales para su funcionamiento óptimo. El cable USB A-B de la DAQ 6009 se conectó para permitir la adquisición de datos, asegurando que las señales y lecturas del experimento fueran capturadas correctamente y transmitidas al software de control. El cable HDMI se utilizó para conectar el monitor, proporcionando una pantalla de alta resolución que facilitó la visualización clara y precisa de los datos y gráficos en tiempo real. Además, se conectó el cable de la fuente de alimentación para garantizar que la computadora funcionara de manera continua y sin interrupciones durante el experimento.

En la figura 4.7, se pueden observar estas conexiones en la computadora, ilustrando la disposición cuidadosa y organizada de los cables. Esta configuración no solo mejoró la eficiencia del monitoreo y control, sino que también minimizó el riesgo de errores y problemas técnicos durante la experimentación. La disposición adecuada de los componentes y conexiones es crucial para mantener un entorno de trabajo seguro y eficiente, lo que contribuye significativamente al éxito del experimento.

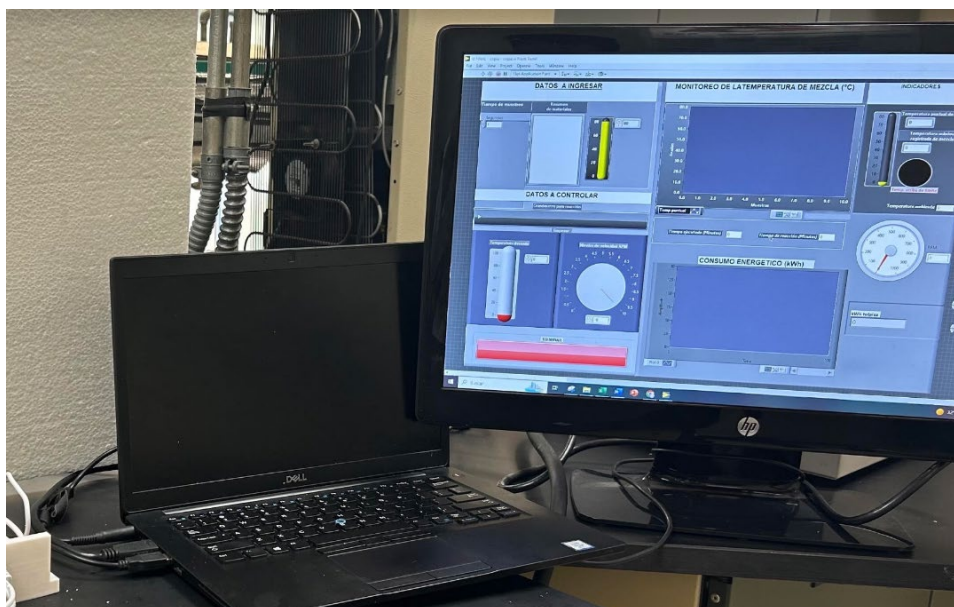


Figura 4.7 Montaje de la computadora y el monitor.

Finalmente, en la figura 4.8 se puede apreciar el área de trabajo del montaje en conjunto. Los equipos y materiales se colocaron de manera estratégica para una mejor manipulación de control y monitoreo durante las experimentaciones. Para seccionar los equipos adecuadamente, se colocaron al lado derecho solamente los equipos de monitoreo y control que son: la computadora y el monitor. Del lado izquierdo, se adaptaron los equipos de experimentación y adquisición de datos que son: el agitador junto con el codificador y el sensor LM35 encapsulado, la interfaz electrónica junto con los sensores de corriente y el sensor LM35 y la DAQ 6009.

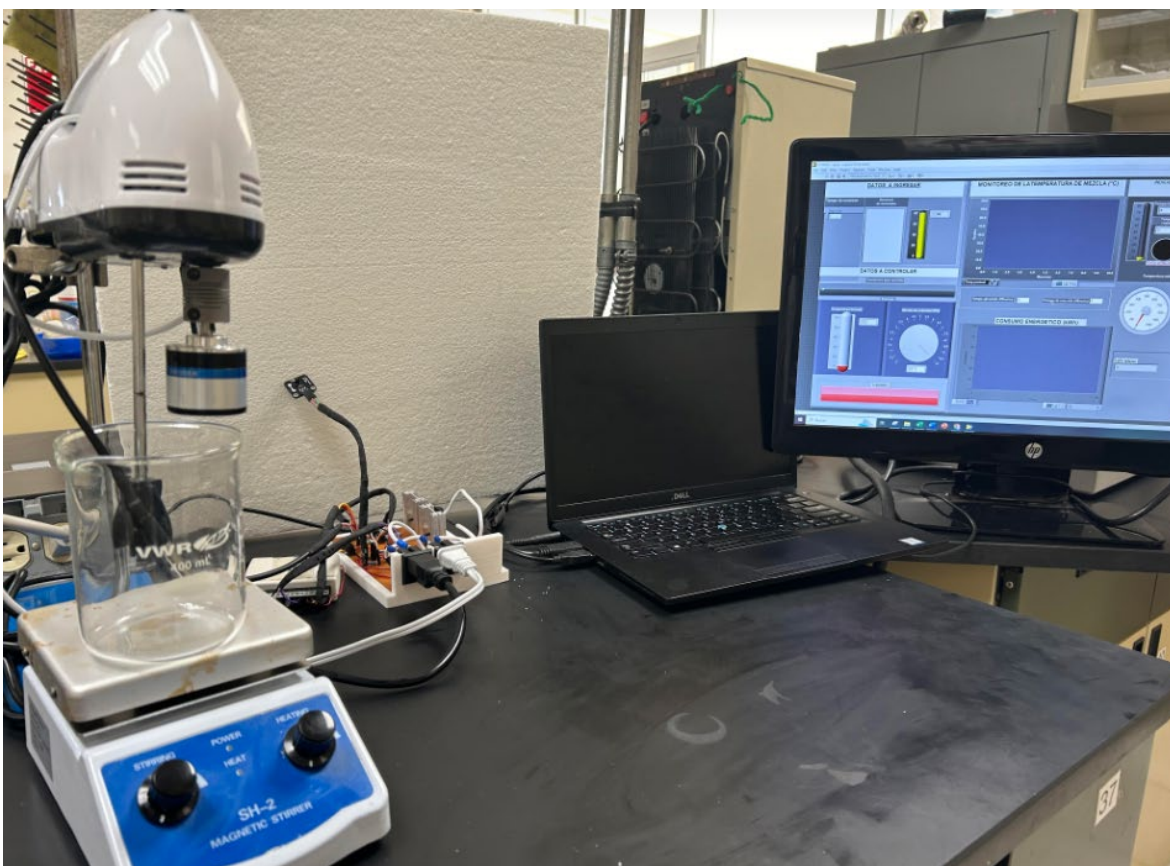


Figura 4.8. Montaje final.

4.2 Resultados de temperatura ambiente

Para la temperatura ambiente, se tomaron los datos del sensor LM35 tipo módulo. Este sensor se colocó de manera que no interfiriera el calor disipado por la plancha o por la computadora y mediante operaciones aritméticas junto con su interfaz electrónica obtener el dato en centígrados. A continuación, se presenta la figura 4.9, donde detalla mediante una gráfica el comportamiento de la temperatura ambiental.

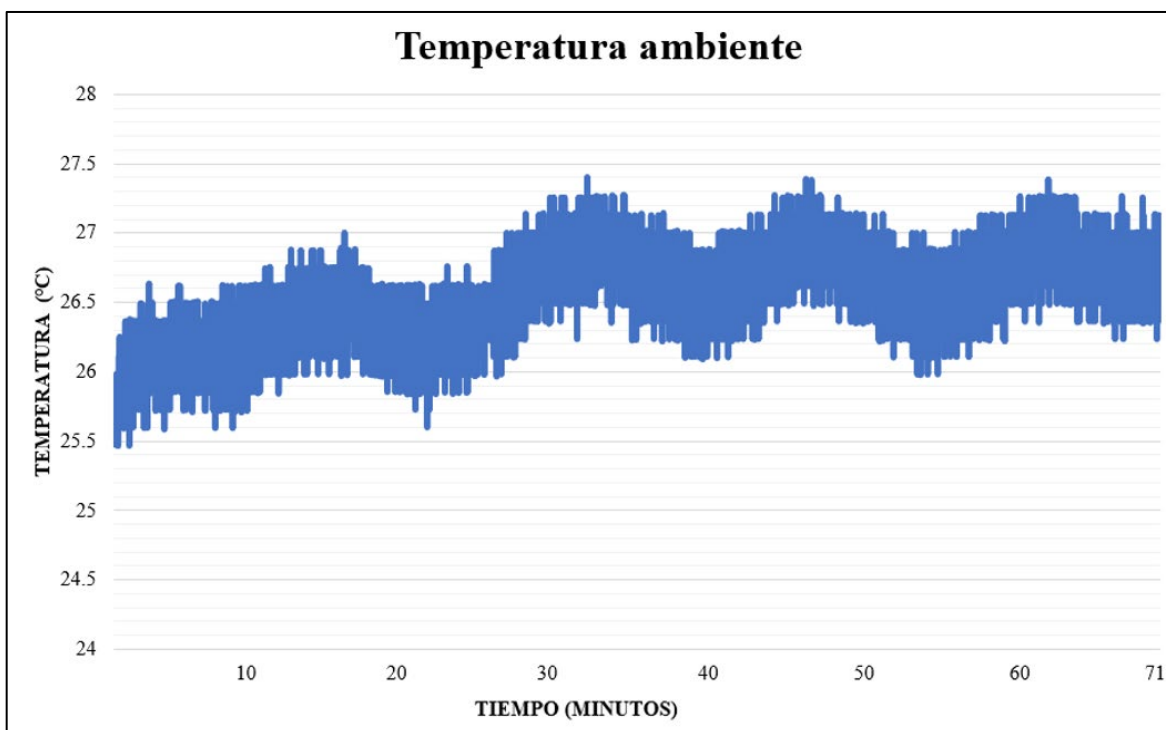


Figura 4.9. Monitoreo de la temperatura ambiente en el proceso de producción de biodiésel.

Como se puede observar en la figura 4.9, la temperatura ambiente se mantuvo de manera constante, oscilando entre 25.5 °C y 27.4 °C. Se aprecia cómo el comportamiento de las temperaturas puntuales durante los 71 minutos de experimentación fue en aumento, lo cual se debe al calor disipado por la plancha calefactora, así como por los componentes electrónicos y la computadora. Sin embargo, este comportamiento es positivo, ya que la temperatura solo osciló 2 grados Celsius, indicando un entorno controlado y estable.

Por último, se puede apreciar cómo la temperatura ambiente se adaptó al algoritmo PID, manteniendo un comportamiento con subidas y bajadas. Las subidas en la temperatura fueron provocadas por la respuesta del PID a la temperatura deseada; una vez alcanzada la temperatura objetivo, la plancha calefactora añadía más calor para mantenerla. Las bajadas ocurrieron debido a la disipación del calor de la plancha calefactora; al descender y acercarse nuevamente a la temperatura deseada, el PID ajustaba la entrada de calor para estabilizar la temperatura.

Este comportamiento oscilatorio es característico del control PID, que ajusta continuamente la salida para minimizar la diferencia entre la temperatura medida y la temperatura deseada. La capacidad del sistema para mantener la temperatura dentro de un rango estrecho demuestra la eficacia del control PID y la estabilidad del entorno experimental. La figura 4.9 ilustra claramente estos ajustes y la respuesta dinámica del sistema, proporcionando una visión detallada de cómo se logró mantener un control preciso de la temperatura durante todo el experimento.

4.3 Resultados de temperatura de reacción

Para la temperatura de reacción, se tomaron los datos del sensor LM35 tipo encapsulado que estuvo dentro antes y durante de la reacción de transesterificación. Este sensor se colocó de manera que tomará la lectura del aceite sin interferencia del aspa de la batidora ni de las paredes del vaso precipitado y mediante operaciones aritméticas junto con su interfaz electrónica obtener el dato en centígrados.

De la misma manera, para el control del PWM controlado por el algoritmo PID, se estableció una temperatura deseada de 45 °C durante el precalentamiento y, durante el proceso, se alternó la temperatura deseada en un rango de 50 °C a 53 °C. A continuación, se presenta la figura 4.10, donde detalla mediante una gráfica el comportamiento de la temperatura de reacción.

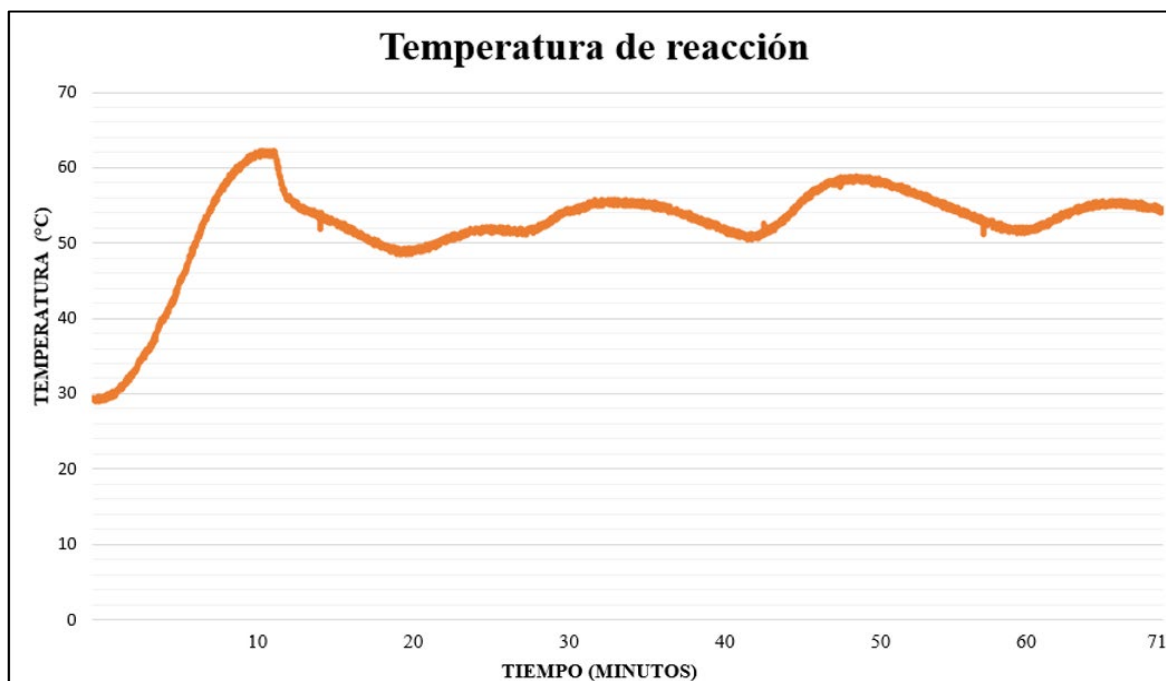


Figura 4.10 Monitoreo y control de la temperatura de reacción en el proceso de producción de biodiésel.

Como se puede observar en la figura 4.10, en los primeros 10-12 minutos se aprecia una subida repentina de la temperatura de 28.9 °C a 62.2 °C. Este lapso corresponde al

precalentamiento del aceite residual. Aunque al control PID se le solicitó mantener una temperatura de 45 °C, debido a la transferencia de calor, la temperatura se elevó mucho más allá de los 45 °C, alcanzando los 62.2 °C. Una vez estabilizada la temperatura en un rango de 2 a 3 grados Celsius, se vertió el metóxido, que estaba a temperatura ambiente, lo que causó una disminución de la temperatura de 4 a 6 grados Celsius. En esos momentos de bajada, la temperatura deseada por el PID era de 50 °C. Al alcanzar los 50 °C, la temperatura volvió a elevarse, pero esta vez solo variaba aproximadamente 2 grados Celsius por encima de la temperatura deseada.

Se puede apreciar el comportamiento oscilatorio de la temperatura debido a las variaciones solicitadas por el algoritmo PID. Por ejemplo, cuando se solicitó al algoritmo PID una temperatura de 52 °C, la temperatura se elevó a 54-55 °C.

Además, se manipuló una vez la perilla de la temperatura para que, al abrir el circuito del ciclo de trabajo, se añadiera más potencia desde la plancha calefactora, lo que provocó un aumento de 6 grados por encima de la temperatura solicitada. Este comportamiento se puede observar en la subida de temperatura entre los 40 y los 60 minutos.

Finalmente, la temperatura de reacción se mantuvo de manera constante en un rango entre 50 °C y 60 °C durante la hora de reacción, posterior al precalentamiento. Esto indica que, después del ajuste inicial y las variaciones inducidas por el metóxido y la manipulación de la perilla, el sistema fue capaz de mantener una temperatura estable, esencial para el éxito de la reacción.

4.4 Resultados de la agitación

Para la agitación, se tomaron los datos del sensor codificador rotatorio óptico incremental bifásico. Este sensor se adecuó y adaptó mediante un acoplamiento tipo prisionero en la flecha rotatoria de la batidora eléctrica para medir adecuadamente las revoluciones de la flecha rotatoria dentro de la mezcla de reacción y mediante operaciones aritméticas obtener rpm.

De la misma manera, para el control abierto del agitador, se estableció mediante prueba y error, un nivel de 1 equivalente a 10% del ciclo de trabajo del PWM. Después, al agregar el metóxido al aceite precalentado, se subió a nivel 2 equivalente a 20% del ciclo de trabajo del PWM y, durante la reacción de transesterificación, se estuvo moviendo del nivel 1.5 al nivel 2. A continuación, se presenta la figura 4.11, donde detalla mediante una gráfica el comportamiento de la agitación.

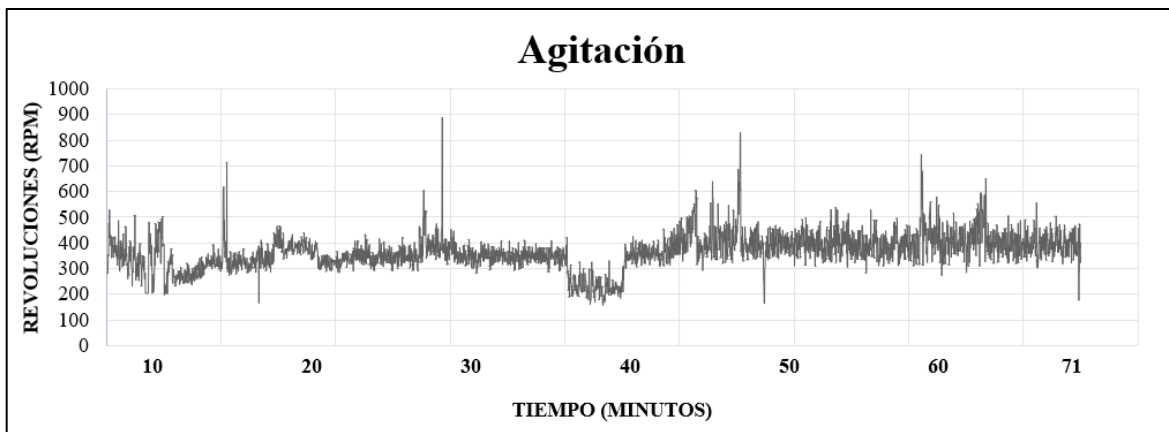


Figura 4.11 Monitoreo y control de la agitación en el proceso de producción de biodiésel.

Como se puede observar en la figura 4.11, hubo ligeros ruidos tanto en la etapa del precalentamiento como durante la reacción de transesterificación. Las revoluciones por minuto se mantuvieron entre 200 y 500 rpm. Se estuvo oscilando el control abierto mediante los niveles del 1 al 3.

En la etapa del precalentamiento, en los primeros 11 minutos aproximadamente, se mantuvo un nivel 1 y 1.5 obteniendo revoluciones entre 200 y 500 rpm hasta verter el metóxido. Después de verter el metóxido, se movió el nivel a 1.5 obteniendo revoluciones entre 300 y 400 rpm.

Asimismo, en el lapso de los 35 y 40 minutos se volvió a bajar al nivel 1 debido a la visualización de espuma en la reacción de transesterificación obteniendo revoluciones entre 200 y 300 y, una vez desaparecida la espuma se movió al nivel 2 obteniendo revoluciones un poco arriba de 300 a 500 rpm. Este nivel se mantuvo hasta la recta final de los 71 minutos.

Durante toda la experimentación, se puede observar ligeros ruidos de bajada y sobre todo de picos altísimos comparado con las revoluciones por minuto que se mantuvieron en todo el proceso de producción del biodiésel. El ruido en la etapa del precalentamiento fue debido a los cambios constantes de niveles del 1 al 1.5 y en un momento repentino bajó y subió la potencia del agitador. Y los picos fueron resultado del algoritmo del PID, al entrar en acción con los parámetros de las ganancias del PID en las subidas, se obtuvieron pocas revoluciones por minuto elevadísimas siendo que el trabajo del agitador se mantenía igual de velocidad y ruido.

Los picos de las revoluciones por minuto, se pueden corroborar en los minutos exactos cuando entraba el algoritmo PID en la figura 4.11. Sin embargo, nada de esto afectó en el producto final, las revoluciones por minuto fueron eficaces.

4.5 Resultados del consumo energético

Para el consumo energético, se tomaron los datos de los 2 sensores ACS711EX. Estos sensores se colocaron en serie en el circuito de cada aparato eléctrico; plancha calefactora y batidora eléctrica. Se trabajaron de manera que midiera simultáneamente la corriente consumida de cada aparato eléctrico y mediante los cálculos mencionados en la sección 3.3.1 Cálculos para el consumo energético en kWh, para obtener el consumo energético en kWh. A continuación, se presenta la figura 4.12, donde detalla mediante una gráfica el comportamiento del consumo energético.

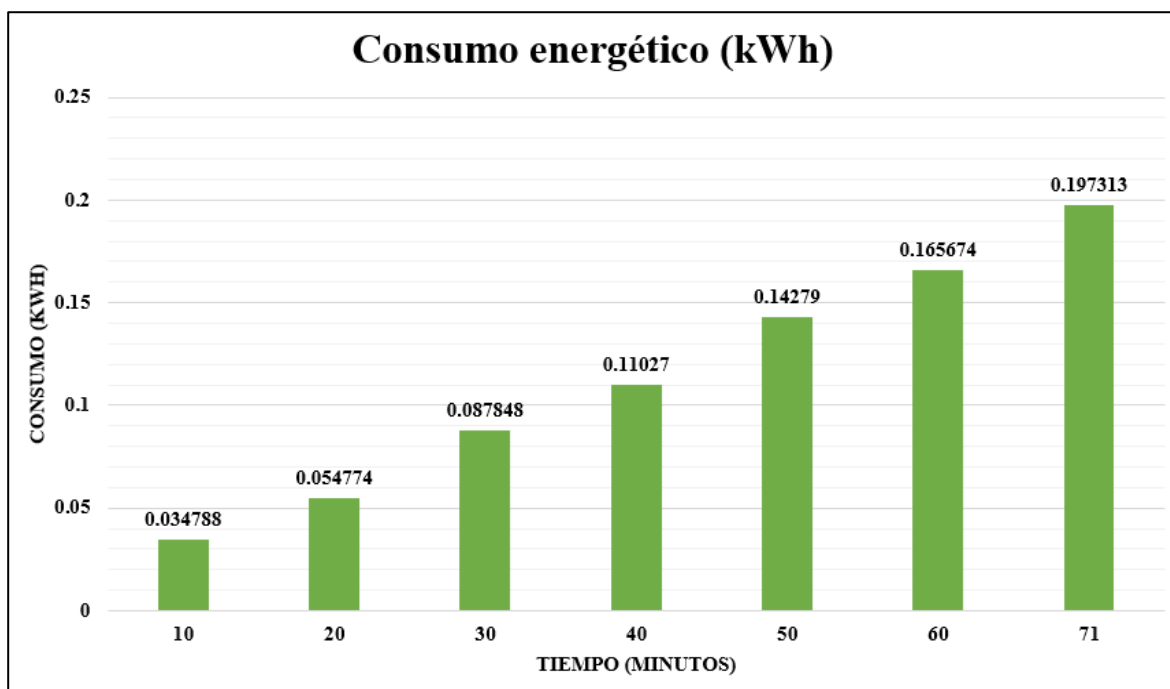


Figura 4.12 Monitoreo del consumo energético total del proceso de producción de biodiésel.

Como se puede observar en la figura 4.12, el consumo energético fue en aumento de manera casi constante a lo largo del experimento. El consumo energético osciló ligeramente debido a la intervención del control PID, que regulaba la plancha calefactora en intervalos casi constantes, manteniendo un tiempo de encendido y apagado uniforme. Además, el agitador fluctuó entre el nivel 1 y el nivel 2, lo que demandó diferentes niveles de consumo energético.

Durante el proceso de producción de biodiésel, que tuvo una duración de 71 minutos, el consumo energético total fue de 0.197313 kWh. Este valor es inferior a los resultados reportados en la sección 2.1.4 Requerimiento energético de la producción, lo que indica una eficiencia energética mejorada en este experimento en comparación con estudios previos.

La estabilidad en el consumo energético es un indicativo de la eficacia del sistema de control PID, que no solo mantuvo las temperaturas deseadas, sino que también optimizó el uso de energía. La fluctuación mínima en el consumo energético del agitador también refleja un diseño eficiente, adaptándose a las necesidades del proceso sin desperdiciar energía.

Este análisis del consumo energético no solo demuestra la viabilidad del proceso, sino que también resalta la importancia de un control preciso y eficiente en la producción de biodiésel, contribuyendo así a la sostenibilidad y reducción de costos operativos.

4.6 Producto final

Como producto final, se obtuvieron ésteres metílicos de ácidos grasos, es decir, biodiésel con glicerina. Por razones relacionadas con el proyecto, se detendrá el proceso en esta etapa y no se procederá a la purificación y separación del biodiésel. No obstante, al observar el producto final, se concluye que se ha producido correctamente el biodiésel deseado.



a) Producto final



b) Visualización de la separación biodiésel y glicerina

Figura 4.13 Ésteres metílicos de ácidos grasos (biodiésel y glicerina).

En la figura 4.13.b, se puede apreciar claramente la separación entre el biodiésel y la glicerina, indicando visualmente que la reacción de transesterificación se llevó a cabo de manera adecuada. Esta separación es un indicador clave de que los componentes han reaccionado como se esperaba, y que el proceso ha sido exitoso hasta esta fase.

Aunque la purificación y separación del biodiésel no se realizarán en este proyecto, los resultados obtenidos hasta ahora son prometedores y demuestran la efectividad del método utilizado. La figura 4.13.b proporciona una visión clara de la fase final del proceso, mostrando una distinción visible entre el biodiésel y la glicerina. Esta observación confirma que los objetivos del proyecto en cuanto a la síntesis del biodiésel se han cumplido.

En futuras investigaciones, sería interesante completar las etapas de purificación y separación para evaluar la calidad final del biodiésel producido y dar a conocer el requerimiento energético que consume dicho proceso creando la oportunidad de implementar energías alternas bajando costos finales de producción.

Capítulo 5

5. Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se presentó una propuesta para el control y monitoreo de las variables críticas (temperatura de reacción, temperatura ambiente, agitación y consumo energético) en el proceso de producción de biodiésel mediante la reacción de transesterificación. La propuesta desarrolló e implementó un instrumento virtual de control y monitoreo basado en LabVIEW®, utilizando el dispositivo de adquisición de datos DAQ 6009 y una interfaz electrónica con sus componentes soldados en una placa fenólica, junto con su armazón protector y portátil.

Los resultados muestran que la presente propuesta valida la hipótesis sugerida, ya que se logró el monitoreo y control de las variables críticas en tiempo real, asegurando así su gestión eficiente del proceso de producción de biodiésel. Asimismo, el consumo energético fue de 0.197313 kWh, resultado de un tiempo de 71 minutos. Este valor es un 44.7% inferior a los resultados reportados por Agee et. al (2014) con el valor de 0.357 kWh a una temperatura de 75 °C durante 1 hora obteniendo una diferencia de 0.1596 kWh. En cuanto al tiempo, nuestra prueba duró un 18.3% más que la de Agee et al manteniendo un consumo energético menor. De la misma manera, el consumo energético obtenido es un 7.8% inferior a lo reportado por Gupta et. al (2018) con el valor de 0.214 kWh a una temperatura de 60 °C durante 1 hora y 10 minutos obteniendo una diferencia mínima. La duración de nuestra prueba fue prácticamente igual, con solo una ligera diferencia del 1.4% en tiempo. Esta reducción, aunque mínima, sigue siendo favorable en términos de eficiencia energética. En consecuencia, la propuesta presentada mejoró la eficiencia energética del proceso de producción de biodiésel con los métodos convencionales sin este tipo de tecnología. Este análisis del consumo energético demuestra que existe viabilidad del proceso y la importancia de un control y monitoreo preciso y eficiente en la producción de biodiésel, contribuyendo así a la sostenibilidad y reducción de costos operativos.

De la misma manera, aunque el algoritmo PID se complicó un poco al solicitarle una temperatura deseada y generaba la diferencia de grados Celsius más arriba; por tema de transferencia de calor, se logró mantener una temperatura de reacción entre 50 °C y 60 °C durante la reacción de transesterificación sin intervención física solamente con el control retroalimentado del algoritmo PID solicitándole una temperatura entre 50 a 53 °C que se ingresaba a la plancha calefactora, obteniendo una oscilación de 10 °C.

Este nivel de control preciso es crucial en el proceso de transesterificación, ya que la temperatura tiene un impacto significativo en la calidad y el rendimiento del biodiésel producido. La capacidad del sistema para manejar las variaciones de temperatura de manera autónoma asegura que la reacción se realice en condiciones óptimas, lo que puede conducir a una mayor consistencia en los productos finales.

En cuanto a la agitación, el control abierto para las revoluciones por minuto (rpm) respondió de manera estable y eficaz. Aunque se observaron picos por encima de las 700 rpm, la velocidad y la visualización se mantuvieron en el nivel solicitado. Estos incrementos en la lectura de las rpm fueron consecuencia de las ganancias del algoritmo PID.

La capacidad del sistema para mantener una agitación estable es crucial en el proceso de transesterificación, ya que una agitación adecuada asegura una mezcla homogénea de los reactivos, lo que a su vez optimiza la eficiencia de la reacción. A pesar de los picos ocasionales, la agitación se mantuvo dentro de los parámetros operativos deseados, lo que demuestra la robustez del sistema de control. En la figura 4.10 corrobora en el tiempo exacto de la entrada del algoritmo PID como también afecta a la lectura de las rpm arrojando dichos picos (figura 4.11). Sin embargo, la función del agitador fue la deseada.

Por otro lado, se empleó aceite residual ofreciendo un beneficio ambiental significativo, ya que aborda el problema de la eliminación inadecuada, que suele ser el caso de los aceites de cocina utilizados en los hogares o en los restaurantes. Además, la incorporación de estos aceites vegetales residuales a la producción de biodiesel influye directamente tanto al costo total del biodiésel como al diseño del proceso.

Al visualizar los detalles durante la experimentación y los resultados obtenidos, se aprecian ligeras complicaciones del algoritmo PID que afectan directamente los comportamientos de los resultados de la temperatura ambiente, temperatura de reacción y la agitación. Así también, se observa las posibles mejoras de las adaptaciones de los equipos y materiales utilizados para llevar a cabo la reacción de transesterificación de esta manera. En consecuencia, de estas observaciones, se hacen las siguientes recomendaciones:

1. Adaptar con mayor longitud el aspa de la batidora eléctrica (agitador) que agita el aceite y el metóxido para un mejor manejo de tamaños de los vasos precipitados como ingresar la aspa hasta una profundidad considerable en la cual no chispee hacia afuera.
2. Añadir más longitud al sensor LM35 que adquiere la temperatura ambiente para que no le afecte en lo absoluto el calor disipado por la plancha calefactora, la computadora y tampoco la interfaz electrónica.
3. Implementar una máquina de estados permitirá una respuesta más rápida y precisa a las variaciones en las variables críticas, como la temperatura de reacción, la temperatura ambiente, la agitación y el consumo energético.
4. Aprovechar la oportunidad de conocer la medición del consumo energético del proceso de producción de biodiésel e implementar fuentes de energías renovables como fuente principal para disminuir el consumo energético requerido.
5. Implementar un serpentín adherido al vaso de la mezcla junto con un actuador o controlador que active una bomba para recircular el flujo. Esto permitirá un enfriamiento más rápido y eficiente, mejorando el control térmico y manteniendo condiciones óptimas para la producción de biodiésel.
6. Evaluar el producto final mediante la purificación y caracterización del biodiésel.

Por último, es importante destacar que las observaciones y recomendaciones formuladas no sugieren que el trabajo carezca de eficiencia. Más bien, ofrecen una oportunidad para perfeccionar la propuesta y elevar su nivel de eficacia. Estas sugerencias apuntan a un refinamiento continuo, a la optimización del proyecto y la oportunidad a futuro de implementar otras energías alternas para bajar costos finales de producción de biodiésel.

Bibliografía

- [1] S. Sivarethinamohan, J. R. Hanumanthu, K. Gaddam, G. Ravindiran, and A. Alagumalai, "Towards sustainable biodiesel production by solar intensification of waste cooking oil and engine parameter assessment studies," *Science of the Total Environment*, vol. 804, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.150236.
- [2] S. Naveen, K. P. Gopinath, R. Malolan, R. S. Jayaraman, K. Aakriti, and J. Arun, "A solar reactor for bio-diesel production from Pongamia oil: Studies on transesterification process parameters and energy efficiency," *Chin J Chem Eng*, vol. 40, pp. 218–224, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.CJCHE.2020.10.010.
- [3] A. Demirbas, "Biodiesel for Future Transportation Energy Needs," <http://dx.doi.org/10.1080/15567030903078335>, vol. 32, no. 16, pp. 1490–1508, Oct. 2010, doi: 10.1080/15567030903078335.
- [4] G. Montero *et al.*, "Current Status of Biodiesel Production in Baja California, Mexico," *Biodiesel- Quality, Emissions and By-Products*, Nov. 2011, doi: 10.5772/27159.
- [5] R. Bharti, A. Guldhe, D. Kumar, and B. Singh, "Solar irradiation assisted synthesis of biodiesel from waste cooking oil using calcium oxide derived from chicken eggshell," *Fuel*, vol. 273, p. 117778, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.FUEL.2020.117778.
- [6] A. R. Gupta, A. P. Jalan, and V. K. Rathod, "Solar energy as a process intensification tool for the biodiesel production from hempseed oil," *Energy Convers Manag*, vol. 171, pp. 126–132, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2018.05.050.
- [7] F. Ma and M. A. Hanna, "Biodiesel production: a review," *Bioresour Technol*, vol. 70, no. 1, pp. 1–15, Oct. 1999, doi: 10.1016/S0960-8524(99)00025-5.
- [8] M. Balat and H. Balat, "A critical review of bio-diesel as a vehicular fuel," *Energy Convers Manag*, vol. 49, no. 10, pp. 2727–2741, Oct. 2008, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2008.03.016.
- [9] N. Haga, "Vegetable Oils as fuels in diesel generating sets," in *10a Conferencia Internacional Ambiental*, Estambul, 2004.
- [10] A. Demirbas, "Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections," *Energy Convers Manag*, vol. 49, no. 8, pp. 2106–2116, Aug. 2008, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2008.02.020.
- [11] J. M. N. van Kasteren and A. P. Nisworo, "A process model to estimate the cost of industrial scale biodiesel production from waste cooking oil by supercritical transesterification," *Resour Conserv Recycl*, vol. 50, no. 4, pp. 442–458, Jun. 2007, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2006.07.005.
- [12] L. López, J. Bocanegra, and D. Malagón-Romero, "Production of biodiesel from waste cooking oil by transesterification," *Ingeniería y Universidad*, vol. 19, no. 1, pp. 155–172, 2015, doi: 10.11144/JAVERIANA.IYU19-1.ODBA.
- [13] M. García-Díaz, J. Gandón-Hernández, and Y. Maqueira-Tamayo, "Estudio de la obtención de biodiesel a partir de aceite comestible usado," *Tecnología Química*, vol. 33, no. 2, pp. 162–169, 2013, Accessed: Oct. 27, 2022. [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852013000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [14] S. Sulaiman, A. R. Abdul Aziz, and M. K. Aroua, "Reactive extraction of solid coconut waste to produce biodiesel," *J Taiwan Inst Chem Eng*, vol. 44, no. 2, pp. 233–238, Mar. 2013, doi: 10.1016/J.JTICE.2012.10.008.
- [15] Á. Sánchez, R. Maceiras, Á. Cancela, and A. Pérez, "Culture aspects of *Isochrysis galbana* for biodiesel production," *Appl Energy*, vol. 101, pp. 192–197, Jan. 2013, doi:

- 10.1016/J.APENERGY.2012.03.027.
- [16] Z. Z. Cai *et al.*, “A two-step biodiesel production process from waste cooking oil via recycling crude glycerol esterification catalyzed by alkali catalyst,” *Fuel Processing Technology*, vol. 137, pp. 186–193, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.FUPROC.2015.04.017.
- [17] J. Kakati and T. K. Gogoi, “Biodiesel production from Kutkura (*Meyna spinosa* Roxb. Ex.) fruit seed oil: Its characterization and engine performance evaluation with 10% and 20% blends,” *Energy Convers Manag*, vol. 121, pp. 152–161, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2016.05.019.
- [18] T. G. Kudre, N. Bhaskar, and P. Z. Sakhare, “Optimization and characterization of biodiesel production from rohu (*Labeo rohita*) processing waste,” *Renew Energy*, vol. 113, pp. 1408–1418, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.RENENE.2017.06.101.
- [19] Sahar *et al.*, “Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel,” *Sustain Cities Soc*, vol. 41, pp. 220–226, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.SCS.2018.05.037.
- [20] P. A. Satyanarayana, R. Kanth Oleti, S. Uppalapati, and V. Sridevi, “A Comparative Study on Characterization of Used Cooking Oil and Mustard Oil for Biodiesel Production: Engine Performance,” *Mater Today Proc*, vol. 5, no. 9, pp. 18187–18201, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.MATPR.2018.06.155.
- [21] C. H. Su, H. C. Nguyen, T. L. Bui, and D. L. Huang, “Enzyme-assisted extraction of insect fat for biodiesel production,” *J Clean Prod*, vol. 223, pp. 436–444, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.03.150.
- [22] L. da C. Cardoso, F. N. C. de Almeida, G. K. Souza, I. Y. Asanome, and N. C. Pereira, “Synthesis and optimization of ethyl esters from fish oil waste for biodiesel production,” *Renew Energy*, vol. 133, pp. 743–748, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.RENENE.2018.10.081.
- [23] R. K. Elango, K. Sathiasivan, C. Muthukumaran, V. Thangavelu, M. Rajesh, and K. Tamilarasan, “Transesterification of castor oil for biodiesel production: Process optimization and characterization,” *Microchemical Journal*, vol. 145, pp. 1162–1168, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.MICROC.2018.12.039.
- [24] J. A. León *et al.*, “Thermodynamic Analysis of Waste Vegetable Oil Conversion to Biodiesel with Solar Energy,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 5, 2022, doi: 10.3390/en15051834.
- [25] N. Ellis, F. Guan, T. Chen, and C. Poon, “Monitoring biodiesel production (transesterification) using in situ viscometer,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 138, no. 1–3, pp. 200–206, May 2008, doi: 10.1016/J.CEJ.2007.06.034.
- [26] S. R. Reddy, D. Titu, and A. Chadha, “A novel method for monitoring the transesterification reaction of oil in biodiesel production by estimation of glycerol,” *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists’ Society*, vol. 87, no. 7, pp. 747–754, Feb. 2010, doi: 10.1007/S11746-010-1549-2/TABLES/2.
- [27] P. Stanislav, *CONTROLLING AND MONITORING SYSTEM FOR THE PRODUCTION OF BIODIESEL*. DAAAM International, 2011.
- [28] H. Xiong, X. Guo, and W. Xie, “Biodiesel Remote Monitoring System Design Based on IOT,” *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 8944, pp. 750–756, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-15554-8_65.
- [29] B. Y. López-Zapata, M. Adam-Medina, P. E. Álvarez-Gutiérrez, J. P. Castillo-González, H. R. Hernández-de León, and L. G. Vela-Valdés, “Virtual sensors for biodiesel production in a batch reactor,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 9, no. 3, Mar. 2017, doi: 10.3390/su9030455.
- [30] I. T. F. Resende *et al.*, “Biodiesel Production by Thermal Solar Heating in a Low Cost Plant Using Waste Cooking Oil,” 2017, doi: 10.18178/ijmerr.6.2.160-163.
- [31] R. M. Baesso, P. A. Oliveira, G. C. Morais, A. V. Alvarenga, and R. P. B. Costa-Felix,

- “Using ultrasonic velocity for monitoring and analysing biodiesel production,” *Fuel*, vol. 226, pp. 389–399, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.FUEL.2018.04.039.
- [32] F. M. de Andrade, R. Sales, N. C. da Silva, and M. F. Pimentel, “Calibration with virtual standards for monitoring biodiesel production using a miniature NIR spectrometer,” *Talanta*, vol. 243, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.talanta.2022.123329.
- [33] J. A. León *et al.*, “Renewable energy integration: Economic assessment of solar energy to produce biodiesel at supercritical conditions,” *International Journal of Photoenergy*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/8769582.
- [34] Jr. L. G. Wade, *Química Orgánica*, 7th Edition., vol. 2. México : Pearson Educación, 2012.
- [35] H. M. El-Mashad, R. Zhang, and R. J. Avena-Bustillos, “A two-step process for biodiesel production from salmon oil,” *Biosyst Eng*, vol. 99, no. 2, pp. 220–227, Feb. 2008, doi: 10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2007.09.029.
- [36] E. M. Shahid and Y. Jamal, “Performance of direct injection compression ignition engine with cotton seed oil biodiesel,” in *In 3rd Int Conf. on sustainable and energy protection SEEP*, 2009.
- [37] Armando Pérez Sánchez, “CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA OPERANDO CON MEZCLAS DIESEL-BIODIESEL MEDIANTE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL LABVIEW® 2010,” Instituto de Ingeniería de Mexicali , Mexicali , 2016.
- [38] Hazardous Substances Data Bank (HSDB), “PubChem Methanol (Compound).” Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Methanol#section=Boiling-Point>
- [39] DrugBank, “PubChem Ethanol (Compound).” Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/ethanol#section=Boiling-Point>
- [40] ILO-WHO International Chemical Safety Cards (ICSCs), “PubChem 1-Propanol (Compound).” Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/propanol#section=Boiling-Point>
- [41] B. M. Agee, G. Mullins, and D. J. Swartling, “Use of solar energy for biodiesel production and use of biodiesel waste as a green reaction solvent,” *Sustainable Chemical Processes 2014 2:1*, vol. 2, no. 1, pp. 1–10, Oct. 2014, doi: 10.1186/S40508-014-0021-2.
- [42] S. Naveen, K. P. Gopinath, R. Malolan, S. J. Ramesh, K. Aakriti, and J. Arun, “Novel Solar Parabolic Trough Collector cum Reactor for the Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil using Calcium Oxide catalyst derived from seashells waste,” *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 157, p. 108145, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.CEP.2020.108145.
- [43] K. Ogata, *Modern Control Engineering* , 5th Edition. Pearson , 2009.
- [44] G. F. Franklin, D. J. Powell, and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, 6th Edition. Prentice Hall, 2010.
- [45] R. Dorf and R. Bishop, *Modern Control Systems*, 13th Edition. Pearson , 2016.
- [46] N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, 6th Edition. John Wiley & Sons, 2010.
- [47] E. O. Doebelin, *Measurement Systems: Application and Design*, 5th Edition. McGraw-Hill, 2003.
- [48] C. D. Johnson, *Process Control Instrumentation Technology*, 8th Edition. Pearson, 2005.
- [49] F. Golnaraghi and B. C. Kuo, *Automatic Control Systems*, 9th Edition. John While & Sons, 2009.
- [50] D. A. Bell, *Electronic Instrumentation and Measurements*, 3rd Edition. Oxford University Press, 2013.
- [51] D. E. Seborg, D. A. Mellichamp, T. F. Edgar, and F. J. Doyle III, *Process Dynamics and Control*, 4th Edition. John Wiley & Sons, 2016.
- [52] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 3rd Edition. Pearson , 2004.
- [53] E. A. Lee and S. A. Seshia, *Introduction to Embedded Systems, Second Edition: A Cyber-*

- Physical Systems Approach*, 2nd Edition. MIT press, 2016.
- [54] K. J. Astrom, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, 2nd ed. ISA, 2006.
- [55] National Instruments, “Explanation about PID controller and theory.” Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.ni.com/es/shop/labview/pid-theory-explained.html>
- [56] J. P. Bentley, *Principles of Measurement Systems*, 4th Edition. Pearson Education, 2005.
- [57] M. A. Pérez, F. J. Ferrero, G. J. Grillo, J. C. Álvarez, and J. C. Campo, *Instrumentación Electrónica Sensores*, vol. 1. Pub. Universidad Politécnica de Valencia, 1994.
- [58] P. Ollero de Castro and E. Fernande Camacho, *Control e instrumentación de procesos químicos*. Síntesis, 2006.
- [59] CFSensor, “¿Cuál es la diferencia entre el sensor analógico y el sensor digital?” Accessed: Jun. 12, 2024. [Online]. Available: <https://cfsensor.com/es/difference-between-analog-sensor-and-digital-sensor/>
- [60] D. Patranabis, *Sensors and Transducers*, 2nd Edition. PHI Learning, 2003.
- [61] National Instruments, “Adquisición de datos (DAQ).” Accessed: Oct. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.ni.com/es/shop/data-acquisition.html>
- [62] National Instruments, “ABOUT NI.” Accessed: Jun. 12, 2024. [Online]. Available: https://www.ni.com/es/about-ni.html?srsId=AfmBOopfcjqvSXJWBWNXiza8niF_SjHH5no2Pr4ol9AJ07d6BEBF9rhlJMIndustrial
- [63] JMIndustrial, “Tarjetas de Adquisición de Datos.” Accessed: Jun. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.jmi.com.mx/tarjetas-de-adquisicion-de-datos/>
- [64] National Instruments, “NI Data Acquisition: The Accuracy and Performance Difference.” Accessed: Jun. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/ni-data-acquisition--the-accuracy-and-performance-difference.html>
- [65] Advantech, “USB-4704.” Accessed: Jun. 12, 2024. [Online]. Available: https://www.advantech.com/es-mx/products/1-2mlkno/usb-4704/mod_4d0800cc-f6fd-402a-9782-24cd0ffdaf42
- [66] Digilent, “MCC USB-200 Series: Single Gain Multifunction USB DAQ Devices.” Accessed: Jun. 12, 2024. [Online]. Available: <https://digilent.com/shop/mcc-usb-200-series-single-gain-multifunction-usb-daq-devices/>
- [67] KEYSIGHT, “U2351A USB Modular Data Acquisition, 16-CH, Analog Output, 250KS/s.” Accessed: Jun. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/us/en/product/U2351A/16-channel-250ksa-s-usb-modular-multifunction-data-acquisition.html>
- [68] National Instruments, “NI-9202.” Accessed: Jun. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.ni.com/es-mx/shop/model/ni-9202.html>
- [69] National Instruments, “SBRIO-9263”, Accessed: Jun. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.ni.com/es-mx/shop/model/sbrio-9263.html>
- [70] National Instruments, “USB-6009.” Accessed: Jun. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.ni.com/es-mx/support/model.usb-6009.html>
- [71] D. Placko, *Fundamentals of Instrumentation and Measuremen*, 1st Edition. ISTE, 2007.
- [72] R. H. Bishop, *Learning With LabVIEW*. Pearson, 2014.
- [73] J. Jerome, *Virtual Instrumentation Using Labview*. PHI Learning, 2010.
- [74] MathWorks, “MATLAB.” Accessed: Jun. 12, 2024. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- [75] MathWorks, “Simulink.” Accessed: Jun. 12, 2024. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/simulink.html>
- [76] AVEVA, “What is SCADA?” Accessed: Jun. 13, 2024. [Online]. Available: <https://www.aveva.com/es-es/solutions/operations/scada/>
- [77] Inductive Automation, “What is SCADA, Who Uses it and How SCADA Has Evolved.” Accessed: Jun. 13, 2024. [Online]. Available: <https://inductiveautomation.com/resources/article/what-is-scada>

- [78] SIEMENS, “SIMATIC throughout history.” Accessed: Jun. 13, 2024. [Online]. Available: <https://www.siemens.com/global/en/company/about/history/specials/60-years-of-simatic.html>
- [79] SIEMENS, “Totally Integrated Automation Portal – Always ready for tomorrow.” Accessed: Jun. 13, 2024. [Online]. Available: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/tia-portal.html>
- [80] ARDUINO, “ARDUINO IDE.” Accessed: Jun. 13, 2024. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/software>
- [81] Raspberry Pi, “Raspberry Pi OS.” Accessed: Jun. 13, 2024. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/software/>
- [82] National Instruments, “What is NI LabVIEW?” Accessed: Jun. 13, 2024. [Online]. Available: <https://www.ni.com/es/shop/labview.html>