



Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga



**“Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi
para el Control de Variables de Operación de un Reactor en
Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel”**

TESIS

Para Obtener el Grado de:

Maestra en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

PRESENTA:

LAQB. Marycarmen García López

TUTORES:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Dra. Claudia Lizeth Salas Aguilar

M. en C. Víctor Manuel Herrera Ambríz

Pabellón de Arteaga, Ags., mayo del 2021



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

Tesis:

**“Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el
Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo
Usado en la Producción de Biodiésel”**

Presenta:

LAQB. Marycarmen García López

Dirigida por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Dra. Claudia Lizeth Salas Aguilar

M. en C. Víctor Manuel Herrera Ambríz

Sinodales:

Dr. Luis Fernando Prieto Contreras

M. en C. Julio Acevedo Martínez

Pabellón de Arteaga, Ags., mayo del 2021

AGRADECIMIENTOS

A Dios,
por estar siempre a mi lado y darme fuerzas para seguir adelante.

A mis amores,
Frida Sofía Reyes, Juan Antonio Reyes, José J. Rodríguez por su infinita paciencia en este último tiempo y por el amor que siempre me brindan.

A mis padres,
Ma. del Carmen y José Saúl por darme la vida, apoyarme, impulsarme a realizar mis metas y amarme incondicionalmente.

A mis hermanos,
Mayra, Melissa, Saúl, García, Carmelo Huerta y Cecilia Acevedo
por acompañarme en este duro camino, por apoyarme desde principio a fin, por ser tan buenos y admirables.

A mi Director de Tesis,
Dr. José Alonso Dena Aguilar
por darme la oportunidad de aprender, ayudarme y guiarme siempre que lo necesité.

A mi Comité Tutorial,
por las aportaciones durante mi formación

A mis amigos y compañeros de Posgrado,
Luis Eric Pérez, Israel Álvarez y Juan Manuel Bernal por hacer tan agradable lo cotidiano.
y a todos aquellos que de una u otra forma me acompañaron en esta etapa...

!!!! Gracias totales !!!!

“Todos somos muy ignorantes. Lo que ocurre es que no todos ignoramos las mismas cosas”.

Albert Einstein



Pabellón de Arteaga, Ags.,

3/mayo/2021

MES. EDGAR ZACARÍAS MORENO
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

PRESENTE

Por medio del presente doy el visto bueno a la Tesis de Maestría titulada **“DESARROLLO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO EMPLEANDO RASPBERRY PI PARA EL CONTROL DE VARIABLES DE OPERACIÓN DE UN REACTOR EN PROCESO SEMICONTINUO USADO EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL”** de la estudiante **MARYCARMEN GARCÍA LÓPEZ** con numero de control M191050000 de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica. Dicho trabajo ya fue revisado por cada uno de los miembros del comité tutorial y la estudiante ya realizo los cambios sugeridos, por lo que autorizamos su impresión.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®

DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL

DRA. CLAUDIA LIZETH SALAS AGUILAR
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL

M. en C. VÍCTOR MANUEL HERRERA AMBRIZ
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



Pabellón de Arteaga, Ags.,

4/mayo/2021

LAQB. MARYCARMEN GARCÍA LÓPEZ
ESTUDIANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
NO. DE CONTROL M191050000

PRESENTE

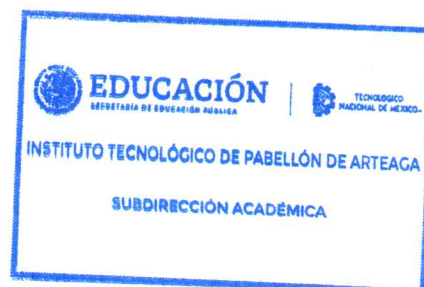
Por medio de este conducto me permito comunicar a Usted que habiendo recibido los votos aprobatorios de los revisores de su trabajo de Tesis titulado: **"DESARROLLO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO EMPLEANDO RASPBERRY PI PARA EL CONTROL DE VARIABLES DE OPERACIÓN DE UN REACTOR EN PROCESO SEMICONTINUO USADO EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL"**, hago de su conocimiento que puede imprimir dicho documento y continuar con los trámites para la presentación de su examen de grado.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®

MES. EDGAR ZACARÍAS MORENO
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



RESUMEN

“DESARROLLO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO EMPLEANDO RASPBERRY PI PARA EL CONTROL DE VARIABLES DE OPERACIÓN DE UN REACTOR EN PROCESO SEMICONTINUO USADO EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL”

Por: LAQB. MARYCARMEN GARCÍA LÓPEZ

El método más empleado para obtener biodiésel es mediante la reacción de transesterificación de aceites vegetales o grasas con alcoholes en presencia de un catalizador a temperaturas de reacción inferiores al punto de ebullición del alcohol empleado. Por tanto, es conveniente definir la metodología, parámetros y condiciones de operación para poder llevar a cabo la producción de biodiésel bajo un ambiente controlado de las variables de estudio que permita obtener el mayor rendimiento. Sin embargo, la mayoría de los estudios de producción de biodiésel se desarrollan a escala laboratorio o escala de banco, de baja capacidad volumétrica, en recipientes de vidrio y empleando medios de control manual. En el caso de emplear un reactor prefabricado, los controles generalmente son manuales o neumáticos a través de válvulas de apertura y cierre o botoneras de encendido-apagado de equipo eléctrico o mecánico.

En este trabajo se desarrollaron dos metodologías para el diseño y construcción de (1) un reactor de bajo volumen para la producción de biodiésel y (2) un sistema mecatrónico para el registro, monitoreo y control de las variables de operación presentes en una reacción de transesterificación para la obtención de biodiésel. En la primera metodología, se realizaron los diseños del reactor empleando software de diseño mecánico especializado para definir las dimensiones, la geometría, el volumen y el tipo de agitador requeridos para un volumen de trabajo de baja escala. La construcción del reactor fue bajo el diseño propuesto y con materiales de fácil adquisición, pero de resistencia comprobada. En la segunda metodología, se elaboraron los diseños electrónicos del sistema mecatrónico para validar su funcionamiento, se construyó el dispositivo empleando electrónica modular, se fabricó el algoritmo en lenguaje de programación interpretado bajo una estructura secuencial y se diseñó una interfaz gráfica que permite la supervisión del proceso desde una computadora externa al sistema.

El objetivo de la presente investigación fue construir un reactor automatizado bajo diseño propio capaz de registrar, monitorear y controlar la temperatura (55 ± 2 °C), velocidad de agitación (flujo turbulento, entre 450 y 650 rpm, entre 9600 y 13300 de Numero de Reynolds) y tiempo (30 minutos) de una reacción de obtención de biodiésel por transesterificación. Considerando esta premisa, para el primer protocolo metódico se empleó el software SolidWorks® y el módulo Flow Simulation para elaborar los diseños y simulación del comportamiento del fluido; para la construcción se utilizó lamina de acero galvanizado y acero inoxidable para fabricar la carcasa cilíndrica, el tanque cilíndrico con terminación cónica, la tapa cilíndrica de soporte del sistema de agitación y un

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín. Para el sistema de calentamiento se empleó una resistencia eléctrica espiral en acero inoxidable de 1000 W de potencia. Para el segundo protocolo metódico, el sistema mecatrónico se integró empleando una placa Raspberry Pi 3 modelo B para el sensado de las variables por medio de sensores inalámbricos RuuviTag y para el control de encendido y apagado de (i) un actuador NEMA 23 modelo 23HS5628 a través de un driver controlador de motor a pasos TB6560 y (ii) la resistencia eléctrica por medio de un relevador Relay de 1 canal. Previo a su construcción, se validó el funcionamiento del sistema empleando el software Fritzing en su versión Beta 0.9.3 de acceso libre. Para el código de control se empleó el lenguaje de programación Python 3 y para la interfaz se utilizó el sistema operativo Raspbian y programas como PuTTY, Cyberduck, Ruuvi Station y VNC.

Finalmente, se estableció un diseño experimental $L_4(2^3)$ por arreglos ortogonales de Taguchi para llevar a cabo la puesta en operación del reactor y el registro y monitoreo de las variables de estudio de manera automática. Se logró construir una base de datos experimental (número de lectura vs variable) del comportamiento de los parámetros de operación seleccionados. En el caso de la temperatura, su valor se incrementaba gradualmente hasta alcanzar la temperatura de operación (55 ± 2 °C) y mantenerse en ella durante el tiempo de reacción determinado (30 minutos). En general, la variable de temperatura fue aceptablemente controlada por el sistema. Por otro lado, las variables de presión y humedad presentaron mayores dificultades de control, en donde se sugiere que la sujeción y posición del sensor y el calentamiento de la placa Raspberry Pi afectaron la respuesta (registro y monitoreo) de los sensores RuuviTag. En el caso de la agitación, se mantuvieron velocidades promedio entre 460 y 650 rpm que garantizaron obtener flujos turbulentos con Números de Reynolds entre 9600 y 13300. Mediante inspección visual, se observó que en el producto resultante de la reacción (llevada a cabo en el reactor) se formaron dos fases inmiscibles que se sugiere corresponde a glicerina (capa inferior) y biodiésel (capa superior).

Ninguna prueba de caracterización del biodiésel obtenido durante las pruebas experimentales fue realizada.

Dirigida por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Dra. Claudia Lizeth Salas Aguilar

M. en C. Víctor Manuel Herrera Ambríz

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS.....	5
1.2.1 Objetivo general.....	5
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	6
1.4 HIPÓTESIS.....	7
1.4.1 Hipótesis alterna.....	7
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	7
 II. MARCO TEÓRICO.....	 8
2.1 ENERGÍAS RENOVABLES.....	8
2.2 BIOCOMBUSTIBLES.....	8
2.3 BIODIÉSEL.....	10
2.4 TIPOS DE REACTORES QUÍMICOS.....	12
2.5 TRANSFERENCIA DE CALOR EN REACTORES.....	15
2.6 AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES FISICOQUÍMICOS.....	15
2.7 SISTEMAS MECATRÓNICOS.....	17
2.8 RASPBERRY PI (RPi).....	18
2.9 PYTHON.....	22
2.10 ACTUADORES.....	23
2.11 RUUVITAG: SENSOR INALÁMBRICO 4 EN 1.....	23
2.12 SISTEMAS DE CONTROL: DE LAZO ABIERTO Y CERRADO.....	25
2.12.1 Sistema de control en lazo abierto (sistemas no realimentados).....	25
2.12.2 Sistema de control en lazo cerrado (sistemas realimentados).....	26
2.13 SOFTWARE DE AUTOMATIZACIÓN DE DISEÑO ELECTRÓNICO: FRITZING.....	27
2.14 SOLIDWORKS® FLOW SIMULATION.....	28
2.15 PUTTY.....	28
2.16 CYBERDUCK.....	30
2.17 SISTEMA OPERATIVO RASPBIAN.....	30
2.18 DISEÑO DE TAGUCHI (ARREGLOS ORTOGONALES).....	31

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

	Pág.
III. METODOLOGÍA.....	33
3.1 VARIABLES DE OPERACIÓN: DEFINICIÓN, REGISTRO Y MONITOREO.....	33
3.1.1 Ubicación de los sensores de temperatura, presión y humedad.....	35
3.2 DISEÑOS MECÁNICOS DEL REACTOR.....	35
3.3 DISEÑOS ELECTRÓNICOS DEL SISTEMA MECATRÓNICO.....	37
3.4 CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR.....	38
3.5 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO EMPLEANDO RASPBERRY PI (RPi)	39
3.6 DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL: DISEÑO DE INTERFAZ Y CONFIGURACIÓN DE RPi.....	43
3.7 SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL FLUIDO POR FLOW SIMULATION: EFICIENCIA DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL AGITADOR.....	44
3.8 PRUEBAS DE VALIDACIÓN: DISEÑO EXPERIMENTAL ORTOGONAL.....	46
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
4.1 DISEÑOS MECÁNICOS DEL REACTOR.....	48
4.2 CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR.....	48
4.3 DESARROLLO INTEGRAL DEL SISTEMA MECATRÓNICO.....	63
4.3.1 Diseños electrónicos del sistema.....	63
4.3.2 Construcción del sistema mecatrónico.....	63
4.3.3 Sistema de control: código e interfaz de control.....	72
4.4 VALIDACIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO PUESTO EN OPERACIÓN.....	79
4.4.1 Validación por desarrollo experimental.....	79
4.4.2 Validación por tipo de flujo.....	83
4.4.3 Validación por simulación en Flow Simulation.....	84
V. CONCLUSIONES.....	86
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
ANEXO 1. Especificaciones técnicas del sensor RuuviTag.....	95
ANEXO 2. Dibujos técnicos de los diseños del reactor.....	97
ANEXO 3. Gráficos de registro y monitoreo de presión y humedad.....	102

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

	Pág
ANEXO 4. Simulaciones por Flow Simulation del tipo de flujo turbulento presente en el reactor.....	106
ANEXO 5. Configuración de animaciones por Flow Simulation.....	109
ANEXO 6. Difusión del conocimiento.....	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
1 Energías renovables.....	9
2 Biocombustibles a partir de biomasa.....	9
3 Diferencia de la combustión entre el biodiésel (izq.) y el diésel (der.).....	11
4 Ciclo del biodiésel.....	12
5 Reactor continuo CSTR.....	13
6 Reactor discontinuo Batch.....	13
7 Reactor semicontinuo RSCTA.....	14
8 Forma de operación de un proceso continuo RCTA (arriba) y proceso discontinuo RDTA (abajo).....	14
9 Forma de operación de un proceso semicontinuo RSCTA.....	14
10 Mecanismos de transferencia de calor.....	16
11 Control y automatización de un reactor químico.....	17
12 Sistema mecatrónico.....	18
13 Conexiones de hardware para una placa RPi.....	19
14 Placa Raspberry Pi 3 modelo B.....	20
15 Partes de una placa Raspberry Pi 3 modelo B.....	20
16 IDLE para Python en tema obsidiana.....	24
17 Motor a pasos NEMA 23 modelo 23HS5628.....	24
18 Sensor de temperatura, presión, humedad y movimiento marca RuuviTag.....	25
19 Esquema de un sistema de control.....	26
20 Sistema en lazo abierto.....	26
21 Elementos de un sistema en lazo abierto.....	26
22 Sistema de control en lazo cerrado.....	27
23 Diagrama electrónico Fritzing para control de un motor a pasos.....	28
24 Ejemplo de simulación elaborada en SolidWorks® Flow Simulation.....	29
25 Ejemplo de conectividad de una Raspberry Pi por medio de PuTTY.....	29
26 IDE de Cyberduck.....	30
27 Configuración de instalación de Raspbian en Windows.....	31
28 Configuración del sensor inalámbrico RuuviTag 4 en 1: vista posterior (izq. arriba), vista anterior (izq. abajo), secciones separadas (centro), vista superior (der. arriba), vista lateral (der. abajo).....	34
29 Motor a pasos empleado NEMA 23.....	34

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

Figura	Pág.
30 Posición de sensores RuuviTag: vista de los sensores de temperatura y presión en recipiente interno en relación con el recipiente externo (izq.), acercamiento de los sensores en el recipiente interno (centro), sensor de humedad en tapa cilíndrica (der.).....	35
31 Placa RPi 3B.....	41
32 Resistencia eléctrica espiral 1000 W.....	41
33 Fuente de voltaje 12V 30A.....	42
34 Driver motor a pasos TB6560.....	42
35 Convertidor analógico MCP3008.....	42
36 Diagrama de flujo del proceso completo de funcionamiento del sistema mecatrónico de biodiésel.....	45
37 Sistema de control en lazo cerrado del sistema mecatrónico.....	46
38 Sistema completo: vista anterior (izq.) y vista posterior (der.).....	49
39 Sistema completo: vista lateral.....	50
40 Sistema completo: vista superior.....	50
41 Sistema completo: vista líneas ocultas (izq.) y vista estructura alámbrica (der.).....	51
42 Carcasa: vista interna inferior (izq.) y vista interna superior (der.).....	52
43 Tapa cilíndrica superior para cierre de carcasa.....	52
44 Tanque: vista externa inferior (izq.) y vista externa superior (der.).....	53
45 Sistema de agitación: actuador, agitador propulsor.....	53
46 Corte transversal del sistema: vista interna del reactor.....	54
47 Gabinete de control: vista estructura alámbrica.....	55
48 Cubierta de motor.....	55
49 Manufactura de reactor.....	55
50 Aspecto de reactor completo.....	56
51 Carcasa vista externa.....	57
52 Carcasa vista interna.....	57
53 Tanque vista exterior.....	58
54 Tanque vista interior.....	58
55 Sistema de agitación: vista completa.....	59
56 Agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín.....	60
57 Aspas del agitador propulsor: aspas inferiores (izq.) u aspas superiores (der.).....	60
58 Sistema de agitación: acercamiento lateral donde se observa la abrazadera y placa de soporte, actuador, entradas de alimentación y rodamiento.....	61

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

Figura	Pág.
59 Sistema de agitación: acercamiento anterior donde se observa la abrazadera, actuador, cople, eje del agitador, entradas de alimentación, rodamiento, soporte actuador y tornillería de sujeción.....	61
60 Vista de la resistencia eléctrica en el interior (fondo) de la carcasa.....	62
61 Cubierta impresa de motor.....	62
62 Gabinete de control: tapa (izq.) y cuerpo (der.).....	63
63 Diagrama electrónico del sistema mecatrónico en vista Protoboard.....	65
64 Diagrama electrónico del sistema mecatrónico en vista Esquemático.....	66
65 Estación de trabajo del sistema mecatrónico.....	67
66 Acercamiento de la estación de trabajo del sistema mecatrónico.....	67
67 Vista lateral de la estación de trabajo.....	68
68 Vista completa del sistema mecatrónico donde se observa, la placa RPi, driver TB6560, relevador de 1 canal, fuente de alimentación, ventiladores, placa Protoboard y diversas conectividades.....	68
69 Placa RPi en operación: luz roja indicativo de encendido y luz verde indicativo de registro de lecturas.....	69
70 Aspecto de la interfaz de la placa RPi: sistema operativo Raspbian en comunicación con la tarjeta.....	69
71 Aspecto de la interfaz de las tomas de lecturas de los sensores.....	70
72 Foco incandescente encendido como indicativo de resistencia eléctrica en ON.....	70
73 Aplicación de Ruuvi Station en dispositivo móvil.....	71
74 Gráficas de temperatura, presión y humedad generadas en aplicación Ruuvi Station.....	71
75 Software libre VNC para configuración de acceso a la RPi.....	73
76 Interfaz de configuración de PuTTY como servidor remoto.....	73
77 Interfaz, lecturas de temperatura con el sistema mecatrónico en operación.....	78
78 Interfaz, lecturas de humedad con el sistema mecatrónico en operación.....	78
79 Registro y monitoreo de la temperatura para la corrida 1 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-1-1), arreglo 2 (L4-1-2) y arreglo 3 (L4-1-3).....	80
80 Registro y monitoreo de la temperatura para la corrida 2 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-2-1), arreglo 2 (L4-2-2) y arreglo 3 (L4-2-3).....	81
81 Registro y monitoreo de la temperatura para la corrida 3 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-3-1), arreglo 2 (L4-3-2) y arreglo 3 (L4-3-3).....	81
82 Registro y monitoreo de la temperatura para la corrida 4 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-4-1), arreglo 2 (L4-4-2) y arreglo 3 (L4-4-3).....	82

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

Figura	Pág.
83 Productos de reacción de transesterificación: corrida 2 (der.) y corrida 4 (izq.) del arreglo 3.....	82
84 Diseño empleado en Flow Simulation: tanque y agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín..	84
85 Flow Simulation configurada en intensidad de turbulencia, valor máximo de 111.43 %.....	85
86 Flow Simulation configurada en longitud de turbulencia, valor máximo de 0.011 m.....	85
87 Dibujos técnicos del tanque.....	97
88 Dibujos técnicos de la carcasa.....	98
89 Dibujos técnicos de la tapa cilíndrica superior. Porta sistema de agitación.....	99
90 Dibujos técnicos del agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín.....	100
91 Dibujos técnicos del gabinete de control.....	101
92 Registro y monitoreo de la presión para la corrida 1 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-1-1), arreglo 2 (L4-1-2) y arreglo 3 (L4-1-3).....	102
93 Registro y monitoreo de la presión para la corrida 2 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-2-1), arreglo 2 (L4-2-2) y arreglo 3 (L4-2-3).....	102
94 Registro y monitoreo de la presión para la corrida 3 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-3-1), arreglo 2 (L4-3-2) y arreglo 3 (L4-3-3).....	103
95 Registro y monitoreo de la presión para la corrida 4 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-4-1), arreglo 2 (L4-4-2) y arreglo 3 (L4-4-3).....	103
96 Registro y monitoreo de la humedad para la corrida 1 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-1-1), arreglo 2 (L4-1-2) y arreglo 3 (L4-1-3).....	104
97 Registro y monitoreo de la humedad para la corrida 2 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-2-1), arreglo 2 (L4-2-2) y arreglo 3 (L4-2-3).....	104
98 Registro y monitoreo de la humedad para la corrida 3 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-3-1), arreglo 2 (L4-3-2) y arreglo 3 (L4-3-3).....	105
99 Registro y monitoreo de la humedad para la corrida 4 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-4-1), arreglo 2 (L4-4-2) y arreglo 3 (L4-4-3).....	105
100 Flow Simulation configurada en disipación de turbulencia, valor máximo de 1.18 W kg^{-1}	106
101 Flow Simulation configurada en energía de turbulencia, valor máximo de 0.014 J kg^{-1}	106
102 Flow Simulation configurada en tiempo de turbulencia, valor máximo de 249.706 s.....	107
103 Flow Simulation configurada en viscosidad de turbulencia, valor máximo de $4.3530\text{e-}07 \text{ Pa s}$	107
104 Flow Simulation configurada en presión del fluido, valor máximo de 102581.46 Pa.....	108
105 Inicio de ruta de configuración de Flow Simulation.....	109
106 Paso 1. El tipo de análisis es interno en el reactor, excluyendo las cavidades existentes en el diseño, se considera la transferencia de calor entre los objetos sólidos y la acción de la gravedad en el sistema.....	109

Figura		Pág.
107	Paso 2. El fluido utilizado es considerado un fluido compresible (aceite) y se define que las características del fluido pueden ser laminar y turbulento en función de la oposición geométrica de los alabes.....	110
108	Paso 3. El material solido considerado es acero inoxidable AISI 302.....	110
109	Paso 4. Se procede a definir la temperatura de frontera o ambiente de 328 K, sin considerar rugosidad para el acero inoxidable.....	111
110	Paso 5. En una siguiente etapa se asigna la temperatura y presión estándar para el sistema, la velocidad del fluido en vertical, los parámetros de turbulencia y la temperatura inicial del sólido.	111
111	Paso 6. Cargar animación: Results (Not loaded)/Load.....	112
112	Paso 7. Correr animación: Play.....	112
113	Paso 8. Se corre la animación y se observa el flujo del sistema.....	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Pág.
1	Propiedades técnicas del biodiésel.....	10
2	Propiedades técnicas del biodiésel y el diésel.....	11
3	Pines GPIO en BCM2835 y su descripción.....	21
4	Especificaciones técnicas de la Raspberry Pi 3 modelo B.....	22
5	Serie de arreglos para experimentos con factores a 2 niveles.....	31
6	Arreglo L4(2 ³).....	32
7	Dimensiones de diseño de cada componente del reactor.....	37
8	Descripción completa de los elementos que integran el sistema mecatrónico.....	40
9	Numero de Reynolds en relación a la velocidad de agitación de la reacción.....	45
10	Factores y niveles experimentales.....	46
11	Factores y niveles experimentales empleadas en un arreglo L4(2 ³).....	47
12	Interfaz de conexiones de pines GPIO del sistema mecatrónico.....	64
13	Valores promedio obtenidos en cada corrida y arreglo L4 realizado.....	80
14	Tipo de flujo en cada corrida y en cada arreglo obtenido durante las pruebas de validación.....	83

NOMENCLATURA

RPi	Raspberry Pi.
RCTA	Reactores continuos de tanque agitado (<i>CSTR – Continuous-Stirred Tank Reactor or Backmix Reactor</i> , en sus siglas en inglés).
RDТА	Reactores discontinuos de tanque agitado (<i>Batch Reactor</i> , en sus siglas en inglés).
RSCTA	Reactor semicontinuo de tanque agitado (<i>Semibatch Reactor</i> , en sus siglas en inglés).
PLC	Controlador Lógico Programable.
GPIO	Pines de conexión (<i>General Purpose Input/Output</i> , en sus siglas en inglés).
EDA	Diseño de diagramas electrónicos (<i>electronic design automation</i> , en sus siglas en inglés).
IDE	Entorno de desarrollo integrado.
PCB	placa de circuito impreso (<i>printed circuit board</i> , en sus siglas en inglés).
IDLE	Entorno de desarrollo integrado de Python.
SSH	Protocolo (<i>Secure Shell</i> , en sus siglas en inglés).
SFTP	Protocolo (<i>SSH Secure File Tansfer</i> , en sus siglas en inglés).
rpm	Revoluciones por minuto.
N _R	Numero de Reynolds.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años se ha explorado el desarrollo de nuevas fuentes de energía para sustituir el consumo de combustibles fósiles y coadyuvar a la disminución de los efectos negativos que el uso de estos hidrocarburos ocasiona al medio ambiente.^{1,2} Frente a este panorama, una mayor eficiencia energética en conjunto con el incremento del uso de las energías renovables, parecen ser una solución viable. Dentro de las energías renovables podemos mencionar, entre otras, a la energía solar, la energía eólica, la energía hidráulica y la energía de la biomasa, de la cual se derivan los biocombustibles. Estas fuentes se consideran inagotables (a escala humana), aunque en el caso de la biomasa, esto es así siempre que se respeten los ciclos naturales.³

En particular, los biocombustibles son recursos energéticos procedentes de la biomasa, clasificándose por tipo de generación o según la materia prima o tecnología requerida para generarlos. Estos recursos energéticos pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. En general, los biocombustibles son producidos por procesos convencionales como la fermentación de azúcares para producir bioetanol, la transesterificación de aceites para manufacturar biodiésel o la digestión anaerobia de desechos orgánicos para generar biogás, por mencionar algunos de ellos. Aunado a lo anterior, los biocombustibles presentan ventajas muy significativas como: (i) económicas, sustituir el desarrollo de las economías en base a hidrocarburos por energías renovables o el desarrollo de las economías agrícolas con el fomento de la producción de biomasa para la generación de biocombustibles siempre y cuando no compitan con la producción alimentaria; (ii) ecológicas, debido a que poseen un bajo impacto negativo al ambiente por sus bajas emisiones de gases de efecto invernadero y (iii) presentan ventajas operativas por su facilidad de producción y el tipo de operaciones unitarias simples que requieren (destilación, molienda, recolección, entre otros).^{2,4}

Específicamente el biodiésel ha sido empleado como un combustible alternativo que se puede obtener a partir de aceites vegetales o de grasas y que, entre otras características, se considera como una fuente de energía limpia, posee bajas emisiones tóxicas, emite reducidas emisiones de gases de efecto invernadero y es relativamente de fácil producción por medios químicos. En este último término, el biodiésel, es un éster que se obtiene mediante la reacción de transesterificación de los triglicéridos de los aceites vegetales o grasas con alcoholes en presencia de un medio alcali o ácido a temperaturas de reacción inferiores al punto de ebullición del alcohol. Aunado a lo anterior, y en términos de funcionalidad, el biodiésel, se produce para usarse en motores a diésel convencionales (como los que se usan en automóviles, camiones, autobuses o barcos) debido a que posee las mismas propiedades que el combustible diésel de hidrocarburos, sin embargo, debe ser mezclado en un porcentaje con diésel obtenido de la refinación del petróleo. Por ejemplo, la mezcla B20 significa una mezcla de 20% de biodiésel renovable con 80% de biodiésel de petróleo y es la mezcla más utilizada en el mercado.^{5,6} Dentro de este contexto, se ha mencionado que el proceso de transesterificación de biodiésel, se refiere a la reacción entre un aceite o una grasa

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

con un alcohol en un medio catalizado, para producir ésteres alquílicos de ácidos grasos (correspondientes al biodiésel) y subproductos como jabones (saponificación), glicerol o glicerina. La reacción en sí, transforma las moléculas de triglicéridos (de tamaño grande y ramificadas) en moléculas de ésteres alquílicos (lineales, no ramificadas, de menor tamaño) muy similares a las del petrodiesel. Los alcoholes empleados deben ser de bajo peso molecular, y entre éstos, el más utilizado es el metanol debido a su bajo costo, seguido por el etanol. El tipo de catalizador básico que comúnmente se emplea es el hidróxido de sodio o de potasio. Además, los procesos de producción de biodiésel pueden ser por lotes o continuos.⁷⁻⁹

Así mismo, es conveniente definir la metodología, variables y condiciones de operación para poder llevar a cabo las reacciones de transesterificación de biodiésel bajo un ambiente controlado que permita obtener el mayor rendimiento de conversión del aceite vegetal o grasa en el biocombustible. Entre otros estudios podemos mencionar, Medina-Villadiego *et al.*,¹⁰ reportan la obtención de biodiésel a partir de aceite usado (proveniente de restaurantes) y manejando condiciones de operación como relación aceite:ácido, concentración de catalizador, relación aceite:metanol, temperatura y tiempo de reacción de 60 °C 90 minutos, respectivamente. Queiroz *et al.*,¹¹ presentan un estudio donde obtienen biodiésel a partir de aceite de palma, y donde especifican el uso de etanol e hidróxido de sodio como catalizador a una temperatura de reacción de 60 °C con conversiones del 98%. Santana *et al.*,¹² describen la obtención de biodiésel a partir de aceite de girasol. Emplean un reactor de vidrio de 2 L de capacidad con agitación constante de 170 rpm y tiempos de reacción de 3 h. Analizan 3 temperaturas de reacción (25, 50 y 68 °C) y distintas relaciones etanol:aceite. Colombo *et al.*,¹³ emplean un reactor de recirculación a escala de banco con controles por medio de válvulas manuales, usan óxido de calcio como catalizador, metanol, temperatura de experimentación de 65 °C y tiempos de 40 minutos para alcanzar máximos de conversión del 98% de biodiésel a partir de aceite de soja. Rojas-González *et al.*,¹⁴ desglosan un compendio de diversos trabajos y distintas metodologías de producción de biodiésel por transesterificación biológica. Entre las variables de mayor relevancia mencionan rangos de temperatura de estudio entre 35-50 °C, empleo de etanol y sin presencia de catalizadores. Kudre *et al.*,¹⁵ reportan la producción de biodiésel a partir de grasas de pescado, donde los máximos de conversión (superiores al 95%) se lograron con temperaturas de reacción de 55 °C, tiempos de 60 minutos y utilizando metanol y catalizador de hidróxido de sodio, además de probar otras condiciones de operación y solventes. García-Díaz *et al.*,¹⁶ especifican en su estudio la obtención de biodiésel a partir de aceite comestible usado y analizando temperaturas de 30 y 50 °C con velocidades de agitación de 250 y 500 rpm. Emplean hidróxido de sodio como catalizador. Mención aparte es el trabajo de Varty & Lishawa,¹⁷ donde describen recetas para producir biodiésel a partir de aceite vegetal usado y de aceite vegetal virgen, empleando metanol e hidróxido sódico como catalizador.

De manera común, los estudios anteriores presentan la producción de biodiésel por transesterificación bajo la influencia de varias variables de operación como (i) temperatura de reacción, (ii) tiempo de reacción, (iii) tipo de alcohol, (iv) relación alcohol-aceite, (v) concentración de catalizador, (vi) concentración del medio de reacción, (vii) concentración de los ácidos grasos, (viii) concentración del solvente, (ix) concentración de la humedad, (x)

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

velocidad de agitación, entre otras. Siendo algunas de estas variables susceptibles a sistemas de control, instrumentación y automatización para (i) tener control en los tiempos de cada paso del proceso sin la intervención humana, (ii) monitorear el comportamiento de las variables durante la operación, y (iii) optimizar la producción de biodiésel a partir de biomasa bajo ambientes controlados y donde es conveniente el uso de reactores *batch* con cierto grado de automatización. Sin embargo, la mayoría de los estudios de producción de biodiésel se desarrollan a escala laboratorio o escala de banco, de baja capacidad volumétrica, en recipientes de vidrio y empleando medios de control manuales como, por ejemplo, uso de termómetros de vidrio para el monitoreo de la temperatura o sistemas de agitación magnética sin capacidad de medir los rpm exactamente. En el caso de emplear un reactor prefabricado, los controles generalmente son manuales o neumáticos a través de válvulas de apertura y cierre o botoneras de encendido-apagado de equipo eléctrico o mecánico. No obstante, se pueden citar algunos trabajos donde se han empleado reactores prefabricados o de diseño propio para la producción de biodiésel con cierto grado de control automatizado. López-Zapata *et al.*,¹⁸ proponen el uso de un prototipo de reactor automatizado a través de electroválvulas, integración de una placa de potencia para el control de velocidad del motor, empleo de microcontrolador Arduino Mega, resistencias térmicas con circuito eléctrico controlado, sensores de nivel, sensores de temperatura y una interfaz gráfica por software LabVIEWTM. Patajalo *et al.*,¹⁹ diseñan y construyen un reactor tipo *batch* donde integran un sistema de botonera para el control de electroválvulas NTP. Caro-Becerra *et al.*,²⁰ integran un controlador lógico programable (PLC) dentro del proceso para que realice el control de un sensor de temperatura, el cual está conectado a una resistencia eléctrica, y se regule el suministro de temperatura a la reacción. Álvarez-Vázquez *et al.*,²¹ proponen la automatización de un reactor por medio del uso de sensores de nivel, empleo de moto reductores, sensor de temperatura dirigidos por un microcontrolador Arduino Mega e interfaz en software LabVIEWTM. Marengo y Pereyra,²² desarrollan un trabajo en software para sugerir la automatización de una planta completa por medio de PLC. Mediante lo anterior proponen establecer lazos de control de motores, válvulas, switches y principalmente de las “recetas” (variables de operación) de biodiésel con las que operaría toda la planta en su conjunto.

Por otro lado, la Mecatrónica es un área de la Ingeniería que integra diversos aspectos tecnológicos como son el eléctrico, el electrónico, el mecánico y el computacional, con la finalidad de diseñar integralmente un sistema que comprenda una parte mecánica y una parte eléctrica para después comunicarlos mediante un microprocesador u ordenador junto con el análisis del comportamiento del sistema y un sistema de control. Dicho esto, la Mecatrónica permite dar solución a problemas de interés de la industria (por ejemplo, la mejora de máquinas o procesos o el incremento de la funcionalidad de los productos) y otros sectores, a través del diseño de sistemas mecatrónicos con su respectivo sistema de control y empleando una placa de desarrollo de hardware.²³⁻²⁵ De forma más específica los sistemas mecatrónicos permiten el desarrollo de sistemas embebidos, los cuales coadyuvan a compensar la no linealidad y deficiencias de la parte mecánica a través del desarrollo y uso de un sistema de control compuesto por algoritmos sofisticados para controlar el actuar de elementos como sensores, microprocesadores, actuadores, entre otros.²⁶ En este contexto, los sistemas de control se caracterizan por (a) operar en tiempo real

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

mediante un ordenador o procesador, (b) lograr el control de las variables de entrada para conseguir un dominio sobre las variables de salida de tal forma que se alcancen los valores deseados (consignas) y (c) manipular en si los elementos de control como sensores y actuadores. Para lograr establecer un sistema de control es pertinente definir los lazos existentes entre las variables medidas o controladas y las variables de control, pudiendo ser de lazo abierto o de lazo cerrado. Los de lazo abierto son sistemas no realimentados, económicos, pero normalmente inexactos debido a que solo existen el controlador y el proceso controlado, esto es, el controlador recibe una entrada de referencia y emite una señal actuante hacia el proceso controlado que a su vez arroja una respuesta de la variable controlada, sin importar el estado de la variable de respuesta. Los de lazo cerrado son sistemas de control realimentados que parten de una estructura de lazo abierto pero que integran adicionalmente un elemento de control más exacto que realiza la comparación de la variable controlada con la entrada de referencia y hace un ajuste del error presente para mantener la salida del sistema en el nivel preestablecido.²⁷

En este sentido, Raspberry Pi (RPi) es un ordenador de placa reducida que puede ser integrado en un sistema embebido de lazo abierto o de lazo cerrado. La placa RPi cuenta con una capacidad de desarrollo de procesamiento similar a los de un ordenador de escritorio y habilitada para comunicarse con diversos periféricos gracias a los puertos y buses estándares con los que cuenta, es por ello que se considera como una minipc. La placa RPi es un dispositivo de arquitectura abierta y de fácil programación gracias a sus pines de propósito general de entradas/salidas GPIO (*General Purpose Input/Output*, en sus siglas en ingles) que permiten conectar a la placa diversos componentes. Aunado a lo anterior, la placa Raspberry Pi puede trabajar con diversos sistemas operativos y lenguajes de programación, como lo pueden ser Raspbian y Python, respectivamente, entre otros.²⁸ Debido a todas estas ventajas que Raspberry Pi aporta al campo de la automatización, se ha estudiado, en los últimos años, el uso de este ordenador dentro del área de la investigación del control de procesos fisicoquímicos o bioquímicos. Por mencionar algunos trabajos, Hulatt *et al.*,²⁹ emplean una placa Raspberry para monitorear y registrar el comportamiento de un fotobiorreactor en el estudio de producción de micro-algas. Lagu & Deshmukh,³⁰ presentan un trabajo para automatizar una planta de tratamiento de agua a través de sensores, actuadores y motores con interface al controlador Raspberry Pi. Ate & Abdelrahim,³¹ estudian la capacidad de monitorear y controlar la temperatura de una solución química en un reactor vessel. Akbar *et al.*,³² desarrollan un sistema de procesamiento de señales utilizando un sensor electroquímico con interfaz a una placa RPi y emplearlo en la detección de metales pesados en agua.

No obstante, y en relación a temáticas de biodiésel empleando el ordenador Raspberry Pi, se ha explorado escasamente su aplicación dentro de este campo como, por ejemplo, Pranoto *et al.*,³³ donde desarrollan una aplicación usando RPi para el monitoreo del estado (prevención de vida útil) de un filtro de diésel convencional pero que se somete a pruebas de trabajo empleando biodiésel B10, B20 y B30. Klapp *et al.*,³⁴ estudian la capacidad de incrementar la producción de biodiésel mediante sonicación y empleo de energía solar. Utilizan RPi para un mejor control del proceso. Tsukamoto,³⁵ presentan un trabajo de automatización de una maquina didáctica de

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

producción de biodiésel donde emplea RPi para la interfaz con sensores y otros elementos controlados en tiempo real.

Por lo tanto, en el presente trabajo se propone una metodología para el diseño y construcción de un sistema mecatrónico y de un reactor de bajo volumen para el control de variables de operación en la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal. Siendo un reactor capaz de operar en flujo continuo, discontinuo o semicontinuo. Para la metodología del sistema de control, instrumentación y automatización se empleó una placa Raspberry Pi 3 modelo B, un sensor RuuviTag para la medición de temperatura con capacidad de comunicación vía Bluetooth y un actuador lineal de motor a pasos NEMA 23, entre otros elementos. La interfaz de control se estableció empleando lenguaje de programación Phyton. Para el desarrollo del reactor se estableció un diseño cilíndrico interno de base cónica construido en acero inoxidable calibre 16, tipo 304, de grado alimenticio de 4 L de capacidad y de un cilindro externo manufacturado en acero galvanizado calibre 18.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos generales

1. Diseñar y construir un reactor de flujo semicontinuo automatizado de bajo volumen mediante parámetros mecánicos para llevar a cabo reacciones de producción de biodiésel.
2. Desarrollar un sistema mecatrónico mediante el uso de Raspberry Pi y lenguaje Phyton para el control de la temperatura de reacción y la velocidad de agitación en la producción de biodiésel.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar mecánicamente el reactor de biodiésel mediante software de diseño para definir dimensiones, componentes y funcionamiento del equipo.
- Construir el reactor de biodiésel mediante el uso de materiales de fácil adquisición y de resistencia mecánica y química comprobada para llevar a cabo reacciones de producción de biodiésel bajo un flujo semicontinuo.
- Diseñar los diagramas electrónicos mediante software de automatización para validar el funcionamiento del sistema mecatrónico previo a su construcción.
- Diseñar el código de programación de control mediante lenguaje Python para lograr la interfaz de los elementos empleados.
- Construir el sistema mecatrónico mediante la integración de elementos de hardware y electrónica modular usando Raspberry Pi para desarrollar el sistema de control y el código de programación.
- Realizar pruebas de producción de biodiésel mediante la puesta en operación del reactor y del sistema mecatrónico bajo un diseño experimental para validar la funcionalidad del sistema de control.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los efectos negativos del consumo de combustibles fósiles, desde el aspecto económico por su altos precios y disponibilidad en el mercado (alrededor de \$60.8 USD por barril en marzo de 2021 de la mezcla mexicana de petróleo crudo de exportación, fuente: *banxico.org.mx – precio de la mezcla mexicana de petróleo*), así como en términos ambientales, por su alta contribución a la generación de gases de efecto invernadero (10,000 toneladas anuales de CO₂ por utilizar petróleo, fuente: *forbes.com.mx – los 10 países que más contaminan por consumir petróleo*), han orillado que en los últimos años se busquen nuevas fuentes de energía alternativa y viable para su consumo en diversos sectores industriales. Dentro de este panorama, los biocombustibles y en específico el biodiésel han demostrado ser una opción muy viable para sustituir total y/o parcial el consumo de hidrocarburos, como el diésel del petróleo (\$20.28 MX por litro, marzo de 2021, fuente: *intermodalmexico.com.mx – histórico del precio de diésel*), por las ventajas ambientales y económicas que ofrece desde su producción, distribución y consumo final (precio por litro de biodiésel a partir de aceite usado desde \$11.10 hasta \$13.72 MX. fuente: REMBIO-2016).

Sin embargo, el rendimiento de la producción de biodiésel depende principalmente del tipo de materia prima (biomasa) empleada y del control de las variables de operación de las reacciones de transesterificación de un aceite vegetal o grasa. Diversos estudios reportados en la literatura se enfocan a la producción de biodiésel empleando diversas biomásas y presentan diferentes metodologías de generación del biocombustible, pero solo reportan en términos generales un control (sin especificar como se realiza) de valores constantes de temperatura y tiempos de reacción, tipos y concentraciones de reactivos y catalizadores empleados, porcentajes de rendimientos de reacción y conocimientos básicos como cinéticas de reacción, simulaciones computacionales o balances de energía, entre otros.

Derivado de lo anterior se presenta un área de oportunidad para aplicar diversas metodologías de la Mecatrónica, como el uso del ordenador Raspberry Pi, y explorar el desarrollo de sistemas mecatrónicos para el control de las variables de operación en la producción de biodiésel dado que, si bien se reportan varios trabajos referentes a la automatización de procesos fisicoquímicos o bioquímicos, no se disponen de muchos estudios específicos y enfocados a esta área de aplicación del conocimiento de obtención del biocombustible por medio de un reactor automatizado.

El presente proyecto propone el desarrollo de un sistema mecatrónico – empleando Raspberry Pi – en conjunto con el diseño y construcción de un reactor automatizado que sean capaces de ser aplicados en métodos de producción de biodiésel. Se establecerán variables de control de operación para definir la forma de automatizar el reactor propuesto. El desarrollo del sistema mecatrónico será mediante la integración de un sensor remoto inalámbrico y un motor lineal a pasos, entre otros elementos. Además, se empleará lenguaje de programación Python como medio de interfaz del sistema. Para la validar la funcionalidad del proyecto, se define un diseño experimental mediante arreglos ortogonales.

1.4 HIPÓTESIS

Es posible diseñar y construir un reactor automatizado que permita llevar a cabo en él una reacción de transesterificación para la producción de biodiésel de manera controlada bajo flujo semicontinuo.

Es posible desarrollar un sistema mecatrónico a base de Raspberry Pi con la capacidad de controlar las variables de operación en la producción de biodiésel y comunicarse por una interfaz desarrollada en Python.

1.4.1. Hipótesis alterna

No es posible diseñar y construir un reactor automatizado que permita llevar a cabo en él una reacción de transesterificación para la producción de biodiésel de manera controlada bajo flujo semicontinuo.

No es posible desarrollar un sistema mecatrónico a base de Raspberry Pi con la capacidad de controlar las variables de operación en la producción de biodiésel y comunicarse por una interfaz desarrollada en Python.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

Como alcance se tiene que:

Para las pruebas de funcionalidad del sistema (transesterificación de aceite y obtención de biodiésel) se emplea aceite comestible vegetal virgen bajo las condiciones reportadas por Varty & Lishawa.¹⁷

La validación de funcionalidad se define en base a la repetitividad del monitoreo y registros de las variables de estudio bajo un diseño experimental por arreglos ortogonales L4.

Como limitaciones se cita:

Esta fuera de alcance del proyecto la caracterización el biodiésel obtenido o la ejecución de mejoras de reingeniería (si lo hubiera) en el reactor. Ambos conceptos se establecerán (en su caso) como trabajo a futuro.

Para determinar las dimensiones del tanque del reactor, se emplearon simples ecuaciones de cálculo de volumen para cuerpos cilíndricos y cilíndrico cónicos. Dentro de este contexto, el uso de ecuaciones de diseño para determinar las dimensiones del reactor, así como de ecuaciones propias de la teoría de la termodinámica o transferencia de calor (modelación matemática) para predecir el flujo de temperatura en el fluido de estudio durante la puesta en operación del reactor esta fuera de alcance. Lo anterior se solventa mediante el uso software de diseño mecánico especializado.

El diseño y construcción del reactor fue del tipo continuo de tanque agitado, con una zona de descarga cónica y con la capacidad de poder operarse de manera continua, discontinua o semicontinua. Para el presente estudio, en la etapa de validación de funcionalidad del sistema mecatrónico, se operó el reactor de manera semicontinua. No se exploró el desempeño del sistema en las otras formas de operación.

II. MARCO TEÓRICO

En esta sección se presenta una breve revisión de conceptos sobre: biodiésel y reactores químicos, sistemas mecatrónicos, automatización y sistemas de control, ordenador Raspberry Pi, sensores y actuadores, así como aplicaciones para el logro de la interfaz. De cada tema se hace énfasis en aquellos conceptos involucrados en la parte medular de este trabajo.

2.1 ENERGÍAS RENOVABLES

En las últimas décadas han sido exploradas como una forma de acceso a la energía limpia. Por ejemplo: las de origen solar, eólico, hidráulico, mareomotriz, geotérmica o de combustibles renovables como la biomasa (incluyendo biocombustibles) que se consideran que se renuevan mediante procesos naturales., ver Figura 1. A nivel global, se han dirigido esfuerzos para promover el uso de las energías renovables dentro de las economías de los países, por ejemplo, en la 5ta cumbre de las Américas, realizada en 2009, se promueve el desarrollo de sistemas de energía más limpios, asequibles y sostenibles; en la asamblea general de las Naciones Unidas del 2012, se establece dar prioridad al uso de la energía renovable y la implementación de proyectos de eficiencia energética; en la declaración de la iniciativa de las Cumbres de América Latina y el Caribe – Unión Europea – (CELAC-UE) del 2013, se establece el crecimiento sostenido de fuentes de energía renovable en las redes nacionales y regionales de energía acorde a los recursos de cada país, entre otras políticas.³⁶

En particular en México, la economía está centrada en el aprovechamiento de los recursos fósiles en la generación de energía eléctrica y en los últimos años se ha observado un decremento del aprovechamiento de las energías renovables en nuestro país a pesar de que la geografía nacional es rica en recursos naturales que pueden aprovecharse como una opción de migración hacia una economía menos dependiente de los recursos fósiles y donde el 13% de la energía eléctrica consumida en la nación proviene de fuentes renovables.³⁷

Dentro de este panorama, los biocombustibles pueden ser una alternativa para la generación de electricidad.

2.2 BIOCOMBUSTIBLES

Los biocombustibles son todos aquellos energéticos que se emplean como combustibles para proveer energía similar a los generados por los carburantes fósiles. Los biocombustibles se obtienen a partir de la biomasa (materia orgánica) de origen vegetal o animal, entre los cuales podemos mencionar al biodiésel, los bioalcoholes, el biogás, la madera o el carbón vegetal, ver Figura 2 (*fuentes: concepto de biomasa*). Una clasificación típica de los biocombustibles es acorde al tipo de origen de la biomasa: (a) la biomasa primaria agrupa los seres fotosintéticos como los residuos agrícolas y forestales, (b) la biomasa secundaria como la carne o materia fecal de los animales,

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

(c) la biomasa terciaria son los restos de animales herbívoros devorados por carnívoros, (d) la biomasa natural es la que se produce en la tierra y océanos, (e) la biomasa residual la que se genera de actividades humanas y desechos agrícolas y forestales y (f) cultivos energéticos agrícolas empleados para la producción de biocombustibles. Otra clasificación de los combustibles que se acepta comúnmente es por generaciones: (i) los de primera generación se producen a partir de aceites y azúcares comestibles provenientes de plantas de maíz, girasol, soja o caña de azúcar, (ii) los de segunda generación se obtienen de materias primas no alimentarias para el ser humano como los residuos forestales y agrícolas o el aceite reciclado de cocina, (iii) los de tercera generación emanan de organismos capaces de producir su propio alimento como las algas y (iv) los de cuarta generación agrupan los biocombustibles que son producidos mediante ingeniería genética para que capturen, por ejemplo, más CO₂ del ambiente.^{38, 39}

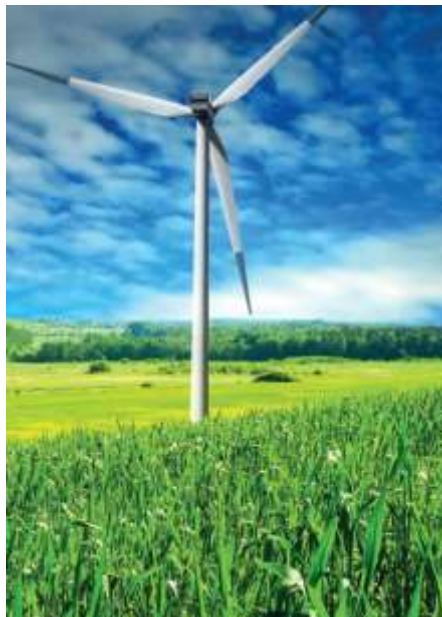


Figura 1. Energías renovables.



Figura 2. Biocombustibles a partir de biomasa.

2.3 BIODIÉSEL

El biodiésel es un biocombustible que desde el aspecto químico se define como un éster monoalquilo de ácidos grasos de cadena larga derivados de biolípidos obtenido a partir de aceites vegetales o de grasas animales y desde el aspecto funcional es una fuente de energía alterna que puede ser usado en motores de combustión interna de diésel en mezclas B20 que significa que contiene 20% biodiésel y 80% diésel de hidrocarburos. Si se compara el valor calorífico del diésel (derivado del petróleo) con el biodiésel, resultan ser muy cercanos, esto es el biodiésel oscila entre 39-41 MJ/kg en comparación con los 43 MJ/kg del diésel. Técnicamente, el biodiésel es un biocombustible equivalente al diésel que cumple los requerimientos de estándares ASTM D 6751. Generalmente el biodiésel se produce a través de la reacción del aceite vegetal o grasa con un alcohol como metanol o etanol y en presencia de un catalizador que permite obtener ésteres de metilo o etilo según corresponda, en otras palabras, se obtiene el biodiésel y productos alternos como la glicerina. En la Tabla 1, se presentan las propiedades técnicas del biodiésel.⁴⁰

Tabla 1. Propiedades técnicas del biodiésel.

Nombre común	Biodiésel
Nombre químico común	Ácido graso de metil éster o etil éster
Formula química	Metil ester $C_{14}-C_{24}$ o $C_{15-25} H_{28-48} O_2$
Viscosidad cinemática (mm^2/s , a 313 K)	3.3–5.2
Densidad (kg/m^3 , a 288 K)	860–894
Punto de ebullición (K)	>475
Punto de inflamabilidad (K)	430–455
Rango de destilación (K)	470–600
Presión de vapor (mm Hg, a 295 K)	<5
Solubilidad en agua	Insoluble en agua
Apariencia física	Líquido limpio color ligeramente amarillo oscuro
Olor	Olor ligeramente a jabon y humedad
Biodegradabilidad	Más biodegradable que el diésel de petróleo
Reactividad	Estable, pero evitar contacto con agentes oxidantes fuertes

El biodiésel, es un combustible obtenido por medio del tratamiento físico o químico de materia vegetal o animal, la cual debe de poseer ciertas características físicas y químicas para transformarse en el biocombustible. También se considera que el biodiésel se compone de triglicéridos que se obtienen por la esterificación de los grupos hidroxilo de una molécula de glicerol con tres moléculas de radicales grasos y en donde reacciones de

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

transesterificación permiten transformarlos en el biodiésel gracias a la presencia un alcohol como el metanol y un catalizador como el hidróxido de sodio o de potasio.⁴¹

En la Tabla 2, se muestra un comparativo de las propiedades físicas del biodiésel y el diésel.⁴² En la Figura 3 (fuente: *bjultrasonic.com*), se observa el tipo de combustión presente en ellos y como la ventaja ambiental del biodiésel es evidente.

Dentro de este panorama el ciclo del biodiésel permite observar como el biodiésel es obtenido desde su origen a partir de plantas mediante la transesterificación de su aceite y finalmente su empleo en actividades humanas, ver Figura 4 (fuente: *urbantecno.com*).⁴³ Siendo importante mencionar que durante la transesterificación para obtener un biodiésel B100, se emplea un embudo de separación donde el biodiésel queda en la parte superior y la glicerina en la parte inferior.

Tabla 2. Propiedades técnicas del biodiésel y el diésel.

Datos físicos-químicos	Biodiésel	Diésel
Composición combustible	Éster metílico	Hidrocarburo
Poder calorífico inferior, kcal/kg (aprox.)	Ácidos grasos C12-C22	C10-C21
Viscosidad cinemática, cSt (a 40 °C)	9500	10800
Peso específico, g/cm ³	3.5–5.0	3.0–4.5
Azufre, % P	0.875–0.900	0.850
Punto ebullición, °C	0	0.2
Punto inflamación, °C	190-340	180-335
Punto escurrimiento, °C	120-170	60-80
Número cetano	48–60	46
Relación estequiometria Aire/comb. p/p	13.8	15



Figura 3. Diferencia de la combustión entre el biodiésel (izq.) y el diésel (der.).

2.4 TIPOS DE REACTORES QUÍMICOS

Un reactor químico es un recipiente donde se puede llevar a cabo una reacción química. Una reacción química heterogénea ocurre cuando los reactivos no se encuentran en la misma fase, caso contrario, una reacción homogénea ocurre cuando las fases de los reactivos son las mismas. Una fase entre reactivos y productos puede ser sólida, líquida o gaseosa. Debido a lo anterior, los reactores químicos se pueden clasificar inicialmente en reactores homogéneos y heterogéneos, y posteriormente en reactores de flujo pistón o mezcla perfecta (también llamados reactores tanque agitados). En el caso de los reactores de tanque agitados se pueden catalogar según la forma en que son operados (carga del reactor, reacción química, descarga del reactor y en su caso, limpieza): en forma discontinua, continua o semicontinua.⁴⁴

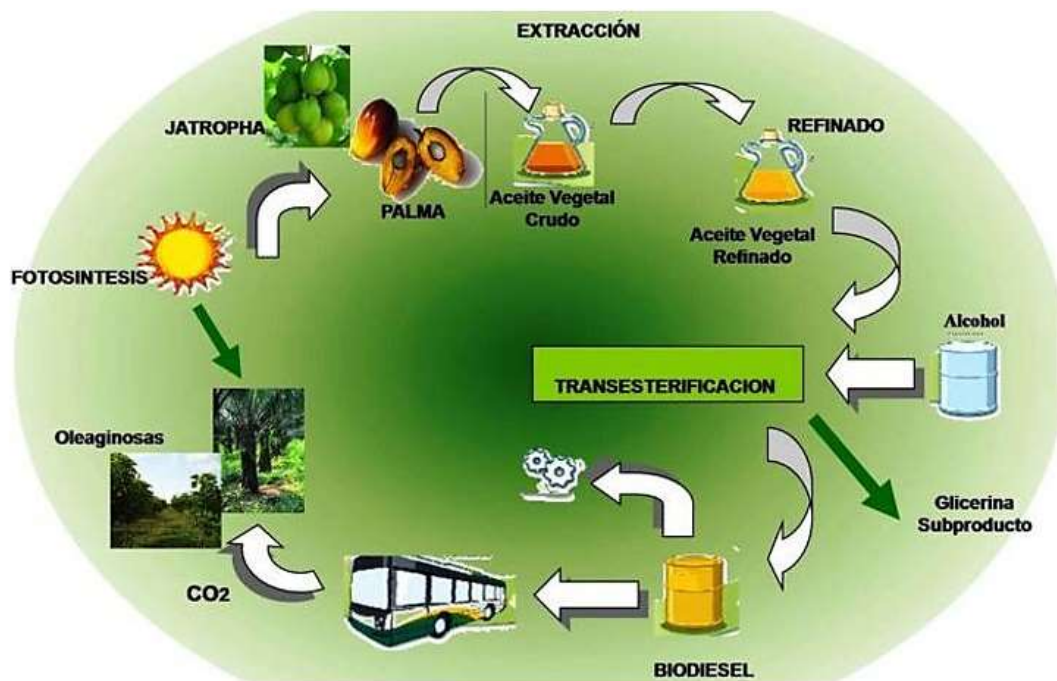


Figura 4. Ciclo del biodiésel.

Los reactores continuos de tanque agitado (RCTA) (*CSTR – Continuos-Stirred Tank Reactor or Backmix Reactor*, en sus siglas en inglés) trabajan de forma estacionaria debido a que las propiedades físicas y composición de la reacción mezclada no varían con el tiempo, aunque inicialmente durante su puesta en marcha deben comportarse de manera no estacionaria. Son adecuados para reacciones de gran escala, permiten mantener la constancia de las condiciones de operación, se pueden automatizar y controlar sencillamente, pero requieren elevadas inversiones iniciales, ver Figura 5. Los reactores discontinuos de tanque agitado (RDTA) (*Batch Reactor*, en sus siglas en inglés) operan en forma no estacionaria debido a que las propiedades físicas y la composición de la reacción si varían con el tiempo. Son reactores que se emplean a baja escala, para explorar nuevos procesos o

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

fabricar productos de gran valía, son fáciles de operar y requieren baja inversión inicial, ver Figura 6. En la Figura 7, se muestra un reactor semicontinuo de tanque agitado (RSCTA) (*Semibatch Reactor*, en sus siglas en inglés).⁴⁵

El funcionamiento de un RDTA consiste en alimentar al reactor los reactivos de una sola vez, esperar a que concluya el tiempo de reacción (no hay entradas ni salidas por lo que la masa se mantiene constante) y retirar los productos. Por otro lado, en el RCTA, existe entrada y salida de materia constante durante todo el tiempo de operación. En la Figura 8, se observa gráficamente como operan los RCTA y los RDTA.⁴⁶

Los reactores RSCTA son un intermedio entre los dos anteriores, propiamente en este tipo de reactores, el funcionamiento se basa en introducir un reactivo de una sola vez y añadir un segundo o más de forma continua durante el tiempo de reacción, por lo tanto, trabaja preferentemente en la fase líquida y la masa de la mezcla no se mantiene constante. Además, una vez agregada la mezcla reaccionante al inicio, se tiene flujo continuo de entrada y/o salida. Una forma de trabajar estos reactores es manteniendo la velocidad de reacción constante al variar la velocidad de adición de uno de los reactivos, sin embargo, se debe controlar la sobredosificación para mantener regulado la parte exotérmica de la reacción y evitar un proceso fuera de control (generalmente manifestadas por la pérdida de agitación o control de la temperatura). Siendo lo anterior un área de oportunidad en estos tipos de reactores para establecer como objetivo la alimentación de la corriente de alimentación y el control de la temperatura. En la Figura 9, se visualiza gráficamente como operan los RSCTA.⁴⁶

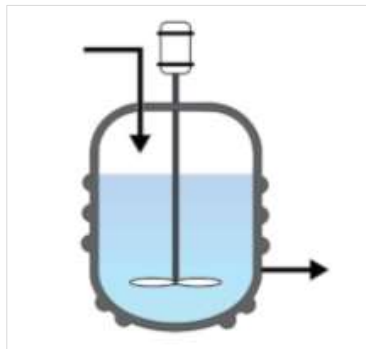


Figura 5. Reactor continuo CSTR.

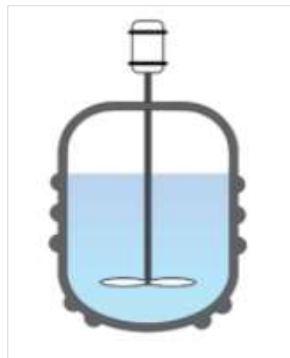


Figura 6. Reactor discontinuo Batch.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
 Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
 Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

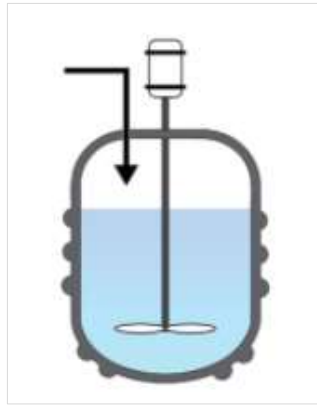


Figura 7. Reactor semicontinuo RSCTA.

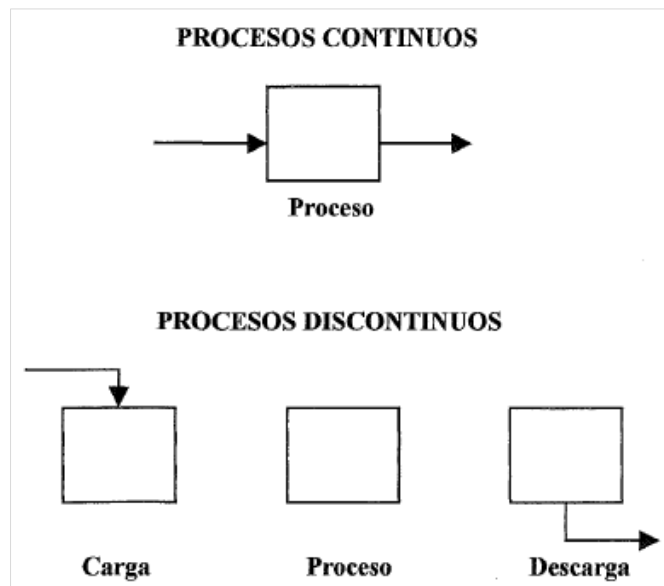


Figura 8. Forma de operación de un proceso continuo RCTA (arriba) y proceso discontinuo RDTA (abajo).

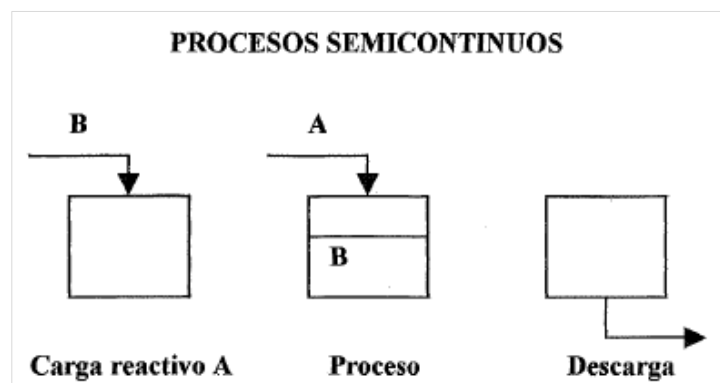


Figura 9. Forma de operación de un proceso semicontinuo RSCTA.

2.5 TRANSFERENCIA DE CALOR EN REACTORES

El calor se transfiere por conducción, convección y/o radiación, ver Figura 10. En la conducción la transferencia de energía se da por medio de un soporte físico de manera tal que las energías internas de las zonas más calientes se desplazan a las de menor temperatura. La convección también se produce en sentido de las temperaturas decrecientes y se basa en un soporte físico en movimiento donde el desplazamiento de masas en el seno de un fluido provoca la mezcla e intercambio de calor entre zonas. En la radiación no se requiere de soporte físico para transmitirse (inclusive su presencia atenúa su presencia) y no requiere de una diferencia de temperatura entre cuerpos.⁴⁷

La termodinámica es una rama de la física que estudia los requisitos de transferencia de calor de un sistema, es decir, predice el intercambio de calor en un sistema al realizar un proceso, aunque no puede especificar el tipo de mecanismo por el cual se lleva a cabo tal transferencia. Siendo la teoría de la transferencia de calor el campo de conocimiento que permite conocer cómo se lleva a cabo dicha transferencia. De forma más clara, al operar un motor de combustión interna se presenta un incremento de temperatura por lo que se aplica la termodinámica para obtener información relativa a los requisitos de enfriamiento del motor (rango de temperatura deseable de operación), pero no especifica qué tipo de intercambiador de calor (diámetro, longitud, tipo de material, arreglo) es necesario implementar para llevar a cabo un enfriamiento ni con que enfriarlo (agua, aire).⁴⁸

La transferencia de calor en un reactor se da por la adición o disminución de calor por conducción a través de la pared de vidrio o metálica del reactor donde se involucra el coeficiente de transmisión del material en cuestión (facilidad con la que un material trasmite el calor). Por otro lado, la transferencia térmica de un sólido a un líquido (en movimiento) se da por convección o también llamada intercambio de calor por convección o emisión calorífica. En la Ingeniería la emisión calorífica ocurre generalmente entre la superficie de un sólido y el flujo de un fluido. Por tanto, se puede considerar que, dentro de un reactor, en donde ocurre una reacción química, y donde se añade calor, en el proceso de transmisión de calor entre un sólido y un fluido se involucran factores como las dimensiones del sólido, condiciones del flujo, temperatura de operación, propiedades del fluido, entre otras.⁴⁸

Para lo anterior existen diversos modelos matemáticos que permiten comprender como se realiza la cinética y transferencia de calor de una reacción química dentro de un reactor, pero también, hoy en día, se cuentan con diversos softwares de diseño mecánico capaces de realizar un análisis térmico, por ejemplo, SolidWorks Simulation.⁴⁹

2.6 AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES FISICOQUÍMICOS

Hoy en día el concepto de automatización se considera clave para la industria en su conjunto debido a que puede ser incorporada en todos los procesos de cualquier fábrica para coadyuvar a su productividad y sobre todo reduciendo los riesgos para los operarios.⁵⁰ En términos económicos la automatización permite un ahorro en

términos de ingeniería debido a que los técnicos se pueden enfocar en la producción en lugar de dedicar tiempo a reescribir el código.⁵¹

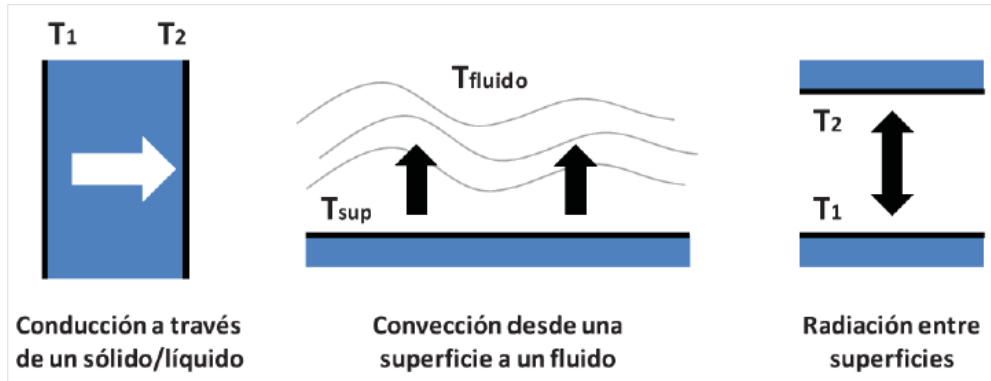


Figura 10. Mecanismos de transferencia de calor.

Para la Real Academia de las Ciencias Físicas y Exactas el concepto de automática se atribuye al conjunto de operaciones, tareas y actividades previamente programadas donde se sustituye al operario, por tanto, la automatización implica que las responsabilidades atribuidas al operador ahora se hacen de manera programada por máquinas. Es por ello que la automatización se puede aplicar a cualquier proceso industrial, principalmente a la industria manufacturera (donde existen máquinas de control numérico por ordenador) y la industria de procesos (donde los procesos se controlan por algoritmos de control avanzado para optimizar sus actividades), ambas industrias con el precepto de optimizar sus procesos internos. Así mismo contribuye al control automático del proceso donde se sustituye la persona por un ente automático más, sin embargo, es mejor considerar la automatización como una cooperación entre el usuario y el controlador.⁵²

En el caso de la automatización y control de reactores, el uso de ordenadores ha permitido revolucionar los procesos discontinuos permitiendo reducir el tiempo del ciclo o eliminando tiempos muertos del proceso por citar unos ejemplos. En particular, para reactores discontinuos el control se centra en la variable de temperatura porque es la más fácil de seguir dentro de un reactor por medio del uso de elementos de control. Siendo estos elementos controladores del tipo lineal como controladores lógico programables (PLC) o controladores PID (proporcional, integral y derivativo). No obstante, se han explorado demás sistemas de control para procesos discontinuos como algoritmos basados en modelos realísticos, algoritmos recursivos o los de control predictivo y adaptativo siendo un ejemplo de ellos la respuesta que arroja la temperatura para activar válvulas de paso de fluidos. Dentro de este panorama, para el caso de los reactores semicontinuos, también se han reportado trabajos en el control y optimización de los mismos con la finalidad de llevar a cabo el control del flujo de adición y conseguir la máxima productividad en el mínimo tiempo requerido dentro de un intervalo de temperatura determinado. Además, de que se han explorado otras condiciones como el pH y la concentración.⁴⁶ En la Figura 11, se muestra un ejemplo de elementos de control y automatización (sensores y válvulas) para un reactor químico bajo el siguiente

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

principio de funcionamiento de control: Se introduce un reactivo alcalino y al alcanzar un nivel H2, se cierra su válvula de suministro y se abre la de un reactivo ácido hasta alcanzar un nivel H3. Al llegar al nivel H3 se cierra la válvula del reactivo ácido y se comienza el proceso de calentamiento (resistencia térmica) y de agitación (agitador). Al alcanzar la temperatura de 100 °C se detiene el calentamiento y la agitación y se abre la válvula de salida normal. Al descargar el producto resultante y al llevar al nivel H1 se cierra la válvula de salida normal y se detiene el proceso. En el caso de que la presión alcance el máximo, se activa una secuencia automatizada de seguridad donde se detiene el proceso (calentamiento y agitación) y se abre la válvula de escape para liberar presión y se abre la válvula de salida defectuosa para vaciar el equipo hasta un nivel H1.⁵³

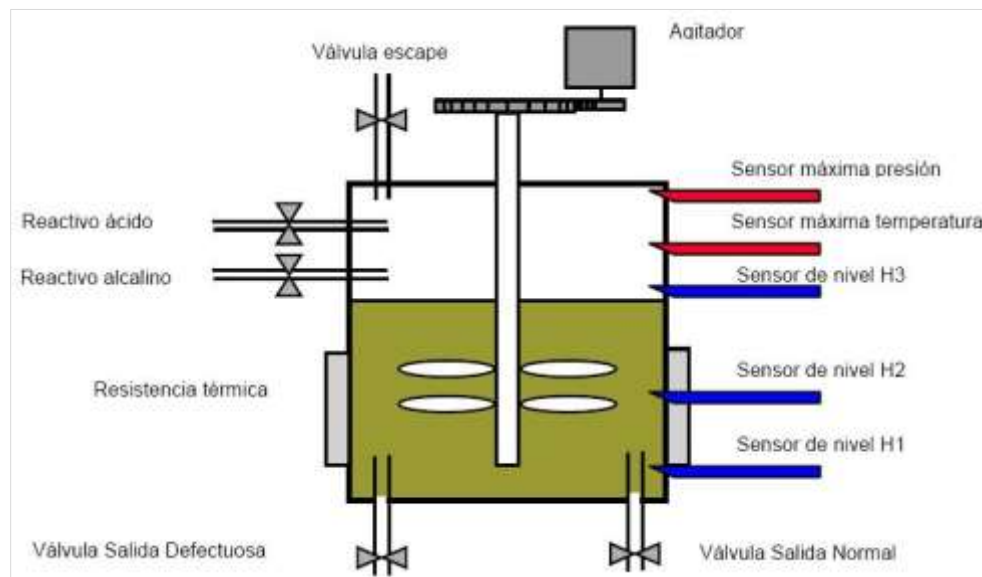


Figura 11. Control y automatización de un reactor químico.

2.7 SISTEMAS MECATRÓNICOS

Un sistema mecatrónico considera la integración de componentes mecánicos, electrónicos y de programación que consideran elementos de control para realizar la automatización de procesos. Un sistema mecatrónico está diseñado para realizar una función específica y típicamente consisten de una estructura mecánica estructural formada por servoactuadores, servomotores, controladores, dispositivos de acondicionamiento, procesamiento y control de la señal, dispositivos de interfaz, fuentes de energía, equipo digital y programación y los diferentes tipos de sensores de adquisición y transferencia de información. El diseño de un sistema mecatrónico considera el tipo de información de señales de entrada y salida, el tipo de sensor o transductor a utilizar, el voltaje requerido y su relación con los fenómenos disipativos y procesos térmicos entre sus componentes mecánicos. Un sistema mecatrónico está basado en microprocesadores, los cuales están integrados y diseñados para controlar una gama de funciones y están programados de tal manera que el usuario final no puede modificar el algoritmo. Se

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

puede decir que las partes esenciales de un sistema mecatrónico son los sensores, el control y actuadores. Los sensores permiten que el sistema interprete el exterior, es decir, logran convertir señales analógicas en eléctricas para que la etapa de control las pueda procesar. El control se refiere al cerebro del sistema mecatrónico pues es donde se procesan las señales eléctricas y se realizan tomas de decisión. Finalmente, los actuadores o transductores son los dispositivos que ejecutan la información obtenida ya que transforman la energía eléctrica de entrada en otra energía como por ejemplo la mecánica.^{54, 55} En la Figura 12, se presenta un sistema mecatrónico controlado por PLC y compuesto por diversos módulos de distribución, estación de prueba, estación de manipulación y clasificadora focal (fuente: *dolangeducation.es*).



Figura 12. Sistema mecatrónico.

2.8 RASPBERRY PI (RPi)

Raspberry Pi (RPi) es un ordenador de placa única reducida (de diferentes modelos) con LAN inalámbrica y conectividad Bluetooth capaz de realizar funciones similares a los de un ordenador de PC pero con un costo menor que hace atractiva su empleo para correr programas, procesar palabras y conectarse a la red ya que trabaja con un procesador que dispone de una arquitectura ARM (*Arcon RISC Machine*, en sus siglas en inglés), memoria RAM, tarjeta gráfica GPU, pines de conexión GPIO (*General Purpose Input/Output*, en sus siglas en inglés) y diversos conectores y sistemas para comunicar tanto audio como video (RCA, USB y micro USB, Ethernet, RJ45, HDMI, Tarjeta SD, entre otros) por lo que una amplia gama de hardware (periféricos) pueden conectarse a ella, ver Figura 13.^{56, 57} En la Figura 14, se presenta una placa Raspberry Pi 3 modelo B (fuente: *raspberrypi.org*). En la Figura 15, se muestra los elementos que componen una placa Raspberry Pi modelo B.⁵⁶

Gracias a los pines GPIO fungen como la interfaz de bajo nivel para lograr conectarse con otros módulos de subsistemas, es decir, la interfaz GPIO permite comunicarse con demás dispositivos electrónicos para

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

controlarlos o para recabar información como lo pueden ser actuadores y sensores, respectivamente. Por ejemplo, el encendido y apagado de un foco o recibir la instrucción de una botonera. En total son 40 pines que se pueden programar mediante software para recibir señales de entrada y salida, así como periféricos. Del total 26 son para la GPIO y el resto pines de alimentación o tierra.^{56, 57}

En la Tabla 3, se muestra la descripción de los pines y su comunicación con el microprocesador BCM2835 que tiene integrada la placa.⁵⁶ En la Tabla 4, se presentan las características técnicas de la placa Raspberry Pi 3 modelo B.⁵⁶

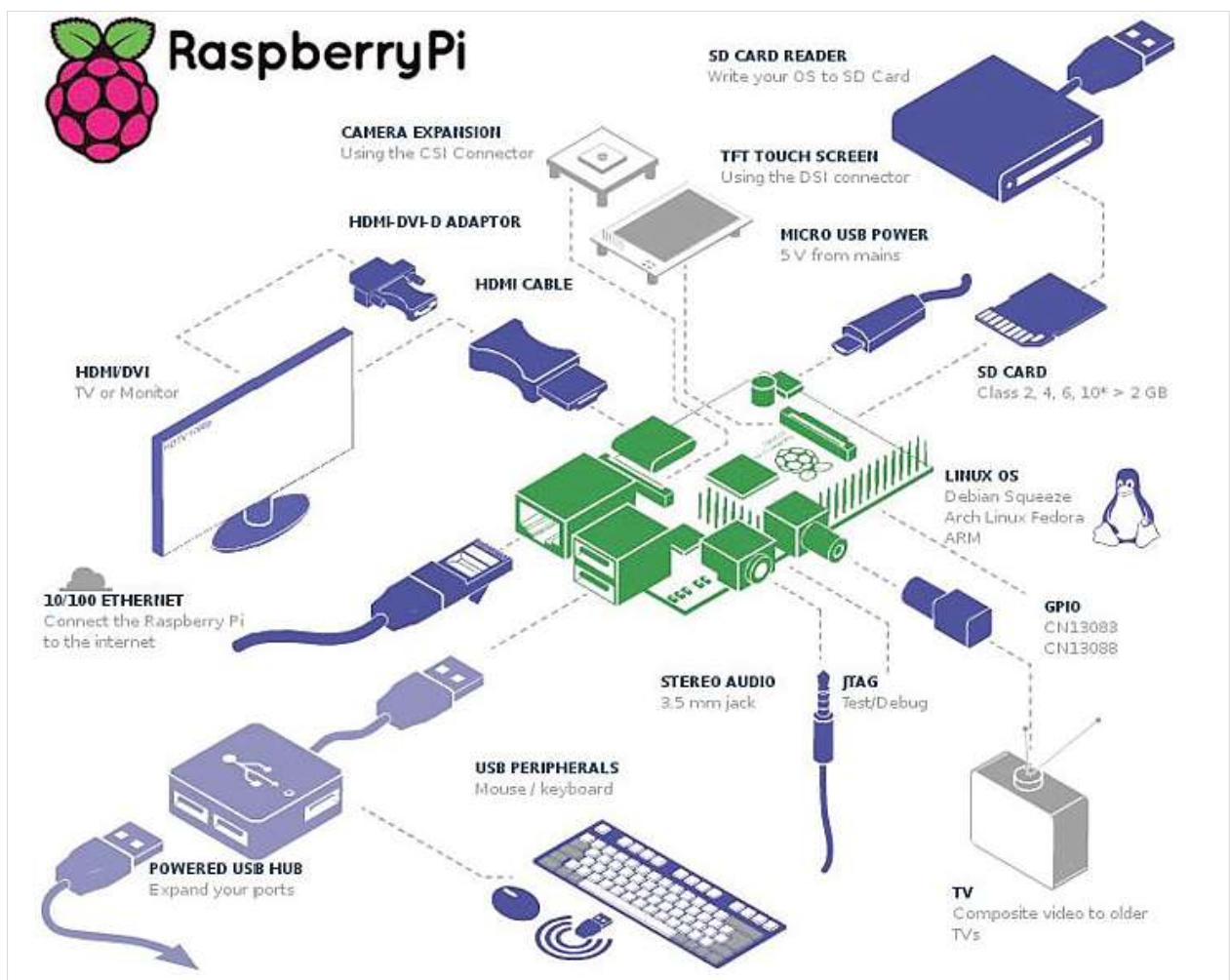


Figura 13. Conexiones de hardware para una placa RPi.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel



Figura 14. Placa Raspberry Pi 3 modelo B.

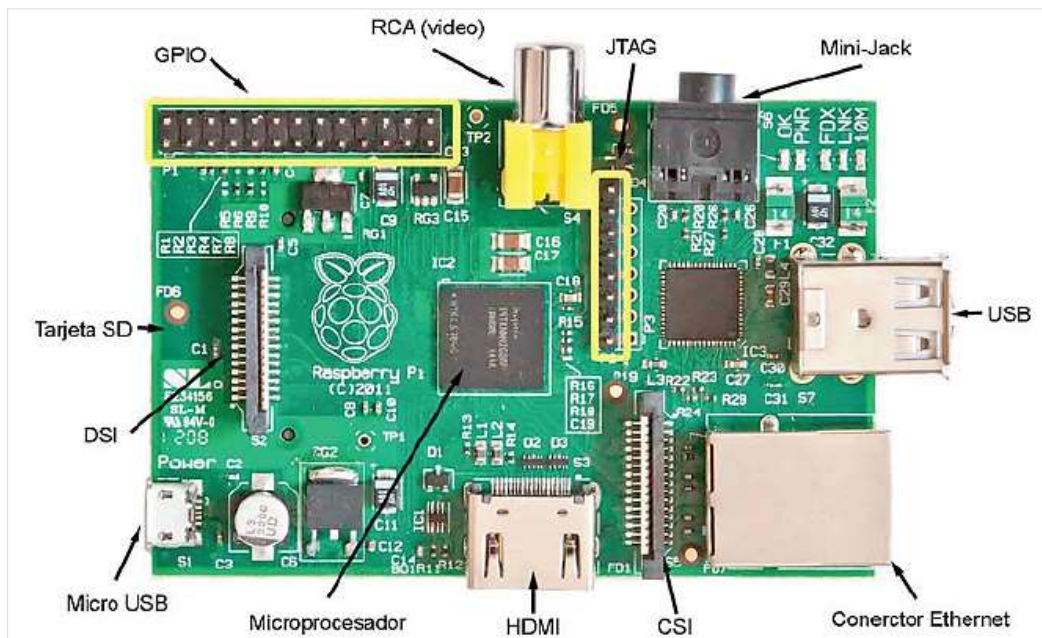


Figura 15. Partes de una placa Raspberry Pi 3 modelo B.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

Tabla 3. Pines GPIO en BCM2835 y su descripción.

No. GPIO	Raspberry Pi Indicación	BCM2835	Descripción
1	3V3		3.3 Voltios
2	5V0		5 Voltios
3	SDA0	GPIO00	Bus I2C
4	DNC		No conectar
5	SCL0	GPIO01	Bus I2C
6	GND		Tierra
7	GPIO7	GPIO04	Pin Programable
8	TXD	GPIO14	Emisor UART
9	DNC		No conectar
10	RXD	GPIO15	Receptor UART
11	GPIO00	GPIO17	Pin Programable
12	GPIO01	GPIO18	Pin Programable
13	GPIO02	GPIO21	Pin Programable
14	DNC		No conectar
15	GPIO03	GPIO22	Pin Programable
16	GPIO04	GPIO23	Pin Programable
17	DNC		No conectar
18	GPIO05	GPIO24	Pin Programable
19	SPI_MOSI	GPIO10	Interfaz Periféricos Serie
20	DNC		No conectar
21	SPI_MISO	GPIO09	Interfaz Periféricos Serie
22	GPIO06	GPIO25	Pin Programable
23	SPI_SCLK	GPIO11	Interfaz Periféricos Serie
24	SPI_CE0_N	GPIO08	Interfaz Periféricos Serie
25	DNC		No conectar
26	SPI_CE1_N	GPIO07	Interfaz Periféricos Serie

En relación a la forma de programar los pines GPIO se pueden utilizar diversos softwares y lenguajes de programación como Scratch, Python, Java, C, C++, entre otros.⁵⁶

Tabla 4. Especificaciones técnicas de la Raspberry Pi 3 modelo B.

Placa	Característica
Procesador	Broadcom BCM 2837
CPU	Quadcore ARM Cortex-A53, 64 Bit
Velocidad del reloj	1.2 GHz
RAM	1 GB
GPU	400 MHz VideoCore IV (R)
Network Connectivity	1x10/100 Ethernet (RJ45)
Wireless	802.11n Wireless LAN (wifi) y Bluetooth 4.1
Puertos USB	4xUSB 2.0
GPIOs	2 x 20 pines
Interfaz cámara	15-pin MIPI
Interfaz Display	DSI 15 pin / HDMI Out / Composite RCA
Potencia de suministro (capacidad de corriente)	2.5 A

2.9 PYTHON

Python es un lenguaje de programación interpretado ya que se ejecuta utilizando un programa intermedio llamado interprete o script y cuyo código fuente – en la primera vez que se ejecuta – se traduce a un pseudo código maquina nombrado bytecode y al ejecutarse genera archivos de extensión *.py* que resguardan el código. Una característica de este lenguaje es que no requiere declarar el tipo de dato que estará contenida en una variable, sino que su tipo se determinará según el valor que se le asigne pudiendo cambiar a otro tipo según el valor que se le asigne nuevamente. Es un lenguaje de alto nivel de sintaxis simple, clara y sencilla y cercana al lenguaje natural.⁵⁸

Adicionalmente se pueden resaltar las siguientes ventajas:⁵⁹

- Los programas Python son compactos y cortos.
- Sus stocks de estructuras de datos se pueden manipular sencillamente.
- Puede emplearse como un lenguaje orientado a objetos.
- Su entorno de ejecución permite detectar varios errores de programación mucho mejor que unos compiladores y proporciona información de localización para corregirlos.
- Es un software gratuito, es compatible con diversos sistemas operativos y su sintaxis es muy simple. Por ejemplo, se muestra un programa Python para el cálculo de la media aritmética de 3 números:

```
a = float (input( 'escribe un numero: '))
```

```
b = float (input( 'escribe un numero: '))
```

```
c = float (input( 'escribe un numero: '))
```

```
media = (a + b + c) / 3
```

```
print ('la media es: ', media)
```

Python es un lenguaje capaz de construir estructuras de datos y algoritmos complejos por medio de su propio interpretador con la capacidad de recibir comandos, evaluarlos y reportar el resultado del comando empleado. El entorno de desarrollo integrado más común para Python se denomina IDLE. Este entorno cuenta con un editor de texto integrado con soporte para mostrar y editar código Python; y también cuenta con un depurador básico que permite ejecutar un programa paso a paso mientras se leen los valores de las variables principales.⁶⁰

En la Figura 16, se muestra el IDLE para Python en vista Obsidiana (fuente: *3engine.net*).

2.10 ACTUADORES

Un actuador es un dispositivo capaz de generar una fuerza de tal magnitud que logra ejercer un cambio de estado, posición o de velocidad sobre un elemento mecánico mediante la transformación de energía. Un actuador puede ser del tipo neumático, hidráulico, eléctrico, lineal o rotatorio según la fuente de energía.⁶¹ Un actuador genera el movimiento de los elementos de un sistema según las instrucciones dadas por la unidad de control.⁶²

En particular, los motores paso a paso son del tipo eléctrico dado que la fuente de energía es la electricidad. El motor a pasos es un actuador electromecánico que requiere de un flujo eléctrico para funcionar y convertir una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos para avanzar en determinados valores en grados (pasos) del eje motriz dependiendo de las entradas de control.⁶¹ En el motor a pasos la señal de control son trenes de pulsos donde cada pulso recibido le indica al rotor del motor girar un determinado número discreto de grados.⁶² Los motores a pasos híbridos son motores que combinan las características de motores de imán permanente y de reluctancia variable en un solo motor, lo que permite obtener ángulos pequeños de paso con un alto par.⁶¹

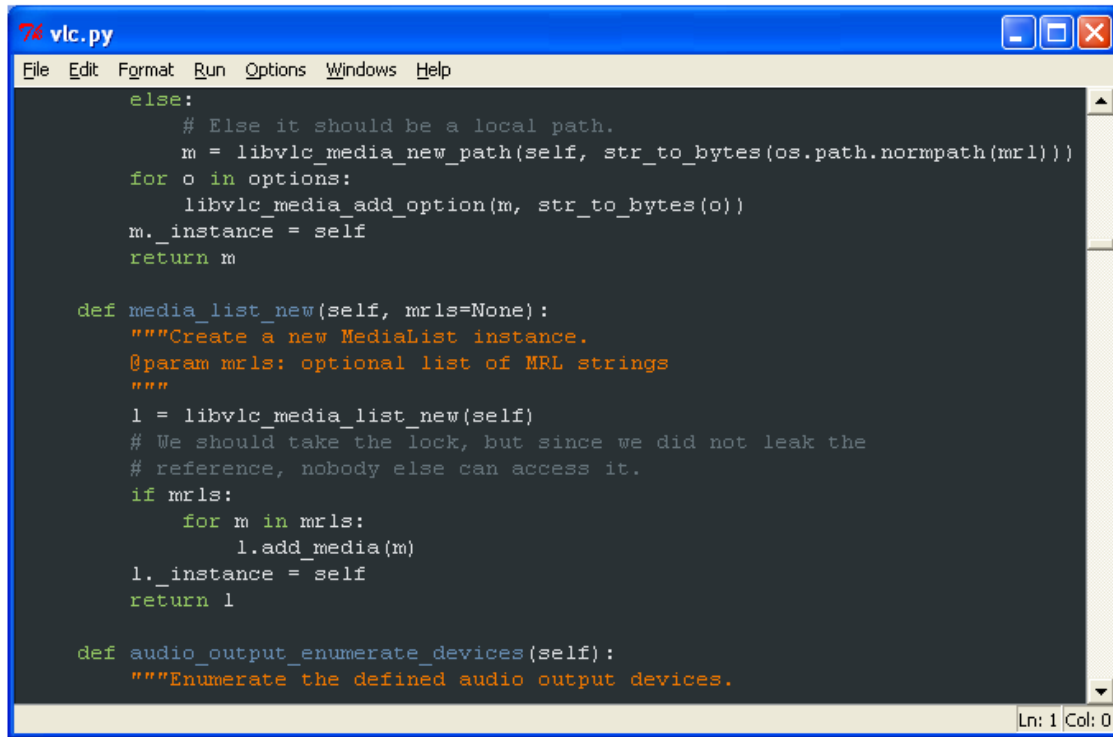
El motor a pasos NEMA 23 modelo 23HS5628 es un actuador híbrido empleado para máquinas CNC generales, con punta de rotor en media luna, de 4 cables y de 1.8° de ángulo de paso con una fuerza de torque de 12.6 kgf y se puede utilizar con controladores de motores como Arduino o Raspberry, ver Figura 17 (fuente: *electrocreea.com*).

2.11 RUUVITAG: SENSOR INALÁMBRICO 4 EN 1

Ruuvitag es un sensor inalámbrico Bluetooth, fabricado por la empresa finlandesa Ruuvi Innovations Ltd, capaz de medir en tiempo real la temperatura, humedad relativa y presión del aire y el movimiento, ver Figura 18 (fuente: *bay.fi*). Cuenta con su propia plataforma de código abierto y aplicación móvil gratuita que permite ser conectado a un teléfono móvil. Los rangos de medición de cada variable son -20 a 70 °C de temperatura, humedad de 0-95 % y presión de 300-1100 hPa; para el caso del movimiento es capaz de contabilizar cada uno de ellos y emitir notificaciones.⁶³

Las especificaciones técnicas del sensor se describen en el Anexo 1.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel



```
74 vlc.py
File Edit Format Run Options Windows Help

else:
    # Else it should be a local path.
    m = libvlc_media_new_path(self, str_to_bytes(os.path.normpath(mrl)))
for o in options:
    libvlc_media_add_option(m, str_to_bytes(o))
m._instance = self
return m

def media_list_new(self, mrls=None):
    """Create a new Medialist instance.
    @param mrls: optional list of MRL strings
    """
    l = libvlc_media_list_new(self)
    # We should take the lock, but since we did not leak the
    # reference, nobody else can access it.
    if mrls:
        for m in mrls:
            l.add_media(m)
    l._instance = self
    return l

def audio_output_enumerate_devices(self):
    """Enumerate the defined audio output devices.
```

Figura 16. IDLE para Python en tema obsidiana.



Figura 17. Motor a pasos NEMA 23 modelo 23HS5628.

El sensor RuuviTag puede ser ejecutado en cualquier ordenador que cuente con un módulo Bluetooth compatible, posea el *framework* instalado y las librerías adecuadas siendo uno de ellos la placa RPi.⁶⁴⁻⁶⁶



Figura 18. Sensor de temperatura, presión, humedad y movimiento marca RuuviTag.

2.12 SISTEMAS DE CONTROL: DE LAZO ABIERTO Y CERRADO

Un sistema de control se desarrolla para controlar parámetros variables de algún valor en particular o para controlar si un evento ocurre o no.²³ Desde la perspectiva de la teoría de control, un sistema está formado por un conjunto de elementos relacionados entre sí, y que generan señales de salida en función de los datos (señales) de entrada. En un sistema de control solo es necesario conocer la relación que existe entre la entrada y salida del proceso que realiza el mismo, esto es, saber cómo se comporta la señal de salida frente a un cambio de la señal de entrada para predecir el comportamiento del sistema y establecer la acción de control adecuada para mejorarla. Técnicamente, un sistema de control se define como un conjunto de elementos que interactúan para lograr que la salida de un proceso se comporte tal y como se espera que responda a través de una acción de control. En la Figura 19, se presenta un diagrama convencional de un sistema de control.⁶⁷ Los tres componentes básicos de un sistema de control son los objetivos de control, los componentes del sistema de control y los resultados. Los objetivos se pueden identificar como las entradas o señales actuantes (u). Los resultados se llaman también salidas o variables controladas (y). El objetivo de un sistema de control es controlar las salidas de alguna manera mediante las entradas a través de los elementos del sistema de control.²⁷

Según el tratamiento que se le dé a la señal de salida se reconocen dos tipos de control: sistemas en lazo abierto y sistemas en lazo cerrado.

2.12.1 Sistema de control en lazo abierto (sistemas no realimentados)

Son sistemas donde la salida no se compara con la entrada y por tanto la salida no tiene ningún efecto sobre la acción de control, ver Figura 20. En estos tipos de sistema se dice que no hay realimentación y aunque son simples y económicos son menos exactos que los de lazo cerrado.⁶⁷ Las partes de un sistema de lazo abierto son el controlador y el proceso controlado, ver Figura 21. La señal de entrada ingresa al controlador, el controlador emite

una señal actuante, la cual controla el proceso de tal forma que la salida se desempeñe de acuerdo a parámetros establecidos.²⁷

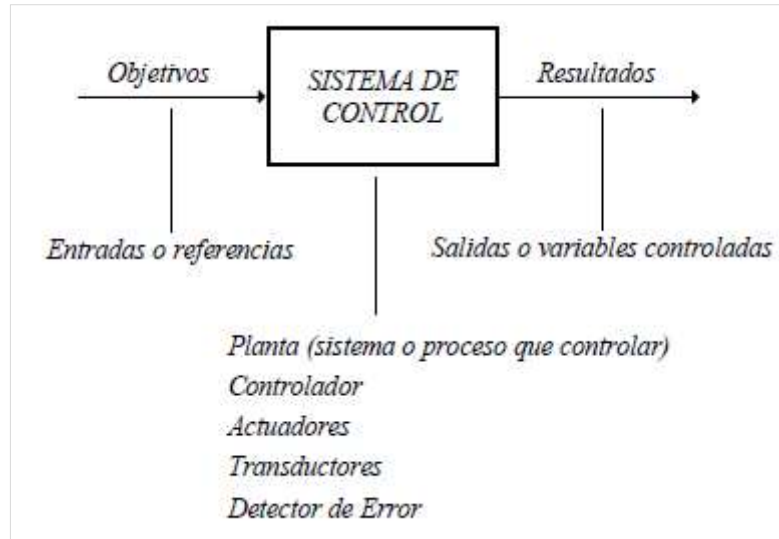


Figura 19. Esquema de un sistema de control.

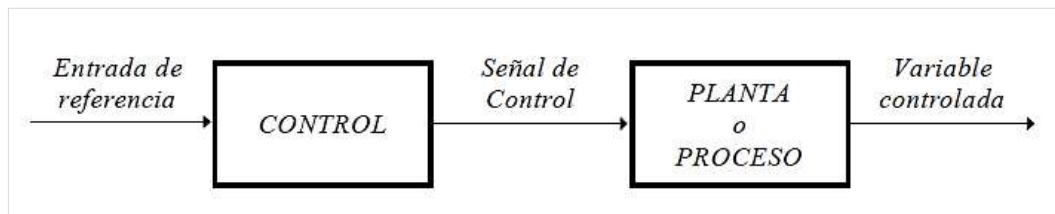


Figura 20. Sistema en lazo abierto.

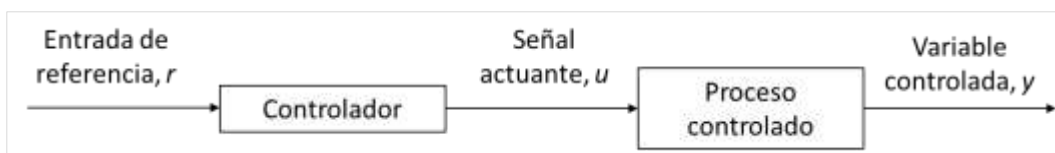


Figura 21. Elementos de un sistema en lazo abierto.

2.12.2 Sistema de control en lazo cerrado (sistemas realimentados)

Son sistemas más precisos que los de lazo abierto y se diferencian de ellos debido a que cuentan con una conexión de realimentación entre la señal de salida y la de entrada. En este tipo de sistemas, la señal controlada de salida se compara con la señal de referencia de entrada, en caso de haber una diferencia (error) en la comparación se emite una señal actuante proporcional a dicha diferencia entre la salida y la entrada del sistema para corregir la desviación existente.²⁷ En otras palabras, en los sistemas en lazo cerrado la señal de salida tiene efecto sobre la

acción de control, ver Figura 22. El elemento de realimentación con el que cuentan permite disminuir la sensibilidad de las perturbaciones externas y las variaciones de los parámetros internos.⁶⁷

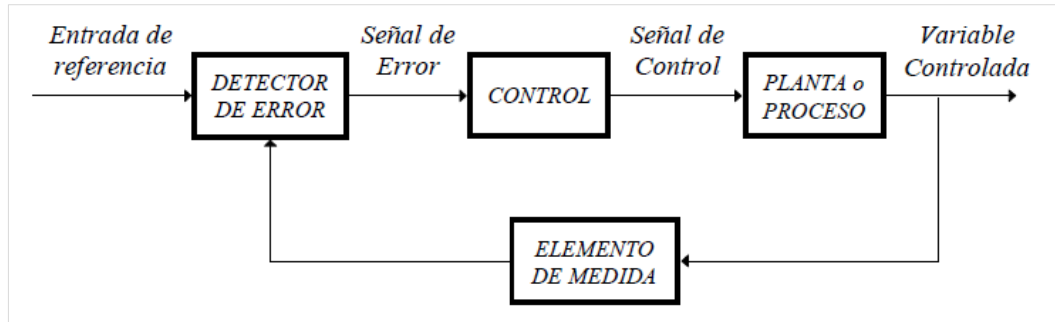


Figura 22. Sistema de control en lazo cerrado.

2.13 SOFTWARE DE AUTOMATIZACIÓN PARA DISEÑO ELECTRÓNICO: FRITZING

Los softwares de automatización para el diseño de diagramas electrónicos (EDA, *electronic design automation*, en sus siglas en inglés) permiten simular circuitos electrónicos previo a su construcción mediante el ensamble – en el diseño – de los componentes y las conexiones para validar su respuesta de funcionamiento. En el mercado existen diversos softwares como Proteus, Fritzing, Multisim, Eagle, EasyEDA, entre otros. La característica común entre ellos es que funcionan bajo licencia comercial para disponer de todos sus recursos, aunque también existen en su versión libre con sus respectivas carencias. Además, cada uno maneja su gama de componentes y en ocasiones el usuario debe dibujar aquellos que requiere y que no están disponibles en sus librerías o utilizar algún componente similar disponible.⁶⁸

En particular Fritzing, es un EDA que cuenta con su propio entorno de desarrollo integrado (IDE) que incluye secciones de trabajo como: (i) vista protoboard, donde se construye y edita el circuito electrónico virtual en vista protoboard (placa de prototipos) de la misma forma que se construirá en la realidad y/o validar su funcionamiento previo a su ensamble real, (ii) vista de esquema, diagrama de circuito del prototipo empleando símbolos de circuito estándar o (iii) vista de placa de circuito impreso (PCB, printed circuit board, en sus siglas en inglés), que permite exportar la información necesaria para la producción de tablas de circuito impreso.^{69,70} Fritzing puede configurarse con la plataforma Arduino o Raspberry. En la Figura 23, se muestra un diagrama electrónico obtenido por Fritzing para simular el control de un motor a pasos empleando una tarjeta Raspberry Pi (fuente: aranacorp.com/es/).

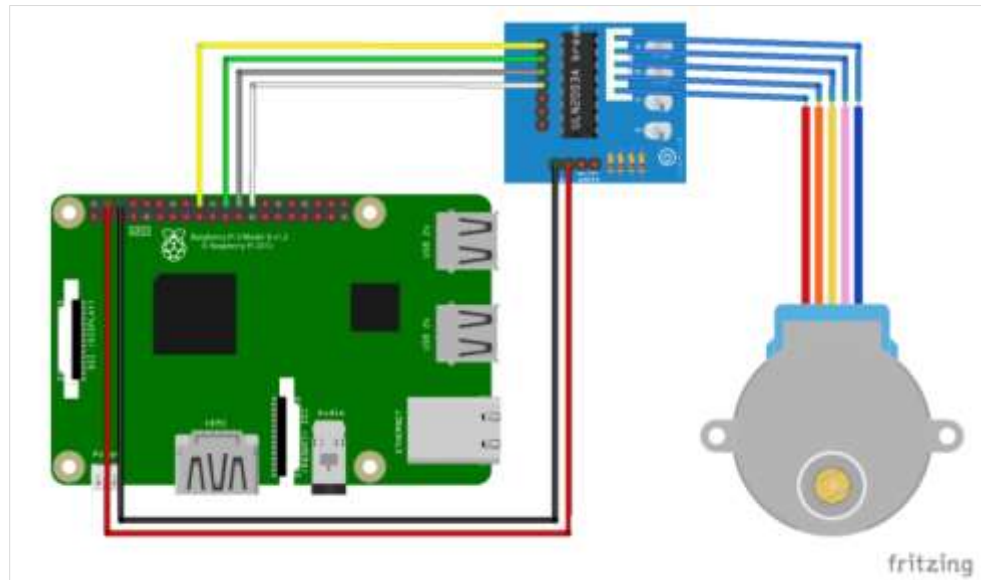


Figura 23. Diagrama electrónico Fritzing para control de un motor a pasos.

2.14 SOLIDWORKS®: FLOW SIMULATION

SolidWorks® es un software de diseño mecánico CAD 3D empleado para modelar piezas en 3D y planos en 2D. Funciona bajo licencia comercial, aunque también hay versiones de estudiante disponibles. Este software de automatización permite croquizar diseños, producir modelos y dibujos detallados, realizar análisis estructurales, análisis térmicos, análisis de fatiga, flujo de fluidos, transferencia de calor, entre otras capacidades. Contiene un conjunto de tutoriales que permite emplearlo fácilmente para manejar piezas, ensambles, dibujos y diversos complementos para tareas de Ingeniería.^{71, 72}

SolidWorks® Flow Simulation consiste de un conjunto de herramientas *toolbox* basadas en la técnica de método de volumen finito para simular las interacciones del flujo y fuerzas de fluidos de gases y líquidos, así como la transferencia de calor (análisis térmico) en sólidos, convección entre fluidos y sólidos y radiación. En la Figura 24, se muestra una simulación de SolidWorks® Flow Simulation.^{73, 74}

Por otro lado, y dentro del campo de las aplicaciones de SolidWorks®, se ha empleado este software para el diseño de reactores químicos tanto en su análisis estructural (dimensiones, componentes, funcionamiento) como un análisis térmico (transferencia de calor dentro del reactor).⁷⁵⁻⁷⁸

2.15 PUTTY

PuTTY es un software gratuito de código abierto disponible con código fuente que trabaja como un emulador de terminal que soporta SSH y otros protocolos. Es un software que permite guardar las preferencias de conexión a la red.⁷⁹ El protocolo SSH (*Secure Shell*) es un protocolo de administración remota que permite

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

autenticar un usuario remoto, controlar y modificar servidores a través del internet.⁸⁰ Singularmente, PuTTY es el protocolo más empleado para administrar la conectividad remota de la placa Raspberry Pi, ver Figura 25.⁸¹

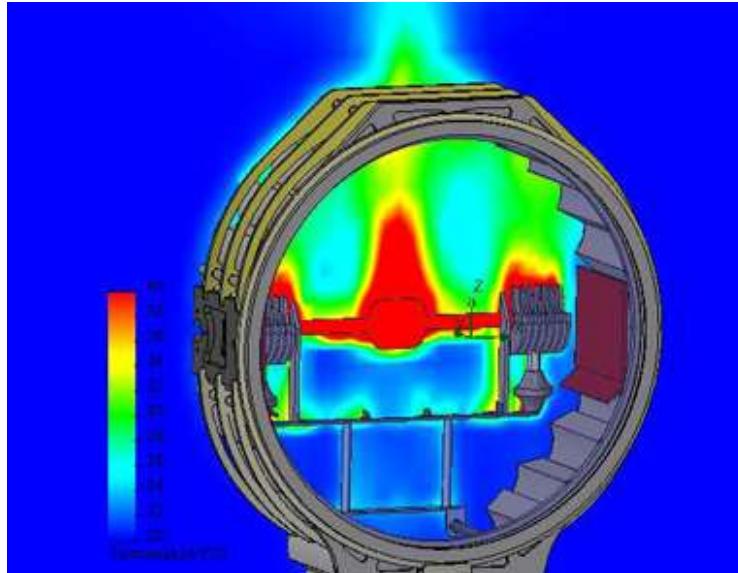


Figura 24. Ejemplo de simulación elaborada en SolidWorks® Flow Simulation.

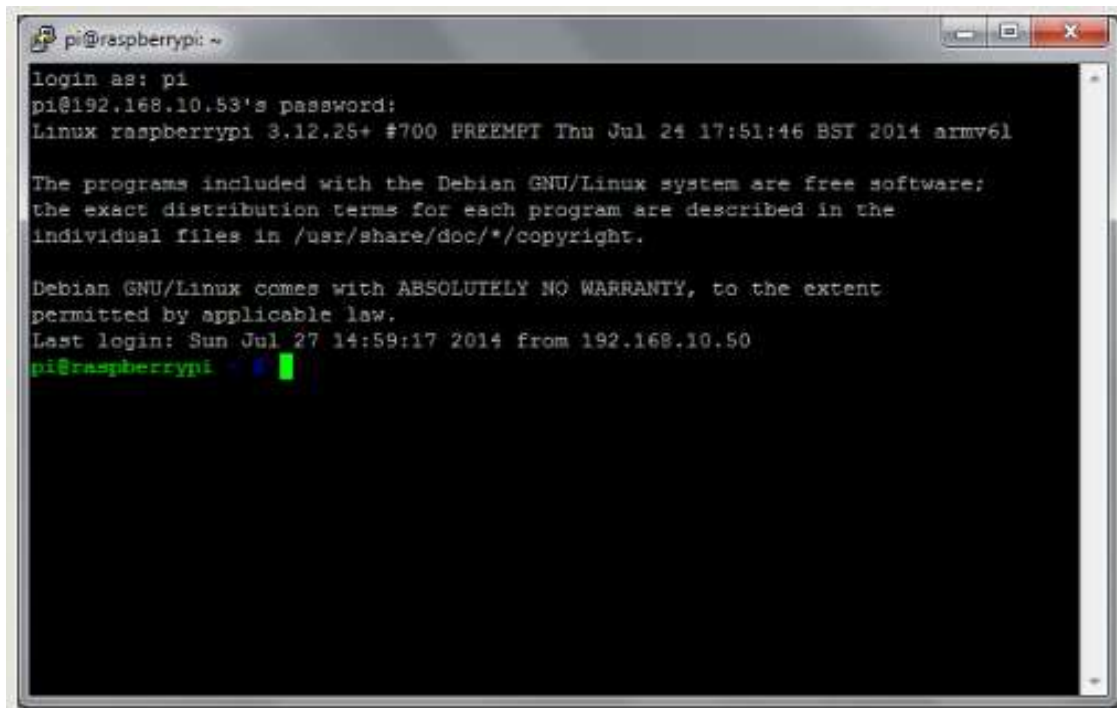


Figura 25. Ejemplo de conectividad de una Raspberry Pi por medio de PuTTY.

2.16 CYBERDUCK

Cyberduck es un servidor libre de almacenaje en la nube. Es una aplicación de código abierto que permite conectarse de manera segura a cualquier servidor de protocolo SFTP (*SSH Secure File Transfer*) y otros protocolos, así como permitir un acceso rápido a las direcciones URL para los archivos que está cargando y descargando en la nube. Cuenta con una interfaz muy amigable por lo que facilita la gestión de archivos. En la Figura 26, se observa el IDE de Cyberduck.⁸² Este software permite transferir archivos a la placa Raspberry Pi cuando no se tiene ninguna conexión física entre una computadora y la Raspberry. Además de que la placa emplea una conexión SSH para transferir un archivo.⁸³

2.17 SISTEMA OPERATIVO RASPBIAN

Raspbian, también llamado Raspberry Pi OS (*operating system*) es un sistema operativo recomendado por el fabricante para poder operar la placa Raspberry Pi. Cuanta con su propio soporte técnico y gran gama de tutoriales para facilitar su uso e instalación y es compatible con Windows. Una de las ventajas de este sistema operativo es que tiene integrado por default Python 3, por lo que facilita el uso de este lenguaje para el desarrollo del algoritmo de control. En la Figura 27, se muestra la instrucción clave para instalar Raspbian en Windows.⁸⁴

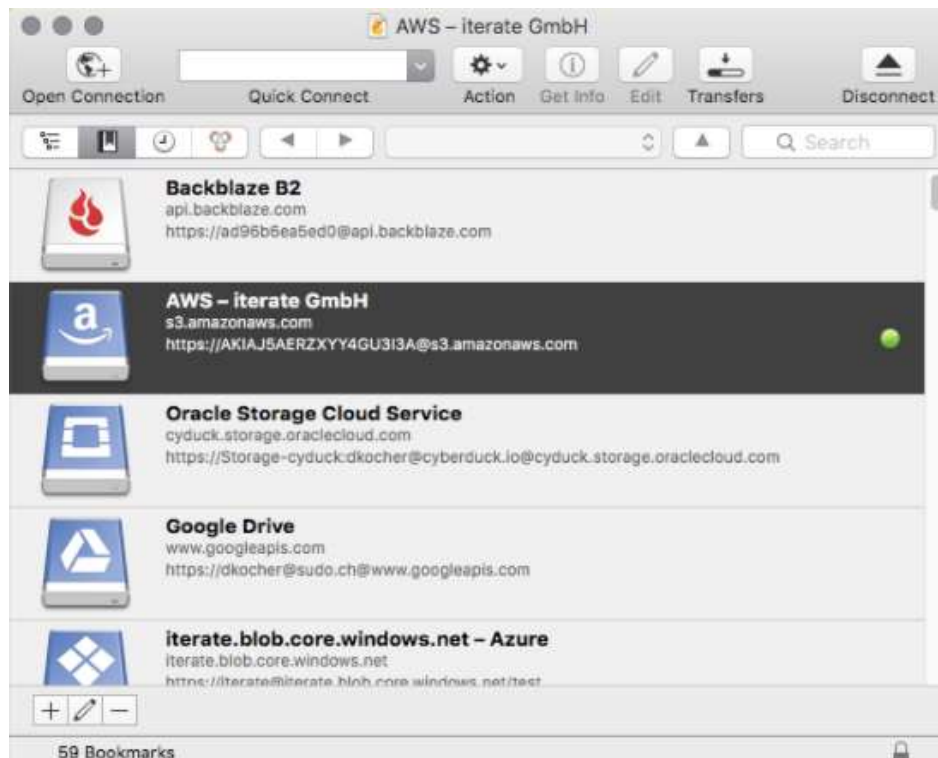


Figura 26. IDE de Cyberduck.

To install on **Raspberry Pi OS**, type
`sudo apt install rpi-imager`
in a Terminal window.

Figura 27. Configuración de instalación de Raspbian en Windows.

2.18 DISEÑO DE TAGUCHI (ARREGLOS ORTOGONALES)

Los métodos de Taguchi o arreglos ortogonales se emplean como un diseño experimental para realizar experimentos que pueden determinar las mejores mezclas de variables de productos y procesos para fabricar un producto. El método de Taguchi para el diseño de experimentos en el diseño de productos permite encontrar aquella combinación de factores que proporcione un desempeño más estable y con el costo de desarrollo más bajo. El método de Taguchi valora la ventaja fundamental de los arreglos ortogonales para involucrar un gran número de factores. Para su aplicación se deben definir previamente las variables (FACTORES). Cada uno de estos factores toma distintos valores (NIVELES) y es necesario elegir el más adecuado para evitar contar con un número elevado de combinaciones posibles. En general, para un arreglo a dos niveles, el número de columnas (efectos o factores) que se pueden analizar, es igual al número de renglones más uno.⁸⁵ El método de Taguchi ha desarrollado una serie de arreglos para experimentos con factores a dos niveles, los más utilizados y difundidos según el número de factores a analizar son relacionados en la Tabla 5.⁸⁶

Tabla 5. Serie de arreglos para experimentos con factores a 2 niveles.

No. de factores	Arreglo a utilizar	No. de condiciones a probar
Entre 1 y 3	L4	4
Entre 4 y 7	L8	8
Entre 8 y 11	L12	12
Entre 12 y 15	L16	16
Entre 16 y 31	L32	32
Entre 32 y 63	L64	64

Las columnas de los arreglos son balanceadas y ortogonales. Esto significa que, en cada par de columnas, todas las combinaciones de factores ocurren el mismo número de veces. Los diseños ortogonales permiten estimar el efecto de cada factor sobre la respuesta independientemente del resto de los factores.⁸⁷

La notación L(corridas) (niveles ^ factores) indica lo siguiente:

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

- $L(\text{corridas}) = \text{número de corridas}$
- $(\text{niveles} \wedge \text{factores}) = \text{número de niveles para cada factor} \wedge \text{número de factores}$

Un diseño $L4(2^3)$ implican 4 corridas con 3 factores en 2 niveles, ver Tabla 6.

Tabla 6. Arreglo $L4(2^3)$.

Corrida	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

III. METODOLOGÍA

En esta sección se describen las técnicas y herramientas empleadas para el desarrollo de este trabajo. En la primera parte se definen las variables de estudio de control. En la segunda parte se detallan los materiales y métodos empleados para el diseño y construcción del reactor de estudio. Dentro de la tercera parte se especifica el desarrollo del sistema mecatrónico. En la última parte se encuentra la descripción de la interfaz de comunicación, código de programación, la simulación y el diseño experimental empleado.

3.1 VARIABLES DE OPERACIÓN: DEFINICIÓN, REGISTRO Y MONITOREO

Diversos trabajos – de interés para el presente estudio – reportados en la literatura^{10, 12-16, 88-90} especifican distintas variables de operación que influyen en la producción de biodiesel. Siendo algunas de estas variables susceptibles a sistemas de control y automatización para optimizar dichos procesos. Entre las variables de operación se pueden mencionar: (i) temperatura, (ii) tiempo de reacción, (iii) tipo de alcohol, (iv) relación alcohol-aceite, (v) concentración de catalizadores, (vi) concentración del medio de reacción, (vii) concentración de los ácidos grasos, (viii) concentración del solvente, (ix) concentración de la humedad, (x) velocidad de agitación, entre otras variables. Conforme lo anterior, se establecieron las siguientes variables y condiciones de operación para el diseño y construcción del sistema mecatrónico de control y automatización de reactor, así como las pruebas preliminares de validación del sistema:

- a) Temperatura de reacción (55 ± 2 °C). Es de las variables de mayor referencia en la literatura dentro del campo de la producción de biodiesel. Además de haber una amplia gama de sensores de temperatura disponibles en el mercado y ser compatibles con el controlador seleccionado.
Para este trabajo, el registro y monitoreo de esta variable fue por medio de un sensor inalámbrico RuuviTag adquirido en Ruuvi Innovations Ltd con sede en Finlandia. En la Figura 28, se muestran diversas vistas del sensor RuuviTag empleado.
- b) Velocidad de agitación (450-650 rpm). Por el tipo de actuador empleado en este trabajo, se establece manejar esta variable para las pruebas de validación de producción de biodiesel en el reactor propuesto.
En este estudio, se empleó un motor a paso NEMA 23 modelo 23HS5628 marca Aibecy adquirido en Fast Tech Commercial Group S. A. de C. V. En la Figura 29, se presenta el tipo de motor empleado.
- c) Tiempo de reacción (30 min). Es también de las variables de mayor y fácil control en los estudios de obtención del biocombustible. Para este trabajo se mantuvo constante este parámetro. El control de este parámetro se realizó automáticamente por medio de la programación del sistema donde se declaró en el algoritmo el tiempo de operación del motor.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

- d) Adicionalmente, se realizó la medición de la presión y la humedad relativa de la reacción a manera informativa. Para cada variable se empleó también un sensor RuuviTag.



Figura 28. Configuración del sensor inalámbrico RuuviTag 4 en 1: vista posterior (izq. arriba), vista anterior (izq. abajo), secciones separadas (centro), vista superior (der. arriba), vista lateral (der. abajo).



Figura 29. Motor a pasos empleado NEMA 23.

3.1.1 Ubicación de los sensores de temperatura, presión y humedad

En total se emplearon 3 sensores RuuviTag donde cada uno se programó para una variable. El sensor de temperatura y el de presión se instalaron en la parte inferior e intermedia del recipiente interno, respectivamente. En particular, la ubicación del sensor de temperatura es en la zona cónica del depósito interno. El sensor de humedad se fijó en la parte interna de la tapa superior del equipo. En la Figura 30, se muestra la ubicación de los sensores.



Figura 30. Posición de sensores RuuviTag: vista de los sensores de temperatura y presión en recipiente interno en relación con el recipiente externo (izq.), acercamiento de los sensores en el recipiente interno (centro), sensor de humedad en tapa cilíndrica (der.).

3.2 DISEÑOS MECÁNICOS DEL REACTOR

Conforme la literatura consultada – de interés para el presente estudio –^{44-46, 91-95} se determinó un diseño propio de un reactor tubular del tipo continuo de tanque agitado con capacidad de poder trabajar en flujo continuo, discontinuo o semicontinuo para la producción de biodiésel. La parte novedosa del diseño es no considerar un fondo plano, sino un fondo en terminación cónica para el trasvase del fluido de trabajo.

Para determinar las dimensiones del tanque del reactor, se emplearon simples ecuaciones de cálculo de volumen para cuerpos cilíndricos (ver ecuación 1) y cilíndrico cónicos (ver ecuación 2). Siendo la ecuación 3, la empleada para determinar la capacidad volumétrica total del tanque. Donde V es volumen, r es radio, h es altura.

$$V = \pi r^2 h \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 h \quad (2)$$

$$V = \pi r^2 h + \frac{1}{3} \pi r^2 h \quad (3)$$

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

Ninguna otra ecuación de diseño se empleó para determinar las dimensiones del reactor, como, por ejemplo, ecuaciones para el cálculo de la calefacción requerida, del sistema de agitación, dimensiones de las paletas, potencia del rodete, potencia del agitador, coeficientes de transferencia de calor, dimensionamiento de accesorios, entre otras. Lo anterior fue solventado mediante las herramientas disponibles en el software especializado de diseño mecánico empleado.

Todos los diseños mecánicos para el reactor fueron elaborados en el software de diseño CAD 3D SolidWorks® versión académica 2018.

Los diseños permitieron validar dimensiones, materiales y el funcionamiento del sistema a través de sensores, actuadores y piezas de soporte a la medida.

El diseño del reactor contempla las siguientes secciones o componentes:

- i. Un cuerpo cilíndrico externo (carcasa) de fondo plano. Dentro del cuerpo externo se tienen 3 anillos de soporte para el recipiente interno. Así mismo, el diseño considera albergar dentro de este elemento la resistencia eléctrica de calentamiento.
Cuenta con una estructura de soporte compuesta por 4 postes, en 60° de dirección, que le otorgan estabilidad y una elevación a la carcasa.
- ii. Un cuerpo cilíndrico interno (tanque) con fondo cónico. La parte cilíndrica adjunta a la parte cónica. La parte cónica posee una base mayor y una base menor. La base menor posee adjunto un cuello recto tubular de salida. El cuello está previsto con roscado para poder acoplar un tapón macho roscado o un tubo conector L para habilitar al reactor en flujo continuo o semicontinuo.
- iii. El sistema de agitación esta soportado sobre una tapa superior cilíndrica que permite el cierre (a presión) hermético del equipo.
La tapa cilíndrica cuenta con una base tipo abrazadera para montaje del motor. La tapa cilíndrica cuenta con 2 entradas de alimentación, mismas que son empleadas a manera de respiraderos.
El sistema posee un agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín. Cuenta con dos juegos de agitador propulsor de 4 aspas tipo paletas cada uno (impulsor mayor e impulsor menor). Las aspas poseen una inclinación de 35°.
- iv. Adicionalmente, se diseñó un gabinete de control para albergar el sistema mecatrónico y una cubierta protectora del motor como factor de seguridad.

Para facilidad de comprensión, en la Tabla 7, se especifican las dimensiones de diseño de cada componente antes mencionado, unidades en milímetros.

3.3 DISEÑOS ELECTRÓNICOS DEL SISTEMA MECATRÓNICO

Para comprobar el funcionamiento del sistema mecatrónico, previo a su construcción, se empleó el software de automatización de diseño de diagramas electrónicos Fritzing en su versión Beta 0.9.3 de acceso libre. Con esta herramienta se generaron vistas de simulación de los sistemas embebidos para validar su funcionamiento, su aplicación en este proyecto permite simular circuitos electrónicos previo a su construcción mediante el ensamble –en el diseño– de los componentes y las conexiones para validar su respuesta de funcionamiento. Fritzing se configuró con la plataforma Raspberry.

Se obtuvieron los diagramas electrónicos en vista protoboard (placa de prototipos) y vista esquemático para generar el diagrama electrónico con símbolos del circuito.

Debido a que se empleó la versión libre del software, las librerías cuentan con carencias de algunos elementos para la simulación, por lo que el driver controlador de motor a pasos TB6560 fue sustituido por uno semejante (driver L298) que permite diferenciar sus 6 entradas y 6 salidas.

Tabla 7. Dimensiones de diseño de cada componente del reactor.

Componente	Largo	Alto	Diámetro	Observaciones
Carcasa (cuerpo cilíndrico exterior).		400.05	168.275	
Anillos de soporte (3) de tanque: Anillo 1 en forma de cruz con círculo central. Anillo 2 y 3 en forma circular.			Anillo1: 17.78 Anillo 2 y 3: 139.7	Posición (altura) de anillos tomando como referencia el fondo de la carcasa: Anillo 1: 50.8 Anillo 2: 203.2 Anillo 3: 374.65
Resistencia eléctrica.			139.7	
Estructura de soporte de la carcasa (4).	210			Permiten que la carcasa este a una altura de 133.35 con respecto al nivel del piso.
Tanque (cuerpo interno – parte cilíndrica).		247.65	127	
Tanque (cuerpo interno – parte cónica).	120	110	127 (base mayor)	

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

			12.7 (base menor)	
Cuello recto.	25.4		12.7	
Sistema de agitación (tapa cilíndrica de soporte).		44.45	169.862	
Sistema de agitación (agitador).	215.9 (eje)	25.4 (paletas impulsor mayor) 19.05 (paletas impulsor menor)	10 (eje) 88.9 (impulsor mayor) 50.8 (impulsor menor)	Agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín
Gabinete de control.	190	45		Ancho: 190.
Cubierta de motor.	80	180		Ancho: 70.

3.4 CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR

El sistema completo del reactor fue construido bajo diseño propio y se compone de las siguientes secciones primarias:

- lámina de acero galvanizado calibre 18. Los 4 soportes de la carcasa fueron fabricados en perfil PTR en acero comercial de 1/2". Además, en su interior se cuenta con soportes (guías) cilíndricos contruidos con alambrcn de acero de bajo carbón de 1/4" para sujeción del tanque.
- Tanque.** Compone el recipiente interno cilíndrico con terminación cónica donde se llevan a cabo las reacciones de obtención de biodiésel por transesterificación. Dentro de él se realiza el registro y monitoreo de las variables de temperatura y presión a través de los sensores colocados en su parte inferior e intermedia. El tanque fue construido en acero inoxidable calibre 16 de tipo 304 grado alimenticio para un volumen total de 4.7 L. La parte cónica facilita el trasvase del fluido de trabajo.
- Sistema de calentamiento.** Compuesto por una resistencia eléctrica en espiral de acero inoxidable con características de 127V, 1000 W, 16A, 60 Hz de potencia, conexiones a 90°. La resistencia fue tomada de una parrilla eléctrica marca Volteck Basic adquirida en un centro comercial urbano.
- Sistema de agitación.** Se compone de una estructura de soporte consistente de una tapa cilíndrica que cubre la parte superior de la carcasa (cierre hermético del sistema a presión), la cual cuenta con un soporte tipo abrazadera donde se monta el actuador. La tapa, la abrazadera y los soportes del actuador fueron contruidos en acero inoxidable calibre 16. El actuador empleado fue un motor a pasos NEMA 23 modelo 23HS5628 marca Aibecy con un eje guía de 8 mm. Mediante un cople flexible de aleación de aluminio

med. 8-10 mm se fija el agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín al motor. Para dar estabilidad y nivel al eje del agitador se adaptó un rodamiento ISK comercial de 10 mm de diámetro interno. El agitador propulsor también fue construido en acero inoxidable calibre 16.

Para determinar las revoluciones por minuto (rpm) del motor se empleó un tacómetro dual DT-2236 marca Lutron.

- e) **Gabinete de control & cubierta de motor.** Se diseñó y construyó en impresora 3D con material PLA (i) un gabinete de control para albergar el sistema mecatrónico que aportara la automatización del sistema y (ii) una cubierta protectora del motor NEMA 23 como factor de seguridad. Se utilizó una impresora MakerBot Replicator Z18. El gabinete de control y la cubierta del motor poseen ranuras para ventilación y conexiones.

3.5 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO EMPLEANDO RASPBERRY PI (RPi)

El sistema mecatrónico fue diseñado y construido para automatizar y controlar las variables de temperatura de reacción, velocidad de agitación de la reacción y tiempo de la reacción. Básicamente se compone de diversos elementos y componentes de electrónica modular, actuadores y sensores compatibles con la placa RPi.

Además, el sistema contempla hardware de cómputo para lograr la interfaz del sistema y conectividad a la red. La conectividad se logró vía inalámbrica por red Wi-Fi a través de la propia placa RPi.

Para facilidad de comprensión en la Tabla 8 se presentan los componentes empleados para la construcción del sistema mecatrónico. La mayoría de los componentes electrónicos modulares fueron adquiridos en Fast Tech Commercial Group S. A. de C. V.

Es de resaltar que el convertidor analógico, el potenciómetro, una resistencia y un foco LED solamente fueron empleados durante la etapa de configuración y pruebas iniciales de respuesta del sistema mecatrónico con sensores de temperatura DS18B20 (sensores no considerados en la configuración final). Uno de los primeros aspectos para la implementación de la interfaz fue la administración del convertidor analógico MCP3008, un circuito integrado que admite hasta 8 canales analógicos. Este dispositivo fue seleccionado pensando en integrar a futuro una mayor cantidad de sensores, el MCP3008 trabaja con el protocolo SPI (Serial Peripheral Interface) y la comunicación se implementa a través de cuatro cables. Lo anterior permitió validar el pre-funcionamiento del sistema. Se decidió conservar el arreglo para trabajos futuros de investigación donde se considere controlar más variables de operación a través de periféricos del tipo analógico debido a que en las pruebas finales de operatividad del sistema no afectaba la respuesta de los sensores RuuviTag con la placa RPi.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

Tabla 8. Descripción completa de los elementos que integran el sistema mecatrónico.

No.	Descripción	Cantidad (unidades)
1	Raspberry Pi 3 modelo B.	1
2	Sensor inalámbrico 4 en 1 RuuviTag.	3
3	Motor a pasos NEMA 23 modelo 23HS5628, DC, 2.8A, 1.8° ángulo de paso, 12.6 kgf de torque/fuerza, 4 cables.	1
4	Driver TB6560 controlador de motor a pasos, DC, 10~35V, 3.5A.	1
5	Módulo relevador Relay 1 canal 5V DC modelo JCQ-3FF-S-Z.	1
6	Protoboard blanco grande 830p en material ABS	1
7	Fuente de voltaje conmutada J-360-12, 12V, 30A.	1
8	Eliminador Raspberry Pi 3, 110V entrada, 5V salida, 3A, salida micro USB	1
9	Convertidor analógico 10 bits 8 canales MCP3008 Raspberry Pi	1
10	Resistencia eléctrica espiral, 127V, 1000 W, 16A, 60 Hz, conexiones 90°	1
11	Ventilador DC 12V 30 mm con conector Dupont	2
12	Potenciómetro rotatorio de carbón modelo B10K, 3 pines	1
13	Cable conductor calibre 16 (1 m)	1
14	LED difuso – color rojo, 3.3V, 17mA.	2
15	Cople flexible en aleación de aluminio 8-10 mm	1
16	Tarjeta Micro SD.	1
17	Resistencia 330 ohm.	2
18	Foco incandescente 100W con socket cerámico.	1
19	Cables jumper dupont varios tipos m-m, m-h varias medidas	17
20	Tornillería de sujeción varias medidas (para el motor y gabinete de control)	10
21	Hardware: Mini teclado USB NOVA	1
22	Hardware: Mini mouse USB NOVA	1
23	Hardware: Monitor pantalla plana HP L1710	1
24	Hardware: Cable adaptador convertidor HDMI a VGA	1

De la Figura 31 a la 35, se muestra el esquema de algunos componentes. Las imágenes fueron tomadas de *electrocrea.com* y/o páginas web de acceso libre.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel



Figura 31. Placa RPi 3B.



Figura 32. Resistencia eléctrica espiral 1000 W.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel



Figura 33. Fuente de voltaje 12V 30A.



Figura 34. Driver motor a pasos TB6560.



Figura 35. Convertidor analógico MCP3008.

3.6 DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL: DISEÑO DE INTERFAZ Y CONFIGURACIÓN DE RPi

Para establecer la comunicación con la placa RPi empleada, se instaló el sistema operativo Raspbian sugerido por el fabricante. Para cargar el algoritmo de control al ordenador RPi se empleó las aplicaciones PuTTY y Cyberduck. Ambas aplicaciones permitieron cargar el algoritmo a la tarjeta desde una estación de cómputo portátil, lo anterior por facilidad de programación. En particular, Cyberduck permitió trasladar archivos desde el equipo de cómputo portátil hacia la RPi, donde los archivos trasladados se fueron modificando y programando hasta la versión final del código. Por otro lado, Putty fue empleado para trabajar como segunda pantalla desde el equipo portátil para controlar los programas. La comunicación entre el equipo portátil y ambas aplicaciones fue por medio del mismo registro de IP de internet. Cada corrida, la IP se actualizaba por temas de seguridad en la navegación.

El algoritmo de control fue elaborado en lenguaje de programación Python 3, el cual ya viene instalado por defecto en el sistema operativo de Raspbian.

Las instrucciones definidas permiten que las señales de entrada de las variables sean reconocidas y consecuentemente emitir las señales de salida hacia la resistencia eléctrica y el actuador para alimentar calor y agitación a la reacción, respectivamente. En particular, la resistencia de la parrilla, es activada en el momento en que se conecta a la corriente eléctrica, cuando se activa el programa, se mantiene encendida hasta el reconocimiento de la variable temperatura y la programación de la misma para el corte de corriente de la resistencia. Por lo que el sistema de control desarrollado fue en lazo cerrado dado que hay realimentación ya que la resistencia se mantiene encendida mientras se llega a una temperatura determinada y el actuador se mantiene en rotación durante el tiempo de reacción establecido, es decir, la respuesta de salida está regulada por el ajuste constante con la de la entrada, principalmente por la temperatura.

Para diferenciar el control de la temperatura, se realizó el monitoreo en tiempo real de las lecturas registradas por medio del sensor, proyectadas en pantalla y que se comparan con la lectura de la aplicación Ruuvi Station, en un dispositivo móvil, teniendo como atributo su funcionamiento aun cuando hay cortes de energía eléctrica que alimente al sistema embebido. Mencionando el monitoreo, se reconoce como parámetro a los datos que son impredecibles y orientativos que es utilizado para lograr la evaluación y valoración del incremento de la temperatura. De igual manera, se obtienen parámetros registrados para la variable de presión y humedad del reactor, utilizados en base de datos para el comportamiento de estas variables y su comparación.

En la Figura 36, se muestra el diagrama de flujo de la operación del reactor para obtener biodiésel por transesterificación en relación al sistema de control. Las variables manipulables son la cantidad de sustancias a emplear, el tiempo y la velocidad de agitación. Las variables sensadas en forma secundaria son la presión y la temperatura. La variable principal y sensada del sistema es la temperatura y en relación a su respuesta depende la operatividad del sistema. Esta variable es detectada por el sensor Ruuvitag. Cabe aclarar que no se manipula la

temperatura del sistema, solo se puede sensar. La variable que se puede manipular es el tiempo y la agitación, si así se considera pertinente. La resistencia eléctrica por fabricación puede operarse en varios niveles a través de un termostato (se apaga al llegar a la temperatura indicada y se enciende para mantenerla). Sin el uso de un termostato, la temperatura máxima que alcanza la resistencia es de 150 °C (al rojo vivo). Al estar la resistencia en modo encendido (ya instalada dentro del reactor), en breves momentos se alcanza esta temperatura. Y aunque adopte un modo apagado, el calor remanente de la resistencia se sigue transmitiendo a la reacción. Razón por lo cual, y después de pruebas preliminares, se estableció una temperatura patrón de control del fluido de $33 \pm 1^\circ\text{C}$. Al llegar a la temperatura patrón, se apaga automáticamente la resistencia, pero la misma se mantiene aun desprendiendo calor (que se sigue transmitiendo al fluido) permitiendo alcanzar y mantener la temperatura de operación de $55 \pm 2^\circ\text{C}$. En el caso de que la temperatura de operación descienda por debajo de los 33 °C, se enciende nuevamente la resistencia para volver a suministrar calor. El anterior ciclo se repite cuantas veces sea necesario durante todo el tiempo de reacción. El tiempo total de reacción se fijó a 30 minutos.

Por otro lado, el actuador está programado con un paso constante de 1.9 ms, sin embargo, sus rpm serán variables y dependientes del volumen de trabajo.

En la Figura 37, se observa un diagrama de flujo representativo del sistema mecatrónico de estudio. Se aprecia el flujo de las señales del sistema de control en lazo cerrado definido.

3.7 SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL FLUIDO POR FLOW SIMULATION: EFICIENCIA DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL AGITADOR

El diseño del agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín se obtuvo por medio del software de diseño mecánico CAD 3D SolidWorks® versión académica 2018.

La validación de la geometría, diseño, trayectoria de flujo circular y eficiencia del agitador se determinó mediante el módulo Flow Simulation del software.

Flow Simulation permite simular el flujo de fluidos, la transferencia de calor y las fuerzas de fluidos dentro de recipientes diseñados en SolidWorks®.

En la literatura se reporta que es necesario garantizar un flujo turbulento (Numero de Reynolds, $N_R > 10,000$) para que se puedan llevar a cabo reacciones de transesterificación y lograr un mezclado entre el alcohol y el aceite debido que son fluidos inmiscibles entre ellos.⁹⁶ Aunque se han estudiado reacciones de transesterificación bajo otros N_R relacionados a velocidades de agitación de 150, 300 y 600 rpm.⁹⁷ Sin embargo, no se puede hablar de un único valor óptimo de velocidad de agitación dado que esta variable es dependiente de las condiciones de reacción pues se reportan valores óptimos con hasta 1000 rpm.⁹⁸ Para aplicaciones prácticas, si el $N_R < 2000$, el flujo será laminar; si el $N_R > 4000$, el flujo será turbulento; si el N_R está entre 2000 y 4000, no se puede predecir que flujo existe, por lo que se considera que es una región de flujo transitorio.⁹⁹

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

Para establecer el N_R del agitador propuesto en este estudio, se emplean los datos reportados por Nouredini & Zhu,⁹⁷ y considerando la literatura,⁹⁹ ver Tabla 9.

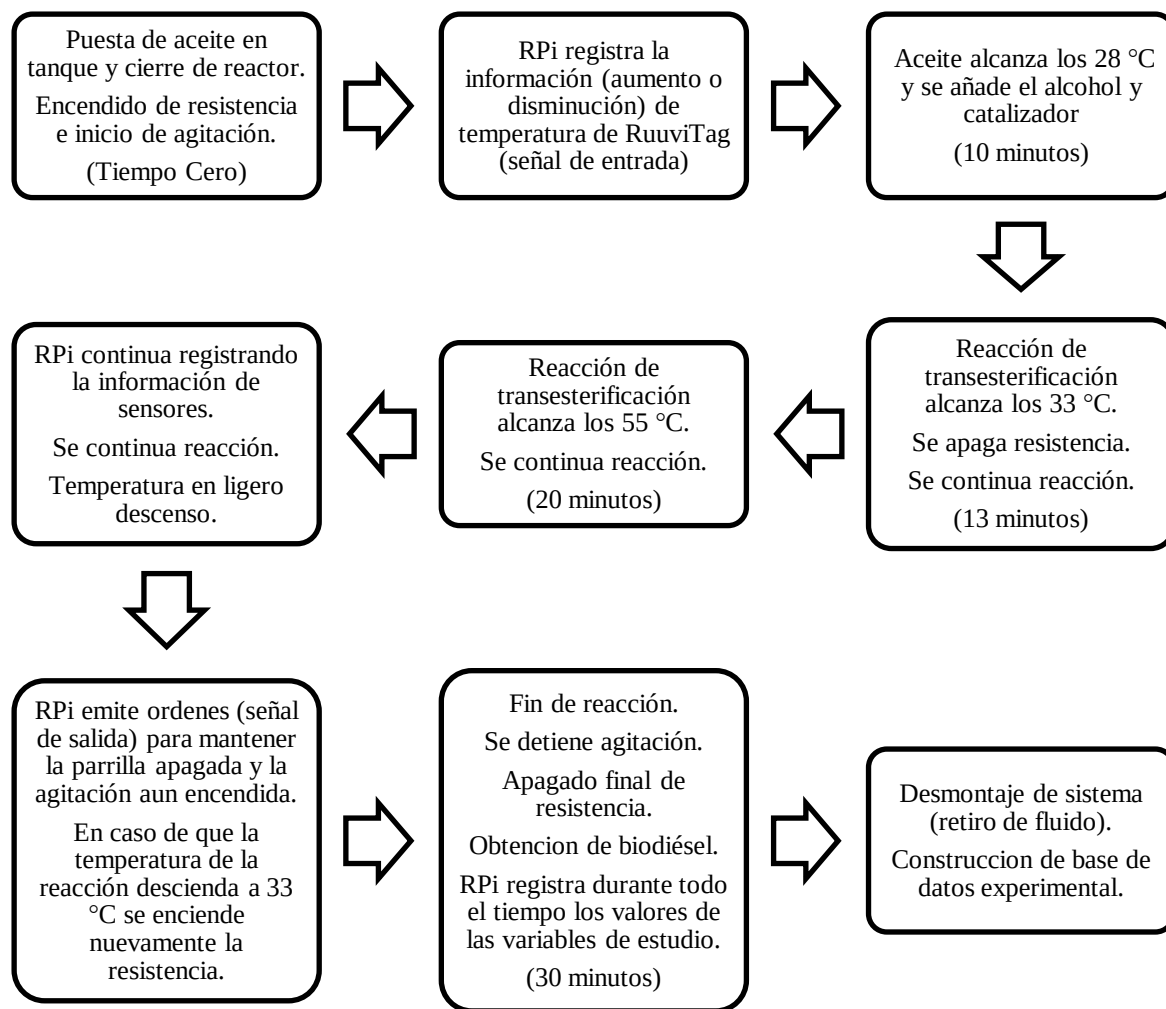


Figura 36. Diagrama de flujo del proceso completo de funcionamiento del sistema mecatrónico de biodiésel.

Tabla 9. Numero de Reynolds en relación a la velocidad de agitación de la reacción.

Velocidad de agitación (rpm)	Numero de Reynolds	Tipo de flujo
150	3100	Transitorio
300	6200	Turbulento
600	12400	Turbulento

En particular, El análisis de simulación de fluidos por Flow Simulation se realizó para determinar el tipo de flujo (laminar o turbulento) observado en el diseño del reactor y tipo de agitador propuesto.

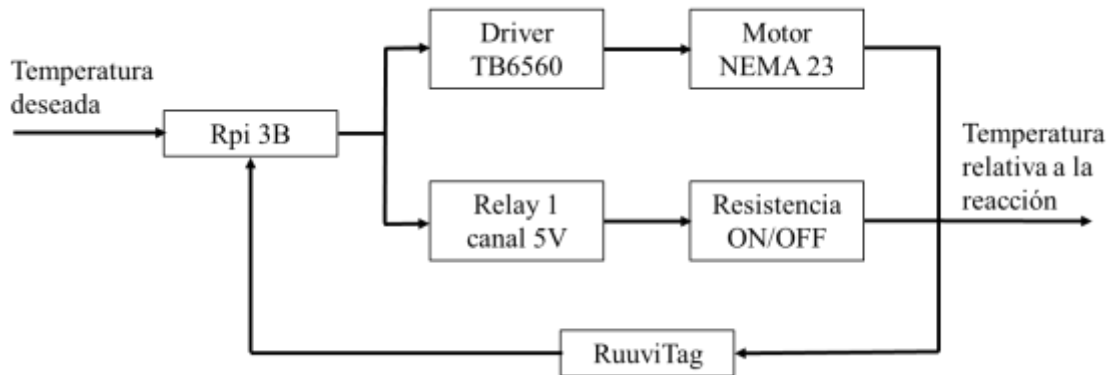


Figura 37. Sistema de control en lazo cerrado del sistema mecatrónico.

3.8 PRUEBAS DE VALIDACIÓN: DISEÑO EXPERIMENTAL ORTOGONAL

Conforme la literatura consultada^{10, 12-16, 88-90} se definieron las variables de operación (factores) y conforme la metodología reportada por Varty & Lishawa¹⁷ se establecieron los valores de los niveles para cada factor (2 niveles por factor) que servirán para determinar el arreglo ortogonal de estudio. En la Tabla 10, se presentan las condiciones experimentales determinadas.

Tabla 10. Factores y niveles experimentales.

Factor (variable de operación)	Nivel 1	Nivel 2	Observaciones
Volumen de aceite vegetal (mL)	1000	1500	Aceite comestible vegetal virgen de canola y/o girasol de la marca 123
Volumen de alcohol de transesterificación (mL)	200	300	Metanol grado ACS PM 32.04
Volumen de catalizador (mL)	2.3	3.45	Hidróxido de sodio, grado técnico en solución al 50% (densidad 1.48 g mL ⁻¹)

Bajo lo anterior, y conforme los catálogos de diseños de Taguchi,⁸⁷ se seleccionó un arreglo ortogonal de Taguchi L4(2³) (ver Tabla 6, sección 2.18).

En la Tabla 11, se muestra el arreglo definido de las condiciones de operación de las 4 corridas contempladas. Donde el factor 1 corresponde al volumen de aceite vegetal, el factor 2 al volumen de alcohol de transesterificación y el factor 3 al volumen del catalizador.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

Tabla 11. Factores y niveles experimentales empleadas en un arreglo L4(2³).

Corrida	1	2	3
1	1000	200	2.3
2	1000	300	3.45
3	1500	200	3.45
4	1500	300	2.3

Para una robustez de la validación del sistema mecatrónico en operación se realizó por triplicado el arreglo ortogonal definido.

El tiempo total de reacción se fijó a 30 minutos para cada corrida.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del desarrollo integral del sistema mecatrónico basado en la placa RPi para el control de la temperatura, velocidad de agitación y tiempo de la reacción en la obtención de biodiésel por transesterificación. En la primera parte se describen los diseños mecánicos y construcción del reactor. En la segunda parte se menciona el desarrollo del sistema de control. En la última parte se presenta la validación y simulación del sistema.

4.1 DISEÑOS MECÁNICOS DEL REACTOR

Para facilidad de comprensión de los diseños creados y observar una mejor nitidez de diseño, se presentan vistas isométricas por secciones del reactor, ver Figuras de la 38 a la 48. Todos los diseños fueron elaborados en estilo de visualización en color acero galvanizado (shiny galvanized).

Los diseños del reactor permitieron su construcción sin contratiempos. En cada diseño se puede apreciar, de manera general, los componentes empleados para su montaje (carcasa, tanque, sistema de agitación, agitador, sistema de calentamiento, gabinete de control, cubierta de motor).

En el Anexo 2, se presentan los cálculos y los dibujos técnicos de las secciones del reactor con cotas en unidades de milímetros.

A continuación, se muestran los cálculos realizados para determinar las dimensiones de la carcasa (ver ecuación 4) y del tanque interno cónico (ver ecuaciones 5, 6 y 7). El volumen total de trabajo del tanque resulto de 3.60 L totales.

$$V = \pi(8.41 \text{ cm})^2(40.01 \text{ cm}) = 8.89 \text{ cm}^3 = 8.89 \text{ L} \quad (4)$$

$$V = \pi(6.35 \text{ cm})^2(24.77 \text{ cm}) = 3.13 \text{ cm}^3 = 3.13 \text{ L} \quad (5)$$

$$V = \pi(6.35 \text{ cm})^2(11.00 \text{ cm}) = 8.89 \text{ cm}^3 = 0.46 \text{ L} \quad (6)$$

$$V = 3.13 \text{ L} + 0.46 \text{ L} = 3.60 \text{ L} \quad (7)$$

4.2 CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR

La construcción del reactor permite cumplir el objeto fin del proyecto de poder contar con un equipo de bajo volumen (3.60 L) para llevar a cabo en él reacciones de transesterificación para la obtención de biodiésel.

El reactor cuenta con (i) una carcasa externa cilíndrica de fondo plano elaborada en lámina de acero galvanizada que alberga al tanque y la resistencia eléctrica, así como servir de soporte para el sistema de agitación por medio de su tapa cilíndrica superior, (ii) un tanque interno cilíndrico con terminación cónica construido en acero inoxidable en cuyo interior se lleva a cabo la obtención del biodiésel por transesterificación, (iii) un sistema de agitación consistente de un agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín de acero inoxidable impulsado por

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

un actuador de motor a pasos lineal, (iv) un sistema de calentamiento por medio de una resistencia eléctrica de espiral de 1000 W y (v) un gabinete de control para albergar el sistema mecatrónico y una cubierta de motor como factor de seguridad, ambos elaborados en material PLA mediante impresión 3D.

La manufactura de la carcasa, tanque, tapa cilíndrica superior fue realizado en un taller especializado de manufactura de acero galvanizado externo al plantel. La construcción del sistema de calentamiento y agitación fue realizada dentro del taller de manufactura de la institución.

De la Figura 49 a la 62, se muestran imágenes de las etapas de construcción o de piezas concluidas.



Figura 38. Sistema completo: vista anterior (izq.) y vista posterior (der.).

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel



Figura 39. Sistema completo: vista lateral.



Figura 40. Sistema completo: vista superior.

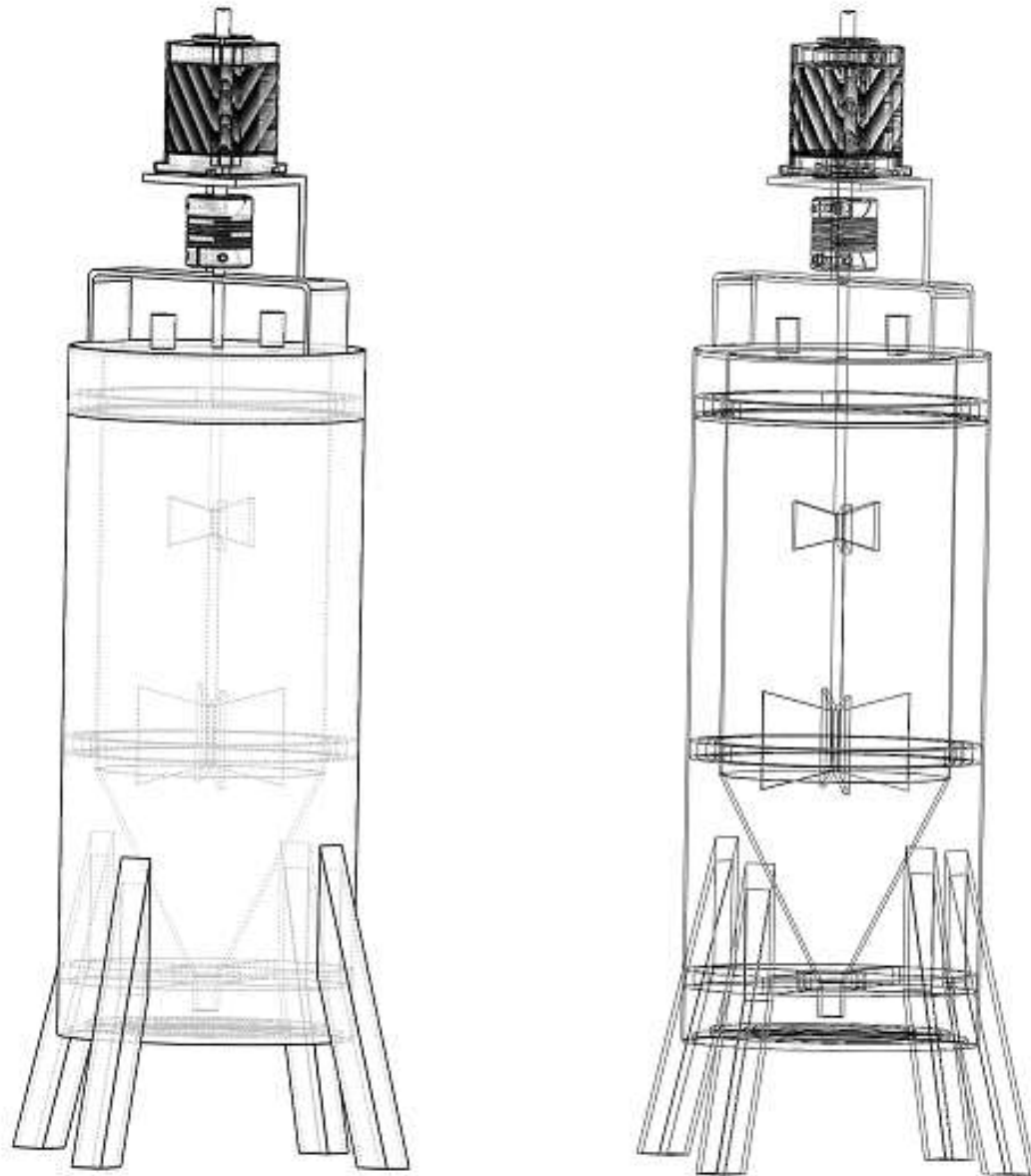


Figura 41. Sistema completo: vista líneas ocultas (izq.) y vista estructura alámbrica (der.).



Figura 42. Carcasa: vista interna inferior (izq.) y vista interna superior (der.).



Figura 43. Tapa cilíndrica superior para cierre de carcasa.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel



Figura 44. Tanque: vista externa inferior (izq.) y vista externa superior (der.)



Figura 45. Sistema de agitación: actuador, agitador propulsor.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

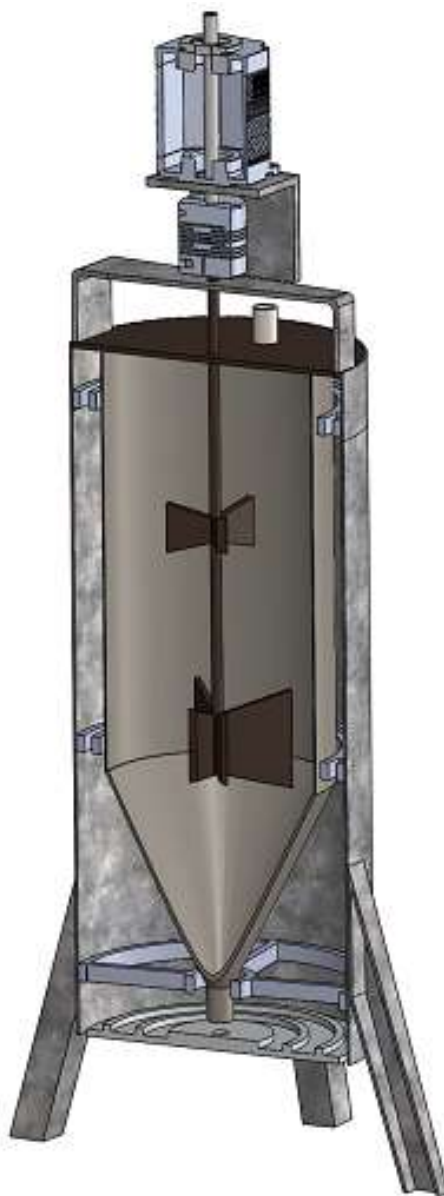


Figura 46. Corte transversal del sistema: vista interna del reactor.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

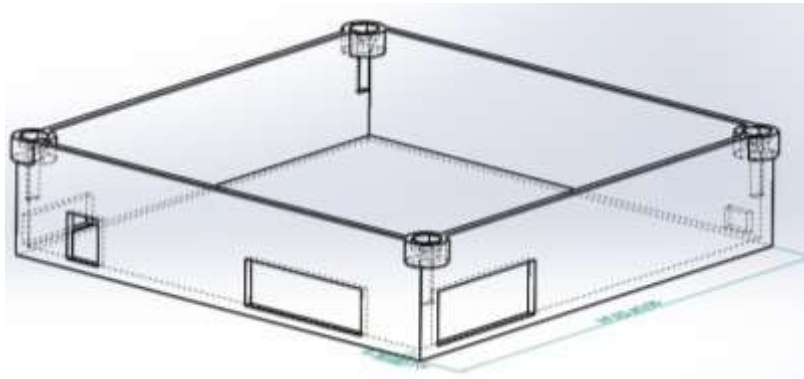


Figura 47. Gabinete de control: vista estructura alámbrica.

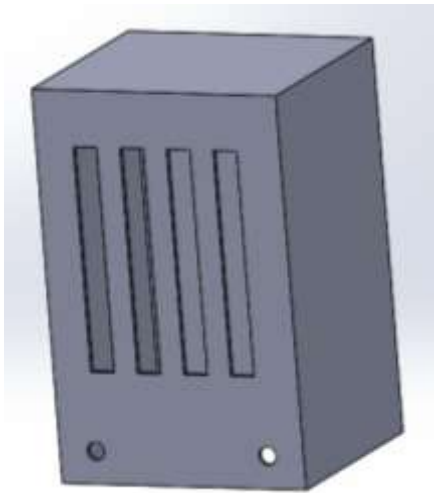


Figura 48. Cubierta de motor.



Figura 49. Manufactura de reactor.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel



Figura 50. Aspecto de reactor completo.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel



Figura 51. Carcasa vista externa.



Figura 52. Carcasa vista interna.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel



Figura 53. Tanque vista exterior.



Figura 54. Tanque vista interior.



Figura 55. Sistema de agitación: vista completa.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel



Figura 56. Agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín.



Figura 57. Aspas del agitador propulsor: aspas inferiores (izq.) u aspas superiores (der.).

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

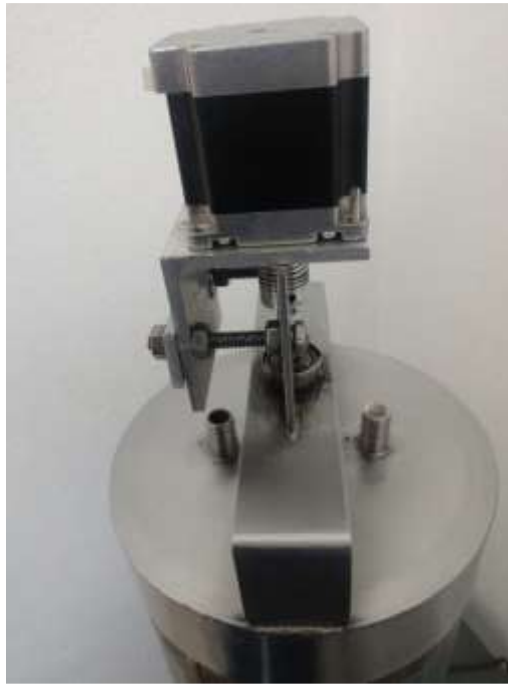


Figura 58. Sistema de agitación: acercamiento lateral donde se observa la abrazadera y placa de soporte, actuador, entradas de alimentación y rodamiento.



Figura 59. Sistema de agitación: acercamiento anterior donde se observa la abrazadera, actuador, cople, eje del agitador, entradas de alimentación, rodamiento, soporte actuador y tornillería de sujeción.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel



Figura 60. Vista de la resistencia eléctrica en el interior (fondo) de la carcasa.



Figura 61. Cubierta impresa de motor.



Figura 62. Gabinete de control: tapa (izq.) y cuerpo (der.).

4.3 DESARROLLO INTEGRAL DEL SISTEMA MECATRÓNICO

4.3.1 Diseños electrónicos del sistema

El sistema mecatrónico se diseñó en base a electrónica modular para Raspberry Pi y los componentes que lo integran se describen en la Tabla 8.

Los diagramas electrónicos – elaborados en Fritzing – en vista protoboard y esquemático, se muestran en la Figura 63 y 64, respectivamente. Se puede observar un foco que representa la posición de la parrilla y la conexión es en paralelo, donde indica el encendido de la resistencia eléctrica. A su vez, se muestran dos ventiladores que se direccionan a la tarjeta Raspberry Pi para evitar el sobrecalentamiento de la misma. La simulación de operación virtual del sistema permitió validar el funcionamiento adecuado del sistema previo a su construcción.

En la Tabla 12, se presenta una lista de los componentes prioritarios con sus respectivas conexiones (pines disponibles y pines requeridos) de los periféricos de acople de señales. Se establecen los pines de comunicación GPIO con el convertidor analógico, el driver TB6560, el relevador y la fuente de energía. Es de resaltar, que el movimiento del motor NEMA 23 es a través del driver TB6560, motivo por el cual no se observa en la Tabla 12.

Los diagramas electrónicos permiten apreciar la forma en que los componentes se empotran en la placa protoboard y se comunican con la Raspberry Pi. Los diagramas hacen referencia a la Tabla 12 para una mejor apreciación de los componentes con sus respectivas conexiones (pines) de los periféricos de acople de señales para activar la resistencia y el actuador.

4.3.2 Construcción del sistema mecatrónico

La construcción del sistema mecatrónico permite cumplir con el objeto fin del proyecto de poder registrar y monitorear las variables de operación de una reacción de transesterificación para la obtención de biodiésel. La variable “principal” del sistema es la temperatura. En el tiempo cero (una vez colocado el aceite vegetal en el

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

tanque) se inicia la agitación y el encendido de la resistencia eléctrica. Cuando la temperatura de la reacción alcanza los 33 °C se apaga la resistencia, pero se continua la transferencia de calor (por la naturaleza de construcción de la resistencia) de manera tal que se alcanzan los 55 °C. La temperatura se mantiene y lentamente comienza a descender, por lo que, al ser menor a los 33 °C, se vuelve a encender la resistencia eléctrica para un nuevo ciclo de suministro de calor. Lo anterior se repite las veces que sean necesarias durante todo el tiempo de reacción. En todo momento la placa RPi recibe las señales de entrada y emite las de salida para automatizar el proceso.

En particular se logra lo siguiente:

- (a) Encendido y apagado de la resistencia eléctrica.
- (b) Encendido y apagado del actuador.

De la Figura 65 a la 74 se presentan imágenes del sistema mecatrónico y de la estación de trabajo desarrollada. Adicionalmente se muestra la interfaz inalámbrica de fabricación que los sensores RuuviTag facilitan con su adquisición.

Es de resaltar que la placa RPi se mantiene fuera del gabinete de control para proveer una mejor ventilación. Siendo lo anterior, un área de mejora para diseñar y construir una caja de control de mayor dimensión para albergar los ventiladores del sistema dentro del mismo.

Tabla 12. Interfaz de conexiones de pines GPIO del sistema mecatrónico.

MCP3008			TB6560			
Conexión de MCP3008	Raspberry Pi	Pines Pi GPIO (#)	Conexión TB6560	Pines Raspberry Pi	Entradas	Salidas
16 VDD	3.3 V	1	+24 V		Voltaje a fuente	
15 VREF	3.3 V	1	GND		Tierra a fuente	
14 AGND	GND	6	+A		Azul	
13 CLK	GPIO11 SPI0-SCLK	23	-A		Verde	
12 DOUT	GPIO09 SPI0_MISO	21	+B		Amarillo	
11 DIN	GPIO10 SPI0_MOSI	19	-B		Rojo	
10 CS	GPIO8 CE0	24	EN-	Tierra (39)		Puente EN- CW-
9 DGND	GND	6	EN+			Puente EN+ CW+
RELAY 1 CANAL			CW-	GPIO 20 (PCM DIN)	GND	Puente EN- CW-
Conexión Relay	Protoboard		CW+		5V	Puente EN CW+
VCC	Voltaje		CLK-	GPIO 21 (PCM DOUT)		
GND	Tierra		CLK+			GND
IN	Señal					

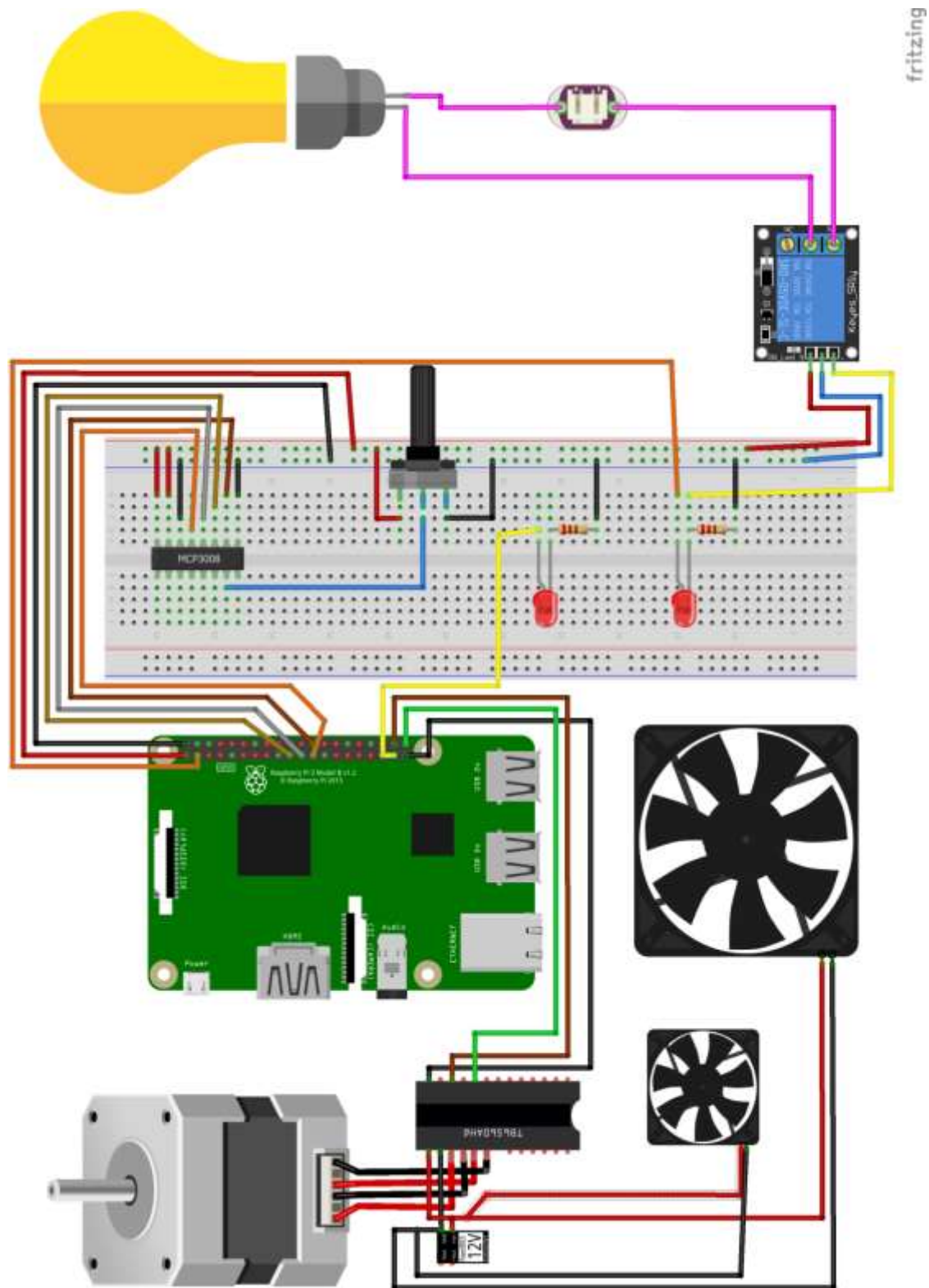


Figura 63. Diagrama electrónico del sistema mecatrónico en vista Protoboard.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel



Figura 65. Estación de trabajo del sistema mecatrónico.



Figura 66. Acercamiento de la estación de trabajo del sistema mecatrónico.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel



Figura 67. Vista lateral de la estación de trabajo.

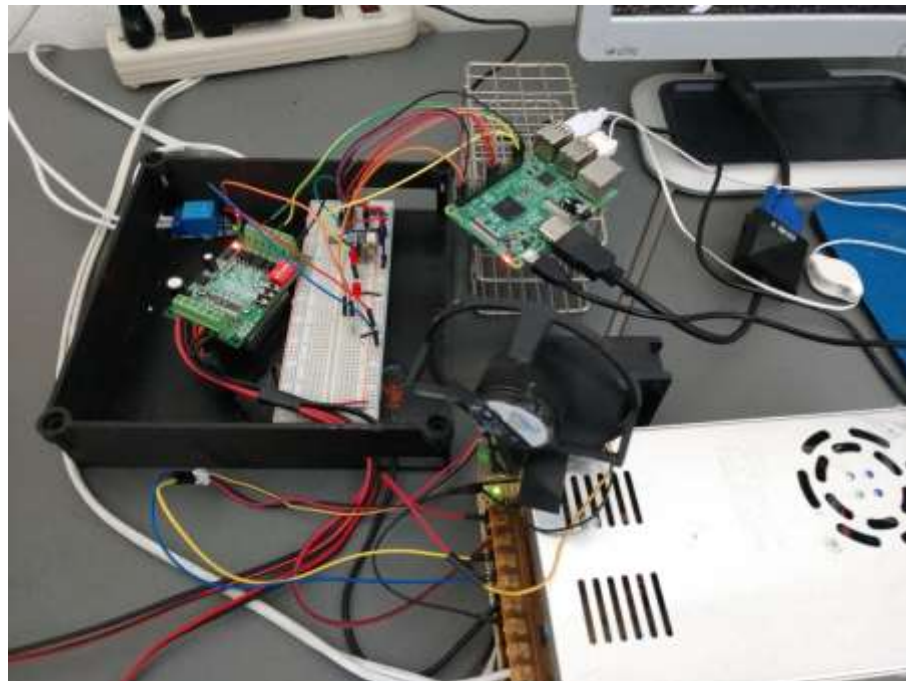


Figura 68. Vista completa del sistema mecatrónico donde se observa, la placa RPi, driver TB6560, relevador de 1 canal, fuente de alimentación, ventiladores, placa Protoboard y diversas conectividades.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel



Figura 69. Placa RPi en operación: luz roja indicativo de encendido y luz verde indicativo de registro de lecturas.



Figura 70. Aspecto de la interfaz de la placa RPi: sistema operativo Raspbian en comunicación con la tarjeta.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

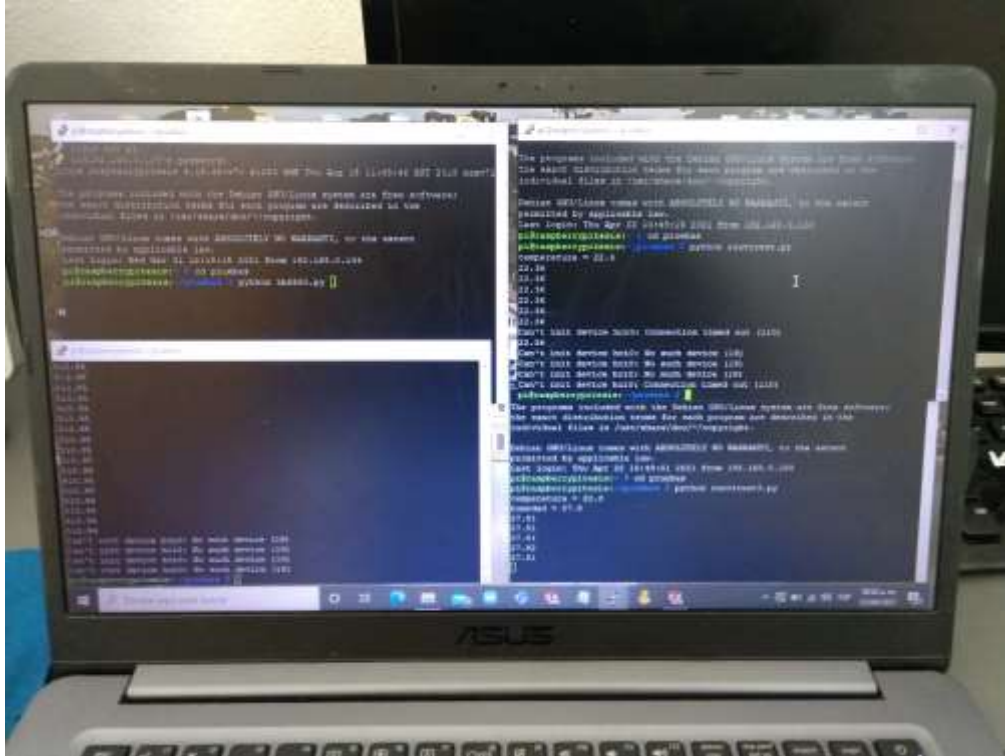


Figura 71. Aspecto de la interfaz de las tomas de lecturas de los sensores.



Figura 72. Foco incandescente encendido como indicativo de resistencia eléctrica en ON.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
 Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
 Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel



Figura 73. Aplicación de Ruuvi Station en dispositivo móvil.

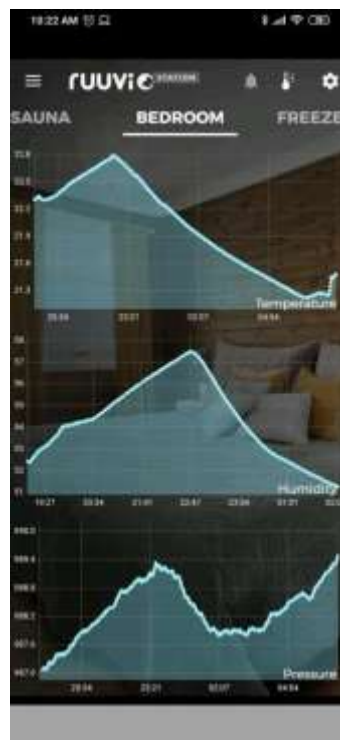


Figura 74. Gráficas de temperatura, presión y humedad generadas en aplicación Ruuvi Station.

4.3.3 Sistema de control: código e interfaz de control

El código de control y automatización para el sistema mecatrónico se desarrolló en lenguaje Python bajo una estructura de sintaxis textual de diseño propio. Se tomaron como guía varias fuentes de información electrónica disponibles en la red libremente, así como librerías integradas por default en el software de acceso libre empleado.

Algunas fuentes consultadas fueron:

- <https://business.tutsplus.com/es/tutorials/controlling-dc-motors-using-python-with-a-raspberry-pi--cms-20051>
- <https://es.accentsconagua.com/articles/business/controlling-dc-motors-using-python-with-a-raspberry-pi.html>
- <http://robotica.sandria.org/2017/12/controlar-motor-cd-con-python-en-raspberry-pi-y-modulo-puente-h/>
- <https://www.aranacorp.com/es/control-e-un-motor-cc-con-raspberry-pi/>
- <https://blog.330ohms.com/2020/06/26/como-conectar-un-motor-a-pasos-a-raspberry-pi/>
- <http://www.josehervas.es/sensorizados/?p=99>
- <http://www.diverteka.com/?p=1792>
- <https://pinout.xyz/#>
- <https://elbinario.net/2018/01/20/controlando-reles-con-raspberry-pi/>
- <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/tb6560-controlador-motor-pasos/>

Enseguida se describe el procedimiento de configuración del sistema RPi y los códigos desarrollados para este trabajo:

Para poder operar la Raspberry Pi3, se implementó un sistema operativo Raspbian de Linux disponible en <https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>. Una vez instalado, se colocó a la placa RPi una tarjeta Micro SD (cap. 64 GB) para habilitar la pantalla de la configuración correspondiente a la apertura de la lectura de GPIO. Para manipular la interfaz de Raspbian se empleó el control mediante VNC (Computación Virtual en Red) para monitorear la RPi por un computador y tomar el control del ordenador servidor remotamente a través de un ordenador cliente, ver Figura 75. Para poder tener acceso de la red, fue necesario obtener la dirección IP que proporciona el servicio de internet al que se encuentre conectado el sistema. En este caso se empleó la interfaz de PuTTY para lograr la configuración de la IP bajo la siguiente secuencia: (a) Introducir la IP o Hostname del servidor remoto, (b) seleccionar el puerto (normalmente es el 22 por defecto para conectar a través de SSH), (c) seleccionar en connection type la opción SSH, (d) dar Open y (e) ingresar nombre de usuario y contraseña para comunicarse con la RPi e iniciar sesión en el servidor remoto. En la Figura 76, se muestra la interfaz de configuración de PuTTY empleada.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel



Figura 75. Software libre VNC para configuración de acceso a la RPi.

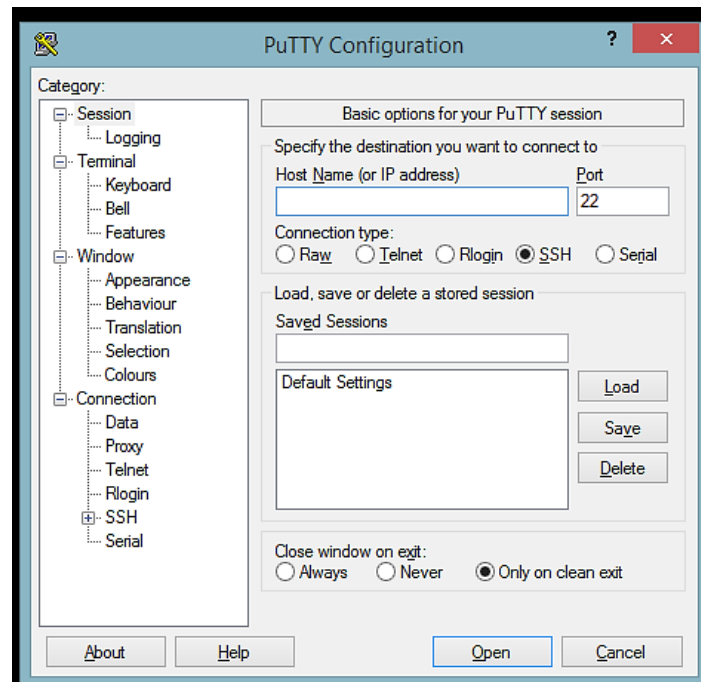


Figura 76. Interfaz de configuración de PuTTY como servidor remoto.

Configurada la placa RPi para su manejo remoto, se procedió a activar las entradas y salidas de los pines GPIO de la tarjeta mediante el código de programación desarrollado en lenguaje Python (estructura secuencial). Donde cada pin tiene dos números adjuntos. El número BOARD y el número BCM (Broadcom SOC channel) de los GPIO de la RPi, se configuraron bajo la siguiente sintaxis Python:

1 – GPIO/BCM Numbering

`GPIO.setmode (GPIO.BCM)`

2 – Board Numbering

`GPIO.setmode (GPIO.BOARD)`

Es de resaltar que la RPi puede proporcionar 5V (pines 2 y 4) y 3.3V (pines 1 y 17) de potencia. También proporciona una tierra (GND) para los circuitos de los pines 6, 9, 14, 20, 25, 30, 34 y 39.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

En la RPi B, la entrada y la salida representa la interface final entre el usuario y el programa que se ejecuta. Las instrucciones de entrada del programa hacen que la computadora lea e ingrese los datos durante la ejecución del mismo, lo que permite escribir el código de ejecución para diferentes conjuntos de datos y una programación activa en el tiempo de ejecución.

El código de comunicación con la RPi 3 modelo B por Phyton que se empleo fue:

```
Login as: pi
Password:
pi@raspberrypitiesis:~$
```

La línea 3 es precisamente la instrucción que evidencia la comunicación con la RPi, ver Figura 70.

El código que se empleó para establecer los comandos para construir una carpeta para guardar los códigos a utilizar con sus respectivas librerías fue:

```
pi@raspberrypitiesis:~$ cd pruebas
pi@raspberrypitiesis:~/pruebas $
```

Con lo anterior se logró que la comunicación permanezca directa con la RPi y se permita trabajar sobre la misma. Algunos comandos en Phyton empleados fueron:

pwd	Indica en que carpeta se encuentra.
ls	Lo que contiene la carpeta donde se encuentre.
cd...	Ir a la carpeta anterior.
cd_/h	Ir a la carpeta home y con la tecla <i>tab</i> se autocompleta el nombre.
mkdir_nombre	Se crea una carpeta nueva.
cat_...	Visualizar código, sin poder editarlo.
nano_...	Editor de texto o código del archivo a correr.
sudo_---	Llamar a librerías y actualización del sistema de la RPi.
python_nombre.pi	Ejecutar el código ya programado.

Logrado la comunicación, se procedió a la codificación de los sensores RuuviTag y el actuador. Para esto, se declaró primeramente en la estructura del código la instalación de librerías que permitieron la actualización, el manejo de los comandos y el reconocimiento de acciones a ejecutar:

```
sudo apt-get install python pi.gpio
sudo apt-get update&sudo apt-get upgrade echo
sudo apt-get install bluez bluez-hcidump
sudo dpkg--configure-a
pip install ruuvitag_sensor
```

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

Enseguida se definió una nomenclatura para cada sensor RuuviTag empleado, siendo el siguiente:

No.	Sensor	Código	Ubicación
1	Temperatura	CD:0D:03:74:02:E6	Parte inferior del tanque (zona cónica).
2	Presión	CE:96:5C:CD:D9:C5	Parte intermedia del tanque.
3	Humedad	EC:51:A7:74:E0:AC	Parte interna de la tapa cilíndrica de cierre del reactor.

El código para el sensor de temperatura fue:

```
from ruuvitag_sensor.ruuvitag import RuuviTag
import RPi.GPIO as gpio
from time import sleep
gpio.setwarnings(False)
gpio.setmode(gpio.BCM)
gpio.setup(2, gpio.OUT)
sensor = RuuviTag('CD:0D:03:74:02:E6')
#FROM THE DEVICE
state = sensor.update()
#get last state
state = sensor.state
#print('ax = {0:0.1f}'.format(state["acceleration_x"]))
#print('ay = {0:0.1f}'.format(state["acceleration_y"]))
#print('az = {0:0.1f}'.format(state["acceleration_z"]))
#print('bateria = {0:0.1f}'.format(state["battery"]))
#print('presion = {0:0.1f}'.format(state["pressure"]))
#print('measurement sequence number = {0:0.1f}'.format(state["measurement_sequence_number$
print('temperatura = {0:0.1f}'.format(state["temperature"]))
#print('humedad = {0:0.1f}'.format(state["humidity"]))
#print('tx power = {0:0.1f}'.format(state["tx_power"]))
#print('contramovimiento = {0:0.1f}'.format(state["movement_counter"]))
#print('formato de datos = {0:0.1f}'.format(state["data_format"]))
#print('mac = {0:0.1str}'.format(state["mac"]))
while True:
    #get last state
    state = sensor.state
    temperatura = sensor.state["temperature"]
    if temperatura > 34:
        gpio.output(2, True)
        print("la parrilla se ha apagado por que el numero ahora es = ", temperatura)
    else:
        gpio.output(2, False)
        print(temperatura)
    state = sensor.update()
```

El código para el sensor de presión fue:

```
rom ruuvitag_sensor.ruuvitag import RuuviTag
import RPi.GPIO as gpio
from time import sleep
gpio.setwarnings(False)
gpio.setmode(gpio.BCM)
gpio.setup(2, gpio.OUT)
```

```
sensor = RuuviTag('CE:96:5C:CD:D9:C5')
#FROM THE DEVICE
state = sensor.update()
#get last state
state = sensor.state
#print('ax = {0:0.1f}'.format(state["acceleration_x"]))
#print('ay = {0:0.1f}'.format(state["acceleration_y"]))
#print('az = {0:0.1f}'.format(state["acceleration_z"]))
#print('bateria = {0:0.1f}'.format(state["battery"]))
print('presion = {0:0.1f}'.format(state["pressure"]))
#print('measurement sequence number = {0:0.1f}'.format(state["measurement_sequence_number$
print('temperatura = {0:0.1f}'.format(state["temperature"]))
#print('humedad = {0:0.1f}'.format(state["humidity"]))
#print('tx power = {0:0.1f}'.format(state["tx_power"]))
#print('contramovimiento = {0:0.1f}'.format(state["movement_counter"]))
#print('formato de datos = {0:0.1f}'.format(state["data_format"]))
#print('mac = {0:0.1str}'.format(state["mac"]))
while True:
    #get last state
    state = sensor.state
    presion = sensor.state["pressure"]
    #state = sensor.state
    #temperatura = sensor.state["temperature"]
    # if temperatura > 25:
    #     gpio.output(2, True)
    #     print("la parrilla se ha apagado por que el numero ahora es = ", temperatura)
    # else:
    #     gpio.output(2, False)
    #     print(temperatura)
    print(presion)
    state = sensor.update()
```

El código para el sensor de humedad fue:

```
from ruuvitag_sensor.ruuvitag import RuuviTag
import RPi.GPIO as gpio
from time import sleep
gpio.setwarnings(False)
gpio.setmode(gpio.BCM)
gpio.setup(2, gpio.OUT)
sensor = RuuviTag('EC:51:A7:74:E0:AC')
#FROM THE DEVICE
state = sensor.update()
#get last state
state = sensor.state
#print('ax = {0:0.1f}'.format(state["acceleration_x"]))
#print('ay = {0:0.1f}'.format(state["acceleration_y"]))
#print('az = {0:0.1f}'.format(state["acceleration_z"]))
#print('bateria = {0:0.1f}'.format(state["battery"]))
#print('presion = {0:0.1f}'.format(state["pressure"]))
#print('measurement sequence number = {0:0.1f}'.format(state["measurement_sequence_number$
```

```
print('temperatura = {0:0.1f}'.format(state["temperature"]))
print('humedad = {0:0.1f}'.format(state["humidity"]))
#print('tx power = {0:0.1f}'.format(state["tx_power"]))
#print('contramovimiento = {0:0.1f}'.format(state["movement_counter"]))
#print('formato de datos = {0:0.1f}'.format(state["data_format"]))
#print('mac = {0:0.1str}'.format(state["mac"]))
while True:
    #get last state
    state = sensor.state
    humedad = sensor.state["humidity"]
    #state = sensor.state
    #temperatura = sensor.state["temperature"]
    # if temperatura > 55:
    #     # gpio.output(2, True)
    #     # print("la parrilla se ha apagado por que el numero ahora es = ", temperatura)
    # else:
    #     # gpio.output(2, False)
    #     # print(temperatura)
    print(humedad)
    state = sensor.update()
```

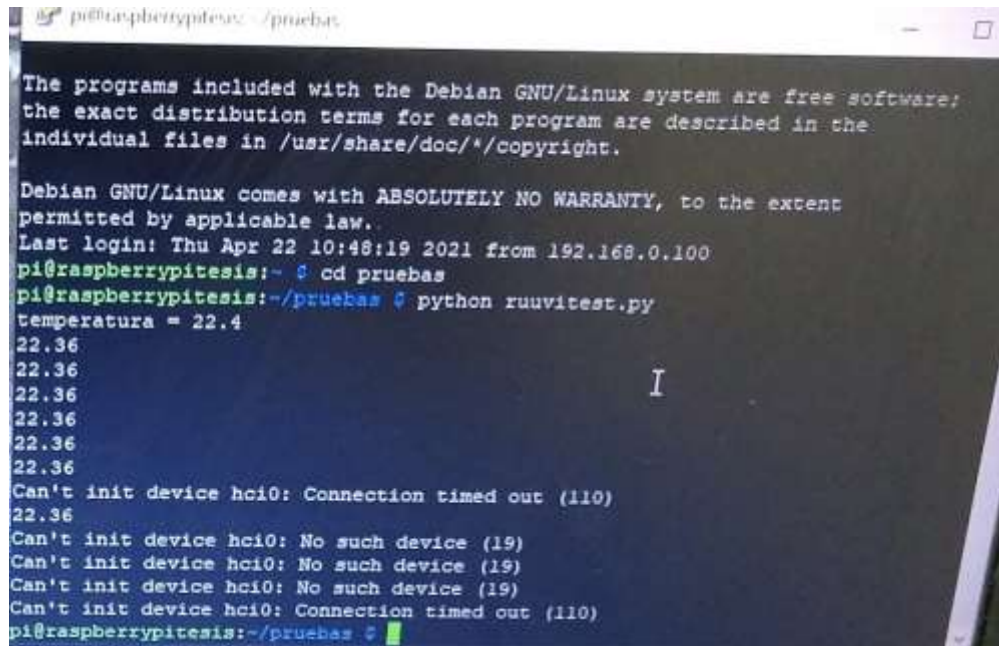
Para el caso del motor NEMA 23 (actuador), el código especifica una velocidad de giro del motor (1.9 ms) que permite que la agitación sea prácticamente continua. El código definido fue:

```
from time import sleep
import RPi.GPIO as gpio
DIR = 20
STEP = 21
CW = 1
CCW = 0
gpio.setmode(gpio.BCM)
gpio.setup(DIR, gpio.OUT)
gpio.setup(STEP, gpio.OUT)
gpio.output(DIR, CW)
# Main body of code
try:
    while True:
        sleep(0)
        gpio.output(DIR, CW)
        for x in range(400):
            gpio.output(STEP, gpio.HIGH)
            sleep(.00190)
            gpio.output(STEP, gpio.LOW)
            #sleep(.00190)
except KeyboardInterrupt: # If there is a KeyboardInterrupt (when you press ctr$
    print("Cleaning up!")
    gpio.cleanup()
```

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

Los códigos elaborados en lenguaje Python para los sensores RuuviTag y el motor NEMA 23 permitieron que la placa RPi pudiera registrar y monitorear las variables de temperatura, presión y humedad de la reacción, así como mantener una agitación constante durante todo el tiempo de reacción.

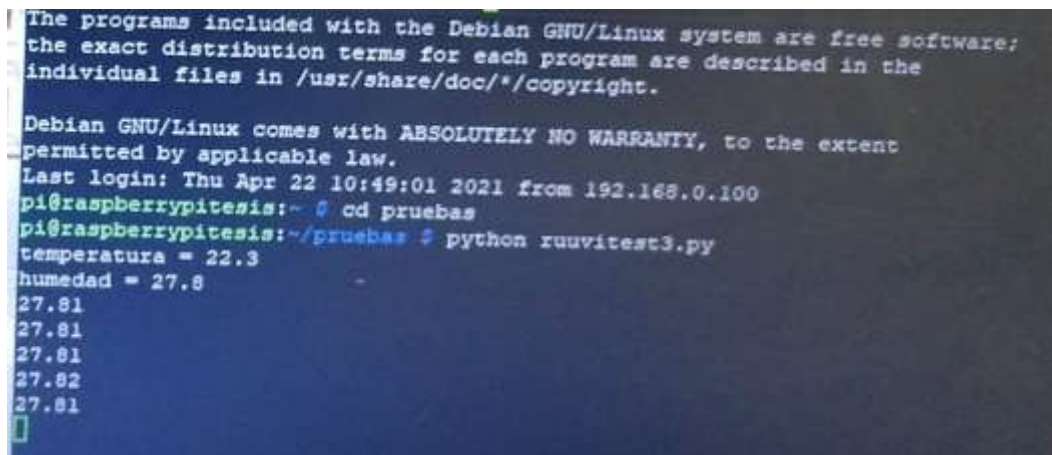
Enseguida se presentan a continuación capturas de pantalla donde se evidencian las lecturas obtenidas durante la operación del sistema mecatrónico desarrollado. Se aprecia los valores de temperatura y humedad en una prueba preliminar, ver Figuras 77 y 78, respectivamente.



```
pi@raspberrypiteas: ~/pruebas
The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Thu Apr 22 10:48:19 2021 from 192.168.0.100
pi@raspberrypiteas:~$ cd pruebas
pi@raspberrypiteas:~/pruebas$ python ruuvitest.py
temperatura = 22.4
22.36
22.36
22.36
22.36
22.36
22.36
Can't init device hci0: Connection timed out (110)
22.36
Can't init device hci0: No such device (19)
Can't init device hci0: No such device (19)
Can't init device hci0: No such device (19)
Can't init device hci0: Connection timed out (110)
pi@raspberrypiteas:~/pruebas$
```

Figura 77. Interfaz, lecturas de temperatura con el sistema mecatrónico en operación.



```
The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Thu Apr 22 10:49:01 2021 from 192.168.0.100
pi@raspberrypiteas:~$ cd pruebas
pi@raspberrypiteas:~/pruebas$ python ruuvitest3.py
temperatura = 22.3
humedad = 27.8
27.81
27.81
27.81
27.82
27.81
```

Figura 78. Interfaz, lecturas de humedad con el sistema mecatrónico en operación.

4.4 VALIDACIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO PUESTO EN OPERACIÓN

4.4.1 Validación por desarrollo experimental

Para comprobar la funcionalidad del sistema mecatrónico desarrollado, se definió un diseño experimental por medio de un arreglo ortogonal de Taguchi $L4(2^3)$ para llevarse a cabo por triplicado bajo las condiciones especificadas en la sección 3.8.

Uno de los parámetros que se definieron para sugerir que el sistema trabaja de manera correcta, es la respuesta de los sensores, en donde cada corrida respectiva debería comportarse de manera similar entre cada arreglo, es decir, la corrida 1 del arreglo 1 debe tener el mismo comportamiento de la corrida 1 del arreglo 2 y la corrida 1 del arreglo 3, y así sucesivamente las corridas 2, 3 y 4 de cada arreglo.

En la Tabla 13, para cada corrida y cada arreglo, se presenta el número de datos y los valores promedio obtenidos.

Mediante un análisis minucioso de los resultados obtenidos, observamos que:

- a) **Corrida 1.** La temperatura y la humedad, entre cada arreglo, se sugiere que estuvieron bajo control. Sin embargo, en la presión, el arreglo 3 presento una diferencia notoria con respecto a los arreglos 1 y 2.
- b) **Corrida 2.** Únicamente la temperatura se aprecia que trabajo bajo control entre los arreglos. Caso contrario la presión y la humedad resultaron con grandes diferencias entre el arreglo 1 y 2 con el 3.
- c) **Corrida 3.** La temperatura se observa bajo control. La humedad se aprecia bajo un control parcial – pero con valores de humedad menores al 50% –, y la presión con grandes diferencias entre el arreglo 1 y 3 con el 2.
- d) **Corrida 4.** En este caso, ninguna variable puede sugerirse que trabajo bajo un control pertinente pues las diferencias resultaron ser muy notorias.

En general se puede sugerir que el sistema mecatrónico si logra el registro y monitoreo de las variables de operación, principalmente de la temperatura, el cual es el objeto fin del presente proyecto.

Aunque, demás trabajo futuro debe llevarse a cabo para mejorar el desempeño del sistema bajo diversas condiciones de operación. Siendo una de estas acciones a futuro, el de poder mejorar el enfriamiento de la placa RPi para evitar su daño y que no se apague automáticamente en su funcionamiento. Es de resaltar que fallas operativas de apagado automático de la placa RPi se presentaron constantemente durante el desarrollo del diseño experimental (provocado por sobrecalentamiento de la tarjeta). Así también, se debe solventar la forma de sujeción de los sensores dentro del tanque para descartar cualquier falla de sensado del sistema.

De las Figuras 79 a la 82 se presentan gráficos del comportamiento del sistema mecatrónico en el sensado de la temperatura. Se visualiza en general que se presentaron para cada corrida y cada arreglo tendencias similares,

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

aunque lo deseable es que fueran muy similares en todas, tal como en las corridas 1 y 4, ver Figura 79 y 82, respectivamente.

En el Anexo 3, se presentan gráficos de comportamiento de la presión y la humedad de cada corrida y arreglo durante el desarrollo del diseño experimental y su registro y monitoreo con el sistema mecatrónico.

Tabla 13. Valores promedio obtenidos en cada corrida y arreglo L4 realizado.

Corrida	Variable	Arreglo 1		Arreglo 2		Arreglo 3	
		No. de datos	Promedio	No. de datos	Promedio	No. de datos	Promedio
1	Temperatura, °C	435	49.76	431	50.31	431	50.29
	Presión, hPa	443	738.93	443	750.51	432	640.27
	Humedad, %	409	76.14	404	76.19	408	77.71
2	Temperatura, °C	444	47.47	431	50.34	434	49.55
	Presión, hPa	437	750.43	443	738.93	432	639.99
	Humedad, %	405	29.36	407	30.57	396	76.27
3	Temperatura, °C	405	47.56	433	49.80	447	47.80
	Presión, hPa	443	738.93	429	639.99	429	750.39
	Humedad, %	408	20.63	407	26.37	407	30.57
4	Temperatura, °C	434	39.53	434	49.82	430	50.36
	Presión, hPa	429	639.99	429	750.39	434	738.79
	Humedad, %	402	77.91	403	76.2	408	29.36

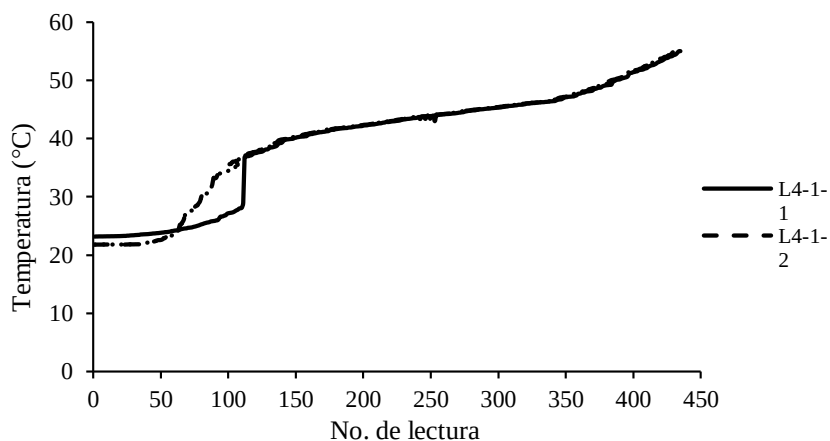


Figura 79. Registro y monitoreo de la temperatura para la corrida 1 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-1-1), arreglo 2 (L4-1-2) y arreglo 3 (L4-1-3).

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

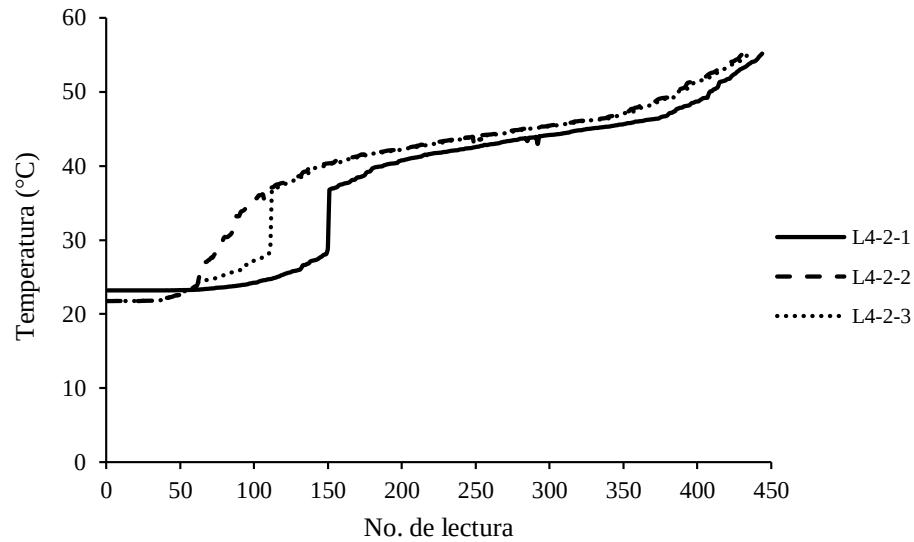


Figura 80. Registro y monitoreo de la temperatura para la corrida 2 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-2-1), arreglo 2 (L4-2-2) y arreglo 3 (L4-2-3).

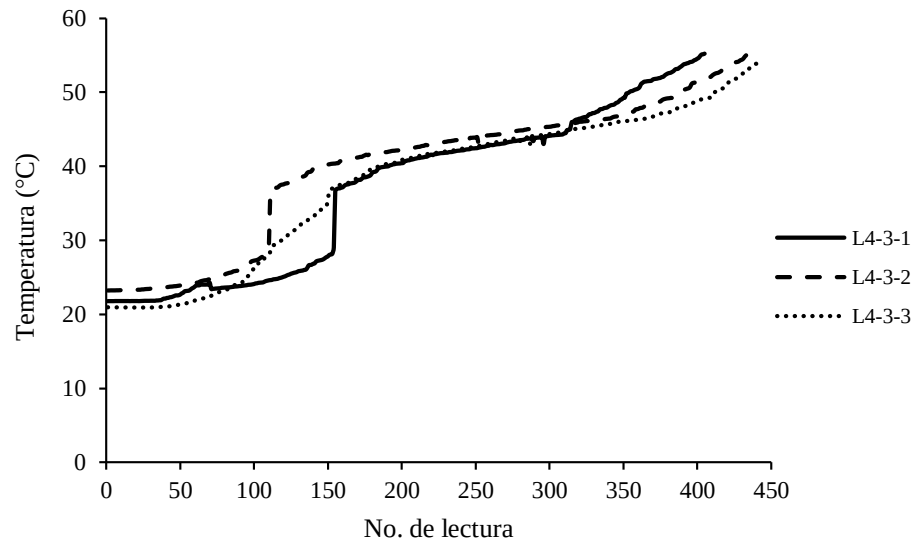


Figura 81. Registro y monitoreo de la temperatura para la corrida 3 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-3-1), arreglo 2 (L4-3-2) y arreglo 3 (L4-3-3).

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

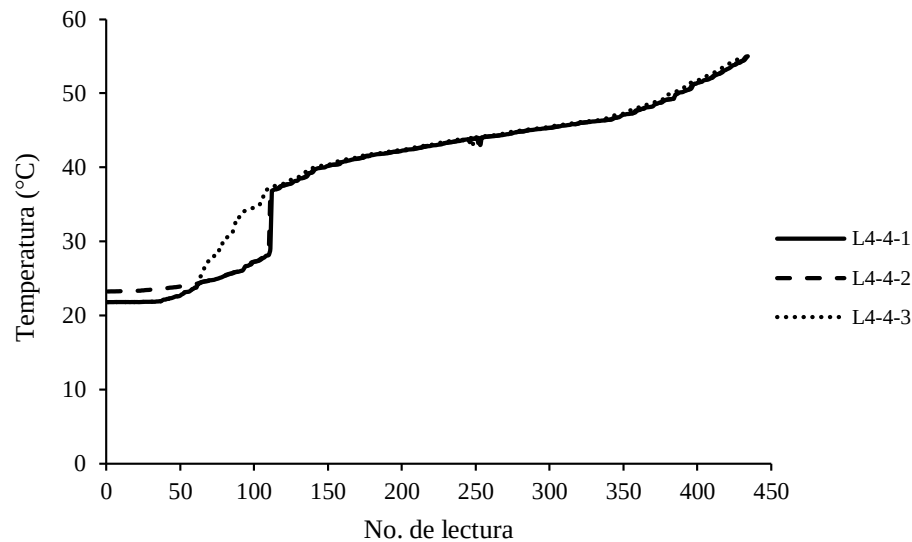


Figura 82. Registro y monitoreo de la temperatura para la corrida 4 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-4-1), arreglo 2 (L4-4-2) y arreglo 3 (L4-4-3).

En la Figura 83, se presenta una muestra de biodiésel obtenido de la corrida 1 del arreglo 1. Se logra observar dos fases, donde la capa inferior corresponde a glicerina y la capa superior se sugiere que es el biodiésel formado. Es de resaltar que no se presenta una fase intermedia que, según la literatura, correspondería a residuos saponificados, lo anterior se sugiere que la cantidad de catalizador fue agotada totalmente en las corridas.



Figura 83. Productos de reacción de transesterificación: corrida 2 (der.) y corrida 4 (izq.) del arreglo 3.

4.4.2 Validación por tipo de flujo

Dentro del código del motor NEMA 23, se especificó una velocidad de giro del motor de 1.9 ms que permite que la agitación sea prácticamente continua. Sin embargo, la velocidad expresada en unidades de revoluciones por minuto (rpm) es dependiente del volumen de trabajo de la reacción. De acuerdo a Nouredini & Zhu,⁹⁷ y considerando la literatura,⁹⁹ los rpm de agitación se pueden relacionar al tipo de flujo (laminar o turbulento) presente en un fluido. Donde en pruebas de transesterificación de obtención de biodiésel se debe tener un flujo turbulento con un Numero de Reynolds, $N_R > 4,000$,⁹⁹ o preferentemente $N_R > 10,000$.⁹⁷

En la Tabla 14, se muestran los rpm que se obtuvieron en cada corrida en cada arreglo, así mismo se especifica el tipo de flujo y N_R que se tuvo durante cada experimento. Por cada corrida se tomaron lecturas de rpm con el tacómetro a los 10, 20 y 30 minutos de reacción para validar que la agitación fuera constante. En general, se sugiere que las pruebas experimentales de validación realizadas fueron correctas, en el sentido de que una reacción de transesterificación se lograba dentro del reactor. Por tanto, las variables registradas por los sensores si correspondían a variables de operación en la producción de biodiésel. Si bien, durante el diseño experimental se detectaron áreas de mejora del sistema mecatrónico, los resultados de tipo de flujo son consistentes con los resultados de la sección 4.4.1 desde la perspectiva de llevar a cabo el registro y monitoreo de los parámetros de obtención de biodiésel por transesterificación. Por otro lado, el flujo turbulento que se logra en el reactor permitió validar el diseño cónico del tanque, así como la geometría del agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín.

Tabla 14. Tipo de flujo en cada corrida y en cada arreglo obtenido durante las pruebas de validación.

Corrida	Arreglo	Lectura rpm (10 min)	Lectura rpm (20 min)	Lectura rpm (30 min)	Promedio Lecturas (rpm)	N_R promedio	Tipo de Flujo
1	1	466	592	595	551	11387	Turbulento
2	1	460	461	476	466	9624	Turbulento
3	1	477	475	458	470	9713	Turbulento
4	1	643	641	640	641	13254	Turbulento
1	2	516	567	571	551	11394	Turbulento
2	2	555	542	530	542	11208	Turbulento
3	2	560	568	557	562	11608	Turbulento
4	2	554	559	553	555	11477	Turbulento
1	3	575	576	546	566	11690	Turbulento
2	3	500	494	510	501	10361	Turbulento
3	3	495	520	522	512	10588	Turbulento
4	3	503	493	505	500	10340	Turbulento

4.4.3 Validación por simulación en Flow Simulation

Mediante el software SolidWorks® y el módulo Flow Simulation se realizó el análisis de simulación de fluidos para verificar que se tenga un flujo de tipo turbulento en el diseño del tanque (con terminación cónica) y considerando el uso de dos arreglos de alabes tipo corbatín, ver Figura 84.

El resultado es consistente con las pruebas de validación anteriores pues se observa una agitación de tipo flujo turbulento, por lo que se sugiere que si se llevan a cabo reacciones de transesterificación de biodiésel.

La herramienta de Flow Simulation tiene habilitado diversas opciones de parámetros de turbulencia, por lo que las simulaciones se llevaron a cabo en cada una de ellas. En todos los casos anteriores, la simulación es idéntica. Es de resaltar que se habilita la opción de “esferas” como visualización de la animación para una mejor apreciación de la agitación. A manera de ejemplo, en la Figura 85 y 86, se muestran capturas de pantalla de dos simulaciones construidas en términos de turbulencia. Ninguna otra interpretación es realizada sobre las simulaciones obtenidas.

En el Anexo 4, se muestran más capturas de pantallas de simulaciones realizadas. En general, todas las simulaciones presentan la misma animación de turbulencia, sin distingo de las unidades contempladas.



Figura 84. Diseño empleado en Flow Simulation: tanque y agitador propulsor de doble aspa tipo corbatín.

En el Anexo 5, a manera informativa, se describe los pasos a seguir para configurar la simulación dentro de SolidWorks®.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

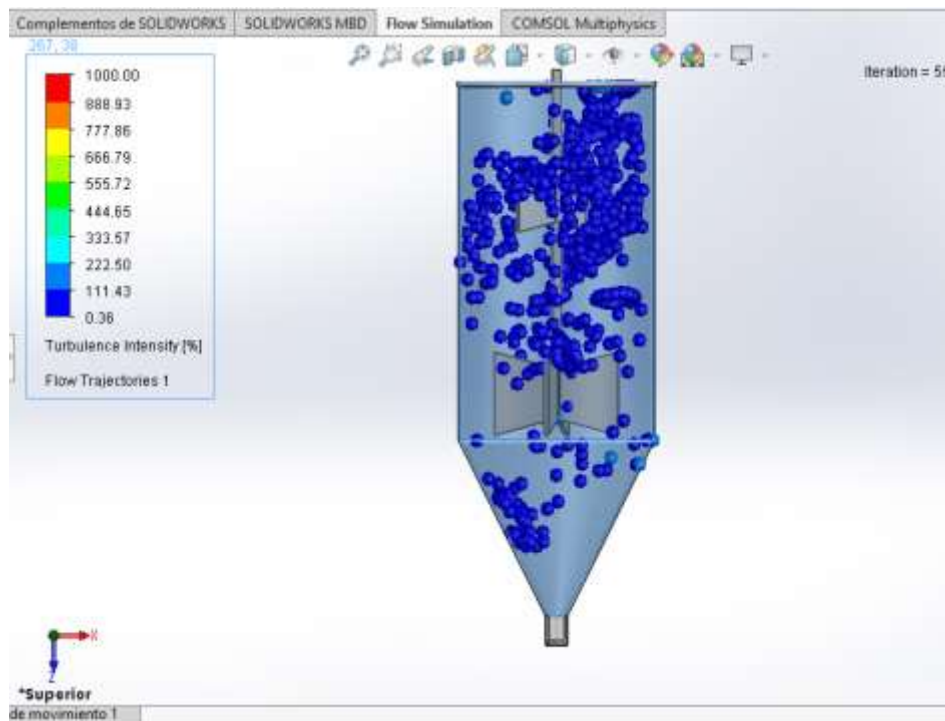


Figura 85. Flow Simulation configurada en intensidad de turbulencia, valor máximo de 111.43 %.

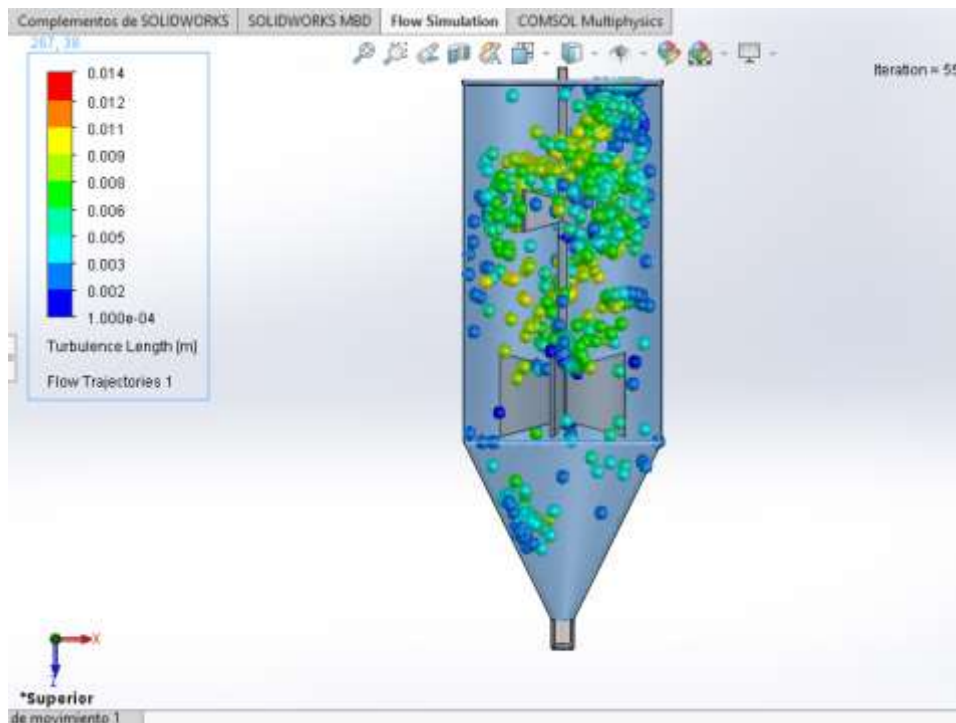


Figura 86. Flow Simulation configurada en longitud de turbulencia, valor máximo de 0.011 m.

V. CONCLUSIONES

El diseño y construcción de un reactor de bajo volumen para la producción de biodiésel por reacciones de transesterificación resultó ser funcional. Los diseños, obtenidos en el software de diseño SolidWorks® versión académica 2018, permitieron asegurar que las dimensiones máximas cilíndricas (altura de 400.05 mm y base de 168.28 mm de diámetro), la geometría (cilíndrica y/o con terminación cónica), el volumen máximo de trabajo (3.60 L) y el tipo de agitador (propulsor de doble aspas tipo corbatín) seleccionado fueran aptos para que las reacciones de transesterificación se llevaran a cabo en flujos turbulentos (soportado por simulaciones construidas en el módulo Flow Simulation de SolidWorks®) y con la capacidad de operar el reactor bajo un proceso continuo, discontinuo o semicontinuo. En este trabajo se operó el reactor bajo un proceso semicontinuo.

La construcción del reactor fue bajo el diseño propuesto y con materiales de fácil adquisición, pero de resistencia comprobada e higiénicos (lamina de acero galvanizado o acero inoxidable) que permitieron llevar a cabo las reacciones de obtención de biodiésel (biocombustible no cuantificado ni caracterizado) sin haberse presentado contaminación de los productos, presiones altas de trabajo, fugas o derramamientos de fluidos. Así mismo, la fabricación y tipo de resistencia eléctrica empleada (en espiral, de acero inoxidable, de 1000 W de potencia), permitieron que una transferencia de calor entre un sólido y un fluido pudiera llevarse a cabo para alcanzar la temperatura de operación requerida (55 ± 2 °C).

Por otro lado, la metodología sugerida para el diseño y construcción de un sistema mecatrónico – basado en el controlador Raspberry Pi 3 modelo B y lenguaje de programación Phyton 3 (el código permitió realizar la automatización del sistema) – para el registro, monitoreo (instrumentación) y control de las variables de operación (temperatura, velocidad de agitación y tiempo de reacción) presentes en una reacción de transesterificación para la obtención de biodiésel y empleando sensores inalámbricos RuuviTag fue adecuada. Los diseños electrónicos del sistema mecatrónico fueron elaborados previamente a su construcción por medio del software de automatización de diseño de diagramas electrónicos Fritzing en su versión Beta 0.9.3 de acceso libre. La construcción del sistema mecatrónico se basó en electrónica modular y empleando componentes compatibles con la placa Raspberry Pi como lo son, driver TB6560, modulo relevador de 1 canal, actuador NEMA 23, entre otros. Por otra parte, se diseñó una interfaz gráfica que permite la supervisión del proceso desde una computadora externa al sistema. La interfaz permite, en caso de existir un problema, saber en qué parte del proceso sucedió y brinda la opción de detener el proceso vía remota. La automatización y el control (encendido-apagado), permitieron llevar a cabo pruebas de obtención de biodiésel.

Se logró construir una base de datos experimental (número de lectura vs variable) del comportamiento de los parámetros de operación seleccionados. En el caso de la temperatura, su valor se incrementaba gradualmente hasta alcanzar la temperatura de operación (55 ± 2 °C) y mantenerse en ella durante el tiempo de reacción determinado (30 minutos). En general, la variable de temperatura fue aceptablemente controlada por el sistema.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

Por otro lado, las variables de presión y humedad presentaron mayores dificultades de control, en donde se sugiere que la sujeción y posición del sensor y el calentamiento de la placa Raspberry Pi afectaron la respuesta (registro y monitoreo) de los sensores RuuviTag. En el caso de la agitación, se mantuvieron velocidades promedio entre 460 y 650 rpm que garantizaron obtener flujos turbulentos con Números de Reynolds entre 9600 y 13300. Mediante inspección visual, se observó que en el producto resultante de la reacción (llevada a cabo en el reactor) se formaron dos fases inmiscibles que se sugiere corresponde a glicerina (capa inferior) y biodiésel (capa superior). Ninguna prueba de caracterización fue realizada por estar fuera del alcance del proyecto.

El diseño y construcción del reactor y del sistema mecatrónico cumplen con el propósito planteado de integrar una tarjeta Raspberry Pi y lenguaje Python al sistema, y aunque rigurosamente se presentaron lecturas fuera de tendencia, si se logra el registro y monitoreo de las variables y la automatización de encendido-apagado de la resistencia eléctrica. Las metodologías propuestas son fáciles de implementar y susceptibles de ampliar su gama de aplicaciones a otros procesos fisicoquímicos que requieran un reactor automatizado para llevarse a cabo, por ejemplo, síntesis de polímeros en solución. También el código de control es capaz de modificarse para poder controlar más periféricos y aumentar el rango de variables de estudio, por ejemplo, sensores de nivel.

Como parte de la difusión del conocimiento, el proyecto – en la parte del diseño y construcción de un módulo automático para producción de biodiésel de bajo volumen – participó en modalidad oral, en el 1er Encuentro Nacional Virtual de Investigación en Ingeniería, ver Anexo 6.

En el trabajo a futuro, es recomendable utilizar las metodologías desarrolladas para estudiar la capacidad del reactor de operar en flujo continuo o discontinuo. También se sugiere mejorar el enfriamiento de la placa Raspberry Pi para evitar su daño y que no se apague automáticamente en su funcionamiento (provocado por sobrecalentamiento de la tarjeta). De igual manera, se recomienda solventar la forma de sujeción de los sensores RuuviTag dentro del tanque para descartar cualquier falla de sensado del sistema.

De manera opcional, el trabajo futuro puede ser orientado a caracterizar el biodiésel generado, realizar el modelado matemático del reactor, implementar diferentes técnicas de control en lazo cerrado y diseñar observadores de estados.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Pisarello, Ma.-L. (2010). *Producción de biodiesel: equilibrio fisicoquímico y cinética de esterificación y transesterificación con diferentes catalizadores y alcoholes* (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- (2) Salinas-Callejas, E. & Gasca-Quezada, V. (2009). Los biocombustibles. *El Cotidiano*, 157, 75-82.
- (3) EPEC. Las energías renovables. Recuperado de <https://web.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/renovables.pdf>
- (4) Álvarez-Maciél, C. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercado actuales y comercio internacional. *Economía informa*, 359, 63-89.
- (5) Laborde, M. F., González, M. S., Ponce, J. M., Pagano, A. M. & Gely, M. C. (2017). Optimización del proceso de esterificación de aceites vegetales usados para la producción de biodiesel. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 8(1), 17-30.
- (6) Sánchez-Medina, I. A. & Huertas-Greco, K. (2012). *Obtención y caracterización de biodiesel a partir de aceite de semillas de Ricinus communis. (Higuerilla) modificadas genéticamente y cultivadas en el eje cafetero* (Tesis de Licenciatura). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Risaralda, Colombia.
- (7) Castellar, G., Angulo, E. R. & Cardozo, B. M. (2014). Transesterification vegetable oils using Heterogeneous catalysts. *Prospect*, 12(2), 90-104.
- (8) Ávila-Orozco, F. D. (2015). *Biodiésel: estudios analíticos y desarrollo de métodos de análisis para el control de calidad* (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- (9) IICA y ARPEL (2009). Manual de biocombustibles. Recuperado de <http://repiica.iica.int/docs/B2223e/B2223e.pdf>
- (10) Medina-Villadiego, M., Ospono-Roa, Y. & Tejeda-Benitez, L. (2015). Esterificación y transesterificación de aceites residuales para obtener biodiésel. *Revista Luna Azul*, 40, 25-34.
- (11) Queiroz, A. G., França, L. & Ponte, M. X. (2012). The life cycle assessment of biodiesel from palm oil (“dendê”) in the Amazon. *Biomass and Bioenergy*, 36, 50-59.
- (12) Santana, H. S., Tortola, D. S., Reis, É. M., Silva Jr., J. L. & Taranto, O. P. (2016). Transesterification reaction of sunflower oil and ethanol for biodiesel synthesis in microchannel reactor: experimental and simulation studies. *Chemical Engineering Journal*, 302, 752-762.
- (13) Colombo, K., Ender, L., Santos, M. M. & Chivanga-Barros, A. A. (2019). Production of biodiesel from Soybean oil and metanol, catalyzed by calcium oxide in a recycle reactor. *South African Journal of Chemical Engineering*, 28, 19-25.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

- (14) Rojas-González, A. F., Girón-Gallegos, E. & Torres-Castañeda, H. G. (2010). Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales: una revisión–catálisis enzimática. *Ingeniería e Investigación*, 30(1), p 17-21.
- (15) Kudre, T., Bhaskar, N. & Sakhare, P. (2017). Optimization and characterization of biodiesel production from rohu (*Labeo rohita*) processing waste. *Renewable Energy*, 113, 1408-1418.
- (16) García-Díaz, M., Gandón-Hernández, J. & Maqueira-Tamayo, Y. (2013). Estudio de la obtención de biodiésel a partir de aceite comestible usado. *Revista Tecnología Química*, 33(2), p.6.
- (17) Varty, A. & Lishawa, S. Haciendo biodiesel de aceite vegetal usado. Recuperado de <https://greenteacher.com/article%20files/haciendobiodiesel.pdf>
- (18) López-Zapata, B. Y., Castillo-González, J. P., Adam-Medina, M. & Álvarez-Gutiérrez, P. E. (2014). Automatización y puesta en operación de un reactor de biodiésel. *Pistas Educativas*, 108, 40-56.
- (19) Patajalo, L., Soria, P., Torres, G. & Erazo, G. (2010). Implementación de un reactor automatizado para producir biodiésel a nivel semi industrial. Recuperado de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6615/1/AC-ESPEL-MAI-0419.pdf>
- (20) Caro-Becerra, J. L., Castellanos-Rangel, L., Romero-González, F. & Ruiz-Morales, M.-del R. (2017). Generación de biodiésel a partir de residuos de aceites, utilizando un reactor con PLC para la automatización del proceso. *Revista de Energía Química y Física*, 4(11), 16-27.
- (21) Álvarez-Vázquez, L., Retana-Taylor, J. A., Gómez-Álvarez, M., Tapia-Herrera, R. & González-Salazar, R. (09/2016-08/2017). Propuesta de automatización de un reactor para la producción de biodiésel a partir de residuos de aceite comestible. *Memoria del Congreso Científico Tecnológico de las carreras de Ingeniería (IME, Industrial E ITSE)* (1ª edición), 1(1), p. 6.
- (22) Marengo, S. J. & Pereyra, R. (2019). *Automatización de planta de producción de biodiesel* (Tesis de Ingeniería). Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina.
- (23) Bolton, W. (2017). *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Un enfoque multidisciplinario* (6ª ed.) México: Alfaomega, Grupo Editor, S. A. de C. V.
- (24) Reyes-Cortés, F., Cid-Monjaraz, J. & Vargas-Soto, E. (2013). *Mecatrónica, Control y Automatización* (1ª ed.) México: Alfaomega, Grupo Editor, S. A. de C. V.
- (25) Autodidacta.info. El autodidactica ABC de la Ingeniería en Mecatrónica. Recuperado de <https://drive.google.com/file/d/1aQr5GNPOIPkxfB00sDwygOTObIADrXRH/view>
- (26) Castillo-Effen, M. (2003) Modelado y simulación de sistemas mecatrónicos. *Investigación & Desarrollo*, 3(1), 54-60.
- (27) Kuo, B. C. (1996). *Sistema de control automático* (7ª ed.). México: PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA, S. A.
- (28) López-Aldea, E. (2017). *Raspberry Pi. Fundamentos y aplicaciones* (ed. Ra-Ma 2017). España: RA-MA Editorial. Recuperado de <https://yolibrospdf.com/electronica.html>

- (29) Hulatt, C. J., Wijffels, R. H., Bolla, S. & Kiron, V. (2017). Production of fatty acids and protein by *Nannochloropsis* in flat-plate Photobioreactors. *PLOS ONE*, 12(1), p.17.
- (30) Lagu, S. S. & Deshmukh, S. B. (2014). Raspberry Pi for automation of water treatment plant. *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, 1999-2003, Delhi, India.
- (31) Ate, A. & Abdelrahim, M. (2018). Controlling the temperature reactor based on Raspberry Pi system control. *2018 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)*, 215-128, Istanbul, Turkey.
- (32) Akbar, K. A. M., Manurung, R. V. & Mulyanti, B. (2018). Development of K500 signal processing system using Raspberry Pi in the 3-electrodes electrochemical sensor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 384, p.8.
- (33) Pranoto, H., Wahab, A., Arifin, Z. & Siswanto, I. (2020). Fuel filter condition monitoring (ffcm) devices innovation on truck diésel engine to prevent filter blocking due to use of bio diesel: b10-b20-b30. *Journal of Physics: Conference Series*, 1700, p.5.
- (34) Klapp, W., Mannankara, R., Williams, K., Parker, C. & Taylor, A. (2018). Increase production rate of the Biodiesel using a solar powered thermally-efficient high-yield ultrasonic processor. *Proceedings of Student Research and Creative Inquiry Day*, 2. Recuperado de https://www.tntech.edu/research/pdf/researchday/Proceedings_2018_FINAL_FOR_PRINTER.pdf
- (35) Tsukamoto, M. Y. S. (2019). *Automatização de uma máquina didática produtora de biodiesel* (Tesis de Licenciatura). Universidad Tecnológica Federal de Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. Recuperado de <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/24382?mode=full>
- (36) IICA. (2014). Guía metodológica: uso y acceso a las energías renovables en territorios rurales/IICA, 48p, San José, C. R.
- (37) Larios-Vázquez, A. (2015). Desarrollo y perspectivas de energía renovable en México. *Economía Informa*, 390, 132-135.
- (38) Ramos, F. D., Díaz, M. S. & Villar, M. A. (2016). Biocombustibles. *Asociación Civil Ciencia Hoy; Ciencia Hoy*, 147, 69-73.
- (39) Salinas-Callejas, E. & Gasca-Quezada, V. (2009). Los biocombustibles. *El Cotidiano*, 157, 75-82.
- (40) Demirbas, A. (2007). *Biodiesel: a realistic fuel alternative for Diesel Engines*, Trabzon, Turkey: Springer.
- (41) Ávila-Orozco, F. D. (2015). *Biodiésel: estudios analíticos y desarrollo de método de análisis para el control de calidad* (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- (42) Tejada-Tovar, C., Tejada-Benítez, L., Villabona-Ortiz, A. & Monroy-Rodríguez, L. (2013). Obtención de biodiésel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal. *Revista Luna Azul*, 36, 10-25.
- (43) Estévez, R. (2012). Biodiésel y nuestro medio ambiente: ecointeligencia. Recuperado de <https://www.ecointeligencia.com/2012/05/biodiesel-y-nuestro-medio-ambiente/>

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

- (44) Castro, A., De Miguel, S., Garetto, T. & Sad, M. (2020). *Reactores químicos: curso introductorio* (1ª ed.). Santa Fe, Argentina: Ediciones UNL.
- (45) Barba-Juan, A. & Clausell-Terol, C. (2014). *Reactores químicos y bioquímicos*. Castelló de la Plana, España: D-Universitat Jaume I. Servei de Comunicació i Publicacions. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/parteaga/51757?page=9>.
- (46) Grau-Vilalta, M. D. (1999). *Estudio del comportamiento de reactores discontinuos y semicontinuos: modelización y comprobación experimental* (Tesis Doctoral). Universitat Politècnica de Catalunya, Cataluña, España.
- (47) Fernández-Benítez, J. A. & Corrochano-Sánchez, C. (2014). *Fundamentos de transmisión de calor*. Madrid, España: Dextra Editorial. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/parteaga/43834?page=22>.
- (48) Camaraza-Medina, Y. (2020). *Transferencia de calor por convección*. Editorial Universitaria. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/parteaga/126029?page=12>.
- (49) Pérez-Jiménez, J. P. (12/06/2018). ¿Cómo hacer un análisis térmico en SolidWorks Simulation?. MX: Solid Servicios. Recuperado de <https://solidservicios.com/blog/como-hacer-un-analisis-termico-en-solidworks-simulation/>
- (50) Canales sectoriales Interempresas. (2019). Automatización en la industria del plástico. Recuperado de interempresas.net/Robotica/Articulos/232237-Automatizacion-en-la-industria-del-plastico.html
- (51) Canales sectoriales Interempresas. (2020). La automatización universal podría ahorrar a la industria hasta 30 mil millones de dólares, según un informe. Recuperado de <https://www.interempresas.net/Robotica/Articulos/322137-automatizacion-universal-podria-ahorrar-industria-hasta-30-mil-millones-dolares-ano-segun.html>
- (52) Industria & empresas. (2014). Sistemas de automatización. Recuperado de <http://industriayempresas.com.ar/node/2100#:~:text=La%20Real%20Academia%20de%20las,f%C3%ADscas%20y%20mentales%20previamente%20programadas.>
- (53) Electrónica integrada 2008. (23/02/2008). Automatización de un reactor químico. <http://electint2008.blogspot.com/2008/02/automatizacion-de-reactor-quimico.html>
- (54) Reyes-Cortés, F., Cid-Monjaraz, J. & Vargas-Soto, E. (2013). *Mecatrónica, Control y Automatización* (1ª ed.). México: Alfaomega Grupo Editor S. A. de C. V.
- (55) Bolton, W. (2013). *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Un enfoque multidisciplinario* (5ª ed.). México: Alfaomega Grupo Editor S. A. de C. V.
- (56) López-Aldea, E. (2017). *Raspberry Pi. Fundamentos y aplicaciones*. España: RA-MA Editorial. Recuperado de <https://yolibrospdf.com/electronica.html>
- (57) Timmons-Brown, M. (2019). *Learn robotics with Raspberry Pi : build and code your own moving, sensing, thinking robots*. USA: No Starch Press, Inc.

- (58) González-Duque, R. *Python para todos*. Creative Commons Reconocimiento 2.5 España. Recuperado de <http://mundogeek.net/tutorial-python/>
- (59) Marzal, A. & Gracia, I. *Introducción a la programación con Python*. Universitat Jaume I. Recuperado de <http://www1.herrera.unt.edu.ar/biblcet/wp-content/uploads/2014/12/ippython.pdf>
- (60) Goodrich, M. T., Tamassia, R. & Goldwasser, M. H. (2013). *Data structures and algorithms in Python*. USA: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- (61) Corona Ramírez, L. G. Abarca Jiménez, G. S. y Mares Carreño, J. (2016). *Sensores y actuadores: aplicaciones con Arduino*. México, México: Grupo Editorial Patria. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/parteaga/39464?page=44>.
- (62) Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C. & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica* (2ª ed.). España: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U.
- (63) Ruuvi.com. (s.f.) RuuviTag, Wireless 4-in-1 Weatherproof Sensor Node. Recuperado de <https://ruuvi.com/ruuvitag/>
- (64) Lahti, S. (23/08/2020). Monitoring your home temperatura – Part 1: setting up RuuviTags and Raspberry Pi. Recuperado de <https://bay.fi/2020/08/23/monitoring-home-temperature-part-1-setting-up-ruuvitags/>
- (65) Chatbotslife.com. (28/11/2017). A telegram Bot to retrieve dato from RuuviTag. Recuperado de <https://chatbotslife.com/ruuvitag-telegram-bot-48bd03a61f3c>
- (66) Roine, J. (09/07/2019). Building a Raspberry Pi 4-based weather monitoring solution using RuuviTag sensors, Azure IoT Hub and Azure functions. Recuperado de <https://jussi-roine.com/2019/07/building-a-raspberry-pi-4-based-weather-monitoring-solution-using-ruuvitag-sensors-azure-iot-hub-and-azure-functions/>
- (67) Gomáriz, S., Biel, D., Matas, J. & Reyes, M. (2000). *Teoría de control. Diseño electrónico* (2ª ed.). España: Ediciones UPC.
- (68) García-González, A. (29/12/2016). Software para diseño de circuitos electrónicos y placas impresas (PCB) – EasyEDA. Recuperado de <http://panamahitek.com/software-para-diseno-de-circuitos-y-placas-pcb-easyeda/>
- (69) Oliveira-Blazetic, G. (2011). Fritzing, primeros pasos. Recuperado de <https://fritzing.org/media/uploads/learning/translations/Fritzing-PrimerosPasos.pdf>
- (70) Fritzing. (2020). Fritzing. Recuperado de <https://fritzing.org/>
- (71) DS SolidWorks. Introduccion a SolidWorks. Recuperado de https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_ES.pdf
- (72) SolidBi. (s.f.). SOLIDWORKS. Que es y para qué sirve. Recuperado de <https://solid-bi.es/solidworks/>
- (73) Solidworks.com (s.f.). SOLIDWORKS Flow Simulation. Recuperado de <https://www.solidworks.com/es/product/solidworks-flow-simulation>
- (74) intelligy.com (2021). Análisis térmico de fluidos. Recuperado de <https://intelligy.com/analisis-termico-fluidos/>

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

- (75) Cambero-Ortega, I., Medina-Orendain, D. A., Santoyo-González, M. A. & Aguilar-Ramírez, S. Y. (2019). *Diseño en impresión 3D de un fermentador continuo modular. Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Tepic 2019*, (pp. 206-211). Tepic, Nayarit, México.
- (76) Díaz-Castillo, A. F. & Vaca-Andrade, J. A. (2018). *Diseño y construcción de un reactor piloto para la producción de biodiésel a base de aceite de higuera* (Tesis de Ingeniería). Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador.
- (77) Rolón-Ortiz, H. Acevedo-Peñaloza, C. & Villamizar-González, Y. (2019). Análisis térmico, modelamiento matemático y simulación de un reactor de agitación discontinuo para volumen específico. *Revista UIS Ingenierías*, 18(1), 39-48.
- (78) CAD CAM Tutorial. (14/10/2016). Solidworks tutorial. Sketch Chemical Reactor in Solidworks [Archivo de Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=_NV7HRp-9ho
- (79) PuTTY.org (s.f.) Download PuTTY – a free SSH and telnet client for Windows. Recuperado de <https://www.putty.org/>
- (80) Diana, C. (31/03/2020). ¿Cómo funciona el SSH?. Recuperado de <https://www.hostinger.mx/tutoriales/que-es-ssh>
- (81) Raspberrypi.org (s.f.). SSH using Windows. Recuperado de <https://www.raspberrypi.org/documentation/remote-access/ssh/windows.md>
- (82) González, F. (18/03/2021). Cyberduck, servidor y navegador de almacenamiento en la nube gratuito para Mac y Windows. Recuperado de <https://www.batiburrillo.net/cyberduck-servidor-y-navegador-de-almacenamiento-en-la-nube-gratuito-para-mac-y-windows/>
- (83) Kheni, P. (22/05/2019). Transfer Files to Raspberry Pi from your Computer. TechMuzz. Recuperado de <https://techmuzz.com/how-to/raspberrypi/transfer-files-raspberry-pi-computer/>
- (84) Raspberry.com (s.f.) Raspberry Pi OS. Recuperado de <https://www.raspberrypi.org/documentation/raspbian/>
- (85) Minitab.com. (2019). Diseños de Taguchi. Recuperado de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/taguchi-designs/>
- (86) Pentón-Saucedo, A. E. & d.-Castillo-Serpa, A. (2012). Aplicación de la Tabla Ortogonal en el diseño de los casos de prueba de Software. *Revista Avanzada Científica*, 15(2), p12.
- (87) Minitab.com. (2019). Catálogo de diseños de Taguchi. Recuperado de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/catalogue-of-taguchi-designs/>
- (88) Murillo-Valdes, J. E. (2004). Producción de biodiésel a partir de aceite de palma. *PALMAS*, 25(4), 31-42.
- (89) Barnwal, B. K. & Sharma, M. P. (2005). Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 9, 363-378.
- (90) Leung, D. Y. C., Wu, X. & Leung, M. K. H. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 87, 1083-1095.

- (91) Marset-Gimeno, D. (2016). *Diseño de un reactor de transesterificación para la obtención de biodiésel a partir de aceites vegetales* (Tesis de Ingeniería). Universitat Politècnica de València, Valencia, España.
- (92) Flores-Hernández, Flores-A., Montiel, M., Reyes-Reyes, J. & Astorga, C. (Octubre de 2013). Diseño y modelado de un biorreactor tipo batch y continuo para aplicaciones de control automático. En Congreso Nacional de Control Automático 2013. Congreso llevado a cabo en Ensenada, Baja California, México.
- (93) Espinoza-Guerrero, A. J. & Palmay-Paredes, P. G. (2009). *Diseño y construcción de un reactor batch para la obtención por transesterificación de biodiésel a partir de aceite de cocina reciclado* (Tesis de Ingeniería). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- (94) Covalda-Olave, M. N. & Hoyos-Alvarez, C. A. (2014). *Diseño y construcción de un prototipo de reactor tipo batch a escala de laboratorio para la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales* (Tesis de Ingeniería). Universidad de Cordoba, Montería, Colombia.
- (95) Enríquez-Montúfar, A. E. (2020). *Diseño de un reactor de metil-metacrilato semiautomático de 200 L de capacidad* (Tesis de Ingeniería). Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador.
- (96) Arbeláez-Marín, A. M. & Rivera-Quiroz, M. P. (2007). *Diseño conceptual de un proceso para la obtención de biodiésel a partir de algunos aceites vegetales colombianos* (Tesis de Ingeniería). Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- (97) Noureddini, H & Zhu, D. (1997). Kinetics of transesterification of Soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 74 (11), 1457-1463.
- (98) Medina-Ramírez, I. E., Chávez-Vela, N. A. & Jáuregui-Rincón, J. (2012). Biodiesel, un combustible renovable. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 55, 62-70.
- (99) Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos* (6a. ed.). Naucalpan de Juárez, México, México: Pearson Educación. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/parteaga/74123?page=247>.

ANEXO 1

Especificaciones técnicas del sensor RuuviTag



July 2019, ruuvi.com

RUUVITAG TECHNICAL SPECIFICATIONS

RuuviTag is an open-source sensor platform that can measure temperature, relative air humidity, air pressure and acceleration.

Technical Specifications

- [Nordic Semiconductor nRF52832 System-on-Chip Software Radio](#)
 - ARM® Cortex™-M4F CPU
 - 512kB Flash Memory + 64kB RAM
 - +4 dBm TX power
 - Support for multiple protocols
 - [Bluetooth 5](#) (BLE 4.2 factory firmware default protocol)
 - [Wirepas Connectivity](#) (for B2B)
 - [Mira OS](#) (for B2B)
 - [Quuppa](#) (for B2B)
 - Other 2.4 GHz proprietary
- [STMicroelectronics LIS2DH12 accelerometer](#)
 - 3-axis, ± 2 g / ± 4 g / ± 8 g / ± 16 g, 1...5300 Hz
 - Freefall and motion detection
- [Bosch BME280 environmental sensor](#)
 - Operating range
 - $-40...85$ °C, 0...95 % RH (non-condensing), 300...1100 hPa
 - Temperature
 - Typical absolute accuracy ± 0.5 °C @ 25 °C, ± 1 °C @ 0...65 °C, ± 1.25 °C @ -20...0 °C, ± 1.5 °C @ -40...-20 °C
 - Output resolution 0.01 °C
 - Relative humidity
 - Typical absolute accuracy tolerance ± 3 % (20...80 % RH, 25 °C, including hysteresis)
 - Air pressure
 - RMS Noise 0.2 Pa, equiv. to 1.7 cm

- Offset temperature coefficient ± 1.5 Pa/K, equiv. to ± 12.6 cm at 1°C temperature change
 - Typical absolute accuracy ± 1 hPa (300...1100 hPa, $0...65^\circ\text{C}$)
 - Relative accuracy ± 0.12 hPa (700...900 hPa, $25...40^\circ\text{C}$)
- Embedded NFC™-A tag coil
- 1000 mAh CR2477 Li/MnO₂ battery (included)
 - User-replaceable
 - Up to 10 years theoretical battery life (depending on the software used)
 - Ruuvi firmware that broadcasts 1 Hz @ +4 dBm
 - Real-world up to 3 years
- Max operating temperature: $-40...85^\circ\text{C}$ (electronics and enclosure)
 - Recommended $-20...70^\circ\text{C}$ (above these limits an extended temperature range battery required, not included)
- 2 buttons
- 2 LEDs
- Dimensions
 - 45 mm diameter (circuit board)
 - 52 mm diameter (enclosure)
 - 12.5 mm height (enclosure)
 - 25 g total weight (enclosure and battery included)
- Weatherproof IP67 certified enclosure (included)
 - High-quality & long-lasting polycarbonate
 - WONDERLITE® PC-110, FDA 21 approved material, flame rating V-2
 - Gore IP67 certified vent membrane
 - Lubricated industrial-grade NBR70 O-ring

Notes: Sensor accuracy information is based on sensor manufacturers' datasheets and information received from the sensor manufacturers. It's not always guaranteed that typical or absolute sensor accuracies will be met in user applications. The sensor manufacturers state that majority of the sensors do fall between the typical values informed on the datasheets. However, some sensor components delivered from the sensor manufacturers' facilities may still have up to three times worse accuracy. Sensors are factory-calibrated before assembled. Sensors are 100% tested but not individually calibrated at Ruuvi's production line. Operating temperature may have an effect to the battery life. Estimates are at room temperature (25°C). RuuviTag is designed for non-condensing use only.

ANEXO 2

Dibujos técnicos de los diseños del reactor

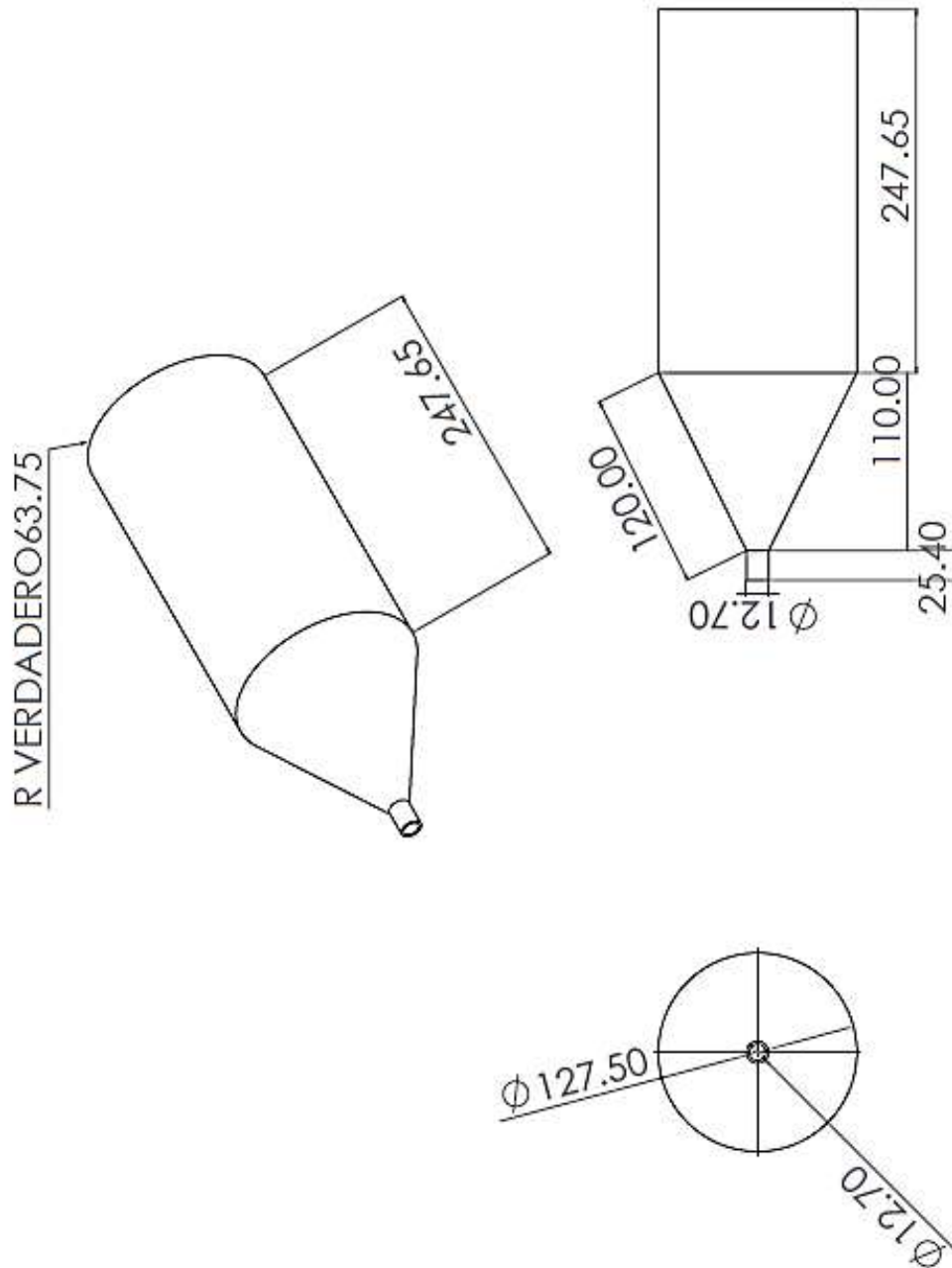


Figura 87. Dibujos técnicos del tanque.

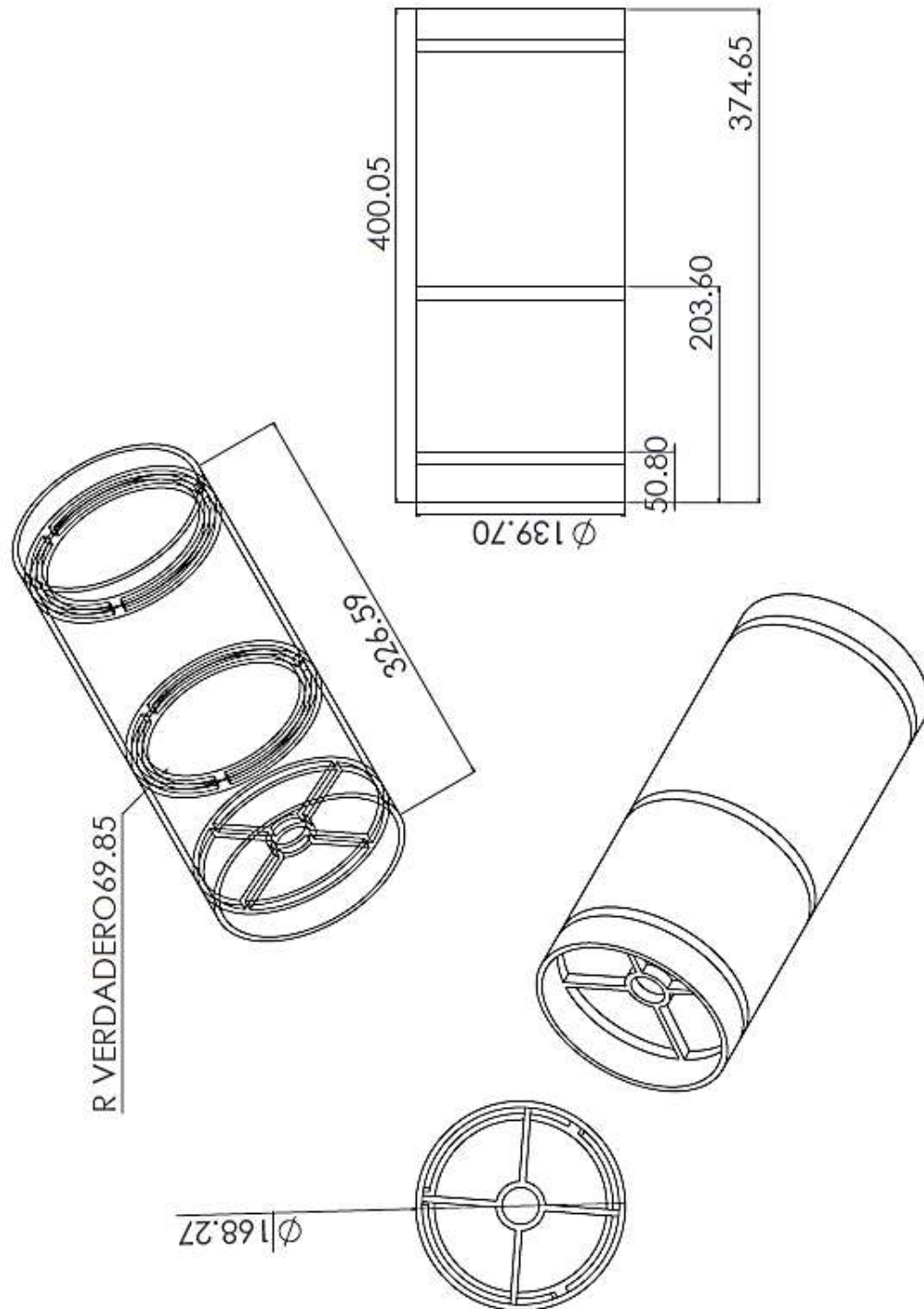


Figura 88. Dibujos técnicos de la carcasa.

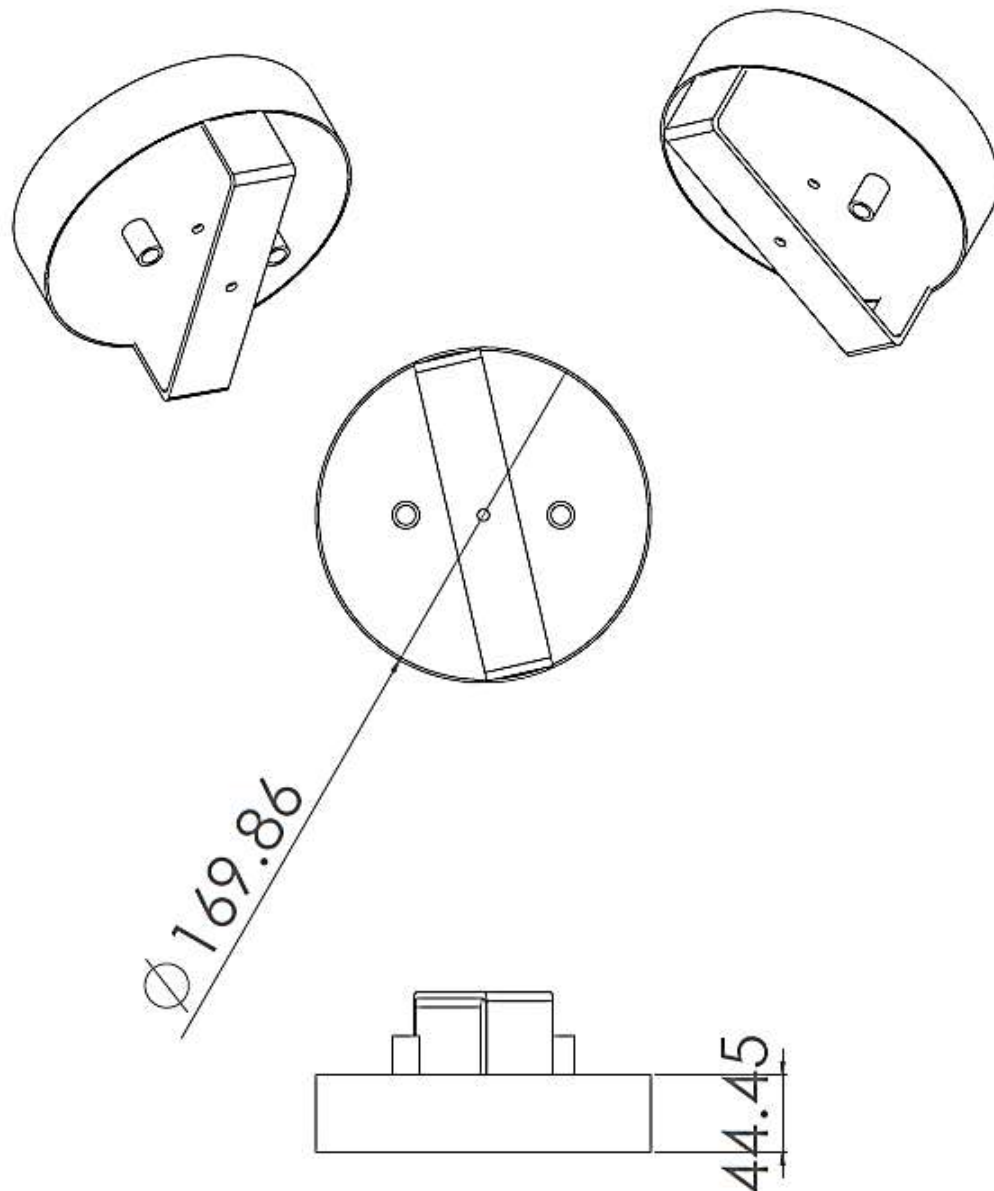


Figura 89. Dibujos técnicos de la tapa cilíndrica superior. Porta sistema de agitación.

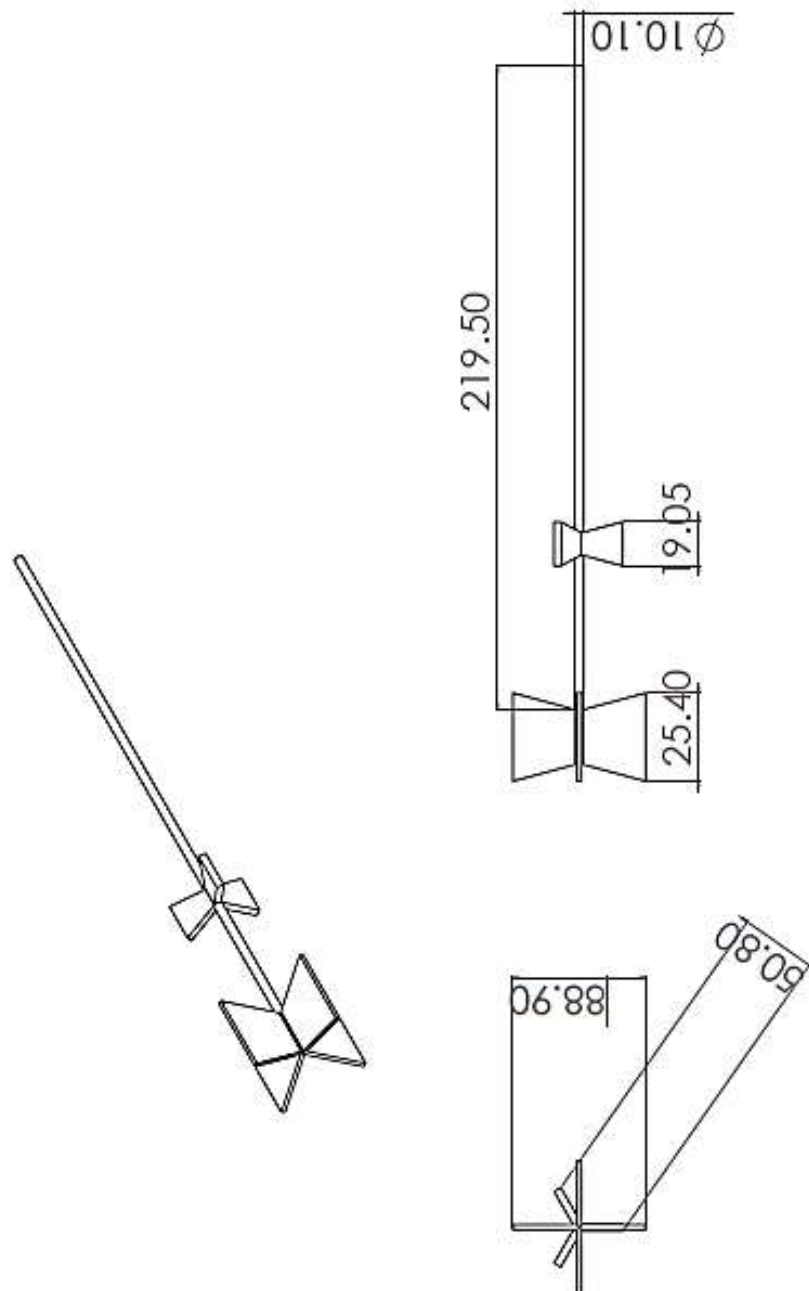


Figura 90. Dibujos técnicos del agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín.

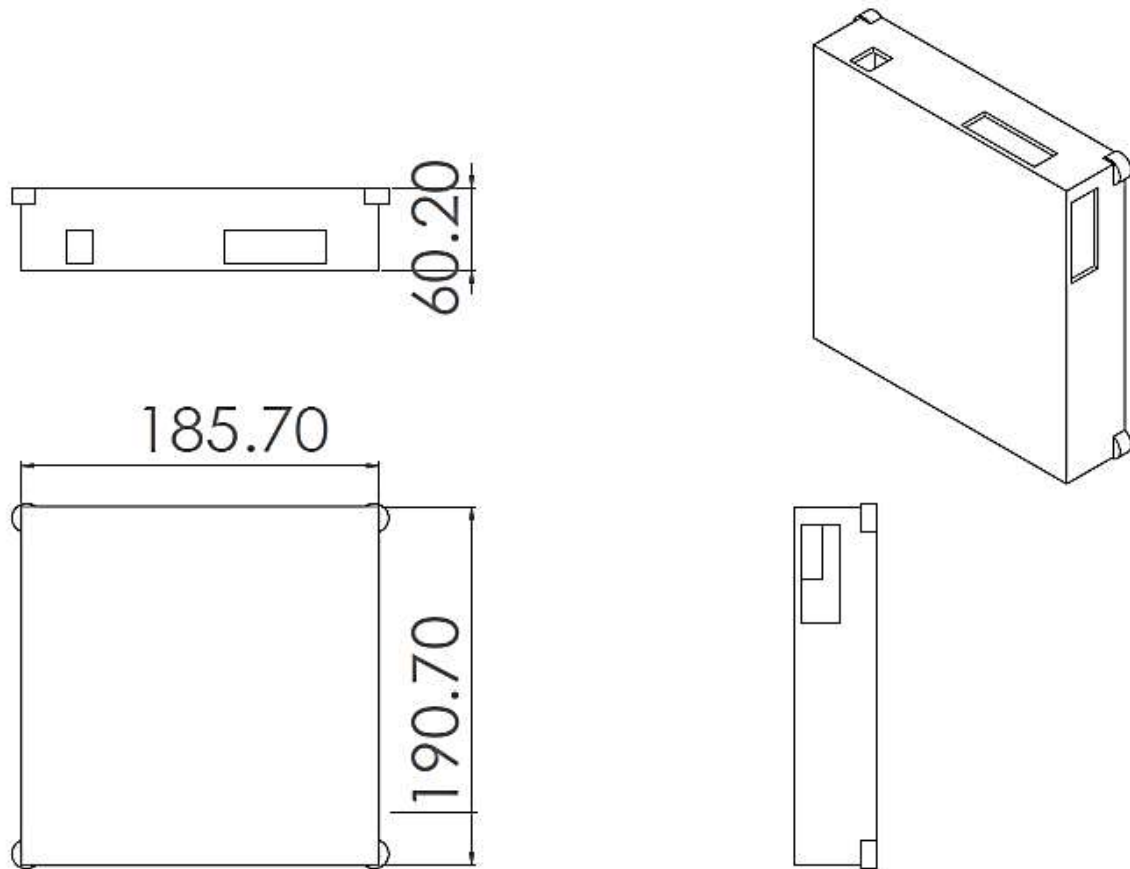


Figura 91. Dibujos técnicos del gabinete de control.

ANEXO 3

Gráficos de registro y monitoreo de presión y humedad

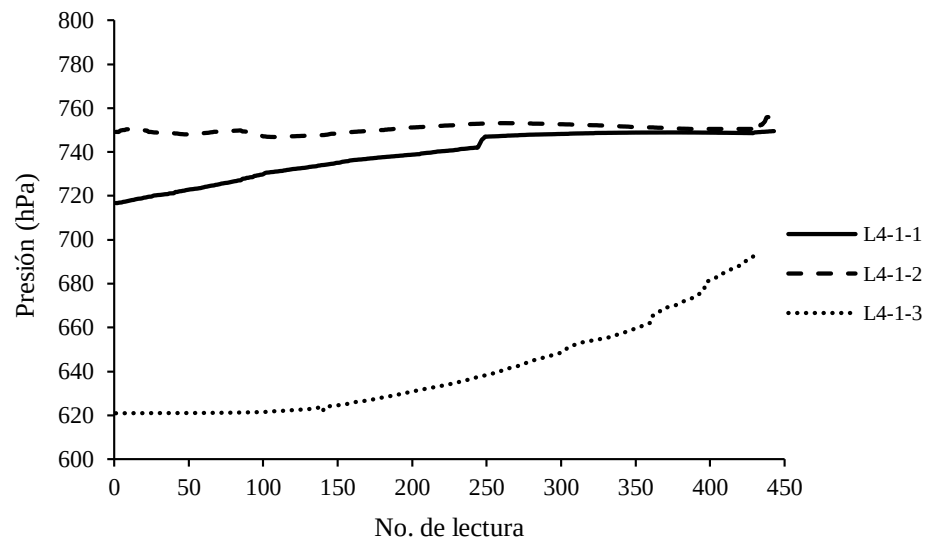


Figura 92. Registro y monitoreo de la presión para la corrida 1 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-1-1), arreglo 2 (L4-1-2) y arreglo 3 (L4-1-3).

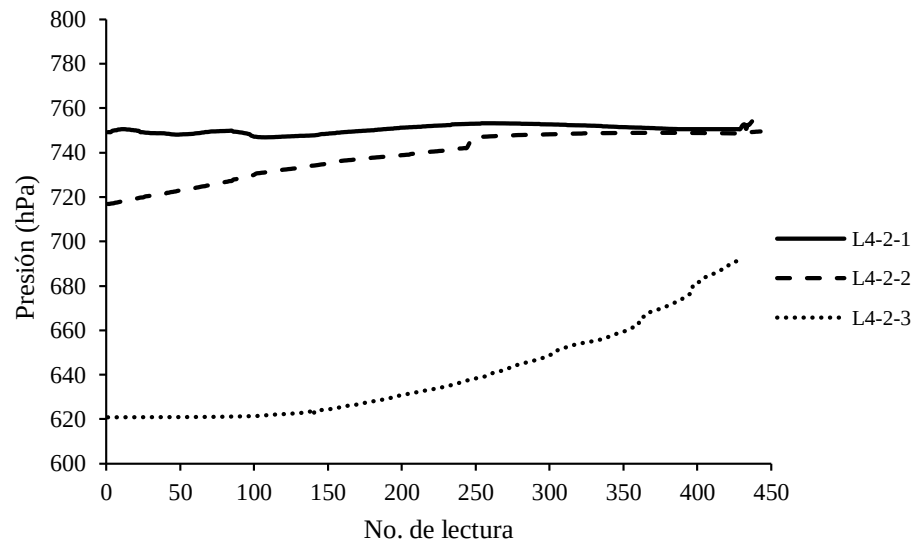


Figura 93. Registro y monitoreo de la presión para la corrida 2 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-2-1), arreglo 2 (L4-2-2) y arreglo 3 (L4-2-3).

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

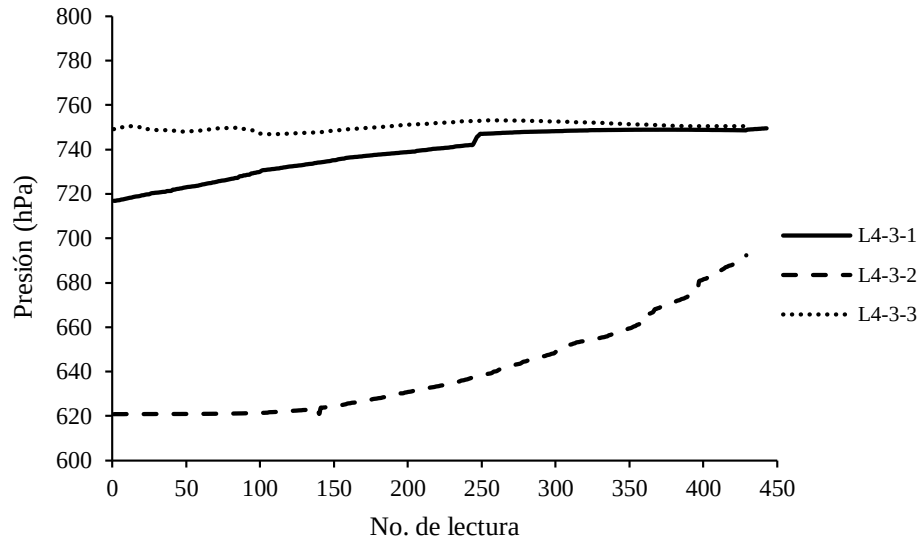


Figura 94. Registro y monitoreo de la presión para la corrida 3 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-3-1), arreglo 2 (L4-3-2) y arreglo 3 (L4-3-3).

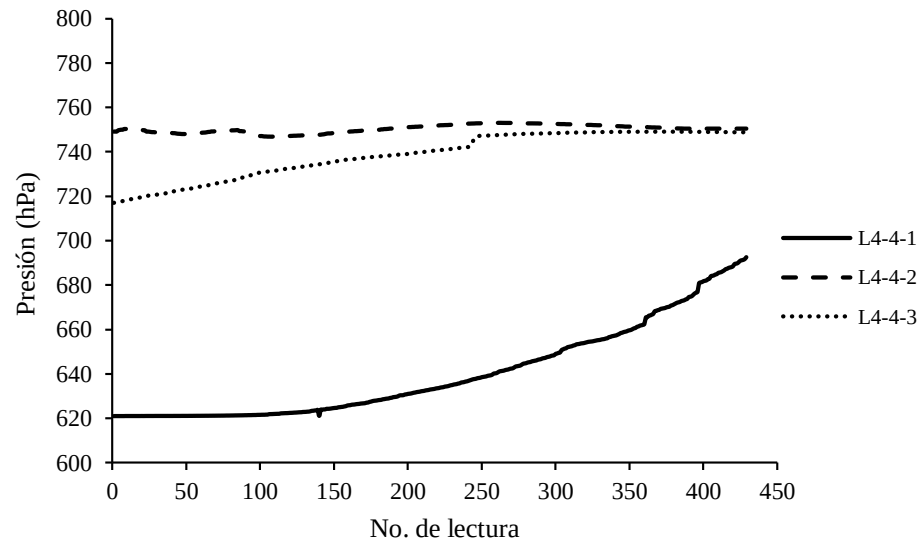


Figura 95. Registro y monitoreo de la presión para la corrida 4 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-4-1), arreglo 2 (L4-4-2) y arreglo 3 (L4-4-3).

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
 Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
 Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

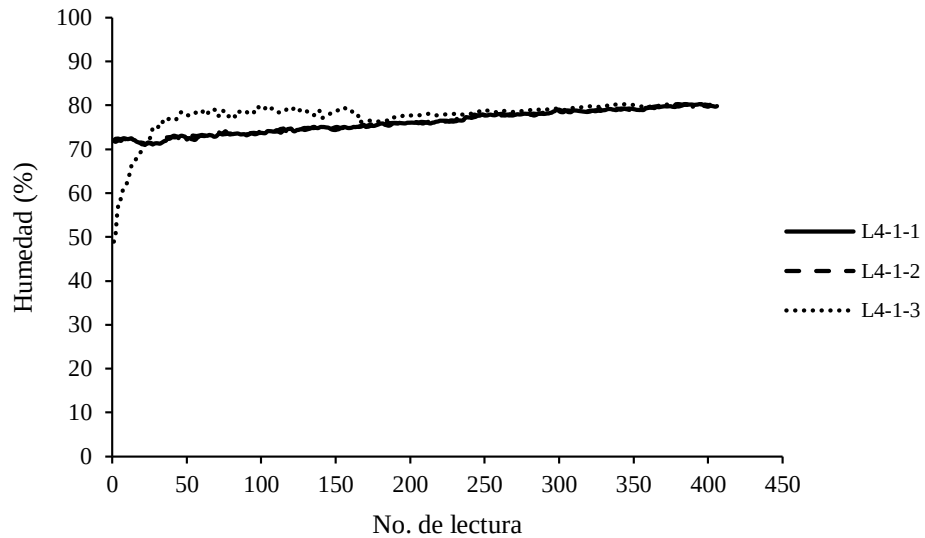


Figura 96. Registro y monitoreo de la humedad para la corrida 1 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-1-1), arreglo 2 (L4-1-2) y arreglo 3 (L4-1-3).

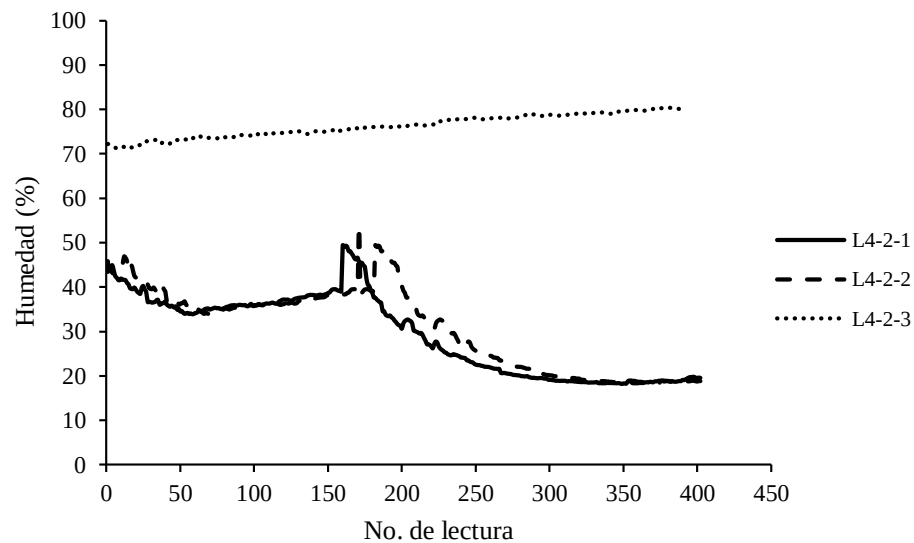


Figura 97. Registro y monitoreo de la humedad para la corrida 2 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-2-1), arreglo 2 (L4-2-2) y arreglo 3 (L4-2-3).

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
 Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
 Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

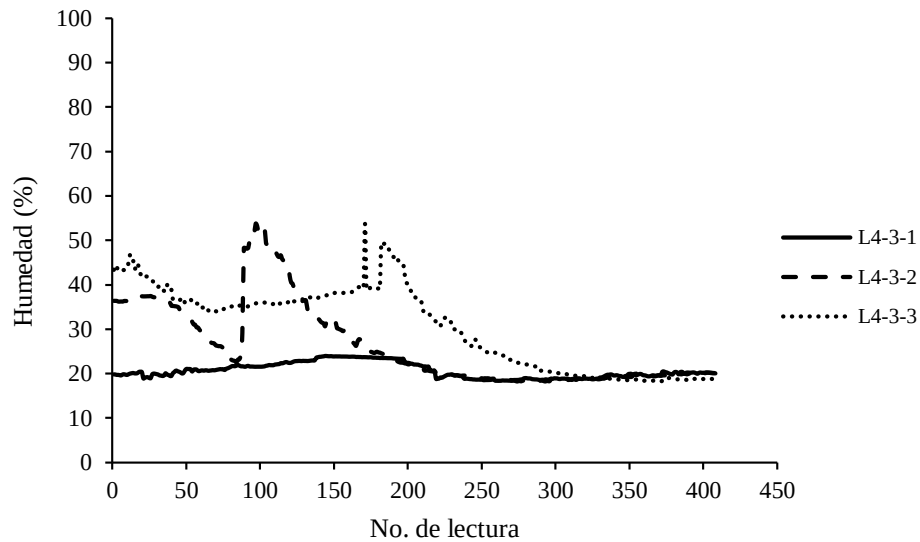


Figura 98. Registro y monitoreo de la humedad para la corrida 3 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-3-1), arreglo 2 (L4-3-2) y arreglo 3 (L4-3-3).

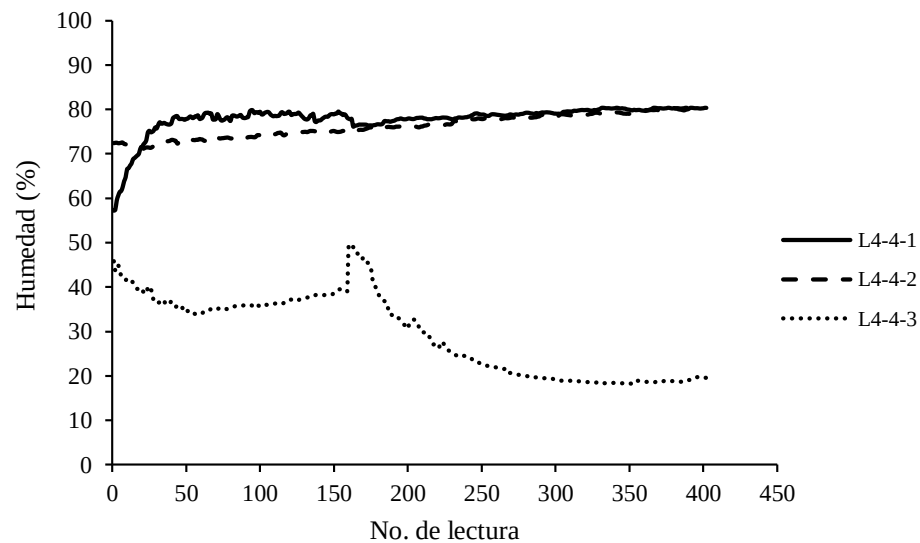


Figura 99. Registro y monitoreo de la humedad para la corrida 4 en cada arreglo: arreglo 1 (L4-4-1), arreglo 2 (L4-4-2) y arreglo 3 (L4-4-3).

ANEXO 4

Simulaciones por Flow Simulation del tipo de flujo turbulento presente en el reactor

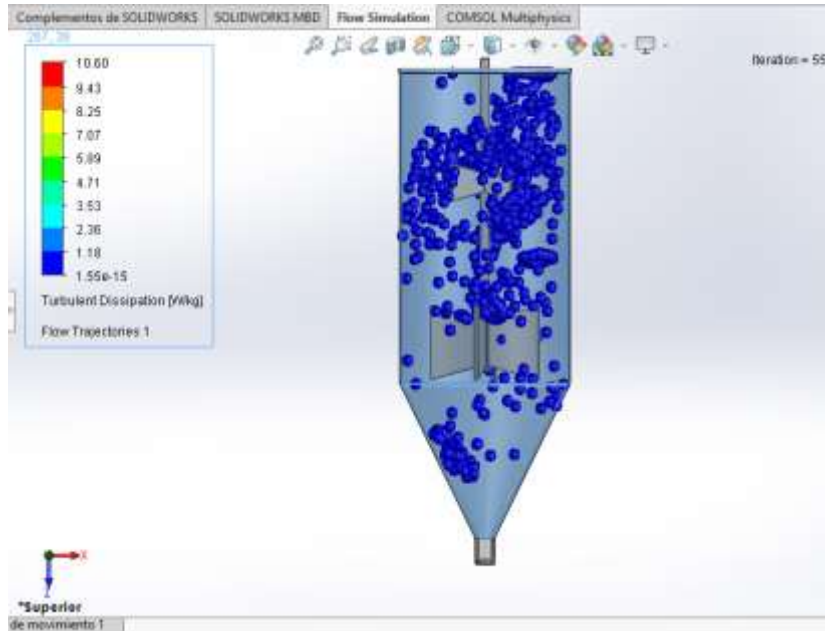


Figura 100. Flow Simulation configurada en disipación de turbulencia, valor máximo de 1.18 W kg^{-1} .

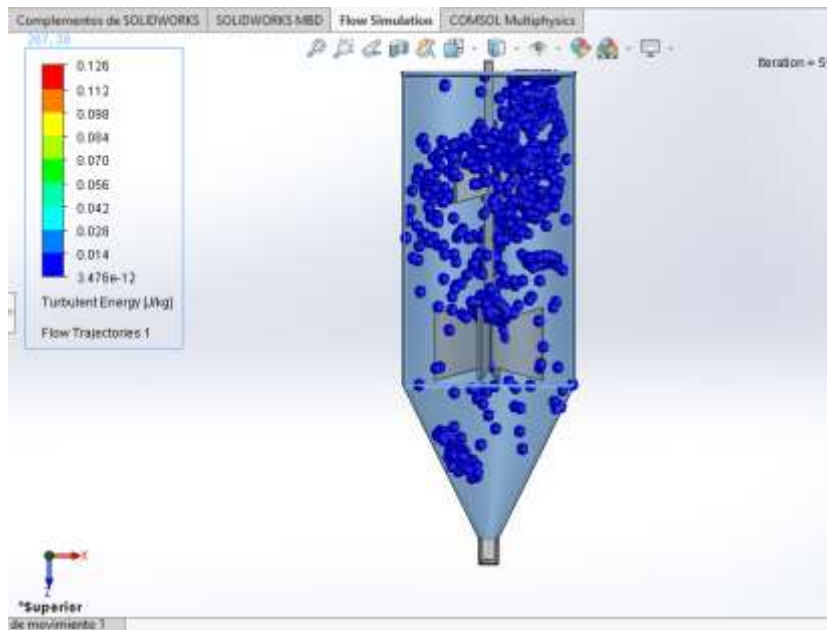


Figura 101. Flow Simulation configurada en energía de turbulencia, valor máximo de 0.014 J kg^{-1} .

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

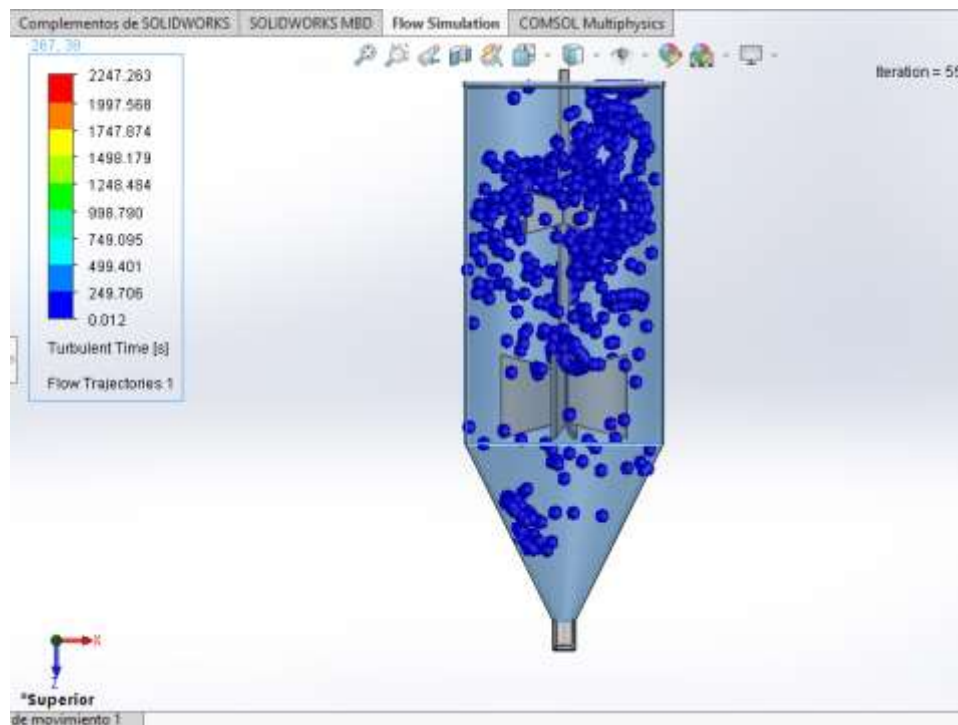


Figura 102. Flow Simulation configurada en tiempo de turbulencia, valor máximo de 249.706 s.

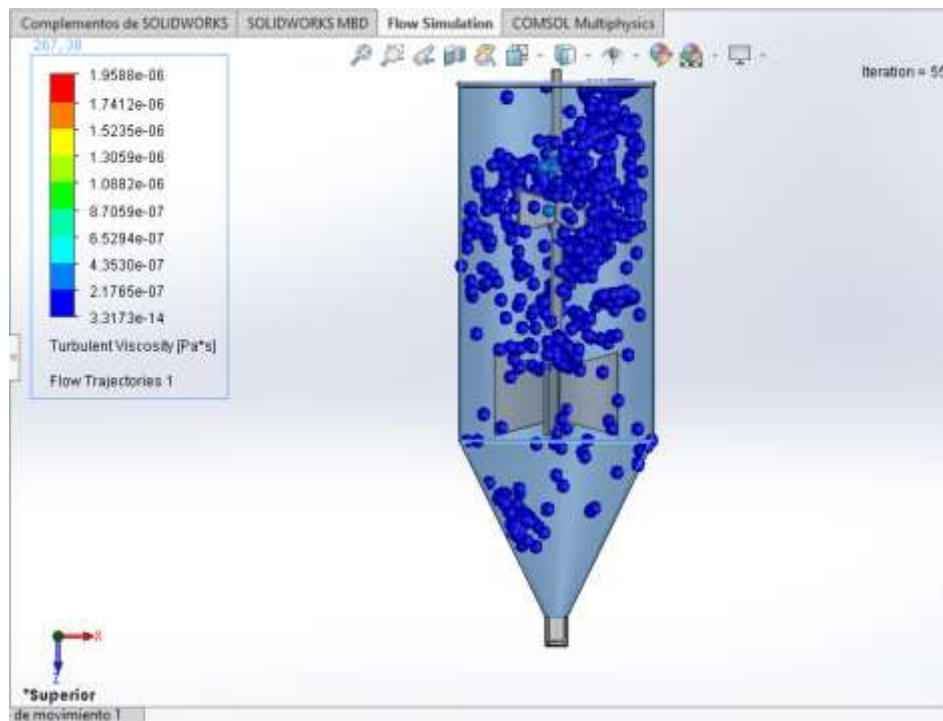


Figura 103. Flow Simulation configurada en viscosidad de turbulencia, valor máximo de 4.3530e-07 Pa s.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

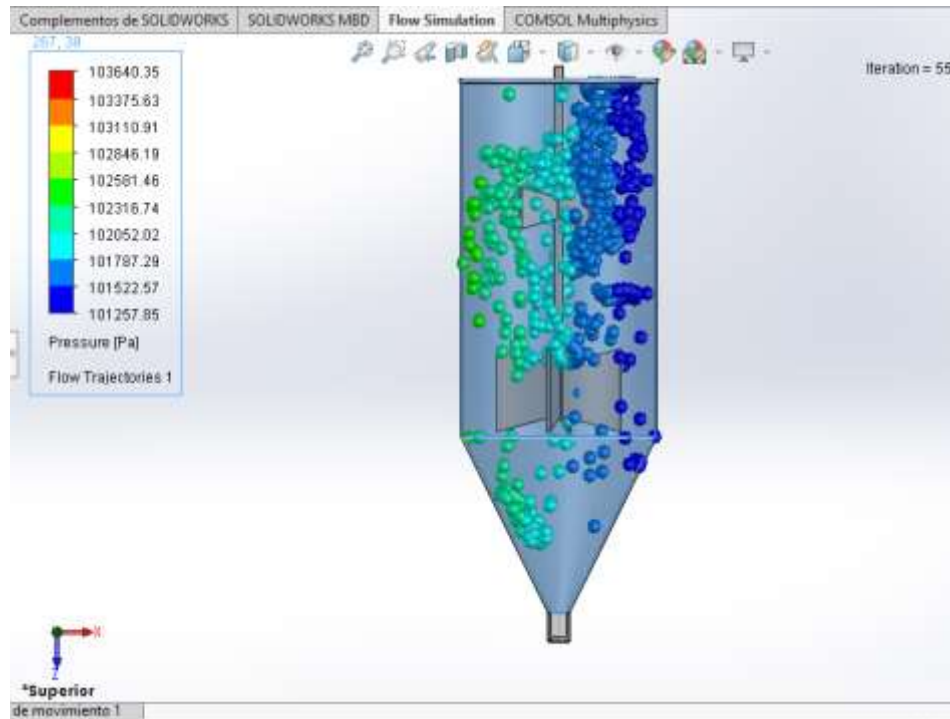


Figura 104. Flow Simulation configurada en presión del fluido, valor máximo de 102581.46 Pa.

ANEXO 5

Configuración de animaciones por Flow Simulation

Una vez cargado el diseño en el software se procede a realizar los siguientes pasos dentro del IDE del software:



Figura 105. Inicio de ruta de configuración de Flow Simulation.

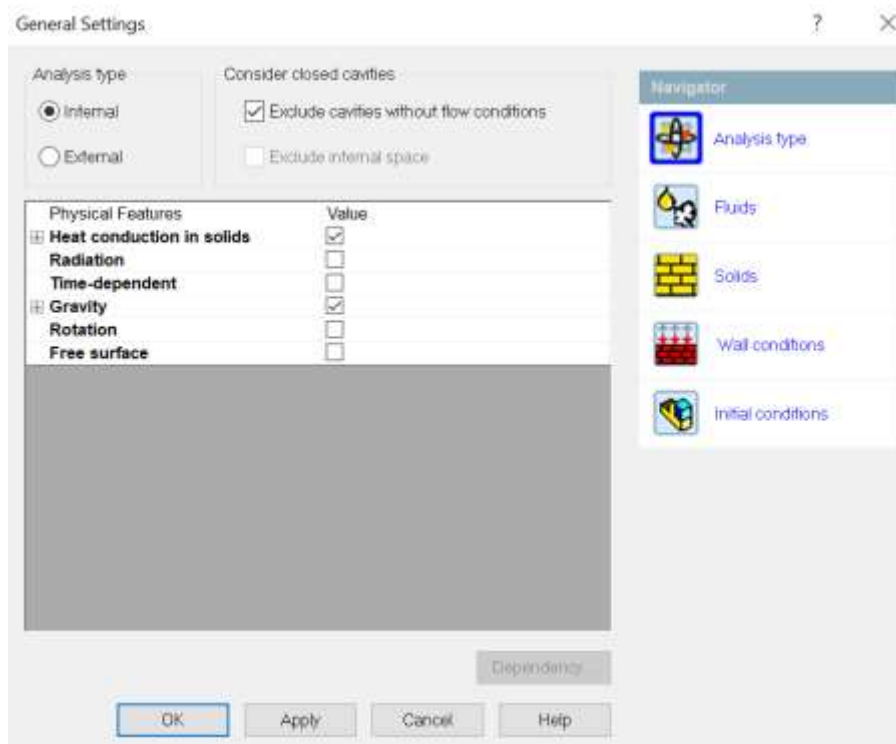


Figura 106. Paso 1. El tipo de análisis es interno en el reactor, excluyendo las cavidades existentes en el diseño, se considera la transferencia de calor entre los objetos sólidos y la acción de la gravedad en el sistema.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

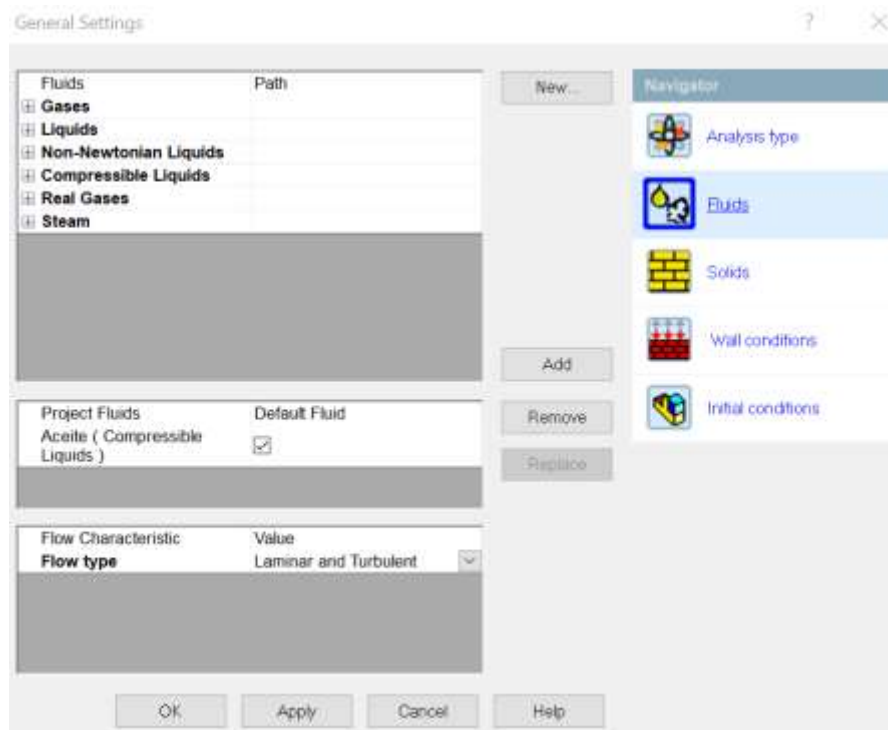


Figura 107. Paso 2. El fluido utilizado es considerado un fluido compresible (aceite) y se define que las características del fluido pueden ser laminar y turbulento en función de la oposición geométrica de los alabes.

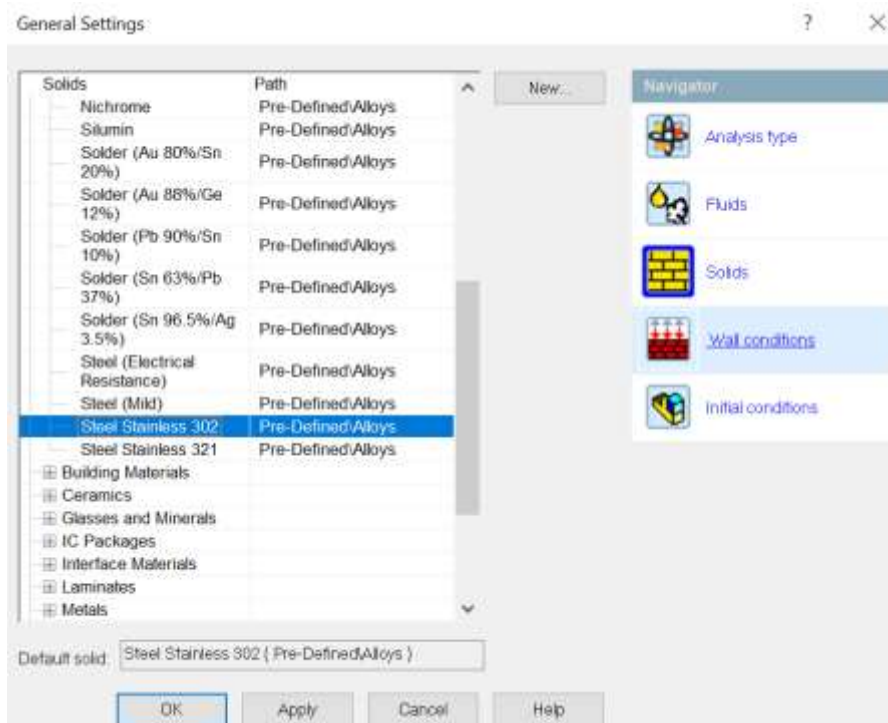


Figura 108. Paso 3. El material solido considerado es acero inoxidable AISI 302.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
 Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
 Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

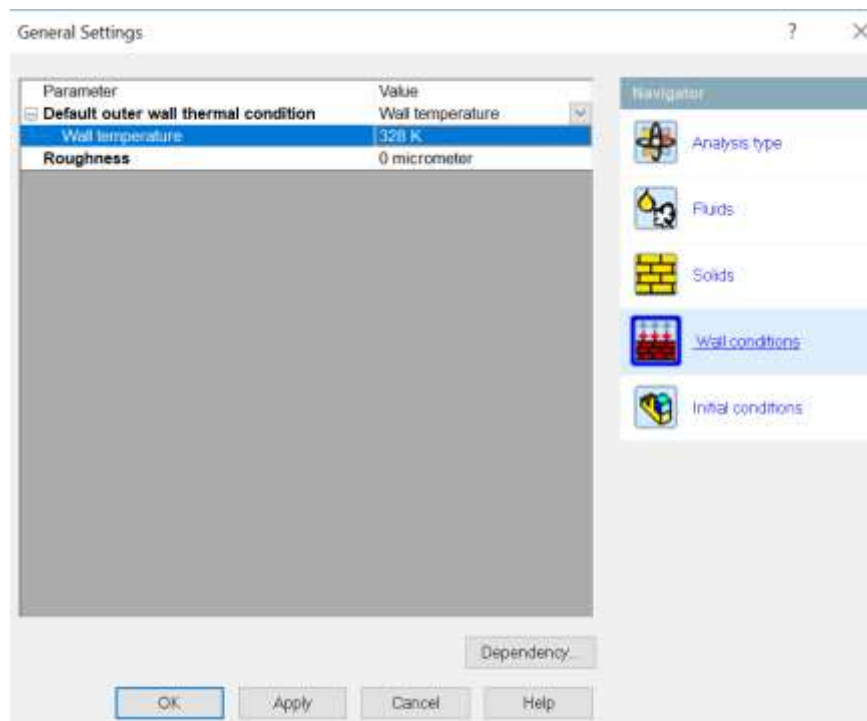


Figura 109. Paso 4. Se procede a definir la temperatura de frontera o ambiente de 328 K, sin considerar rugosidad para el acero inoxidable.

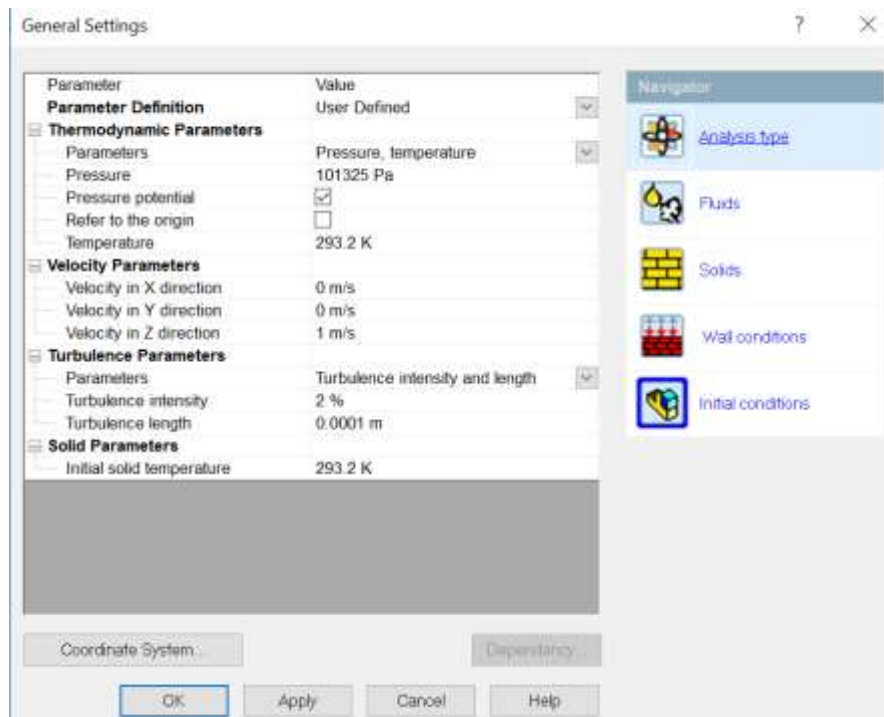


Figura 110. Paso 5. En una siguiente etapa se asigna la temperatura y presión estándar para el sistema, la velocidad del fluido en vertical, los parámetros de turbulencia y la temperatura inicial del sólido.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

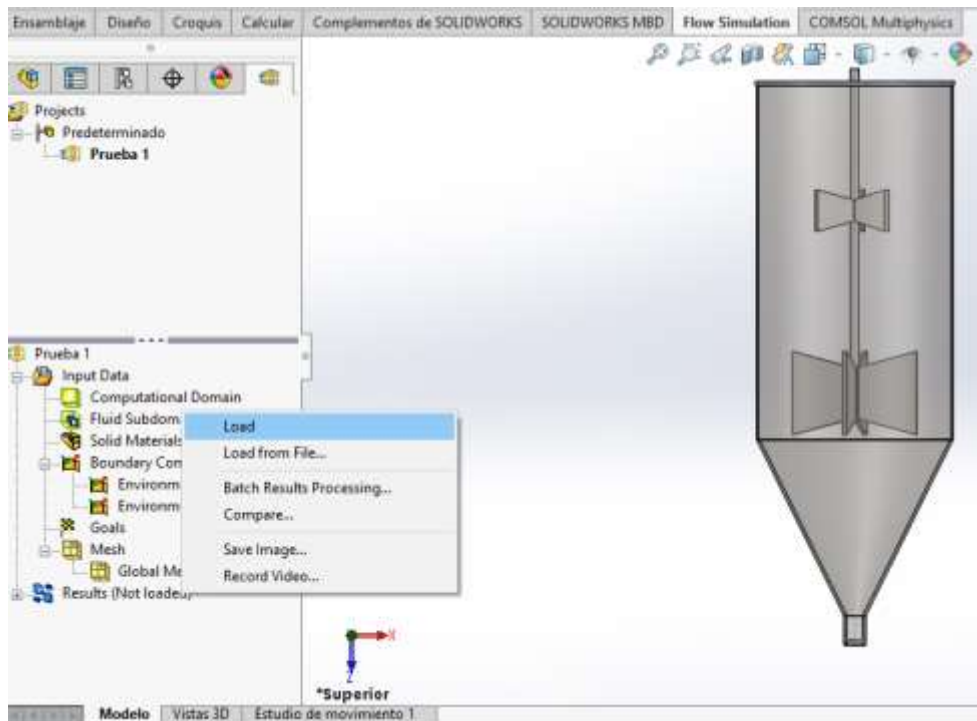


Figura 111. Paso 6. Cargar animación: Results (Not loaded)/Load.

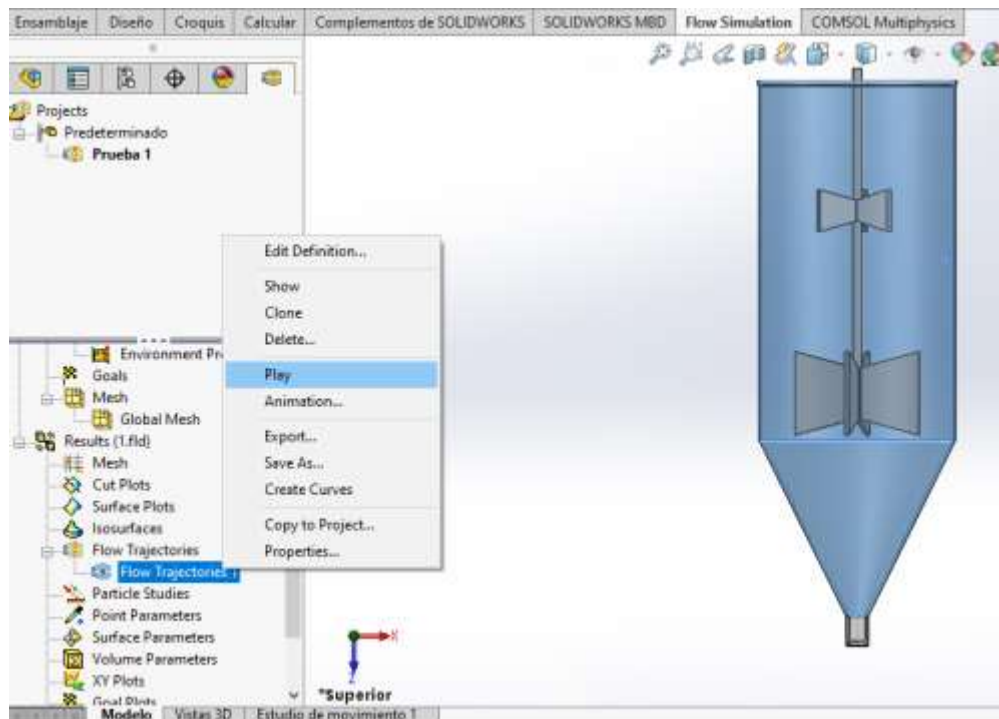


Figura 112. Paso 7. Correr animación: Play.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi para el Control de Variables de Operación de un
Reactor en Proceso Semicontinuo Usado en la Producción de Biodiésel

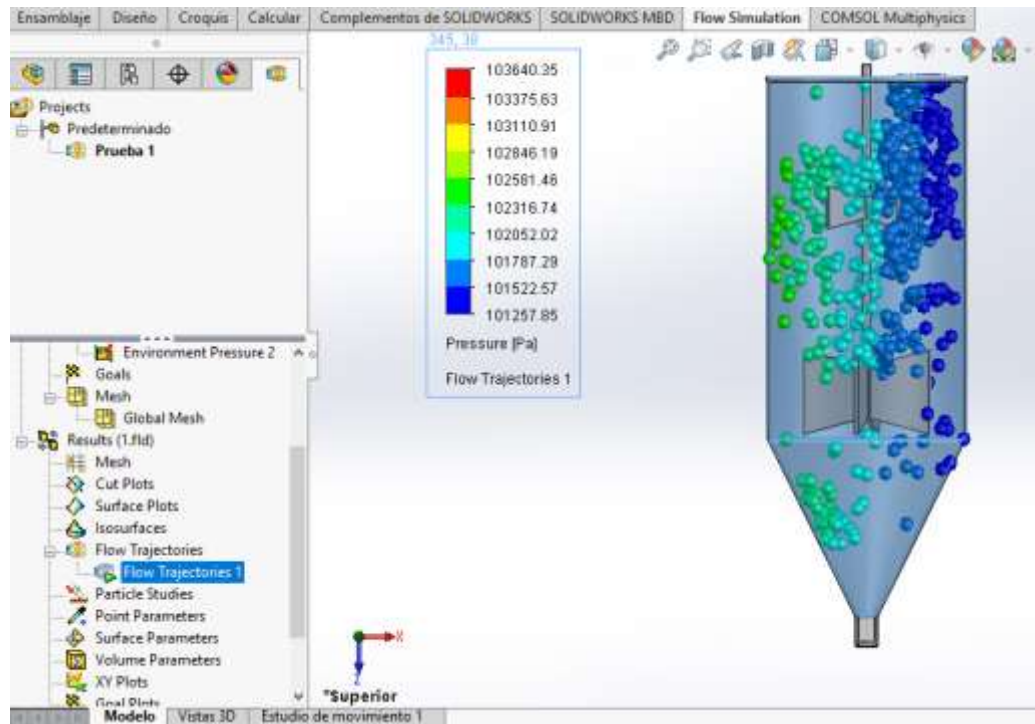


Figura 113. Paso 8. Se corre la animación y se observa el flujo del sistema.

ANEXO 6

Difusión del conocimiento



1er Encuentro Nacional Virtual de Investigación en Ingeniería

17 al 18 de septiembre del 2020, Matehuala, SLP

El comité organizador del 1er Encuentro Nacional Virtual de Investigación en Ingeniería, a través del Cuerpo Académico de Ingeniería de Procesos Químicos y Ambientales de la COARA-UASLP, otorga el presente reconocimiento a :

García-López, M., Dena-Aguilar, J. A., Salas-Aguilar, C. L., Herrera-Ambriz, V. M.

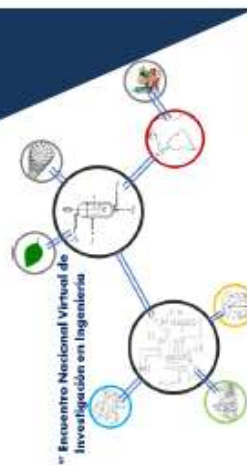
Por la presentación del trabajo titulado AMB-01 “ESTUDIO DE OBTENCIÓN DE BODIESEL A PARTIR DE ACEITILLA AMARRILLA BIDENS FERULIFOLIA (JACQ.) DC.: PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE VEGETAL Y DESARROLLO DE UN REACTOR DE BODIESEL AUTOMATIZADO”, presentado en forma Oral en la plataforma Zoom® del 17 al 18 de septiembre del 2020



Dr. Víctor Manuel Ovando Medina
Presidente del Comité Organizador



Dr. Alfredo Márquez Herrera
Secretario del Comité Organizador



1er Encuentro Nacional Virtual de Investigación en Ingeniería