



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Diseño e implementación de un sistema SCADA en el proceso de conversión de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos por pirólisis mediante técnicas de control y monitoreo del proceso por medio del internet de las cosas

Nolivos Ramírez, Carlos Alexander y Piza Reasco, Robert Antonio

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecatrónico

Ing. Singaña Amaguaña, Marco Adolfo

14 de febrero del 2022

Latacunga



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “Diseño e implementación de un sistema SCADA en el proceso de conversión de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos por pirólisis mediante técnicas de control y monitoreo del proceso por medio del internet de las cosas” fue realizado por las señores **Nolivos Ramírez, Carlos Alexander y Piza Reasco, Robert Antonio** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 14 febrero del 2022

Ing. Singaña Amaguaña, Marco Adolfo

C. C. 0501627889



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MEATRÓNICA

COPYLEAKS

TESIS_Nolivos-PizaCopyLinks.pdf

Scanned on: 16:45 February 14, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	1170
Words with Minor Changes	304
Paraphrased Words	847
Omitted Words	1049

Ing. Singaña Amaguaña, Marco Adolfo

C. C. 0501627889



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Nolivos Ramírez, Carlos Alexander y Piza Reasco, Robert Antonio**, con cédulas de ciudadanía n° 0604230672 y 1207725019, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: “**Diseño e implementación de un sistema SCADA en el proceso de conversión de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos por pirólisis mediante técnicas de control y monitoreo del proceso por medio del internet de las cosas**” es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 14 febrero del 2022

Nolivos Ramírez, Carlos Alexander

C.C: 0604230672

Piza Reasco, Robert Antonio

C.C: 1207725019



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

Autorización de publicación

Nosotros, **Nolivos Ramírez, Carlos Alexander y Piza Reasco, Robert Antonio**, con cédulas de ciudadanía n° 0604230672 y 1207725019, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Diseño e implementación de un sistema SCADA en el proceso de conversión de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos por pirólisis mediante técnicas de control y monitoreo del proceso por medio del internet de las cosas”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 14 febrero del 2022

Nolivos Ramírez, Carlos Alexander

C.C: 0604230672

Piza Reasco, Robert Antonio

C.C: 1207725019

Dedicatoria

El presente proyecto de titulación es dedicado a mi madre Martha y mi padre Juan Carlos por darme apoyo, fuerza y valentía para poder seguir adelante en toda circunstancia.

A mis hermanas Pamela y Gioia, por apoyarme e incitarme a seguir en este proceso brindándome su cariño y afecto.

A todos los miembros de mi familia que contribuyeron para poder culminar esta etapa muy importante de mi vida.

Nolivos Ramírez, Carlos Alexander

Dedicatoria

Dedico este proyecto de titulación en primer lugar a Dios, quien me dio fortaleza de seguir cuando el camino estuvo difícil, a toda mi familia, quienes en algún momento de mi vida me apoyaron a pesar de muchas adversidades que pasamos.

A mis amados padres.

A mi madre Silvia, por indicarme el camino correcto, motivarme a ser mejor cada día, por demostrarme su incondicional apoyo sin importar las situaciones difíciles que pasamos durante el transcurso de mi juventud.

A mi padre, Roberto por, incitarme a mejorar cada día, ser un ejemplo de constancia y dedicación en cada meta que se propone, ya que con ello me alentaba a no de caer durante todo el proceso de mi carrera.

Piza Reasco, Robert Antonio

Agradecimiento

Quiero agradecer a Dios por darme la vida, la salud y fuerza en todo momento para poder culminar este proceso.

Quiero agradecer a mi familia por el apoyo general que me han brindado y por haber inculcado en mis buenos valores para ser una buena persona. Por ser el pilar fundamental de mi vida y darme su amor en todo momento.

Un agradecimiento a los docentes que contribuyeron en mi formación profesional y crecimiento como persona.

Un agradecimiento a mis amigos y compañero por haber hecho de este proceso una etapa única, bonita y muy importante para mí.

Nolivos Ramírez, Carlos Alexander

Agradecimiento

Estoy agradecido con todas las personas que formaron parte de mi proceso de crecimiento y educación.

A mi familia hermanos, tíos, tías por darme un aliento en cada paso desde la escuela, colegio, universidad y la vida. A mi madre por ser parte fundamental de mi vida con sus enseñanzas y consejos que me brinda día a día, a mí padre su apoyo incondicional auspiciando todos los gastos que implica estudiar una carrera de ingeniería.

Finalmente agradezco a todas las personas que han estado en esta etapa y en el desarrollo de la Tesis, por sus consejos y apoyo hasta poder culminar con este trabajo.

Piza Reasco, Robert Antonio

Tabla de contenido

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Reporte de verificación de contenido	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimiento	8
Agradecimiento	9
Tabla de contenido.....	10
Índice de figuras	15
Índice de tablas	20
Resumen	21
Abstract.....	22
Aspectos generales.....	23
Planteamiento del problema	23
Antecedentes	24
Justificación e importancia.....	25
Objetivos	26
<i>Objetivo general</i>	26
<i>Objetivos específicos</i>	26
Hipótesis	27
Variables de la Investigación	27
<i>Variable Independiente</i>	27
<i>Variable Dependiente</i>	27

Fundamentación teórica	28
Residuos Sólidos.....	28
Pirólisis.....	30
Variables del proceso.....	32
Degradación térmica de plásticos	33
<i>Análisis Termogravimétrico</i>	34
<i>Interpretación clásica de una curva termogravimétrica</i>	36
Sistema de control aplicado a una planta	38
<i>Modelado</i>	39
<i>Técnicas de control.....</i>	40
Adquisición de señales	43
<i>Sensores.....</i>	44
<i>Acondicionador de señal.....</i>	44
<i>Tarjeta de adquisición de datos</i>	46
<i>Computador de procesamiento.....</i>	46
Parámetros de un interfaz humano máquina.....	47
<i>Reglas para el diseño de interfaces.....</i>	48
<i>Consideraciones del diseño.....</i>	49
Estudio y análisis del internet de las cosas.....	49
Diseño del sistema SCADA	51
Especificaciones del usuario para el proceso.....	51
Selección de los dispositivos de instrumentación del proceso.....	53
<i>Selección de las camisas de calentamiento.....</i>	53
<i>Selección del elemento de control para las camisas de</i>	
<i>calentamiento</i>	55
<i>Selección de los sensores de temperaturas</i>	64

<i>Selección de la celda de carga</i>	67
<i>Selección de la servo-válvula para la alimentación de materia prima</i>	71
<i>Selección de los sensores de presión</i>	73
<i>Selección del Motor y su elemento de control final</i>	78
Selección de los dispositivos de control y monitoreo	80
<i>Selección del controlador central</i>	80
<i>Selección de pantalla touch</i>	81
<i>Selección de los controladores secundarios</i>	83
Selección de los dispositivos de mando y señalización	87
Esquema de conexión del sistema SCADA	88
<i>Diagrama de Instrumentación</i>	91
<i>Protocolo de Comunicación</i>	92
<i>Diagrama general del sistema</i>	94
Diseño del sistema eléctrico y electrónico	96
<i>Potencia</i>	96
<i>Control</i>	101
<i>Circuito de control para los actuadores</i>	101
<i>Circuito de control para los microcontroladores secundarios</i>	116
<i>Circuito de control para el controlador central</i>	118
Diseño del algoritmo de control para el reactor térmico	120
<i>Obtención del modelo de la planta</i>	120
<i>Controlador PID</i>	123
<i>Controlador ON/OFF</i>	126
<i>Simulación</i>	126
Diseño del interfaz humano máquina	127

<i>Estructura del HMI</i>	127
<i>Pantalla de selección de modo</i>	128
<i>Pantalla modo manual</i>	129
<i>Pantalla de configuración del modo automático</i>	130
<i>Pantalla modo automático</i>	131
Diseño de la página web para la supervisión de los datos (IoT)	133
<i>Conexión al broker MQTT</i>	133
<i>Creación de la Dashboard</i>	138
<i>Funciones</i>	140
Implementación del sistema SCADA	143
Programación de la unidad de control	143
<i>Implementación para el cliente uno y dos</i>	143
<i>Implementación dentro de la Raspberry Pi 4</i>	148
Implementación de algoritmos de control para el reactor térmico	151
Implementación del HMI para el monitoreo y control del proceso.....	152
Aplicación del IoT para la supervisión del proceso	159
Pruebas y resultados	162
Pruebas y resultados.....	162
Sistema eléctrico y electrónico.....	162
<i>Pruebas en los elementos de control final de las resistencias</i>	163
Funcionamiento de los sensores presentes en la planta.....	170
Funcionamiento manual y automático desde el HMI.....	171
Funcionamiento del IoT.....	181
<i>Definición de la hipótesis</i>	184
<i>Ejecución de cálculos necesarios para el análisis</i>	184
Conclusiones y recomendaciones	188

Conclusiones	188
Recomendaciones	191
Trabajos futuros.....	193
Bibliografía.....	194
Anexos	198

Índice de figuras

Figura 1 Principales técnicas de análisis térmico.....	34
Figura 2 Diagramas T-t para las diversas metodologías de ensayo.....	35
Figura 3 Curva termogravimétrica (TG) y su curva derivada de primer orden (DTG)	36
Figura 4 Parámetros característicos de los termogramas.....	38
Figura 5 Respuesta al escalón unitario de una planta.....	40
Figura 6 Curva de respuesta en forma de S.....	41
Figura 7 Oscilación sostenida con periodo P_{cr}	42
Figura 8 Partes de un sistema DAQ.....	44
Figura 9 Datos técnicos del Triac.....	57
Figura 10 Datos técnicos del MOC3021.....	57
Figura 11 Circuito de disparo del Triac con Opto-Transistor.....	58
Figura 12 Características del diodo emisor del MOC3021.....	58
Figura 13 Características del diodo emisor del 4N35.....	60
Figura 14 Circuito de detección de cruce por cero.....	62
Figura 15 Circuito control de fase – simulación.....	63
Figura 16 Graficas de simulación.....	64
Figura 17 Termocupla tipo k y acondicionador.....	67
Figura 18 Celda de carga de 20Kg - Acondicionador.....	71
Figura 19 Válvula Motorizada.....	73
Figura 20 Columna de enfriamiento.....	74
Figura 21 Transductor de presión.....	75
Figura 22 Conversor de corriente a voltaje.....	76
Figura 23 ADC de 16 bit.....	77
Figura 24 Motor WG31M.....	78

Figura 25 <i>Elemento de control final Puente H</i>	79
Figura 26 <i>Raspberry Pi 4 model B</i>	81
Figura 27 <i>Pantalla táctil y sus componentes</i>	82
Figura 28 <i>ESP32 DevKit</i>	86
Figura 29 <i>Luces Pilotos</i>	87
Figura 30 <i>Paro de Emergencia</i>	88
Figura 31 <i>Pirámide de automatización</i>	89
Figura 32 <i>Esquema de Instrumentación</i>	92
Figura 33 <i>Modelo (Pub-Sub) MQTT</i>	93
Figura 34 <i>Arquitectura de comunicación</i>	94
Figura 35 <i>Esquema General de todo el Sistema</i>	95
Figura 36 <i>Diseño de la placa</i>	97
Figura 37 <i>Dispositivo de protección</i>	98
Figura 38 <i>Capacidad de corriente en conductores AWG</i>	99
Figura 39 <i>Funda de protección térmica para conductores</i>	99
Figura 40 <i>Diagrama de conexión de potencia</i>	100
Figura 41 <i>Conexión de la válvula</i>	102
Figura 42 <i>High-side switch</i>	103
Figura 43 <i>Transistor NPN como interruptor</i>	104
Figura 44 <i>Configuración electrónica del opto-transistor</i>	105
Figura 45 <i>Características principales del TIP32C</i>	106
Figura 46 <i>Características técnicas principales del PC817</i>	107
Figura 47 <i>Circuito "High-side switch" para las válvulas</i>	108
Figura 48 <i>Circuito para control de las luces piloto</i>	109
Figura 49 <i>Circuito para las válvulas</i>	110
Figura 50 <i>Circuito luces piloto</i>	111

Figura 51 <i>Convertidor reductor de voltaje</i>	112
Figura 52 <i>Aislamiento de la señal PWM con optoacoplador</i>	113
Figura 53 <i>Placa electrónica para los actuadores de 24Vdc</i>	114
Figura 54 <i>Circuito eléctrico de control de 24Vdc</i>	115
Figura 55 <i>Conexión fuente 24Vdc y breaker</i>	116
Figura 56 <i>Circuito eléctrico microcontroladores y transductores de presión</i>	117
Figura 57 <i>Circuito eléctrico controlador central</i>	119
Figura 58 <i>Circuito de potencia y fuentes de control</i>	120
Figura 59 <i>Entrada y salida para el reactor</i>	121
Figura 60 <i>Aproximación de la planta</i>	122
Figura 61 <i>Función de transferencia</i>	123
Figura 62 <i>Diagrama de Bloques</i>	124
Figura 63 <i>Diseño del Controlador PID</i>	125
Figura 64 <i>Simulación</i>	127
Figura 65 <i>Estructura del HMI</i>	128
Figura 66 <i>Pantalla modo de operación</i>	129
Figura 67 <i>Pantalla modo manual</i>	130
Figura 68 <i>Configuración modo automático</i>	131
Figura 69 <i>Pantalla principal modo automático</i>	132
Figura 70 <i>Inicio de sesión en Thingsboard</i>	134
Figura 71 <i>Creación de nuevo dispositivo</i>	135
Figura 72 <i>Configuración del dispositivo creado</i>	135
Figura 73 <i>Obtención del "Access token"</i>	136
Figura 74 <i>Recepción de datos desde el cliente MQTT</i>	138
Figura 75 <i>Indicador digital para la temperatura</i>	139
Figura 76 <i>Indicador digital para el peso</i>	139

Figura 77 <i>Indicador digital para la presión y rpm</i>	139
Figura 78 <i>Diseño final de la página IoT</i>	140
Figura 79 <i>Histórico de datos de temperatura</i>	141
Figura 80 <i>Datos históricos en un rango específico de tiempo</i>	142
Figura 81 <i>Diagrama de flujo para el cliente Uno y Dos</i>	145
Figura 82 <i>Configuración cliente tres</i>	146
Figura 83 <i>Establecer parámetros</i>	147
Figura 84 <i>GPIO de la Raspberry PI 4</i>	149
Figura 85 <i>Diagrama de flujo para la lectura de datos</i>	151
Figura 86 <i>Archivos creados para el funcionamiento del HMI</i>	153
Figura 87 <i>Clases del programa principal</i>	154
Figura 88 <i>Métodos para la clase "ModeScreen"</i>	155
Figura 89 <i>Pantalla modo manual para la resistencia del reactor</i>	156
Figura 90 <i>Pantalla modo manual para control de la presión</i>	157
Figura 91 <i>Pantalla modo automático</i>	157
Figura 92 <i>Graficas de temperatura</i>	158
Figura 93 <i>Graficas de presión</i>	159
Figura 94 <i>Monitoreo del proceso de pirólisis en la página web</i>	160
Figura 95 <i>Página web desde un dispositivo móvil</i>	160
Figura 96 <i>Código para enviar correos con Python</i>	161
Figura 97 <i>Cruce por cero</i>	164
Figura 98 <i>Señal de disparo y cruce por cero</i>	165
Figura 99 <i>Disparo del Triac al 95% de la onda</i>	166
Figura 100 <i>Disparo del Triac al 40% de la onda</i>	166
Figura 101 <i>Disparo del Triac 100% de la onda</i>	167
Figura 102 <i>Disparo del Triac 2 respecto a la onda de salida 1</i>	168

Figura 103 <i>Disparo del Triac 2 a media onda respecto a la onda de salida 1</i>	169
Figura 104 <i>Amperaje de la resistencia del reactor al 100%</i>	169
Figura 105 <i>Amperaje del reactor al 20%</i>	170
Figura 106 <i>Planta en funcionamiento</i>	172
Figura 107 <i>Pantalla Modo manual - Reactor</i>	173
Figura 108 <i>Corriente entregada al reactor a un 30% de Potencia</i>	173
Figura 109 <i>Calentamiento del reactor visualizado en el HMI</i>	174
Figura 110 <i>Temperatura del reactor a 405°C</i>	175
Figura 111 <i>Pantalla manual para el control de presión</i>	176
Figura 112 <i>Modo automático - vista general</i>	177
Figura 113 <i>Modo automático - graficas temperatura</i>	178
Figura 114 <i>Modo automático - grafica presión</i>	179
Figura 115 <i>Producto obtenido en la prueba manual</i>	180
Figura 116 <i>Producto obtenido en la prueba automática</i>	181
Figura 117 <i>Página web del proceso de pirólisis</i>	182
Figura 118 <i>Notificación por correo electrónico</i>	182

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Plásticos en residuos sólidos urbanos</i>	29
Tabla 2 <i>Comparación de los procesos de pirólisis</i>	31
Tabla 3 <i>Parámetros</i>	41
Tabla 4 <i>Ajuste de controladores por el método de la ganancia límite</i>	42
Tabla 5 <i>Plásticos en residuos sólidos urbanos</i>	53
Tabla 6 <i>Sensores de temperatura</i>	65
Tabla 7 <i>Acondicionadores, transmisores de temperatura</i>	65
Tabla 8 <i>Características de placas</i>	84
Tabla 9 <i>Evaluación del peso específico</i>	84
Tabla 10 <i>Evaluación del criterio velocidad de reloj</i>	84
Tabla 11 <i>Evaluación del criterio Núcleos</i>	85
Tabla 12 <i>Evaluación del criterio Conectividad Wi-Fi</i>	85
Tabla 13 <i>Conclusión para la selección</i>	85
Tabla 14 <i>Actuadores y sensores</i>	90
Tabla 15 <i>Leyenda del esquema de instrumentación</i>	91
Tabla 16 <i>GPIO utilizados en cliente uno</i>	144
Tabla 17 <i>GPIO utilizados en cliente dos</i>	148
Tabla 18 <i>BCM Utilizados</i>	150
Tabla 19 <i>Pruebas tomadas con su respectiva velocidad de calentamiento</i>	184
Tabla 20 <i>Datos para el cálculo de la desviación estándar</i>	185

Resumen

En el presente trabajo de titulación se desarrolla el diseño e implementación de un sistema SCADA en el proceso de conversión de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos por medio de pirólisis. Se seleccionarán los elementos de instrumentación necesarios para monitorear y controlar las variables que intervienen en el proceso y se tratarán los datos leídos de la planta en un controlador central, el cual, también ejecutará un programa para el HMI y el algoritmo de control de temperatura para mantener el reactor a 400°C. Las señales de control para los actuadores se enviarán a dos microcontroladores secundarios que utilizan un protocolo de comunicación que se conoce como MQTT el cual se ejecuta sobre el modelo TCP/IP y a través de los elementos de control final activarán los actuadores para mantener las variables del proceso en los valores deseados. Adicionalmente se implementará el monitoreo de la planta de pirólisis por medio del IoT con la plataforma Thingsboard y recurriendo al servicio de e-mail para notificar estados críticos de la máquina. Finalmente se analiza el funcionamiento del proceso en base a la velocidad de calentamiento que puede entregar la resistencia eléctrica y a su vez se valida la hipótesis referente a una mejora en el proceso y que permita tener un seguimiento continuo de la planta durante toda su operación.

Palabras clave:

- **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)**
- **IOT (Internet of Things)**
- **PIRÓLISIS**
- **SCRIPTING PYTHON**

Abstract

In this degree work, the design and implementation of a SCADA system in the process of conversion of plastic waste into liquid hydrocarbons by pyrolysis is developed. The instrumentation elements necessary to monitor and control the variables involved in the process will be selected and the data read from the plant will be processed in a central controller, which will also execute the program for the HMI and the temperature control algorithm to maintain the reactor at 400°C. The control signals for the actuators will be sent to the actuators. The control signals for the actuators will be sent to two secondary microcontrollers using a communication protocol known as MQTT which runs on the TCP/IP model and through the final control elements will activate the actuators to maintain the process variables at the desired values. Additionally, the monitoring of the pyrolysis plant will be implemented through IoT with the Thingsboard platform and using the e-mail service to notify critical states of the machine. Finally, the operation of the process is analyzed based on the heating rate that the electrical resistance can deliver and in turn the hypothesis regarding an improvement in the process is validated and that allows to have a continuous monitoring of the plant throughout its operation.

Keyword:

- **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)**
- **IOT (Internet of Things)**
- **PYROLYSIS**
- **PYTHON SCRIPTING**

Capítulo I

1. Aspectos generales

1.1. Planteamiento del problema

Entre los problemas medioambientales en la actualidad están el cambio climático, contaminación de suelos y aguas, la deforestación, la sobreexplotación de recursos. entre otros. Algunos de estos efectos son provocados principalmente por los combustibles fósiles y el tratamiento inadecuado de los residuos sólidos.

La investigación científica y experimentación ha permitido el desarrollo de procesos mecánicos, químicos, térmicos, fisicoquímicos, entre otros, para aprovechar los residuos derivados del petróleo. Este es el caso del reactor de pirólisis, que permite, a través de una reacción química, obtener dos tipos de sustancias, tales como biocarbones y biocombustibles que pueden ser usadas en el sector del transporte y energético.

Este proceso de pirólisis involucra el control y monitoreo de las variables que forman parte de la reacción, las cuales son muchas veces controladas por el operario, lo que puede interferir en los resultados debido al error humano. Esto se puede optimizar con la instrumentación adecuada y la automatización del proceso.

Con el diseño e implementación de un sistema de control en el proceso de conversión de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos mediante pirólisis, haciendo uso de técnicas de control y monitoreando todas sus variables en un HMI, para mejorar el octanaje del hidrocarburo a obtener, permite al estudiante adquirir un mayor conocimiento y experiencia en la automatización y control de procesos químicos, en un área aún no muy explorada por parte de los estudiantes de ingeniería Mecatrónica e investigadores de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, lo cual beneficiaría en su perfil académico.

1.2. Antecedentes

La producción de plásticos ha ido aumentando con el pasar de los años, ha reemplazado materiales como metales, cerámicas y maderas debido a las múltiples aplicaciones que se le puede dar y a la demanda (Mancheno, y otros, 2016).

No obstante, los productos plásticos, como muchos de los polímeros artificiales derivados del petróleo, no son biodegradables y muchos de estos son incluso nocivos por su composición química, además que su reciclaje, específicamente del EPS, es difícil a gran escala y no resulta rentable. Por tanto, se han desarrollado distintos procesos mecanismos, químicos y térmicos para poder obtener derivados a partir de los desechos plásticos. Los procesos termoquímicos como la pirólisis y gasificación son una buena alternativa estudiada por la comunidad científica para aprovechar estos residuos (Bellón, Tovar, & Muñoz, 2017).

El estudio del proceso de pirólisis con residuos plásticos para obtener derivados resale a más de 20 años. En la investigación “Estudio de la pirólisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados” realizada en 1996, menciona que se realizan experimentos a velocidades de calefacción moderada y a temperatura constante para posteriormente analizar los resultados obtenidos con las condiciones planteadas (Conesa, 1996). Hasta la actualidad se han desarrollado diversos reactores de pirólisis en los cuales se obtienen diferentes derivados con distintos tipos de materia y condiciones físico-químicas, tal es el caso de la investigación de (Gordillo, 2018) denominada “Diseño y simulación de un equipo generador de biocarbón utilizando materia orgánica residual”; en donde detalla el diseño del pirolizador que emplea residuos sólidos orgánicos como materia prima para obtener biocarbón, analizando su calidad luego de ser obtenido con tres valores de temperatura diferente.

Como se ha observado en estos proyectos, es indispensable el control y monitoreo de las variables como temperatura, flujo y tiempo, que afectan directamente a

la calidad de las sustancias resultantes de la reacción y de otras variables como nivel y presión que permiten optimizar y automatizar el proceso. Gracias a las técnicas de control, instrumentación moderna y software de modelamiento matemático y simulación, se ha podido optimizar la producción y calidad de biocombustibles a partir de desechos plásticos. En el proyecto de tesis de (Guio & Navarro, 2019) se comparan distintas técnicas de control como la compensación por análisis gráfico, compensación por lugar geométrico de las raíces y controlador-observador por espacios de estado para determinar que la velocidad de descomposición del plástico es independiente a las diferentes presentaciones, cantidades y temperaturas empleadas; y que todas las curvas de temperatura presentan un comportamiento subamortiguador.

En otro estudio se ha desarrollado el sistema de control para la producción de bio-metanol integrando una red neuronal no lineal mediante la herramienta Simulink de Matlab, obteniendo un mejor control de la temperatura del reactor de pirólisis (Kasmuri N. , Kamarudin, Abdullah, Hasan, & Som, 2018).

En la actualidad la obtención de biocombustible con un reactor de pirólisis eficiente es una alternativa de solución potencial en el sector del transporte y generación de energía, debido al agotamiento de las reservas de petróleo y al impacto ambiental generado por sus derivados (Kasmuri N. H., Kamarudin, Abdullah, Hasan, & Som, 2017).

1.3. Justificación e importancia

El desarrollo de equipos modernos e innovadores son de vital importancia en los laboratorios de la Universidad de las Fuerzas Armada ESPE Sede Latacunga. Esto permitirá a los estudiantes e investigadores realizar prácticas, y con ello afianzar los conocimientos adquiridos para en un futuro proponer nuevos temas de investigación basados en las técnicas de control y análisis químico de sustancias de reacción y sustancias obtenidas, que involucrará la parte petroquímica.

El uso de control moderno para estos tipos de procesos industriales no ha tenido una presencia considerable dentro del Ecuador. Se conoce que los proyectos desarrollados dentro del país se centran tanto en la parte química como en la parte mecánica, además, de que todo su proceso se lo realiza manualmente. Es importante realizar un control automático mediante la adecuada instrumentación para así aumentar la eficiencia de las sustancias obtenidas y a su vez evitar posibles accidentes dentro de la planta.

Proveer de una herramienta didáctica basada en un proceso real, brindará al estudiante mayor conocimiento y experiencia sobre la operación de un proceso que se emplea a nivel industrial, ya que, involucra varias áreas de conocimiento como lo es la mecánica, química, instrumentación y control para la automatización.

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo general*

Diseñar e implementar un sistema SCADA en el proceso de conversión de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos por pirólisis mediante técnicas de control y monitoreo del proceso por medio del internet de las cosas.

1.4.2. *Objetivos específicos*

- Investigar sobre el proceso de pirólisis utilizado para la obtención de hidrocarburos, analizando las variables involucradas en el sistema y a su vez los diferentes métodos de control que pueden aplicarse a un reactor térmico y catalítico.
- Diseñar un algoritmo de control que permita la operación correcta del reactor térmico y el catalizador, evaluando su eficiencia con respecto a otras técnicas de control simulando el proceso en software que permita el estudio de sistemas de control.

- Seleccionar todos los equipos de instrumentación como sensores y actuadores, para el correcto monitoreo y control de las variables necesarias en el proceso de pirólisis.
- Implementar el control desarrollado en un dispositivo de adquisición y procesamiento de datos realizando el monitoreo mediante un HMI y a su vez la supervisión del proceso de pirólisis haciendo uso de IoT.
- Realizar las pruebas de funcionamiento del control para el proceso de pirólisis.

1.5. Hipótesis

¿Diseño e implementación de un sistema SCADA en el proceso de conversión de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos por pirólisis con la instrumentación, técnicas de control y aplicación del IoT, permitirá mejorar el funcionamiento del proceso y el seguimiento del estado de la planta?

1.6. Variables de la Investigación

1.6.1. Variable Independiente

Sistema de control del proceso de pirólisis

1.6.2. Variable Dependiente

Mejorar funcionamiento del sistema automatizado

Capítulo II

2. Fundamentación teórica

2.1. Residuos Sólidos

El consumo de los plásticos en la sociedad moderna se estima que crece un 4% en cada año y también representan un 12% de los residuos sólidos urbanos a nivel global. Su uso se ha extendido en muchas industrias como lo son: industria alimenticia (envases, botellas de bebidas, bolsas, etc.), en la fabricación de elementos en la industria automotriz, vivienda, entre otros (Correal Magda, 2021).

El término plástico hace alusión a diferentes polímeros de estructura macromolecular que puede ser moldeada mediante calor o presión, los cuales son derivados del petróleo. Sin embargo, el desarrollo y uso en gran volumen de este útil material no tiene un equilibrio en el ecosistema, ya que, el reciclaje de los residuos sólidos se da en menor impacto. De los residuos plásticos generados, se estima que solamente se recicla menos del 15%.

Los residuos sólidos plásticos tienen como principal característica su largo tiempo de descomposición el cual depende del tipo, tamaño, y el proceso de degradación asociado ha dicho plástico, en general se conoce que estos residuos tardan en descomponerse al menos 100 años (Martínez, 2020).

En la tabla 1, se hace referencia a los tipos de plásticos, generalmente hallados en los residuos sólidos urbanos son: polietileno y polipropileno en mayor cantidad, mientras que se encuentran en menor proporción el poliestireno, cloruro de polivinilo, polietileno tereftalato, entre otros (Ojeda, 2019).

Tabla 1*Plásticos en residuos sólidos urbanos*

Sigla	Nombre	Usos y aplicaciones
PET	Polietileno tereftalato	Botellas para bebidas, aceite y otros alimentos.
PEAD/HDPE	Polietileno de alta densidad	Envases y botellas para productos de limpieza. Membranas impermeabilizantes
PVC	Policloruro de vinilo	Cañerías, electrónica
PEBD/LDPE	Polietileno de baja densidad	Bolsas, separadores, guantes
PP	Polipropileno	Tapas de botellas
PS	Poliestireno	Vasos y recipientes para alimentos, aislantes.
-	Otros	Comprende: policarbonato (PC), nylon, acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), entre otros.

Nota. Tomado de EL blog Verde by Tendencias, por (Esther, 2020)

(Arandes, Bilbao, & López, 2004) afirman que hay diferentes métodos para el reciclado de los residuos plásticos denominados: primario, secundario, terciario y cuaternario.

- En el tratamiento primario se establecen operaciones mecánicas para obtener un producto con características similares al original
- El tratamiento secundario consiste en la fusión, los residuos son convertidos en productos de diferentes formas y con mayor espectro de aplicaciones.
- En el tratamiento terciario se recurre a procesos químicos para la transformación de los residuos en hidrocarburos.

- El tratamiento cuaternario, consiste en la incineración para recuperar energía, aunque es contrarrestado por los impactos ambientales negativos que genera.

2.2. Pirólisis

El proceso de pirólisis es aquel donde se produce la degradación de distintos tipos de sustancias como desechos plásticos o biomasa cuando se somete a un aumento gradual de temperatura y esto sucede en un ambiente inerte, es decir, libre de oxígeno. El proceso de pirólisis es un poco complejo desde la parte química, ya que, es la base para poder desarrollar un buen sistema de control, este se lleva a cabo a través de una secuencia de reacciones en las que intervienen diferentes factores como lo son: la estructura y composición del polímero, la tecnología utilizada, la velocidad de calentamiento, el tiempo de resistencia, la velocidad de enfriamiento y la temperatura del proceso.

(Castells, 2012), menciona que los productos que se generan por la degradación de la sustancia dentro del reactor son:

- Gases, la corriente de gas que contiene hidrógeno, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono y otros varios gases, dependiendo de la composición del material escogido como materia prima y de las condiciones de operación.
- Líquidos, la fracción condensable a temperatura ambiente, integrada por una agrupación heterogénea de vapores consiste en alquitranes y/o bien aceite que contiene sustancias químicas tales como ácido acético, acetona y metanol.
- Un coque o char residual consiste en carbono casi puro mezclado con el material inerte que entra en el proceso.

Este proceso fisicoquímico constituye una etapa previa a la combustión o a la gasificación, también se encuentra como un proceso industrial, por lo que, el proceso de pirólisis se aprovecha de diferente manera.

(Ceupe, 2018) en su documento ¿Qué es la pirólisis?, indica que este proceso se puede clasificar en:

- **Pirólisis convencional:** se usan equipos rotatorios o de conocidos como de lecho móvil e incluso horno de parrilla. En cualquiera de los casos, los sistemas pueden ser directos e indirectos.
- **Pirólisis rápida:** se incluyen los sistemas de polvo en suspensión.
- **Pirólisis instantáneo:** para este tipo se promete el lecho fluidizado en dos etapas, en el que se produce la combustión de un sólido y esto es lo que transfiere calor al sistema.

En la tabla 2, se visualiza la comparación entre los diferentes procesos de pirólisis, tomando en cuenta aspectos como: temperatura y velocidad de calentamiento, tiempo de resiliencia y producto mayoritario.

Tabla 2

Comparación de los procesos de pirólisis

Proceso	Temperatura °C	Velocidad de calentamiento °C/s	Tiempo resiliencia	Producto mayoritario
Convencional	500	2	Gases 5 s Sólido horas	Char y condensables A temperaturas moderadas, 500°C, condensables
Rápida	400 a 800	>2	Gases: <2 s	Gases e hidrocarburos ligeros
Instantánea	>600	>200	Gases: <0.5 s	

Nota. Tomado de KeeUI Solar por, (Oscar, 2021)

2.3. Variables del proceso

De acuerdo con (Espinoza & Naranjo, 2014) es muy importante conocer las variables y parámetros que influyen en el proceso de pirólisis ya que esto afecta directamente en el producto que se obtendrá.

- **Temperatura:** La temperatura es un factor muy importante, ya que ayuda al rompimiento de enlaces químicos de las moléculas y además determina la velocidad de descomposición térmica y estabilidad de las materias que ingresan al reactor. A temperaturas elevadas, aproximadamente 600 °C, se producen moléculas gaseosas simples, A temperaturas más bajas, de 400 °C aproximadamente, se obtienen productos líquidos más viscosos.
- **Presión:** Este parámetro tiene efecto tanto en el proceso de pirólisis dentro del reactor, como en la obtención de productos. Se ha determinado que a presiones elevadas el rendimiento de gases no condensables incrementa, la consecuente disminución de producto líquido, lo cual desfavorece el resultado.
- **Velocidad de calentamiento:** Este factor junto a la temperatura son de suma importancia en el proceso de pirólisis, pudiendo clasificarse en pirólisis lenta o convencional y pirólisis flash. En la pirólisis lenta, donde el tiempo en que se ejecuta puede durar horas o hasta días, facilita la obtención de la fracción sólida. En la pirólisis flash la transmisión de calor es la que controla la descomposición, facilita la formación de líquidos a temperaturas mayores a 400°C.
- **Tiempo de resiliencia:** Un tiempo extenso de resiliencia de los compuestos volátiles favorece la formación de compuestos gaseosos. La temperatura es la que determina principalmente el tiempo de reacción que se necesita.

- **Catalizadores:** La implementación de catalizadores en el proceso de pirólisis admite trabajar a rangos de temperatura más bajas, y en función de los catalizadores empleados, es más selectivo en los productos obtenidos.

2.4. Degradación térmica de plásticos

La temperatura es una variable sumamente importante dentro del proceso de pirólisis de residuos plásticos, debido a que, influye en el producto final que se desea obtener.

En el estudio “Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos” realizado por (Proaño & Crespo, 2009), se identifica que a temperaturas menores a 300°C se obtiene la acumulación de un producto sólido resinoso, que representa la cantidad de residuo plástico que no ha sido degradado totalmente, razón por la cual no se trabaja con temperaturas inferiores para evitar los bajos rendimientos de combustible líquido. La mayor cantidad de productos líquidos se obtiene aproximadamente a 400 °C y 2 horas con una composición de 4,3 % de gases, 76,19 % de líquidos y 19,512 % de sólidos.

El análisis térmico de los residuos plásticos es indispensable para poder tener un mejor monitoreo del proceso y para poder implementar un control automático.

Según (Badia, 2007), el análisis que permiten evaluar determinadas propiedades físicas y químicas por sometimiento a la muestra de un efecto térmico. El resultado de cada uno de estos métodos es una curva, en algunos casos llamada termograma.

Las técnicas de análisis térmico adquieren especial relevancia en el estudio y caracterización de materiales plásticos puesto que aportan una información muy importante, útil para las siguientes aplicaciones:

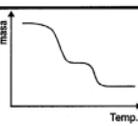
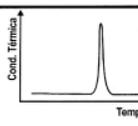
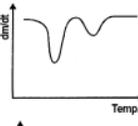
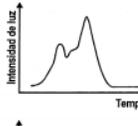
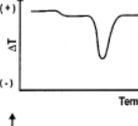
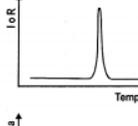
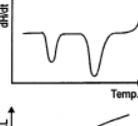
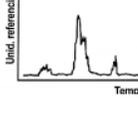
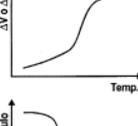
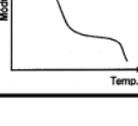
- Identificación del tipo de plástico
- Intuir las condiciones de operación y transformación del polímero

- Análisis de la vida en uso de los plásticos
- Evaluar las posibilidades de reciclado de los diferentes materiales

En la figura 1 se presenta un resumen de las principales técnicas de análisis térmico, mencionando variable medida, gráfico y aplicaciones respectivas.

Figura 1

Principales técnicas de análisis térmico

Técnica	Variable medida	Gráfico característico	Aplicaciones	Técnica	Variable medida	Gráfico característico	Aplicaciones
Termogravimetría (TGA)	Pérdida de masa		Pérdida de volátiles. Cinéticas de degradación. Estabilidad térmica. Pérdida de humedad. Presencia de cargas.	Análisis de gases desprendidos (EGD)	Conductividad térmica de los gases desprendidos		Cinéticas de degradación. Estabilidad térmica.
Termogravimetría diferencial (DTG)	Velocidad de pérdida de masa		Cinéticas de degradación. Estabilidad térmica.	Termooptometría; Oxoluminiscencia (OL)	Intensidad de luz emitida		Estabilidad térmica
Análisis térmico diferencial (DTA)	Diferencia de temperatura entre muestra y referencia inerte		Transiciones térmicas (fusión, Tg, cristalización) Identificación de mezclas. Compatibilidad de blends. Diagramas de fases.	Conductimetría	Variación de la intensidad de corriente o resistividad eléctrica		Estudios de conductividad o resistividad eléctrica
Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	Diferencia de entalpía entre muestra y referencia inerte		Transiciones térmicas (fusión, Tg, cristalización) Identificación de mezclas. Compatibilidad de blends. % cristalinidad.	Termosonometría	Intensidad de sonido		Procesos de fractura. Construcción diagramas de fases. Comportamiento del sólido
Análisis termomecánico (TMA)	Variaciones en volumen o longitud		Estabilidad dimensional. Curado de resinas.				
Análisis dinámomecánico (DMA)	Cambios en el módulo elástico o de cortadura		Estabilidad mecánica. Transiciones térmicas (Tg y fusión) Rangos de temperatura de uso.				

Nota. Tomado de Caracterización termogravimétrica de las operaciones de reprocesado de poli (tereftalato de etileno) (PET), (p. 104), por (Badia, 2007)

2.4.1. Análisis Termogravimétrico

Se basa en la determinación de la pérdida de masa de los materiales en función de un programa de temperaturas controlado. Los resultados que aporta son muy apropiados en el estudio de la degradación y comportamiento en servicio de materiales.

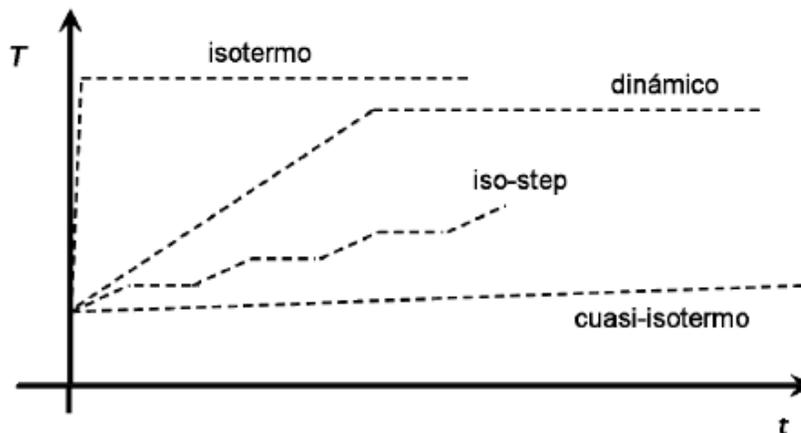
Según (Badia, 2007) el análisis termogravimétrico puede realizarse siguiendo diferentes metodologías:

- Termogravimetría isoterma, en la cual la masa se registra en función del tiempo a temperatura constante.
- Termogravimetría cuasi-isoterma, en la cual se calienta la muestra hasta temperatura constante mediante un programa de temperaturas crecientes de muy bajo gradiente.
- Termogravimetría dinámica, en la que se calienta la muestra mediante una rampa de temperaturas usualmente lineal. Este caso es el más habitual de ensayo.
- Termogravimetría iso-step, se trata de alternar rampas isotermas con dinámicas.

En la figura 2 se representa el diagrama para las diversas metodologías de ensayo termogravimétricos dependiendo la temperatura aplicada.

Figura 2

Diagramas T-t para las diversas metodologías de ensayo



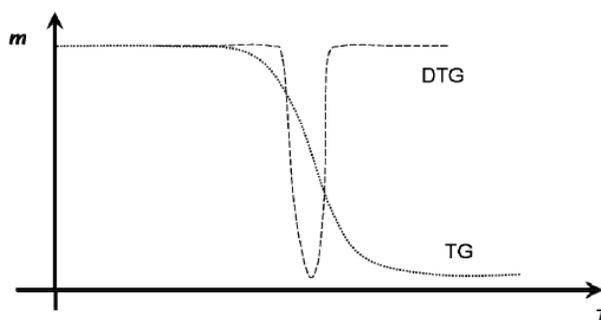
Nota. Tomado de Caracterización termogravimétrica de las operaciones de reprocesado de polímeros (tereftalato de etileno) (PET), (p. 105), por (Badia, 2007).

2.4.2. Interpretación clásica de una curva termogravimétrica

El análisis termogravimétrico según (Badia, 2007) proporciona como resultado un termograma o curva termogravimétrica. Está conformada por una curva sigmoïdal con uno o varios tramos dependiendo de la naturaleza química de los componentes y de la composición de la muestra, como se muestra a continuación en la figura 3.

Figura 3

Curva termogravimétrica (TG) y su curva derivada de primer orden (DTG)



Nota. Tomado de Caracterización termogravimétrica de las operaciones de reprocesado de polímeros (tereftalato de etileno) (PET), (p. 106), por (Badia, 2007)

La curva DTG, es el resultado de la primera derivada de la curva termogravimétrica, donde las caídas de máxima pendiente de la curva TG, corresponden a máximos en la curva DTG. A partir del estudio de la curva TG se puede realizar, cuantitativamente, la caracterización de la pérdida de masa al aumentar la temperatura.

A temperaturas bajas, hasta 150°C, la pérdida de peso corresponde a la pérdida de componentes volátiles en el sistema como agua, disolventes orgánicos de bajo peso molecular o gases absorbidos.

A temperaturas entre 150-250°C puede detectarse la pérdida de componentes de bajo peso molecular como aditivos, agua de cristalización, plastificantes o incluso primeros productos de descomposición a bajas temperaturas.

A temperaturas superiores a 225-250°C se inicia normalmente la degradación térmica, cuya evolución depende del tipo de atmósfera utilizado en el ensayo, de tal forma que cuando el análisis termogravimétrico, se realiza en presencia de oxígeno o aire recibe el nombre de degradación termo-oxidativa.

A temperaturas superiores a 500°C se produce la carbonización de compuestos hidrocarbonados cuya degradación térmica no conduce a la formación de fragmentos volátiles, quedando como residuos junto con las cargas o aditivos inorgánicos no degradables. Si el ensayo se realiza en atmósfera oxidante, el residuo carbonizado se gasifica por transformación en anhídrido carbónico y los residuos inorgánicos quedan como cenizas de óxidos metálicos o sales no oxidables.

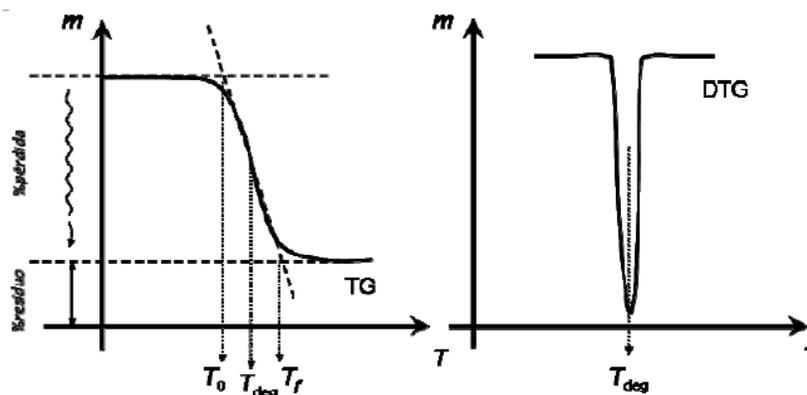
De acuerdo con (Badia, 2007) los parámetros que caracterizan la pérdida de masa en función de la temperatura son:

- Temperatura de degradación (Tdeg): Se obtiene como el pico de la curva DTG, pues a partir del punto medio del tramo recto de la curva TG puede llevar a error experimental. Este término es bastante usado para caracterizar y comparar materiales.
- Temperaturas de inicio y final de la degradación (T₀ y T_f): Proporciona información acerca del rango de temperaturas en el que se produce la pérdida máxima de material.
- Pérdida de masa y Cantidad de Residuo restante (%pérdida y %residuo): Determinan la medida con la que la masa ha disminuido a causa de la temperatura, así como el porcentaje de residuo (cenizas) que no se quema.

Estos parámetros, gráficamente se muestran a continuación, en la figura 4.

Figura 4

Parámetros característicos de los termogramas



Nota. Tomado de Caracterización termogravimétrica de las operaciones de reprocesado de poli (tereftalato de etileno) (PET), (p. 108), por (Badia, 2007)

2.5. Sistema de control aplicado a una planta

El control automático ha desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y en cualquier operación industrial que requiera el control de temperatura, presión, humedad, flujo, etc.

Las teorías de control que se utilizan habitualmente son la teoría de control clásica o convencional, la teoría de control moderno y la teoría de control avanzado, en la cual se pueden identificar subcategorías como el control robusto, control adaptivo, control por lógica difusa, control neuronal, entre otros.

Dentro de la teoría de control moderno y clásico se puede encontrar los conocidos controladores PID y los PID modificados que a su vez tienen distintos métodos para sintonización, como el de Ziegler-Nichols (Ogata, 2010).

Cuando el sistema que se quiere controlar es conocido de forma exacta, se puede asociar a un modelo matemático que defina su comportamiento. Si el sistema en cuestión se lo considera aislado del entorno, el análisis en lazo abierto bastaría para la resolución del problema de control.

Sin embargo, al considerar la presencia de perturbaciones externas o las relaciones de entrada/salida no son del todo conocidas, lo cual se acerca más a la realidad, lo idóneo es emplear un esquema de control de lazo cerrado (Guio & Navarro, 2019).

2.5.1. Modelado

Para realizar el diseño del modelo de un sistema se debe empezar a partir de una predicción de su funcionamiento para que posteriormente pueda diseñarse a detalle. La predicción se basa en una descripción matemática de las características del sistema, a la cual se le denomina modelo matemático.

Regularmente el modelo matemático se trata de una serie de ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del sistema como modelo teórico.

Sistemas lineales y no lineales:

Sistema lineal: En este caso las ecuaciones que describen el modelo son lineales, se les aplica el principio de superposición.

Sistema no lineal: No se aplica el principio de superposición. Existe dificultad matemática, normalmente se los aproxima a modelos matemáticos lineales.

Sistemas dinámicos y estáticos:

(Pendino & Crespo, 2015) diferencian a los sistemas dinámicos y estáticos en base a sus salidas.

Sistema dinámico: Si su salida en el presente depende de una entrada en el pasado.

Sistema estático: Su salida en curso depende de la entrada en curso. En este caso la salida no cambia si la entrada no cambia. En el dinámico la salida cambia con el tiempo cuando no está en equilibrio.

2.5.2. Técnicas de control

2.5.2.1. Regla de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID

Este método de Ziegler-Nichols se basa en las características de la respuesta transitoria de una planta dada para determinar los valores de ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d . Existen dos métodos para la sintonización de controladores que se explica a continuación.

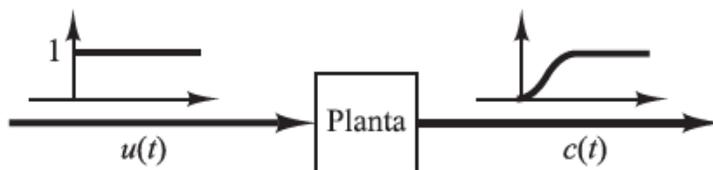
Primer método

Empleando este método, la respuesta del sistema a una entrada escalón unitario, que se visualiza en la figura 5, se obtiene de forma experimental. Si el sistema no tiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, su curva de respuesta al escalón unitario, tiene forma de S, con esta condición se puede aplicar el método.

La función de transferencia que describe la curva de la figura 5, se aproxima mediante un sistema de primer orden con un retardo.

Figura 5

Respuesta al escalón unitario de una planta



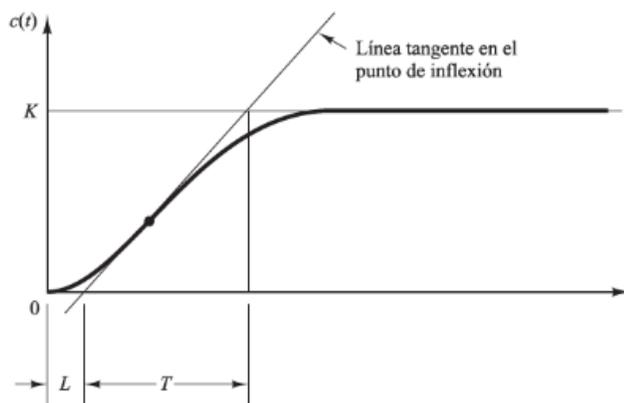
Nota. Tomado de Ingeniería De Control Moderna, (p. 569), por (Ogata, 2010)

Como se puede observar en la figura 6, la curva de respuesta en forma de S se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . Estos

valores se obtienen dibujando una línea recta tangente en el punto de inflexión de la curva de respuesta en forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y con la línea $c(t) = K$

Figura 6

Curva de respuesta en forma de S



Nota. Tomado de Ingeniería De Control Moderna, (p. 569), por (Ogata, 2010)

Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo con la ecuación que se muestra en la tabla 3.

Tabla 3

Parámetros

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0.9 T/L$	$L/0.3$	0
PID	$1.2 T/L$	$2L$	$0.5L$

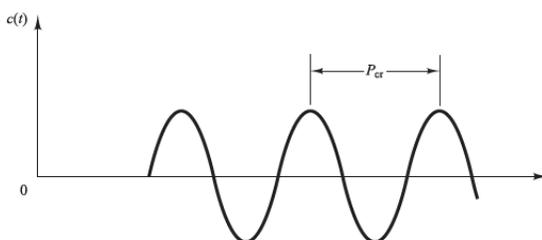
Nota. Tomado de Control Digital Teoría y Práctica, (p.198), por (García Jaimes, 2009)

Segundo método

En el segundo método, primero se fija T_i infinito y T_d a cero. Empleando solo la acción de control proporcional, se incrementa K_p desde 0 hasta un valor crítico K_{cr} , para que la salida tenga oscilaciones sostenidas. En el caso que la salida no presente oscilaciones sostenidas para cualquier valor establecido de K_p , entonces no es posible aplicar el método. La ganancia crítica K_{cr} y el periodo P_{cr} se determinan experimentalmente como se muestra en la figura 7.

Figura 7

Oscilación sostenida con periodo P_{cr}



Nota. Tomado de Ingeniería De Control Moderna, (p. 571), por (Ogata, 2010)

Para hallar los valores de K_p , T_i y T_d , Ziegler-Nichols sugirieron las ecuaciones que se presentan en la tabla 4.

Tabla 4

Ajuste de controladores por el método de la ganancia límite

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$1/1.2P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Nota. Tomado de Control Digital Teoría y Práctica, (p.197), por (García Jaimes, 2009)

Las reglas de sintonía de Ziegler-Nichols han demostrado ser muy útiles. Particularmente a plantas cuya dinámica se conoce. En estos casos, hay disponibles muchos métodos analíticos y gráficos para el diseño de controladores PID, además de las reglas de sintonía de Ziegler-Nichols. (Ogata, 2010)

2.6. Adquisición de señales

En los procesos industriales es indispensable la adquisición, medición y obtención de las diferentes variables dependiendo la aplicación ya que, a partir de esto, dependerá la toma de decisiones para implementar en el controlador del proceso. Teniendo en cuenta esto es también muy importante la adecuada selección de la instrumentación de la planta.

La adquisición de datos es el proceso de obtener un valor medible de un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consiste en cuatro elementos esenciales para que pueda lograr con su objetivo, estos son:

- Sensores y transductores
- Acondicionamiento de la señal
- Hardware de medidas DAQ
- Computador con software programable

La figura 8 representa el proceso para realizar la medida de un fenómeno físico o eléctrico y representarlo en un ordenador (National Instruments, 2012).

Figura 8

Partes de un sistema DAQ



Nota. Tomado de Partes de un sistema DAQ, por (National Instruments, 2012).

2.6.1. Sensores

Son dispositivos que tienen la capacidad de transformar una magnitud física como temperatura, presión, humedad, valor de pH, entre otros, en una diferencia de potencial o una variación de intensidad. En resumen, realizan una conversión de energías y suministran información sobre el estado y tamaño de la magnitud.

Para que el sensor pueda proporcionar una señal eléctrica, es indispensable que exista una propiedad que cambie en función de una determinada magnitud que pueda percibir el sensor según el material de fabricación y que exista una relación entre dicha magnitud y el fenómeno físico que sea predecible, suave y estable.

Un ejemplo, es la relación que se da en los conductores entre su resistencia al paso de la corriente y la temperatura, a mayor resistencia mayor temperatura.

2.6.2. Acondicionador de señal

El acondicionamiento de la señal tiene como objetivo proporcionar una señal que sea aceptable por parte de las DAQ a partir de los datos obtenidos por el sensor. Los

niveles de voltaje que suelen admitir las tarjetas de adquisición de datos van entre unos márgenes determinados: -10V a 10V, 0V a 10V, 0V a 5V, 0V a 3.3V, entre otros.

Según (Estrada Roque, 2018) las funciones principales que debe cumplir el acondicionador son:

- **Transformación:** Los sensores pueden proporcionar una diferencia de potencial o intensidad. Generalmente las DAQ admiten diferencias de potencial, por tanto, si el sensor entrega una variación de corriente, esta debe ser transformada.
- **Amplificación:** La señal entregada por los sensores suele tener una magnitud bastante pequeña, por tanto, esta debe ser amplificada para que pueda ser detectada correctamente por la DAQ. La señal amplificada debe estar en el rango de operación de la tarjeta.
- **Conversión por medio de optoacopladores:** El objetivo de esta conversión es aislar el sistema eléctrico de los sensores del sistema eléctrico de la DAQ para evitar usar tierras comunes, esto se obtiene al transformar la señal eléctrica en óptica (luz).
- **Filtrado:** Con el filtrado se pretende eliminar o reducir en lo posible ruidos de alta frecuencia que pueden alterar la correcta medición.
- **Excitación:** Hay varios sensores que requieren de una excitación, ya sea por corriente o tensión, para producir la variación proporcional a la magnitud a medir.
- **Linealización:** No todos los sensores tienen una variación lineal, a veces es necesario realizar cálculos para convertir la respuesta del sensor en lineal.

2.6.3. Tarjeta de adquisición de datos

De acuerdo con (Smith, 2020) las tarjetas de adquisición de datos se encargan de la conversión de señales desde analógica a digital (ADC) y la comunicación con el ordenador.

Las características más relevantes de una tarjeta de adquisición de datos son:

- **Número de canales analógicos:** Indica la cantidad de magnitudes distintas que se puede adquirir con la misma tarjeta.
- **Velocidad de muestreo:** Cuanto mayor sea la velocidad de muestreo mejor representación obtendremos de la señal analógica.
- **Resolución:** Viene dada por el número de bits del ADC que se utilizan para representar cada muestra.
- **Rango de entrada:** Indica los márgenes entre los que debe estar la señal de entrada para que pueda ser convertida.
- **Capacidad de temporización:** Permite funcionalidades como poder controlar los momentos en los que se debe leer una señal, identificar las veces que se ha producido un evento, generar ondas de acuerdo con el reloj, entre otras.
- **Forma de comunicarse con el computador:** Puede ser mediante entrada-salida por interrupción, que es lo más común y mediante acceso directo a la memoria. Cuando el flujo de datos es elevado.

2.6.4. Computador de procesamiento

El computador es el elemento que recibe toda la información que viene desde el sensor pasando por la DAQ, y aloja el software de aplicación que permite adquirir, analizar y presentar datos de medidas.

Estos datos pueden ser simplemente presentados en un interfaz gráfico, o a su vez, pueden ser parte de un sistema de control que se programa para cumplir alguna función específica (Mora, 2011).

2.7. Parámetros de un interfaz humano máquina

Un Interfaz Humano Máquina, o HMI por su abreviación en inglés: Human-Machine Interface. Es la herramienta que sirve de conexión entre el proceso y los operarios de una planta industrial, esto sirve para monitorear y controlar de manera adecuada el proceso.

La interfaz humano máquina tiene como funciones: visualización de la información en tiempo real, suministrar contenido gráfico sobre el proceso y controlar las variables del sistema.

Las aplicaciones de una HMI pueden comprender la implementación desde un sistema sencillo, hasta un avanzado sistema de control y monitoreo. (Autycom, 2018).

Según (Rodríguez, 2013) un HMI se puede ver desde tres puntos de vista distintos:

- **Modelo de usuario:** El usuario tiene su visión personal del sistema y está debidamente capacitado para monitorear y controlar el proceso a su cargo.
- **Modelo del programador:** Está conformado por los elementos que manipula el programador, como la base de datos. Entre sus conocimientos incluye la plataforma y herramientas de desarrollo. Sin embargo, no necesariamente tiene la habilidad de brindar al usuario el modelo más adecuado según su exigencia.
- **Modelo del diseñador:** Se encarga de combinar las necesidades e ideas del usuario y los materiales que dispone el programador para poder diseñar el producto software.

Uno de los objetivos de una interfaz es reducir la dependencia del usuario de su propia memoria no forzándole a recordar información que podría tener disponible en pantalla o repetir operaciones ya realizadas.

2.7.1. Reglas para el diseño de interfaces

Para el diseño de interfaces, (Rodríguez, 2013) considera tres reglas básicas que se desglosan mostrando algunas de las funciones de cada regla, como se describe a continuación.

- 1. Dar control al usuario:** El diseñador debe dar al usuario la posibilidad de realizar su trabajo de maneja fácil y que pueda adaptarse a sus exigencias, el usuario debe sentir que tiene el control del sistema.
 - Permitir al usuario usar teclado o mouse.
 - Permitir al usuario interrumpir y reanudar la tarea.
 - Utilizar mensajes y textos descriptivos.
 - Permitir al usuario manipular objetos de la interfaz.
 - Reducir la carga de memoria del usuario.
- 2. Reducir la carga de memoria del usuario:** Evitar que el usuario tenga que memorizar y recordar información.
 - Aliviar la carga de la memoria de corto alcance (mantener los últimos datos introducidos).
 - Proporcionar indicaciones visuales de donde está el usuario, que hace y que puede hacer.
 - Proporcionar atajos de teclado.
 - Asociar acciones a los objetos.
- 3. Consistencia:** Permite al operador emplear el conocimiento obtenido al usar otros programas.

- Consistencia a la realización de trabajos.
- Consistencia en los resultados.
- Consistencia del aspecto estético.
- Permitir la libre exploración de la interfaz, sin miedo a consecuencias negativas.

2.7.2. Consideraciones del diseño

Según (Rodríguez, 2013), existen varias guías de diseño desarrolladas por expertos y comités, a continuación, se citan algunas de ellas en cuanto al diseño:

- No saturar de objetos en la pantalla, y los presentes deben estar bien distribuidos.
- Demasiada simetría puede hacer las pantallas difíciles de leer.
- Asimetría = activo, simetría = sereno.
- Elementos de tamaño y color similares se perciben como pertenecientes a un grupo.
- Asumir errores en la entrada del usuario.
- Diseñar para el usuario, no para demostrar los propios conocimientos tecnológicos.
- Unos buenos gráficos no salvarán a una mala interfaz.

En resumen, el HMI debe estar enfocado para el usuario. Debe ser un medio abierto y sencillo que facilite la interacción y que simplifique las tareas de la actividad que ésta realiza.

2.8. Estudio y análisis del internet de las cosas

Internet de las Cosas o IoT por sus siglas en inglés, es una innovación tecnológica que tiene como objetivo conectar los elementos que se usa diariamente a

internet, con el objetivo de aproximar cada vez más el mundo físico a la digital y está en creciente desarrollo su implementación en la industria.

De forma simple Internet de las Cosas trata de objetos conectados entre sí por medio de la red. Estos intercambian información para facilitar o crear diversas acciones.

Según (Valois, 2018) para que algo así pueda ocurrir hay un conjunto de tres factores que necesitan ser combinados para que una aplicación funcione dentro del concepto de Internet de las Cosas. Éstos son: dispositivos, la red y un sistema de control.

Los Dispositivos: Son todos los elementos tales como: refrigeradores, carros, lámparas, o sensores - actuadores a nivel industrial.

La Red: Es el medio de comunicación, son tecnologías como Wi-Fi, Bluetooth y datos móviles (3G y 4G).

El controlador: Es necesario para que todos los datos adquiridos de los dispositivos a través de red sean procesados, entonces ellos son enviados para un sistema que controla cada aspecto y hace nuevas conexiones.

Capítulo III

3. Diseño del sistema SCADA

3.1. Especificaciones del usuario para el proceso

El propósito de este capítulo es identificar las características técnicas del proceso de pirólisis y determinar los componentes necesarios para la creación del sistema SCADA, el cual controlará el funcionamiento de la máquina donde ocurrirá la reacción.

Como primer paso es esencial identificar las variables que se necesitan controlar y monitorear en el proceso para obtener el producto deseado. Partiendo de la revisión bibliográfica y guía de los tutores se determinó que para el proceso de pirólisis térmica es necesario obtener datos de temperatura y masa en un tiempo específico, ya que estas variables influyen directamente en el producto que se obtiene de la reacción química.

La temperatura de degradación del polímero oscila entre 400°C a 450°C mientras que, para la transformación de estado sólido a líquido se requiere aproximadamente entre 90°C a 130°C, estos valores son obtenidos de manera experimental y a través del estudio termogravimétrico del polímero en particular (Badia, 2007).

El proceso que se planteó diseñar es un reactor continuo CSTR en donde se tendrá una entrada de materia prima en fase líquida, a diferencia del convencional reactor batch o por lotes. El material que ingresa al reactor debe estar precalentado a temperatura de 90°C a 130°C, pero no debe superar este valor porque empezaría a degradarse el polímero y generar gases.

La masa que va a reaccionar dependerá de las dimensiones físicas del reactor; en este caso, el volumen es de 10 litros según (Balseca & Carrera, 2022), pero se recomienda operar al 50% de su capacidad nominal, por lo tanto, en los 5 litros se

pueden alojar aproximadamente 4,5 Kg de materia prima, este dato se obtiene con la fórmula de la densidad.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1)$$

$$M = V * \rho \quad (2)$$

$$M = 5lt * \frac{1000cm^3}{1lt} * \frac{0.9gr}{cm^3} = 4,5 Kg$$

Donde M es la masa, V el volumen y ρ la densidad aproximada del polímero.

Además, como se diseñará un sistema continuo, se tendrá una tolva de alimentación que inyectará la materia prima a medida que se va consumiendo la masa del polímero dentro del reactor y se va transformando en gas debido a la reacción térmica.

El proceso se realiza a presión normal, aproximadamente a 1 atmósfera, así que los elementos no están sometidos a grandes presiones que puedan generar fallas mecánicas; sin embargo, por motivos de seguridad es necesario monitorear esta variable y colocar una válvula de alivio.

El agitador, el cual realiza la mezcla del material líquido al interior del reactor, es importante para que mantenga un calor homogéneo en toda la materia prima; por tanto, se requieren bajas velocidades, de entre 30 rpm hasta 70 rpm.

Los gases que se van generando dentro del reactor pasarán por una columna de reflujo que sirve como filtro y seguirán por el intercambiador de calor para que se condensen y se transformen en líquido. Este sistema tiene que mantenerse a bajas temperaturas para que se pueda condensar la mayor cantidad de gases generados y así aumentar la eficiencia de producción. La temperatura recomendada para la condensación es de entre 2°C a 5°C

En la tabla 5 se especifican las variables del proceso para una reacción de pirólisis según las personas especializadas en la materia.

Tabla 5*Plásticos en residuos sólidos urbanos*

Variable	Características
Temperatura	Degradación del polímero entre 400°C a 450°C, fusión del polímero entre 90°C a 130°C, condensación de los gases 2°C a 5°C
Masa	4kg a 5kg
Tiempo del proceso	4h
Presión	2 atm máximo
Velocidad del agitador	48 rpm

Nota. Especificaciones del proceso para tener en cuenta

3.2. Selección de los dispositivos de instrumentación del proceso

Una vez especificadas las variables directas del proceso de pirólisis, es necesario analizar que dispositivos de instrumentación se deben emplear para satisfacer los requerimientos de operación del reactor.

3.2.1. Selección de las camisas de calentamiento

La temperatura del material que se inyectará al reactor debe ser de 90°C a 130°C y dentro del reactor la temperatura de operación debe ser de entre 400°C a 450°C, grados a los cuales el plástico comienza su degradación. Debido a estas condiciones, se requiere de un sistema de calentamiento para alcanzar las temperaturas de dichos sistemas.

El sistema de calentamiento que se empleará para incrementar la temperatura está conformado por resistencias eléctricas y un circuito de potencia que permita regular el voltaje y corriente entregado a la carga que a su vez permite controlar la temperatura.

Para calcular la potencia de las resistencias, se requiere obtener la cantidad calorífica necesaria para elevar la temperatura del material desde la temperatura ambiente hasta 130°C para la tolva y 400°C para el reactor, por tanto, se procede a calcular con la siguiente fórmula:

$$Q = m * c * \Delta T \quad (3)$$

Donde:

Q : cantidad calorífica

m : masa del material a calentar

c : calor específico

ΔT : variación de la temperatura

$$Q_{tlv} = 1.629Kg * 1900 \frac{J}{Kg * ^\circ K} * (403.15 - 293.15)^\circ K = 340461 J$$

El calor necesario para elevar la temperatura del material en la tolva hasta 130°C es de 340461J, con este dato se puede calcular la potencia eléctrica necesaria para alcanzar dicha temperatura empleando la siguiente fórmula

$$P = \frac{Q}{n * t} \quad (4)$$

Donde:

P : potencia eléctrica

Q : cantidad calorífica

n : eficiencia de transferencia de calor del sistema

t : tiempo para alcanzar la temperatura deseada

$$P_{tlv} = \frac{340461J}{0.7 * 10min * \frac{60s}{1min}} = 810.62W$$

De la misma forma se realiza el cálculo para el reactor, considerando que varía el valor de la masa a calentar y el tiempo de calentamiento.

$$Q_{reac} = 4.5Kg * 1900 \frac{J}{Kg * ^\circ K} * (673.15 - 293.15)^\circ K = 3249000 J$$

$$P_{tlv} = \frac{3249000J}{0.7 * 45min * \frac{60s}{1min}} = 1719.04W$$

El calor necesario para elevar la temperatura del material en el reactor hasta 400°C es de 3249000J y la potencia eléctrica requerida es de 1719.04W

Estos valores calculados de potencia son para llegar justo a la temperatura especificada, pero es necesario sobredimensionar con un factor de seguridad para evitar que la resistencia se dañe en el caso de superar esta temperatura en el tiempo estimado que dure el proceso. La empresa OHMIO recomienda dimensionar las resistencias con el doble del valor calculado obteniendo los siguientes valores de potencia, los cuales sirven para seleccionar las resistencias disponibles en el mercado (Ohmio, 2019).

$$P_{tlv} = 810.62W * 2 = 1621.24W$$

$$P_{tlv} = 1719.04 * 2 = 3438.10W$$

Con los datos calculados anteriormente se procede a seleccionar resistencias eléctricas de tipo tubular. Para la tolva se escogió una resistencia de 1800W que era el valor inmediato superior al calculado disponible en el mercado, misma que opera a 110Vac o 220Vac; se trabaja con una alimentación de 220Vac para no tener una corriente elevada. En cuanto al reactor se seleccionó una resistencia de 3800W que de igual manera se puede operar a 110Vac o 220Vac.

3.2.2. Selección del elemento de control para las camisas de calentamiento

Como elemento de control final para las dos resistencias se requiere de un circuito para controlar el ángulo de disparo de una carga de corriente alterna conocido también como un circuito de control de fase. En el mercado existen diferentes módulos que permiten hacer el control del ángulo de disparo, pero éstos están diseñados para

una potencia baja por lo cual se decide diseñar el circuito de control de fase para las camisas de calentamiento.

3.2.2.1. Diseño del circuito de control de fase.

Para proceder con el diseño de este circuito se toma en cuenta la potencia de cada resistencia eléctrica; que para la resistencia de la tolva tiene una potencia de 1800W y para la resistencia del reactor se tiene una potencia de 3800W, teniendo en cuenta que se tiene una alimentación de 220Vac, entonces se selecciona un TRIAC de 16A y 24A respectivamente para la resistencia de la tolva y el reactor.

Elementos necesarios para el circuito de control de fase.

- Resistencias
- Opto - Triac
- Opto - Transistor
- Disipador
- TRIAC's
- Puente de Diodos

Para realizar el disparo del Triac correctamente, se tiene en consideración las especificaciones técnicas del tiristor y del Opto-Triac para poder dimensionar las resistencias necesarias para el circuito.

En la figura 9 se observa las características técnicas principales del Triac BTA24, destacando su corriente nominal de 25A y su corriente de compuerta IGT= 35 a 50mA.

Figura 9

Datos técnicos del Triac

Main features

Symbol	Value	Unit
$I_{T(RMS)}$	25	A
V_{DRM}/V_{RRM}	600 and 800	V
$I_{GT(Q_i)}$	35 to 50	mA

Nota. Las características técnicas completas del BTA24, se pueden observar en el apartado de anexos (Anexo A1).

En la figura 10 se muestran las características del tiristor que forma parte del Opto-Triac MOC3021.

Figura 10

Datos técnicos del MOC3021

OUTPUT DRIVER			
Off-State Output Terminal Voltage	V_{DRM}	400	Volts
Peak Repetitive Surge Current (PW = 1 ms, 120 pps)	I_{TSM}	1	A
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	PD	300 4	mW mW/°C

Nota. Las características técnicas completas del MOC3021, se pueden observar en el apartado de anexos (Anexo A2).

La resistencia R6 que se observa en la figura 11, limita la corriente del Triac en el MOC3021 cuyo valor máximo es $I_{TSM} = 1\text{A}$, por tanto, para calcular un valor de resistencia adecuado se recurre a la siguiente fórmula:

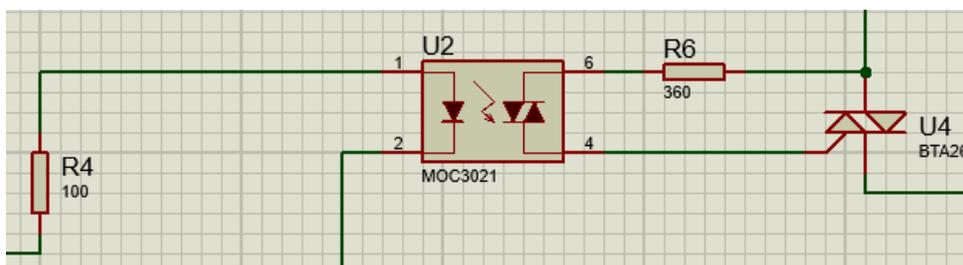
$$R = \frac{V_{pico}}{I_{TSM}} \quad (5)$$

$$R_6 = \frac{220V_{AC} * \sqrt{2}}{1A} = 311.12\Omega$$

Por tanto, seleccionando un valor standard de resistencia se opta por el inmediato superior de 360Ω.

Figura 11

Circuito de disparo del Triac con Opto-Transistor



Para el dimensionamiento de la resistencia R4 que se visualiza en la figura 11 hay que tener en cuenta las características del diodo emisor del MOC3021 que se presenta en la figura 12.

Figura 12

Características del diodo emisor del MOC3021

INFRARED EMITTING DIODE			
Reverse Voltage	V_R	3	Volts
Forward Current — Continuous	I_F	60	mA
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Negligible Power in Triac Driver	P_D	100	mW
Derate above 25°C		1.33	mW/°C

Conociendo la corriente máxima que circula por el diodo de 60mA y el voltaje de 3.3Vdc de alimentación, se procede a calcular la resistencia mínima.

$$R = \frac{V_{dc}}{I_F} \quad (6)$$

$$R_4 = \frac{3.3V_{dc}}{60mA} = 55\Omega$$

La resistencia mínima que se puede colocar es de 55Ω, sin embargo, con este valor se está operando al límite de corriente del diodo, por tanto, para limitar más la corriente se opta por seleccionar una resistencia estándar de 100Ω. Y se comprueba que la corriente calculada sea mayor a la corriente mínima requerida por el diodo emisor para su activación que es de 15mA.

$$I_{Fmin} = \frac{3.3V_{dc}}{100\Omega} = 33mA$$

La corriente calculada con la resistencia de 100Ω tiene un valor de 33mA, por lo que cumple con los requerimientos de conducción del diodo emisor del MOC3021.

La señal de voltaje que activa al diodo emisor del MOC3021 para disparar el Triac proviene desde un microcontrolador, el mismo que recibirá la señal del cruce por cero para sincronizar la frecuencia de la red eléctrica con la frecuencia del controlador.

El circuito para obtener la señal de cruce por cero se obtiene rectificando la onda completa de la red eléctrica por medio de un Opto-transistor, el cual sirve para aislar el circuito de potencia del circuito de control, se obtiene el pulso que será leído en el microcontrolador como señal de cruce por cero.

La corriente que circulará por el puente de diodos viene dada por el diodo emisor del Opto-transistor 4n35, ya que, es el elemento que tendrá un consumo máximo de 60mA como indica la figura 13.

Figura 13

Características del diodo emisor del 4N35

INPUT LED			
Reverse Voltage	V_R	6	Volts
Forward Current — Continuous	I_F	60	mA
LED Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ with Negligible Power in Output Detector Derate above 25°C	P_D	120	mW
		1.41	mW/°C

Nota. Las características técnicas completas del 4N35, se pueden observar en el apartado de anexos (Anexo A3).

Se calcula el valor de resistencia necesaria, considerando que el voltaje de alimentación es de 220Vac y la caída de tensión en el puente de diodos es de 1.1V para limitar la corriente que llega al diodo emisor.

$$R = \frac{V_{pico} - V_{puente}}{I_F} \quad (7)$$

$$R_{puente} = \frac{220V * \sqrt{2} - 1.1V}{60mA} = 5.2K\Omega$$

Para evitar que se trabaje en el límite de operación del Opto-transistor, se realizará el cálculo para que circule una corriente 15mA, ya que el mínimo necesario para conducir es de 10mA.

$$R_{puente} = \frac{220V * \sqrt{2} - 1.1V}{15mA} = 20.7K\Omega$$

Seleccionado un valor de resistencia estándar de 22K Ω , se comprueba que la corriente calculada sea mayor a la corriente mínima.

$$I_{Fmin} = \frac{220V * \sqrt{2} - 1.1V}{22K\Omega} = 14.1mA$$

Lo que cumple con las condiciones de conducción del diodo emisor.

Para evitar que las resistencias se sobrecalienten, se coloca una resistencia del mismo valor en el otro terminal del puente de diodos, así se reduce el voltaje de entrada en cada resistencia a la mitad y se disminuye su potencia.

$$V_R = V_{pico} - V_{puente} \quad (8)$$

$$V_R = 220V * \sqrt{2} - 1.1V = 310.02V$$

$$V_{R1} = V_{R2} = \frac{V_R}{2} \quad (9)$$

$$V_{R1} = V_{R2} = \frac{310.02V}{2} = 155V$$

$$P_{R1} = P_{R2} = V_{R1} * I_{Fmin} \quad (10)$$

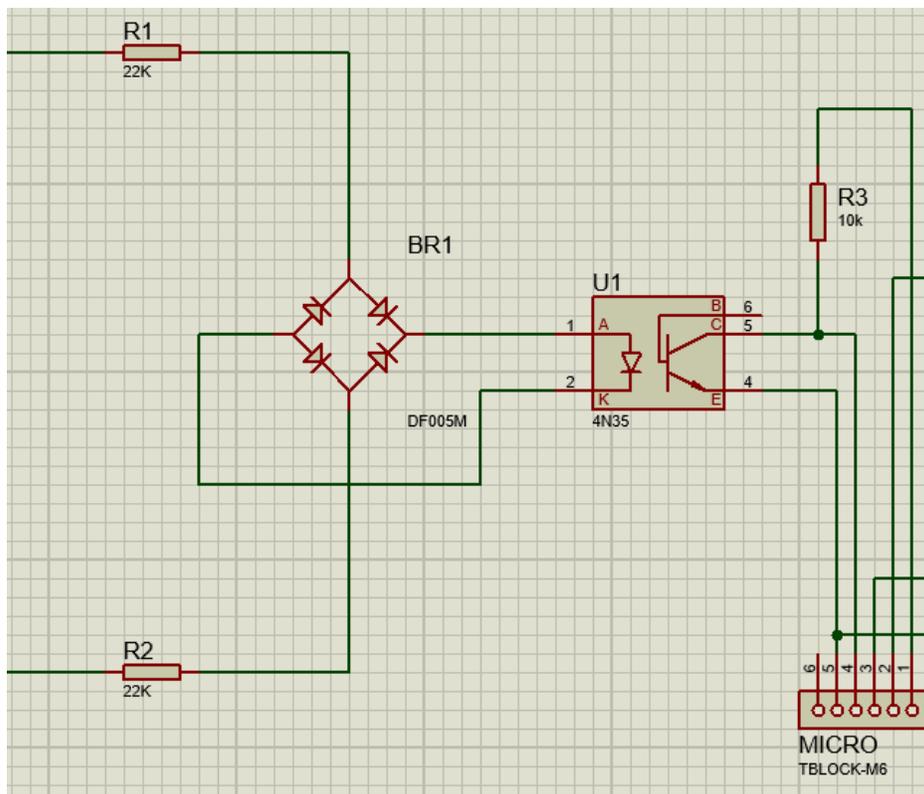
$$P_{R1} = P_{R2} = 155V * 14. mA = 2.1W$$

Por tanto, la potencia que deberá soportar cada resistencia es de 2.1W, lo cual se consigue colocando resistencias de 1W en paralelo.

El transistor de salida opera como interruptor, por tanto, al activarse el diodo emisor, conducirá el voltaje de alimentación de 3.3Vdc entre colector y emisor. Para proteger el pin de entrada del microcontrolador, se coloca una resistencia de 10KΩ entre la alimentación positiva o Vcc y el colector. En la figura 14 se puede observar el diseño del circuito detector de cruce por cero.

Figura 14

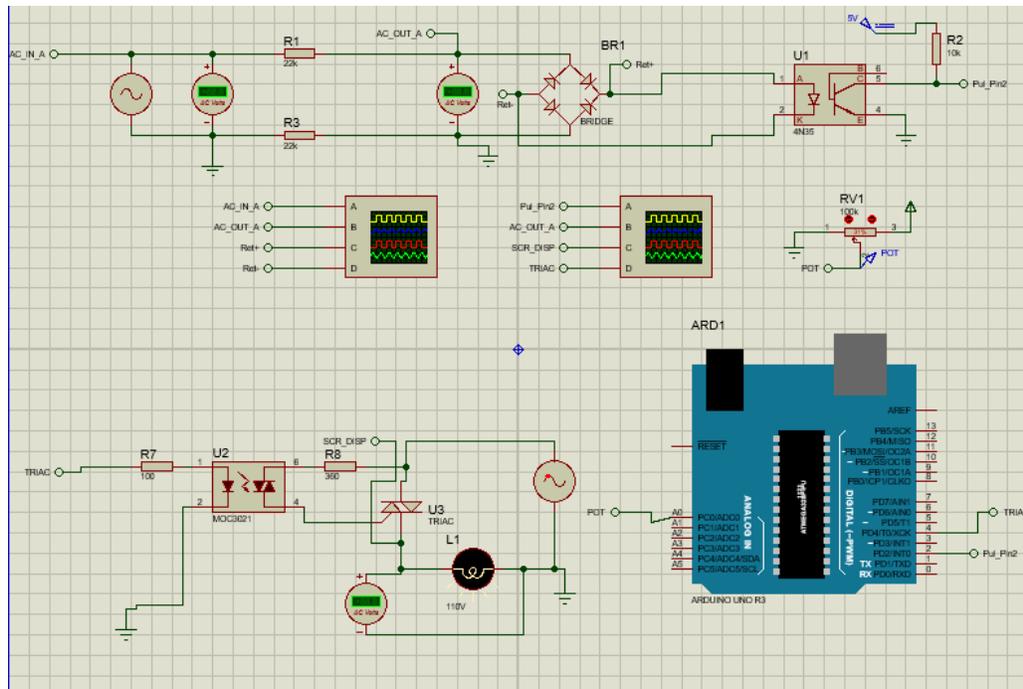
Circuito de detección de cruce por cero



La figura 15 representa el circuito de control de fase desarrollado, adaptado para poder realizar la simulación en el Software Proteus con la finalidad de comprobar que el diseño realizado funciona correctamente.

Figura 15

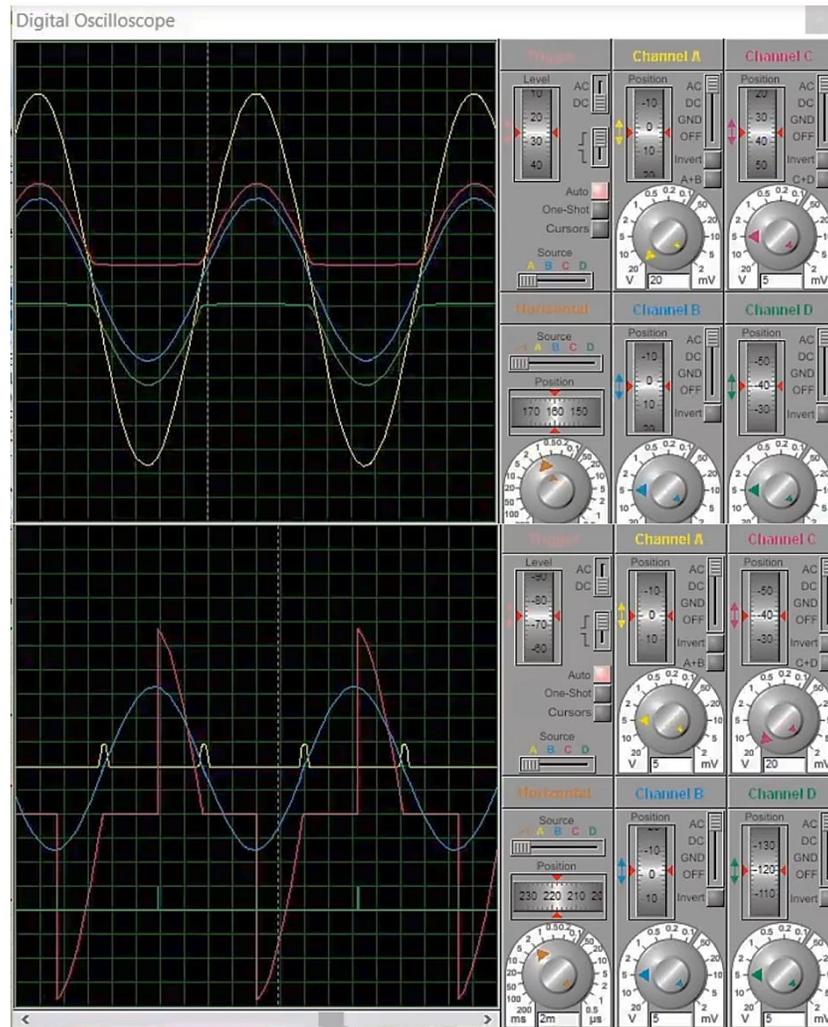
Circuito control de fase – simulación



La figura 16 muestra el resultado de la simulación. Es posible variar la potencia que se entrega a la carga, esto se puede visualizar claramente en el recorte de la onda de salida, a causa del disparo del Triac que se realiza desde el microcontrolador, obteniendo el cruce por cero de la onda de AC; entonces, después de cada cruce por cero se va a elegir en que porción del tiempo disparar el Triac para que así, solo tome esa parte de la onda.

Figura 16

Graficas de simulación



Nota. Estas graficas muestran el disparo del Triac, la curva azul es la entrada de voltaje, la curva blanca es la señal del cruce por cero, la curva rosada es la salida, es decir, lo que le llega a la cara y la curva verde es el disparo del Triac.

3.2.3. Selección de los sensores de temperaturas

Para medir y controlar la temperatura del material precalentado se requiere un sensor que tenga un rango de al menos 130°C y que su señal de salida se pueda

acondicionar fácilmente para ser leída en un microcontrolador, mientras que para medir la temperatura en el interior del reactor se requiere un rango de al menos 500°C.

En el mercado nacional existen varios sensores que permiten leer este rango de temperatura, pero también hay que analizar acondicionadores disponibles y costo.

En la tabla 6 se visualiza un análisis de los diferentes sensores de temperatura disponibles en el mercado nacional y en la tabla 7 los dispositivos acondicionadores o transmisores para la señal.

Tabla 6

Sensores de temperatura

Tipo de sensor	Rango de temperatura	Error	precio
Termocupla tipo K	-200°C a 1250°C	+/-1.6°C	21\$
Termocupla tipo J	-200°C a 800°C	+/-1.6°C	40\$
Pt100	-200°C a 450°C	+/-0.3°C	19\$

Tabla 7

Acondicionadores, transmisores de temperatura

Tipo	Rango de temperatura	Salida	Resolución	Sensor soportado	precio
Max6675	-200°C a 1250 °C	Comunicación serial SPI	12 bits	Termopar tipo K	7\$
Transmisor de temperatura	0°C a 200°C	Corriente 4-20mA	análogo	Pt100, Termopar k	65\$
TC	-200°C a 450°C	SSR	14 bits	Termopares K, J, B, E y PT100	31\$

Analizando los elementos de las tablas, se determina que todos los dispositivos mencionados cumplen con los requerimientos para el precalentamiento en la tolva, la Pt100 tiene menos errores; y en cuanto a costo tiene un valor bastante aproximado al termopar tipo K, sin embargo, al revisar la tabla 7 se observa que los elementos que permiten una lectura del sensor son los transmisores de temperatura y los controladores de temperatura (TC).

Los TC proporcionan una salida de voltaje para activar relés de estado sólido, mientras que los transmisores tienen salida de corriente de 4 a 20mA que se puede transformar a señal de voltaje para ser leído en el microcontrolador, mismo que tiene un costo elevado con respecto a la TC; el módulo acondicionador Max6675 permite la lectura únicamente de termocuplas tipo K, pero a diferencia de los dos elementos mencionados, éste se puede conectar directamente a un microcontrolador mediante comunicación serial SPI y tiene un costo reducido respecto las demás opciones.

En relación con los análisis previos, se opta por la combinación de una termocupla tipo K y el acondicionador Max6675 como se muestra en la figura 17. Esta selección de componentes permite una lectura del rango de temperatura deseado con un error aceptable y la señal puede ser leída por cualquier microcontrolador.

Termocupla tipo K tiene las siguientes especificaciones:

- Fabricante: Twidex
- Tamaño de la sonda: 6x100mm
- Rosca: NPT 1/4"
- Terminal: 2 horquillas aisladas
- Material de la sonda: acero inoxidable 304
- Rango de medición: 0 – 600°C

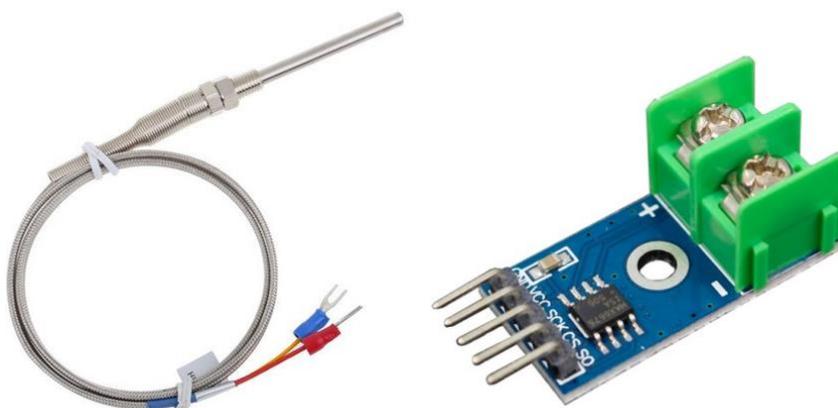
Especificaciones para el acondicionador Max6675:

- Voltaje de operación: 5Vdc
- Corriente de trabajo: 50mA
- Resolución Transmisor MAX6675: 12 bits (0°C - 1023°C)
- Rango de temperatura MAX6675: 0°C - 1023°C
- Resolución de temperatura: 0.25°C
- Interfaz de comunicación: SPI

Las especificaciones completas para el Max6675 se detallan en el apartado de anexos (Anexo B1)

Figura 17

Termocupla tipo k y acondicionador



Nota. Tomado de MaxElectrónica [Imagen], por (MaxElectronica, 2019), CC BY 2.0

3.2.4. Selección de la celda de carga

Para controlar el peso de la materia prima dentro del reactor, es necesario un sistema de medición que proporcione una señal adecuada que pueda ser leída por el microcontrolador. Las celdas de carga son dispositivos que se pueden emplear para este fin, existen tipos que se basan en principios físicos y eléctricos distintos.

Las celdas de carga hidráulicas tienen un fundamento mecánico, la carga se convierte en presión hidráulica, la cual se puede medir fácilmente con un manómetro o un transductor de presión; generalmente este tipo de celdas se emplea para medir grandes magnitudes de peso y también suelen ser más voluminosas que las demás.

Otro tipo de celdas son las de carga capacitiva, éstas emplean el principio de un capacitor, al variar el espesor del material dieléctrico entre las placas conductoras ubicada en el elemento o plataforma de medición, debido a la carga aplicada, cambiará su valor de capacitancia lo que permite tener una señal eléctrica.

Las celdas de carga con galgas extensiométricas se basan en el principio de una resistencia eléctrica y en la variación de su valor resistivo al ser deformadas por una carga externa, esto permite obtener una señal eléctrica que debe ser acondicionada para que se pueda medir en un dispositivo de control.

El principio de funcionamiento es el mismo para todo tipo de celda, pero existen variaciones dependiendo de la forma del sensor y la ubicación de las galgas extensiométricas, permitiendo medir cargas específicas dependiendo de los requerimientos del usuario.

Las celdas de carga más comunes son las de tipo viga o flexión, son de propósito general y pueden medir desde magnitudes en gramos hasta más de 2000Kg, la carga aplicada que se mide es puntual y se ubica en el extremo no empotrado de la celda, pero se le puede añadir una plataforma para medir un elemento de mayor superficie.

Otro tipo de celda con galga extensiométrica es el tipo "S" que son ideales para medir cargas axiales en tensión y colgantes, pero también se pueden emplear para cargas en compresión. Su nombre viene dado por la forma que posee y tiene un amplio rango de medición, se pueden encontrar celdas tipo "S" que midan hasta 20000Kg.

Las células de carga de botón y arandela son ideales para medir cargas de compresión y tienen una construcción que permite ser montadas en espacios restringidos. Se puede encontrar sensores de este tipo que miden en rangos de 0 a 100Kg e incluso hasta más de 20 toneladas.

El peso que se requiere medir de la materia prima es de 5Kg aproximadamente, pero hay que considerar que se medirá también el recipiente que lo contiene, en este caso el reactor interior, el cual tiene un peso de 4.8Kg. Para poder alejar el sistema de medición del calor generado por las resistencias eléctricas, el reactor interior posee un soporte cilíndrico en el centro que sobresale, de manera que se pueda apoyar en la celda de carga y de esta forma que tome la medición del peso como una carga puntual. Por tanto, la celda de carga debe cumplir que tenga una medición mínima de 10Kg.

En el mercado nacional se puede encontrar fácilmente celdas de carga con galgas extensiométricas, los tipos más comunes son las de tipo viga o de flexión. En base al requerimiento que se detalla, las celdas tipo viga son una opción viable para medir el peso deseado, ya que, la carga se puede considerar puntual.

Las celdas de carga más comunes y de fácil adquisición son las de tipo viga con valores de 1Kg, 5Kg, 10Kg, 20Kg y 40Kg, y seleccionando el inmediato superior al valor nominal, la celda de carga tipo viga de 20Kg es la adecuada para implementar en el sistema.

Especificaciones para la celda de carga seleccionada:

- Modelo: FZ1439
- Capacidad de carga nominal: 20Kg
- Dimensiones: 80x12.7x12.7mm
- Longitud de cable: 16cm
- Material: aluminio

- Temperatura de trabajo: -10°C a 50°C
- Sobre carga de seguridad: 150%
- Precisión: 0.02% FS

Las especificaciones completas para la celda de carga se detallan en el apartado de anexos (Anexo B2).

Para leer la señal de la celda en el microcontrolador, la opción más recomendada es el conversor análogo-digital HX711 que tiene resolución de 24 bit y se emplea específicamente para celdas de carga, en la figura 18 se puede visualizar el elemento como tal.

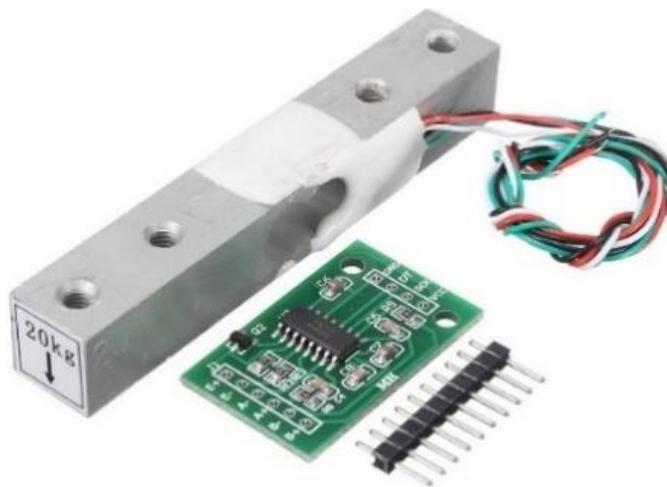
Este dispositivo tiene las siguientes especificaciones:

- Voltaje de Operación: 2.7Vdc ~ 5Vdc
- Consumo de corriente: menor a 10mA
- Voltaje de entrada diferencial: $\pm 40\text{mV}$
- Interfaz de comunicación: I2C
- Resolución conversión A/D: 24 bit
- Frecuencia de lectura: 80Hz

Las especificaciones completas para el HX711 se detallan en el apartado de anexos (Anexo B3).

Figura 18

Celda de carga de 20Kg - Acondicionador



Nota. Tomado de ElectroniLab [Imagen], por (ElectroniLab, 2019), CC BY 2.0

3.2.5. Selección de la servo-válvula para la alimentación de materia prima

De igual forma que se analizó el sensor de temperatura en conjunto con el actuador que le generaba los cambios (resistencia eléctrica), el elemento que influye directamente en la variación del peso es la válvula que permite el ingreso de materia prima desde la tolva de alimentación, por tanto, para mantener el peso constante dentro del reactor es necesario una válvula con accionamiento eléctrico, para que pueda recibir la señal de apertura desde el microcontrolador.

El requerimiento del proceso restringe el uso de algunas válvulas de accionamiento eléctrico debido a que en primera instancia la materia prima que ingresa al reactor se encuentra en estado sólido, sin el precalentamiento, pero al incrementar la temperatura para que inicie la degradación térmica, la masa al interior del reactor comenzará a disminuir debido a la reacción y se tendrá inyectar más material desde la tolva, pero esta vez precalentando el polímero hasta que alcance su estado líquido.

Por este motivo se descarta el uso de una válvula de compuerta o globo con solenoide ya que no se puede emplear para el paso de sustancias sólidas, como el polímero troceado que se inyectará al reactor antes de arrancar el proceso.

En este caso la mejor opción es una válvula de bola motorizada, debido a que, permite el paso de material sólido granulado o troceado sin problemas y se puede controlar su apertura al accionar el motor que tiene acoplado. Otro aspecto para considerar es la forma en la que se podrá accionar la válvula al enviar la señal eléctrica, ya que, puede funcionar solo con estados de apertura y cierre completo o de forma proporcional al enviarle un porcentaje de apertura cualquiera.

Debido a estos requerimientos se optó por la válvula motorizada de 3 hilos fabricada por una empresa extranjera que puede funcionar de manera proporcional y cumple con las especificaciones físicas del sistema. En la figura 19 se puede observar que posee 3 terminales; uno negativo o GND de color amarillo; uno de señal para abrir de color rojo y uno de señal para cerrar de color azul.

A continuación, se detalla sus especificaciones principales:

- Fabricante: US SOLID
- Material de la válvula: SS304
- Tiempo de operación: 3-5 segundos
- Tensión de trabajo: 24V
- Potencia máxima: 2W
- Torque máximo: 2Nm
- Presión máxima: 1Mpa
- Esperanza de vida: 80000 a 100000 ciclos

Figura 19

Válvula Motorizada



Nota. Tomado de US solid [Imagen], por (SOLID, 2020), US Solid. CC BY 2.0

3.2.6. Selección de los sensores de presión

Se conoce que el proceso de pirólisis ocurre en un ambiente inerte a presión atmosférica que puede elevarse hasta el doble, los gases que se generan en la degradación térmica del material ingresado y la misma temperatura son los factores que determinan la variación de la presión durante el proceso.

Durante el barrido de nitrógeno para desplazar el oxígeno presente en el reactor, la presión puede alcanzar valores de hasta 17 PSI, cuando la temperatura alcanza valores superiores a los 300°C y se tiene mayor generación de gases, la presión puede alcanzar valores entre 20 PSI a 29 PSI hasta que termine el proceso de degradación.

En el mercado nacional se puede adquirir fácilmente indicadores de presión análogos o conocidos como manómetros, pero al requerir una señal eléctrica para implementar en el sistema SCADA se opta por un transductor de presión que cumpla con los requerimientos del proceso. De manera general los sensores de presión no son

diseñados para elevadas temperaturas, pero existen empresas a nivel mundial que fabrican sensores de presión para aplicaciones especiales a elevados costos, por tanto, una opción viable es emplear una columna de enfriamiento como se muestra en la figura 20, esto sirve para enfriar el gas y así medir la presión sin necesidad que el transductor soporte altas temperaturas.

Esta torre de enfriamiento presenta un cuerpo perforado con un tubo espiral interno, el cual ayuda con la reducción de la temperatura del gas.

A continuación, se describe sus especificaciones principales:

- Zócalo: Acero inoxidable: 316L
- Tubo: Acero inoxidable: 316
- Presión operativa máxima: 1500 PSI
- Reduce la temperatura hasta: 299°C

Las especificaciones completas para la torre de enfriamiento se detallan en el apartado de anexos (Anexo B4)

Figura 20

Columna de enfriamiento



Por estos requerimientos se procedió a buscar un transductor de presión que opere a una temperatura de 100°C, que tenga un rango de medición de al menos 50 PSI y que proporcione una señal eléctrica para poder ser tratada y leída por un microcontrolador.

En el mercado nacional resultó complicado conseguir un transductor de presión con las características requeridas, por lo que se optó adquirirlo desde el exterior y se puede observar en la figura 21, a continuación, se detalla sus especificaciones:

- Fabricante: JENOR
- Rango de capacidad: 0 - 1Mpa
- Señal de salida: 4 - 20mA.
- Capacidad de sobrecarga: 2 - 4 veces
- Rango de temperatura de uso: -40°C a 105°C
- Fuente de alimentación: 9 - 32Vdc

Figura 21

Transductor de presión



Nota. El transductor de presión de silicio proporciona una señal de corriente.

El transductor de presión seleccionado soporta hasta 1Mpa de presión, lo cual está en el rango necesario de medición requerido y opera en un rango de temperatura

de hasta 105°C. La señal que proporciona es de corriente estándar de 4 a 20mA, sin embargo, los microcontroladores no suelen soportar señales de corriente, debido a esto es necesario tratar la señal para que sea convertida a una señal de voltaje.

Se opta por adquirir un conversor de corriente a voltaje que tiene como entrada la señal de 4-20mA y como salida voltaje entre 0-35Vdc dependiendo de la alimentación que se le entregue, que será de 3.3Vdc, por esto, el voltaje de salida será de 0Vdc a 3.3Vdc. En la figura 22 se puede visualizar el conversor adquirido, a continuación, se presentan sus características:

- Rango de salida ajustable
- Potenciómetro ZERO ajusta el voltaje para la corriente mínima 0 o 4mA
- Potenciómetro SPAN ajusta el voltaje para la corriente máxima 20mA
- Regulador de voltaje LM317
- Temperatura de funcionamiento: -10°C a +60°C

Las especificaciones completas para conversor de corriente – voltaje se detallan en el apartado de anexos (Anexo B5)

Figura 22

Conversor de corriente a voltaje



Nota. Tomado de cdtecnologia.net [Imagen], por (cdtecnologia.net, 2021). CC BY 2.0

Para obtener una señal de voltaje, adicional al conversor, se selecciona otro conversor análogo digital para que la señal pueda ser tratada dentro de cualquier microcontrolador; siendo éste el módulo ADS1115, es un ADC de 16 bits que permite convertir una señal análoga de voltaje a una señal digital mediante comunicación I2C, además puede leer hasta cuatro señales y envía al microcontrolador en una sola trama. Se puede alimentar a 5V o 3.3V dependiendo el voltaje de funcionamiento del microcontrolador. El ADC tiene 10 pines como se muestra en la figura 23.

A continuación, se detalla sus especificaciones:

- Voltaje de operación: 2V a 5,5V
- Corriente: 150 μA
- Velocidad de muestreo: 8 Hz a 860 Hz
- Resolución: 16-bit
- Canales: 4 canales de entrada
- Interfaz de comunicación I2C

Las especificaciones completas para ADS1115 se detallan en el apartado de anexos (Anexo B6)

Figura 23

ADC de 16 bit



Nota. Tomado de Adafruit [Imagen], por (Earl, DiCola, & Bearnes, 2012) CC BY 2.0

3.2.7. Selección del Motor y su elemento de control final

Tomando en cuenta las velocidades recomendadas y la viscosidad del material se opta por un motor con torque alto lo cual implica que la velocidad sea relativamente baja, según (Balseca & Carrera, 2022).

Este motor tiene una caja reductora de forma cónica que permite ubicarlo en una buena posición como se muestra en la figura 24. En el extremo para acoplar el agitador y por otro extremo acoplar un medidor de velocidad, conocido como encoder, con éste se puede obtener la retroalimentación, el cual ayudará a que el agitador gire a la velocidad deseada.

Especificaciones del motor seleccionado:

- Modelo: WG31M
- Voltaje de operación: 24Vdc
- Corriente: 6.1A
- Torque: 672Ncm
- Velocidad: 41 rpm

Las especificaciones completas para WC31M se detallan en el apartado de anexos (Anexo B7)

Figura 24

Motor WG31M



Como elemento de control final se escogió un puente H de código IBT2 que se muestra en la figura 25, el cual permite controlar motores de hasta 27Vdc de alimentación con una corriente máxima de 30A.

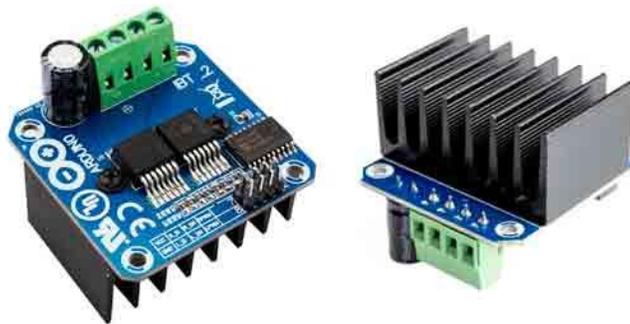
Especificaciones del puente H IBT2 seleccionado:

- Voltaje de operación: 6Vdc – 27Vdc
- Estructura de chip dual BTN7960B / BTS7960 corriente máxima de 30 A
- Conexión de 5 hilos de MCU al módulo: GND, 5V, IN1, IN2, EN
- Consumo de corriente inactivo: $7\mu A$ a $25^{\circ}C$
- Entrada máxima de frecuencia: 25 KHz
- Peso: 67.4g
- Controlador de memoria intermedia 74HC244 para un mejor aislamiento.

Las especificaciones completas para IBT2 se detallan en el apartado de anexos (Anexo B8)

Figura 25

Elemento de control final Puente H



Nota. Tomado de Luis Llamas, por (Llamas, 2019), Llamas. CC BY 2.0

3.3. Selección de los dispositivos de control y monitoreo

Para poder controlar todos los actuadores y sensores que son parte del proceso y poder implementar el sistema SCADA, se seleccionara un controlador central y dos controladores secundarios.

El controlador central tendrá la función de leer los sensores, ejecutar los programas de control y HMI, la comunicación con los microcontroladores secundarios y la configuración para la implementación del IoT, mientras que los controladores secundarios tendrán la función de ejecutar el programa para accionar los actuadores a través de los elementos de control final y comunicarse con la tarjeta controladora principal, para recibir las instrucciones necesarias y realizar las tareas correspondientes.

3.3.1. Selección del controlador central

Considerando las funciones que debe cumplir el controlador central se establece que debe poseer una cantidad de procesamiento y de memoria elevada para realizar todas las tareas contemporáneamente sin retrasos y sin perder información para no perjudicar la correcta ejecución del proceso.

Una opción viable es emplear una tarjeta Raspberry Pi ya que el último modelo dispone de la potencia de procesamiento y capacidad de memoria necesaria para realizar todas las tareas requeridas. En el mercado nacional es fácilmente asequible mientras que otras tarjetas con características similares como la tarjeta BeagleBone o TinkerBoard son difíciles de adquirir.

Entre las características principales de la Raspberry Pi 4, modelo B incorpora un procesador Broadcom BCM2711 con arquitectura de 64 bits y una velocidad del procesador de 1.5 GHz, la capacidad de la memoria RAM es de 8GB, dispone de tarjeta de video VideoCore VI, tiene conectividad Wi-Fi, bluetooth 5.0 y ethernet. Posee 4 puertos USB y un cabezal estándar de 40 pines GPIO para conectar distintos elementos

electrónicos, los cuales se usarán para conectar los diferentes sensores del sistema. Su imagen se puede visualizar en la figura 26.

Esta tarjeta necesita una potencia de 15W para su correcto funcionamiento, por lo cual se necesita una fuente de alimentación de 5V o 5.1V a una intensidad de corriente de 3A, para ello se hace uso de su propia fuente.

Las especificaciones completas para Raspberry Pi 4 se detallan en el apartado de anexos (Anexo B9)

Figura 26

Raspberry Pi 4 model B



Nota. Tomado de hipertextual, por, (López, 2020). CC BY 2.0

3.3.2. Selección de pantalla touch

Considerando que se selecciona una Raspberry Pi 4 para centralizar todo el proceso, se procede a buscar una pantalla touch que se integre de manera fácil con el microprocesador, pero que también permita visualizar de una forma adecuada el HMI diseñado.

El Display LCD 7" táctil fabricado por la empresa Raspberry Pi Foundation que se muestra en la figura 27; es la pantalla touch seleccionada para este proyecto, puesto que, se integra muy bien con la Raspberry Pi 4 y no es necesario instalar ningún controlador externo para su funcionamiento porque el sistema operativo Raspbian OS

proporciona todas las configuraciones nativas para este dispositivo, lo que brinda una funcionalidad completa sin la necesidad de conectar un mouse o teclado.

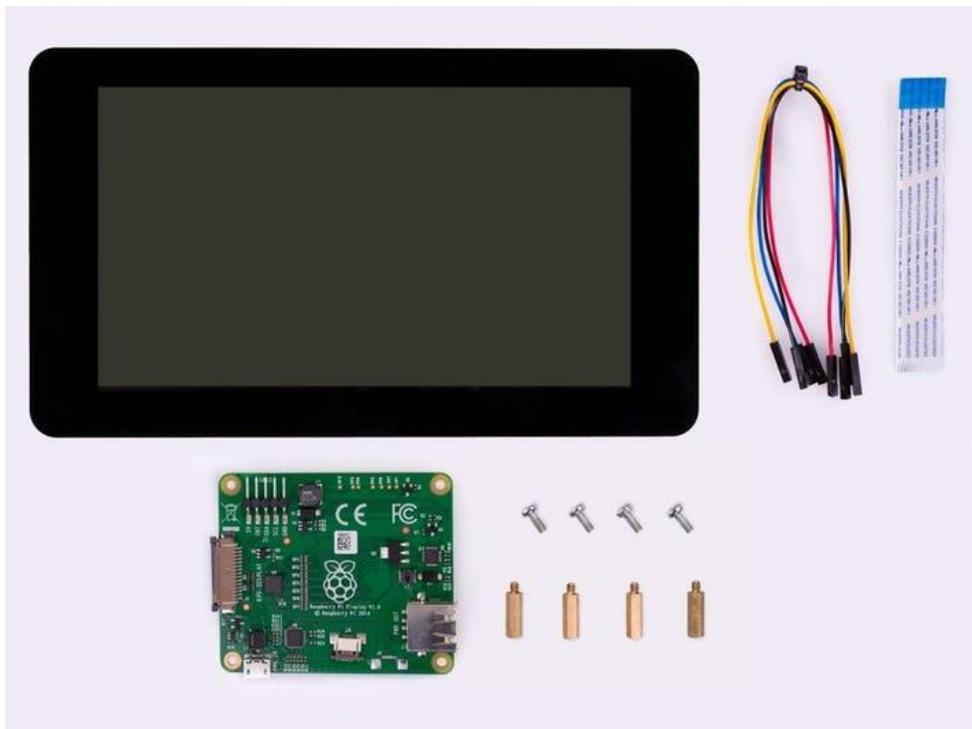
Especificaciones del Display LCD 7”:

- Placa adaptadora de señales
- Cable ribbon DSI (video y touch)
- Voltaje de alimentación: 5V DC
- Resolución de 800x480 píxeles a 60 fps
- Dimensiones marco: 194x110x20 mm
- Compatible con Raspberry Pi A+, B+,2B, 3B, 3B+ y 4B

Las especificaciones completas para Display LCD 7” se detallan en el apartado de anexos (Anexo B10)

Figura 27

Pantalla táctil y sus componentes



Nota. Tomado de Raspberry Pi, por, (Raspberry, 2015). CC BY 2.0

Esta pantalla táctil se conecta a la Raspberry Pi 4 a través de una placa adaptadora que se puede visualizar en la figura 27, la cual maneja la conversión de energía y señal; entonces se alimenta la pantalla desde los puertos GPIO de la Raspberry Pi 4 identificando GND, 5V y también se usa el BUS de datos para conectarse al puerto DSI del computador.

3.3.3. Selección de los controladores secundarios

Los controladores secundarios recibirán las instrucciones desde el controlador central y deberán ejecutar el programa para que se conviertan las instrucciones de programación en señales eléctricas que serán entregadas a los elementos de control final que a su vez permitirá la activación de los actuadores del sistema.

Para comunicar el controlador central con los secundarios se empleará el modelo TCP/IP haciendo uso de una conexión inalámbrica y evitar tener conexiones físicas, se debe tener pines de entrada / salida para enviar y recibir las señales eléctricas; además de tener una velocidad de procesamiento suficiente para que no colapse el programa.

Para la selección de la placa controladora externa se tiene en cuenta 3 posibles alternativas en base a los criterios de selección que se explica a continuación:

- **Velocidad de reloj:** Para ejecutar las instrucciones de programación de manera rápida.
- **Conectividad:** Debe tener la posibilidad de conexión inalámbrica.
- **Núcleos:** Es importante que disponga varios núcleos para poder ejecutar procesos en paralelo.

Tabla 8*Características de placas*

Características	Arduino Mega	ESP32	ESP8266
Velocidad de reloj	16MHz	160MHz	80MHz
Conectividad Wi-Fi	No	Sí	Sí
Núcleos	1	2	1

Nota. Tomado de Tecnología10, por, (Villar, 2021)

En base a los datos proporcionados en la tabla 8, se evalúa la mejor opción mediante el cálculo de la matriz para la selección de alternativas, recurriendo al análisis de pesos ponderados de las características presentadas como se muestra en la tabla 9.

Se define la importancia de las características de acuerdo (Villar, 2021) donde se establece que el factor más importante es la velocidad de reloj seguido del número de núcleos que posee la tarjeta y por último la conectividad.

Tabla 9*Evaluación del peso específico*

Criterio	Velocidad de reloj	Núcleos	Conectividad	$\sum +1$	Peso ponderado
Velocidad de reloj		1	1	3	0.5
Núcleos	0		1	2	0.33
Conectividad	0	0		1	0.16
		Total		6	1

Tabla 10*Evaluación del criterio velocidad de reloj*

Velocidad de reloj	Arduino Mega	ESP32	ESP8266	$\sum +1$	Peso ponderado
Arduino Mega		0	0	1	0.16
ESP32	1		1	3	0.5
ESP8266	1	0		2	0.33
		Total		6	1

Tabla 11*Evaluación del criterio Núcleos*

Núcleos	Arduino Mega	ESP32	ESP8266	$\sum +1$	Peso ponderado
Arduino Mega		0	0.5	1.5	0.25
ESP32	1		1	3	0.5
ESP8266	0.5	0		1.5	0.25
Total				6	1

Tabla 12*Evaluación del criterio Conectividad Wi-Fi*

Conectividad Wi-Fi	Arduino Mega	ESP32	ESP8266	$\sum +1$	Peso ponderado
Arduino Mega		0	0	1	0.16
ESP32	1		0.5	2.5	0.42
ESP8266	1	0.5		2.5	0.42
Total				6	1

Tabla 13*Conclusión para la selección*

Conclusión	Velocidad de reloj	Núcleos	Conectividad	\sum	Prioridad
Arduino Mega	0.16x0.5	0.25x0.33	0.16x0.16	0.18	3
ESP32	0.5x0.5	0.5x0.33	0.42x0.16	0.48	1
ESP8266	0.33x0.5	0.25x0.33	0.42x0.16	0.31	2

De acuerdo con los resultados de peso ponderado de las tablas 10,11,12 se procede a calcular la tabla 13 de conclusiones para seleccionar la mejor alternativa. Resultando ganador de las alternativas propuestas la placa ESP32 que cumple todos

los parámetros de diseño requeridos, se lo puede visualizar en la figura 28, este chip creado por la multinacional Expressif Systems, es capaz de soportar Wi-Fi y Bluetooth, con capacidades superiores a un Arduino y un ESP8266, cuenta con un microprocesador de 32-bits que puede ser Dual core.

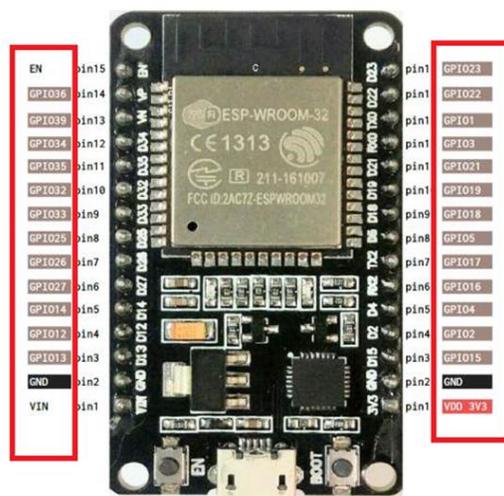
Especificaciones del microcontrolador ESP32:

- Modelo: ESP32 DEVKIT V1
- Voltaje de Alimentación (USB): 5V DC
- Voltaje de Entradas/Salidas: 3.3V DC
- CPU principal: Dual-Core Tensilica Xtensa 32-bit LX6
- Frecuencia de Reloj: 160Mhz
- Pines: 30 GPIO

Las especificaciones completas para ESP32 se detallan en el apartado de anexos (Anexo B11)

Figura 28

ESP32 DevKit



Nota. Tomado de Instructables [Imagen], por (Koyanagi, 2018). CC BY 2.0

3.4. Selección de los dispositivos de mando y señalización

Estos dispositivos permitirán ejecutar órdenes y señalar estados de forma óptica, los cuales son necesarios en cualquier tipo de industria, aunque el proceso sea totalmente automatizado deberá existir un operador calificado que le dé seguimiento al funcionamiento de todo el proceso.

Entonces, se selecciona dos luces pilotos de 24 Vdc, como se muestra en la figura 29, las cuales indicaran el estado del proceso, es decir, si están corriendo el proceso o si está parado por alguna razón ya sea externa que el operario lo detenga o por una razón interna que sería con la parte de software.

A continuación, se detalla sus especificaciones:

- Modelo: Xider AD22-22DS
- Voltaje de operación: 24Vdc
- Corriente: 20mA
- Temperatura ambiente: -25°C – 55°C
- Vida útil: 30000h

Figura 29

Luces Pilotos



Nota. Tomado de Protoelectrica [Imagen], por (ProElec, 2020). CC BY 2.0

Para el paro de emergencia se escoge un botón tipo hongo como se muestra en la figura 30, estos paros generalmente son accionados cuando existe algún problema en el proceso o también cuando una persona se encuentra en peligro.

A continuación, se detalla sus especificaciones:

- Modelo: ASGPAR432
- Número de terminales: 4
- Agujero de montajes: 22mm
- Tipo de contacto 1NO + 1NC

Figura 30

Paro de Emergencia



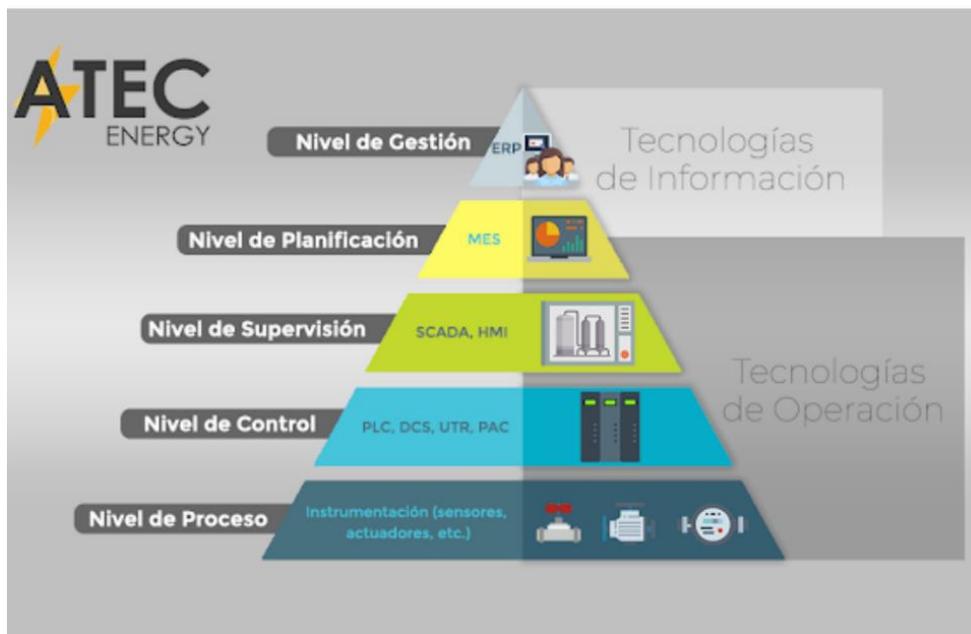
Nota. Tomado de DreamsTime [Imagen], por (Yudesign, 2016). CC BY 2.0

3.5. Esquema de conexión del sistema SCADA

Un sistema SCADA requiere de diferentes elementos para cumplir con su propósito el cual es la supervisión, control y adquisición de datos, para este apartado se explicará los elementos implementados en cada fase y un esquema general donde se visualizará de manera gráfica los dispositivos usados. Para todo este proceso se sigue los niveles de la pirámide de automatización que se muestra en la figura 31.

Figura 31

Pirámide de automatización



Nota. Tomado de ATEC ENERGY BLOG [Imagen] por (Klop, 2018). CC BY 2.0

Esta pirámide de automatización ayuda a visualizar de forma gráfica los dispositivos que forman parte del proceso, que también se separan por niveles.

- **Nivel de Proceso:** En este nivel se ubican los dispositivos que dotan de acciones a la máquina y a su vez monitorear los efectos, por lo cual se tiene a los sensores, acondicionadores de señal, actuadores y elementos de control final. A continuación, en la tabla 14 están listados todos los componentes usados en la planta de pirólisis.

Tabla 14*Actuadores y sensores*

Actuador	Elemento de control final	Sensor	Acondicionador de señal
Resistencia Eléctrica	Circuito control de fase	Termocupla Tipo K	Max6675
Motor	Puente H	Encoder	--
Servo Válvula 3/4	Circuito High-side switch	Celda de carga	HX711
Electroválvula	Circuito de Activación	Sensor de presión	Convertor de corriente a voltaje + Convertor análogo digital ASD1115
Luces Pilotos	Circuito de Activación	--	--
Paro de Emergencia	--	--	--

Nota. Elementos de campo para el trabajo físico y de monitoreo

- **Nivel de Control:** En esta etapa se encuentran las tarjetas controladoras; se tienen dos microcontroladores ESP32 los cuales se encargan de manejar todos los actuadores, esto lo hace recibiendo ordenes de la tarjeta Máster Raspberry Pi 4, la cual funciona como el controlador central y aquí es donde se leen todos los sensores que están presentes en la planta de pirólisis.
- **Nivel de Supervisión:** En esta etapa se usa una pantalla para la visualización del proceso de pirólisis. También se implementa todo el SCADA, siendo ésta la combinación de las etapas anteriores; entonces es aquí donde se puede hacer el control ya sea manual o automático.

Para este diseño sólo se toma en cuenta los niveles que pertenecen a la tecnología de operación, ya que en sí este proyecto está inclinado a la automatización de todo el proceso de pirólisis.

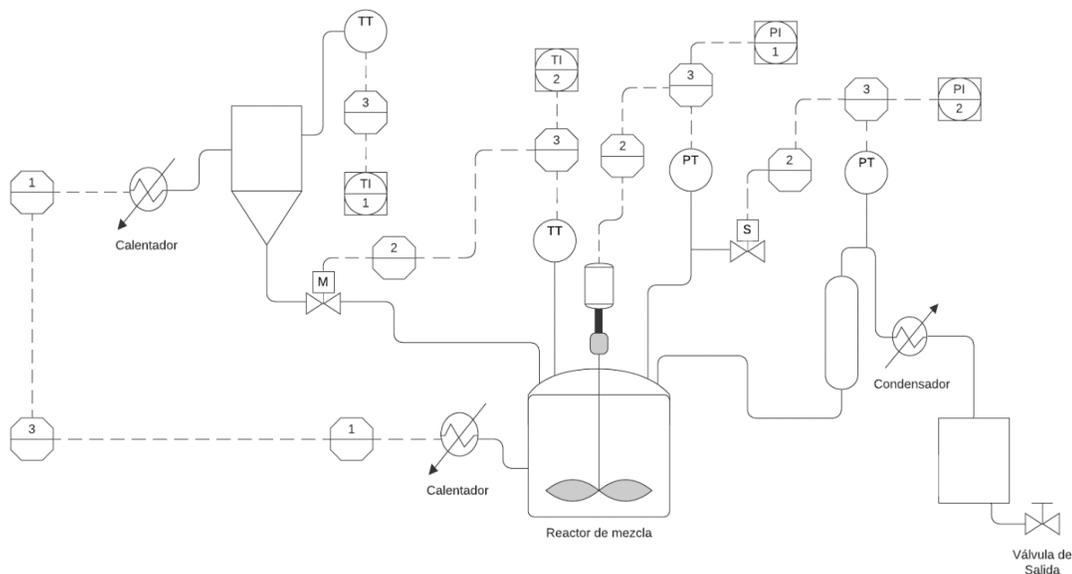
3.5.1. Diagrama de Instrumentación

En este apartado se muestra el diagrama que abarca todo el proceso con sus sensores y/o transductores, así como los actuadores que están presentes en la planta de pirólisis. En la tabla 15 se detalla los elementos con su simbología presentes en el esquema de instrumentación que se visualiza en la figura 32.

Tabla 15

Leyenda del esquema de instrumentación

Símbolo	Características
	Controlador 1
	Controlador 2
	Raspberry Pi 4
	Indicador de temperatura en pantalla
	Transmisor de temperatura
	Transmisor de presión
	Indicador de presión en pantalla

Figura 32*Esquema de Instrumentación***3.5.2. Protocolo de Comunicación**

En la arquitectura diseñada están presentes dos microcontroladores ESP32 que permiten conectarse a una red Wi-Fi y la Raspberry Pi 4 que es el controlador central, la necesidad de buscar una comunicación eficiente que permita conexiones inalámbricas y que ayude en futuras implementaciones IoT, se escoge el protocolo MQTT el cual está basado en la pila TCP/IP.

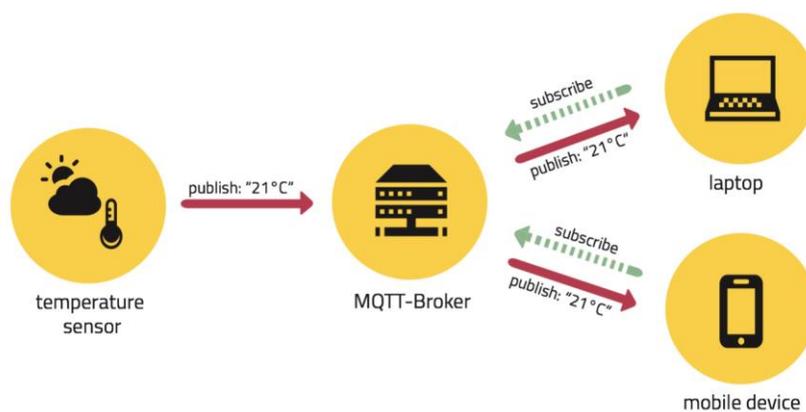
MQTT es un servicio de mensajería Push, es decir, que reacciona a un evento cuando llega el mensaje; el modelo que usa es publicador/suscriptor para este tipo de arquitectura los clientes intercambian datos con un servidor centralizado o también se lo conoce como Broker, en este caso se instala el Broker Mosquitto en la Raspberry Pi 4.

Para tener organizado todos los mensajes que le llegan al Broker, esto se realiza por temas o “topics” y con jerarquía, haciendo posible que el cliente puede conectarse al

Broker o servidor y publicar o subscribirse a cualquier tema, en la figura 33 se muestra la arquitectura de esta comunicación.

Figura 33

Modelo (Pub-Sub) MQTT

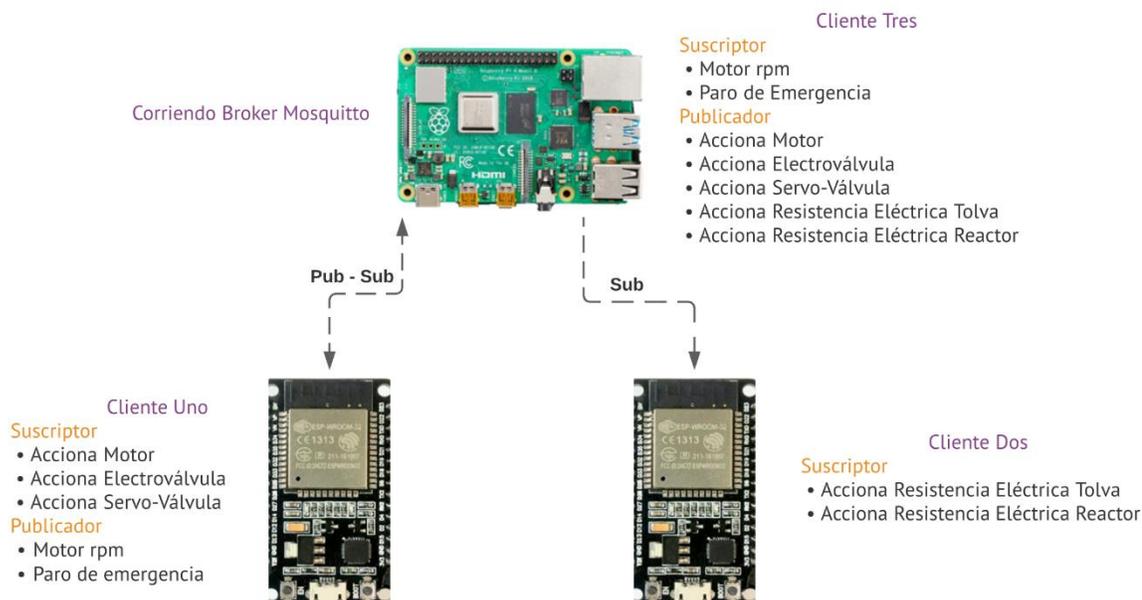


Nota. Tomado de Borrowbits [Imagen] por (H., 2020). CC BY 2.0

En la figura 34 se muestra la arquitectura de comunicación para la planta, se tiene entonces dos clientes ESP32, y la Raspberry Pi 4 como servidor. Por tanto, existe una configuración maestro – esclavo para esta arquitectura; el maestro es identificado como cliente tres (Raspberry Pi 4) y los clientes uno o esclavos, dos (ESP32).

Figura 34

Arquitectura de comunicación



Nota. La comunicación se hace con el modelo Pub-Sub, la Raspberry Pi 4, aparte de leer todos los sensores, también implementa el Broker Mosquitto para iniciar la comunicación.

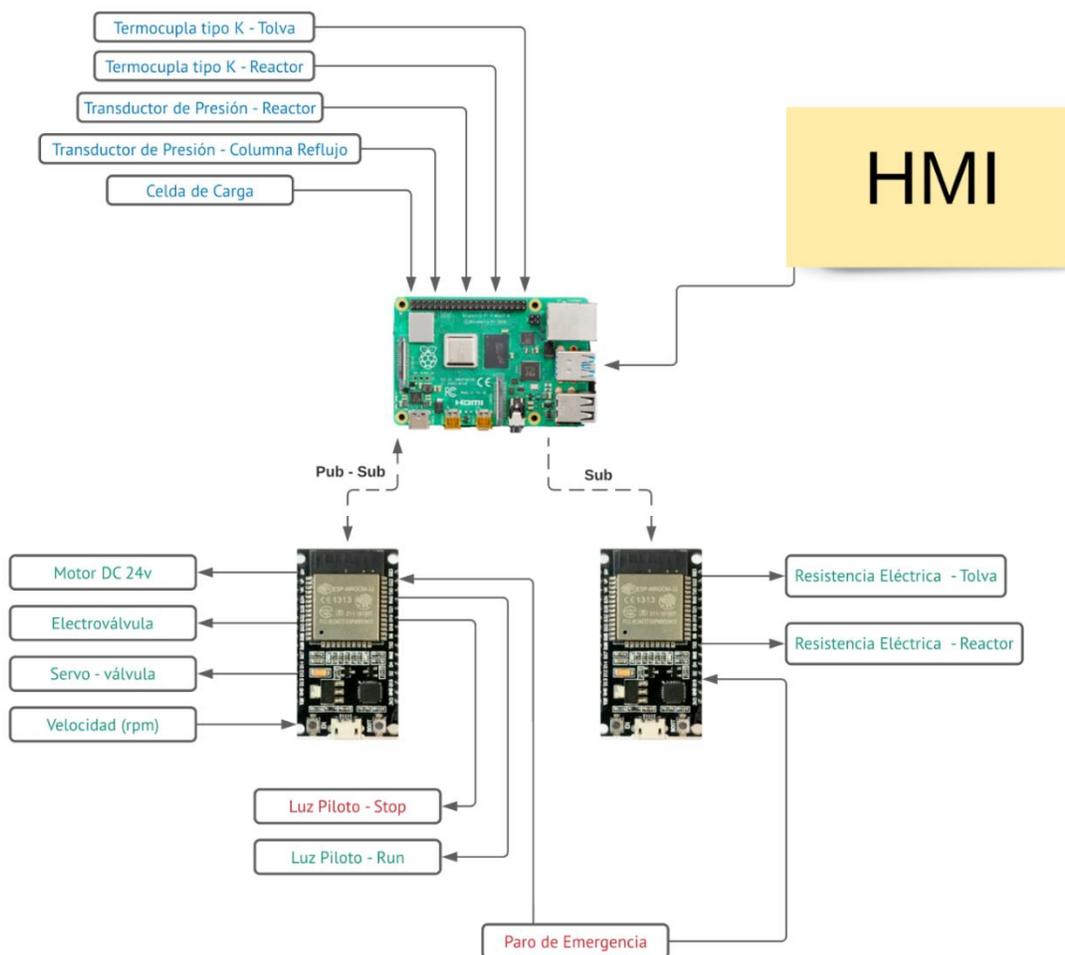
3.5.3. Diagrama general del sistema

Después de explicar y contextualizar todo el proceso según la pirámide de automatización y haber seleccionado un protocolo de comunicación que permitirá tener lectura y acción instantánea sobre los diferentes actuadores, se puede leer los efectos que causaría en la planta. Se configura la Raspberry Pi 4 para que sea la tarjeta que lee todos los sensores y a su vez también ejecutará el HMI; en cuanto a los actuadores se distribuyeron dependiendo de la necesidad, gracias a que se tiene en cuenta las interrupciones por software que tiene cada ESP32. Entonces el Cliente Uno será el que controle los elementos finales de control para el motor, servo-válvula y electroválvula; y

el cliente Dos se encargará de controlar los elementos de control final para los circuitos de control de fase, que a su vez permitirán el recorte de la onda sinusoidal que llega a la carga. Todo esto se muestra en la figura 35, y con su respectiva comunicación hacia el servidor o Broker.

Figura 35

Esquema General de todo el Sistema



Nota. Sensores y actuadores conectados a su tarjeta respectiva, aquí se muestra todo lo que incluye el sistema para poder actuar sobre la máquina y a su vez leer la reacción.

3.6. Diseño del sistema eléctrico y electrónico

Una vez seleccionados todos los elementos del sistema se procede a realizar las conexiones eléctricas y electrónicas para poder ser implementado físicamente.

3.6.1. Potencia

Las resistencias que se emplearán tienen valores de 1800W para la tolva y 3800W para el reactor, el voltaje de alimentación es de 220Vac; por tanto, se calcula la corriente para poder seleccionar un equipo de protección y dimensionar el calibre de los conductores.

$$I = \frac{P}{V} \quad (11)$$

$$I_{tlv} = \frac{P_{tlv}}{V} = \frac{1800W}{220V} = 8.2A$$

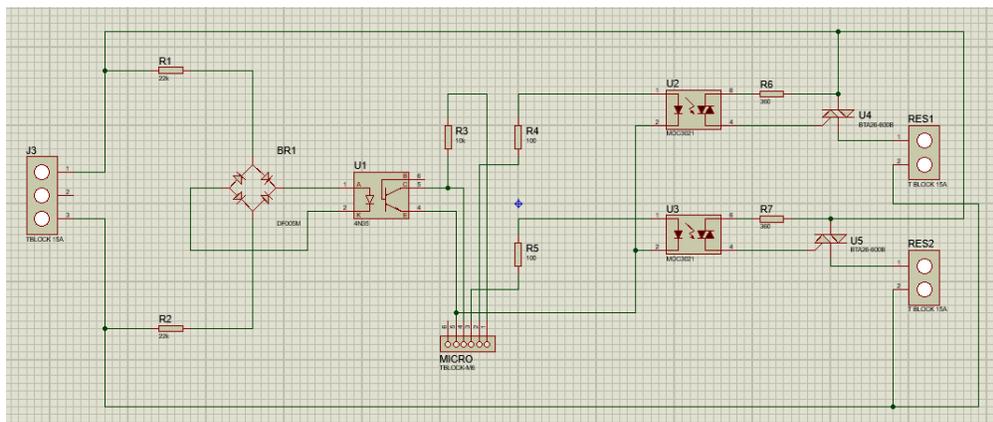
$$I_{reac} = \frac{P_{reac}}{V} = \frac{3800W}{220V} = 17.3A$$

El valor teórico de corriente es de 8.2A y 17.3A para la tolva y reactor respectivamente, y la suma de estos valores da una corriente total de 25.5 A.

Para el circuito de control de fase ya se estableció el valor nominal de corriente para los Triac, pero se requiere que las pistas de la placa que se diseñará soporten dicho valor de corriente, lo cual resulta complicado conseguir ya que el valor de corriente es bastante elevado, por tal motivo se decidió hacer una modificación que consiste en emplear un conductor que soporte la corriente adecuada en las partes del circuito que se conectan a la carga, mientras que para las señales electrónicas se emplean las pistas convencionales, el diseño de la placa realizado previamente se visualiza en la figura 36.

Figura 36

Diseño de la placa



Nota. Circuito de control de fase diseño para colocarlo en la PCB

Para dimensionar un elemento de protección para las resistencias es indispensable conocer el valor nominal de corriente, en este caso ya se calculó previamente y tiene un valor de 25.5A, un interruptor automático se selecciona con el 25% de corriente sobre la nominal, por tanto:

$$I_{CB} = I_n * 1.25 \quad (12)$$

$$I_{CB} = 25.5 * 1.25 = 31.87A$$

Donde I_{CB} , es la corriente nominal para la selección del interruptor automático.

Con este valor se seleccionó el dispositivo con corriente nominal igual o mayor a 31.87A, encontrando en el mercado un breaker de 32A como se muestra en la figura 37, lo cual satisface lo requerido.

A continuación, se detalla sus especificaciones:

- Modelo: Siemens 5SL42327RC
- Capacidad de corte: 10kA
- Frecuencia: 50-60 Hz

- Polos: 2
- Corriente nominal: 32A
- Voltaje: 240/415 V

Las especificaciones completas para Siemens 5SL42327RC se detallan en el apartado de anexos (Anexo B12)

Figura 37

Dispositivo de protección



Nota. Tomado de Ingelcom [Imagen], por (Grainger, 2021). CC BY 2.0

Una vez seleccionado el breaker, también es necesario seleccionar un conductor que soporte la corriente mayor a 32A y a su vez que resista temperaturas elevadas teniendo en cuenta la figura 38.

Figura 38

Capacidad de corriente en conductores AWG

Recubrimiento	Temperatura máxima de trabajo	Amperios por calibre		
		#14	#12	#10
THHN	90°C	25	30	40
TW	60°C	15	20	30

Nota. Tomado de Electrocables [Imagen], por (ELECTROCABLES, 2018). CC BY 2.0

El conductor 10 AWG THHN cumple con estas características, porque soporta hasta 40A de corriente y resiste temperaturas de 90°C, ahora bien, no es suficiente considerando que la temperatura en los terminales que se encuentran en el reactor puede alcanzar temperaturas mayores a los 300°C, por lo que se protegerá adicionalmente con una funda de protección térmica como se puede visualizar en la figura 39.

A continuación, se detalla sus especificaciones:

- Estructura: Trenzada
- Material: Fibra de vidrio
- Temperatura: -70°C a 650°C

Figura 39

Funda de protección térmica para conductores

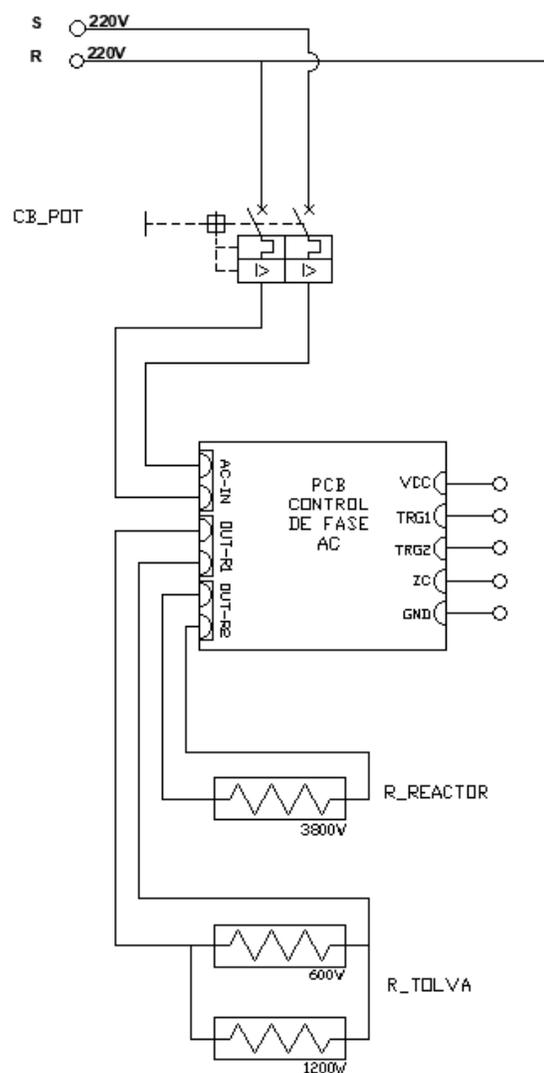


Nota. Tomado de DirectIndustry [Imagen], por (DirectIndustry, n.d.). CC BY 2.0

Con todos los elementos seleccionados se puede realizar el esquema de conexión de las resistencias con el circuito de control de fase y su respectivo elemento de protección como se visualiza en la figura 40.

Figura 40

Diagrama de conexión de potencia



Nota. La resistencia de la tolva consta de dos resistencias en paralelo de 1200W y 600W para tener un total de 1800W.

3.6.2. Control

Para el circuito de control se consideran tres aspectos principales: el control de los actuadores que emplea 24Vdc, los microcontroladores secundarios y el controlador central que manejan niveles de tensión de 5Vdc y 3.3Vdc

3.6.3. Circuito de control para los actuadores

Los actuadores que se necesitan controlar requieren alimentación de 24Vdc, y son: un motor DC con caja reductora, una válvula solenoide, una válvula motorizada y dos luces piloto. Se determinarán los elementos de control final que recibirán las señales digitales desde los microcontroladores y permitirán la activación de los actuadores con señales analógicas. Para el motor se seleccionará un driver para variar la velocidad a través de PWM; mientras que, para la válvula motorizada, la válvula solenoide y las luces piloto se diseñará un circuito para controlar su activación.

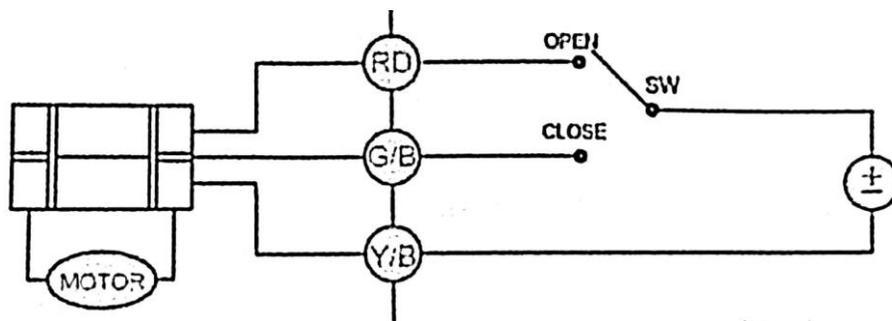
El motor DC con caja reductora tiene acoplado un eje con aspas que cumple la función de mezclar el producto al interior del reactor para que se distribuya de manera homogénea el calor en el material. En base a la corriente de 6.25A obtenida de la hoja de datos del motor, se calcula una potencia de 150W.

Para realizar el control se requiere de un driver que cumpla con las condiciones de voltaje y corriente del motor, en el mercado existe un controlador que soporta hasta 30Vdc y 15A y los terminales de control se pueden alimentar a 5Vdc o 3.3Vdc, lo cual se adapta al requerimiento.

La válvula motorizada posee tres terminales de control, un terminal para enviar la señal de abrir, un terminal para enviar la señal de cerrar y GND que es común para los dos estados de la válvula, como se muestra en la figura 41. La válvula opera a 24Vdc y tiene una potencia de 2W; por tanto, su corriente es 83mA.

Figura 41

Conexión de la válvula



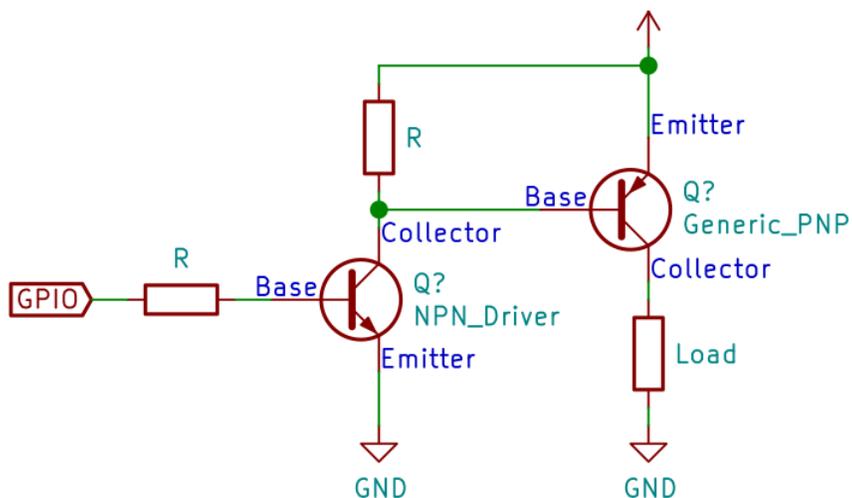
Nota. Los terminales R, B y Y corresponden a los colores rojo, azul y amarillo respectivamente.

La válvula solenoide posee una potencia de 30W y su corriente es de 1.25A, su estado es normalmente cerrado, por tanto, para abrirla se debe alimentar con 24Vdc y regresa a su estado normal por resorte al cortar la alimentación.

Las luces piloto que se emplearán consumen 20mA de corriente, por tanto, su potencia es de 0.48W.

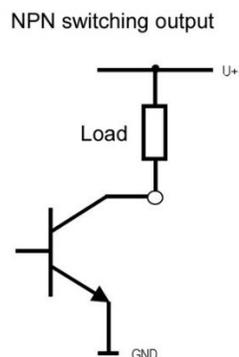
Los elementos electrónicos que permiten el control sobre los actuadores son los transistores los cuales deben cumplir con las características técnicas de corriente, voltaje y potencia de cada actuador y la función que deben cumplir es de 'switcheo'.

Para la válvula motorizada hay que tener en consideración que los terminales para abrir y cerrar reciben ambos 24Vdc, lo que delimita el tipo de transistor que se debe emplear. El transistor PNP es el ideal, debido a que, el emisor se conecta a Vcc y la carga se conecta en el colector recibiendo el voltaje Vcc, la base en cambio se polariza con voltaje negativo; por este motivo es necesario colocar un transistor NPN ya que este recibe la señal positiva desde el microcontrolador y la invierte para polarizar el transistor PNP, esta configuración también se conoce como High-side switch que se muestra en la figura 42.

Figura 42*High-side switch*

Nota. Tomado de baldengineer [Imagen], por (Lewis, 2019). CC BY 2.0

Para la válvula solenoide se emplea la misma técnica, mientras que para las luces piloto los transistores operarán como switch como se muestra en la figura 43; por lo que un tipo NPN se adapta mejor al requerimiento, ya que empieza a conducir cuando se aplica un voltaje positivo a la base, el cual viene desde la salida del microcontrolador.

Figura 43*Transistor NPN como interruptor*

Nota. Tomado de Wika [Imagen], por (Reiser, 2011). CC BY 2.0

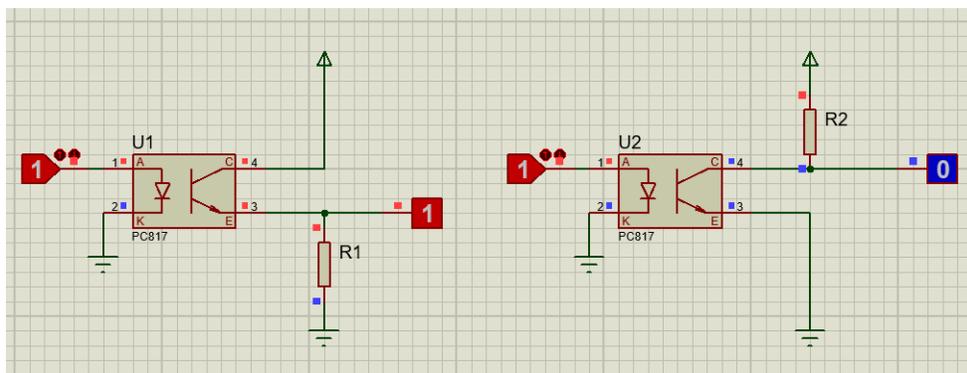
Debido a la presencia de los actuadores, se puede generar ruido en las señales electrónicas, por lo que es necesario aislar el circuito de los actuadores con las señales que vienen desde el controlador.

Aprovechando que todos los transistores que reciben la señal desde los ESP32 son tipo NPN se puede implementar fácilmente un opto-transistor en el circuito electrónico para la válvula motorizada, la válvula solenoide y las luces piloto, ya que solo se reemplaza el transistor NPN por el opto-transistor.

A la entrada del opto-transistor se conecta la señal que proviene desde el microcontrolador con una resistencia para limitar la corriente que llega al diodo emisor, mientras que en la salida se conectan los terminales del colector y emisor del transistor dependiendo la configuración electrónica deseada, como se muestra en la figura 44.

Figura 44

Configuración electrónica del opto-transistor



Nota. A la izquierda se puede observar el opto-transistor con configuración no inversora, mientras que a la derecha con configuración inversora.

Para dimensionar los valores de los elementos electrónicos del circuito “High-side switch” se debe tener en consideración la carga que se desea controlar, para esto se toma en cuenta la carga de mayor consumo de amperaje que es la válvula solenoide con 1.25A de corriente y 24Vdc de alimentación.

La carga se conecta entre el colector del transistor y GND; por tanto, la corriente de colector I_C , debe ser mayor o igual a 1.25A. Indagando en los elementos electrónicos que pueden cumplir el requerimiento, se encontró que el TIP32C tipo PNP satisface con la necesidad, ya que su corriente I_C es de máximo 3A y admite un voltaje máximo de 100Vdc. Como se observa en la figura 45.

Figura 45

Características principales del TIP32C

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_C = 25^\circ\text{C}$)						
SYMBOL	PARAMETER	VALUE				UNIT
		TIP31 TIP32	TIP31A TIP32A	TIP31B TIP32B	TIP31C TIP32C	
V_{CBO}	Collector to base voltage ($I_E = 0$)	40	60	80	100	V
V_{CEO}	Collector to emitter voltage ($I_B = 0$)	40	60	80	100	
V_{EBO}	Emitter to base voltage ($I_C = 0$)	5				
I_C	Collector current	3				A
I_{CM}	Collector peak current ($t_p < 5\text{mS}$)	5				
I_B	Base current	1				

Nota. Las características del TIP32C completas se pueden observar en el apartado de anexos (Anexo A4).

Para dimensionar la resistencia de la base del transistor R_B , que se muestra en la figura 47, se debe considerar la corriente de la base mínima I_B que se requiere para que circule corriente entre el emisor y colector. Haciendo uso de las siguientes fórmulas, se puede hallar el valor de resistencia necesario.

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} \quad (13)$$

Donde h_{FE} es la ganancia del transistor que va de 10 a 75 unidades.

$$I_B = \frac{1.25\text{A}}{75} = 16.7\text{mA}$$

$$R_B = \frac{V_{CC}}{I_B} \quad (14)$$

$$R_B = \frac{24\text{Vdc}}{16.7\text{mA}} = 1.4\text{K}\Omega$$

Seleccionando un valor de resistencia menor, para asegurar que la corriente sea suficiente para saturar el transistor, se elige el valor estándar de $1\text{K}\Omega$, lo cual produce una corriente superior a 16.7mA como se puede observar a continuación:

$$I_B = \frac{V_{cc}}{R_B} \quad (15)$$

$$I_B = \frac{24V_{dc}}{1.4K\Omega} = 17.1mA$$

Para el dimensionamiento de las resistencias RL2 y RD, figura 47, se consideraron las especificaciones del Opto-transistor PC817, que se seleccionó en base al voltaje máximo que admite, la corriente I_C del transistor y la corriente máxima que puede circular en el diodo emisor.

Para RL2 se selecciona una resistencia estándar de 10K Ω y se comprueba que la corriente no supere el valor máximo proporcionado en la hoja de datos que se puede observar en la figura 46.

Figura 46

Características técnicas principales del PC817

	CHARACTERISTIC	SYMBOL	RATING	UNIT
Input	Forward Current	I_F	50	mA
	Reverse Voltage	V_R	6	V
	Power Dissipation	P_D	70	mW
Output	Collector Power Dissipation	P_C	150	mW
	Collector Current	I_C	50	mA
	Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	80	V
	Emitter-Collector Voltage	V_{ECO}	6	V

Nota. Las características técnicas completas del PC817, se pueden observar en el apartado de anexos (Anexo A5).

Recurriendo a la fórmula, se obtiene que la corriente I_C es:

$$I_C = \frac{24V_{dc}}{10K\Omega} = 2.5mA$$

Por lo tanto, cumple con las especificaciones técnicas del Opto-transistor.

Para dimensionar la resistencia RD, se considera la corriente máxima que admite y el voltaje con el que se alimenta.

Dado que la señal eléctrica del diodo emisor proviene desde el microcontrolador, se considera el voltaje de 3.3Vdc; y seleccionando un valor de resistencia estándar para la protección del diodo de 330Ω, se procede a calcular el valor de corriente que circulará por el elemento, comprobando que no supere el valor máximo dado por el fabricante para I_F , figura 46.

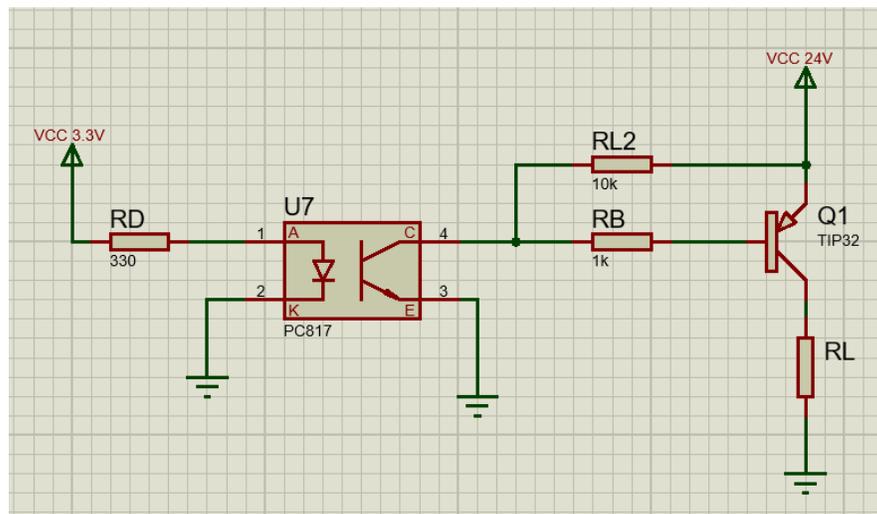
$$I_F = \frac{3.3Vdc}{330} = 10mA$$

Con este valor calculado, se comprueba que la selección de la resistencia es válida y su valor no supera la corriente máxima de 50mA.

En la figura 47 se puede observar el diseño del circuito para el accionamiento de las válvulas.

Figura 47

Circuito "High-side switch" para las válvulas

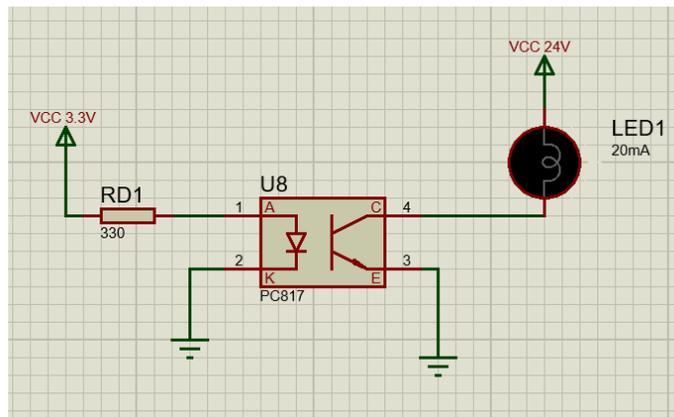


Debido al bajo consumo de corriente de las luces piloto (20mA), no es necesario añadir un transistor con mayor capacidad de corriente como en el caso de las válvulas;

conectando directamente al transistor de salida del PC817, figura 48, se puede conseguir su control sin ningún problema ya que la corriente máxima I_C es de 50mA como se observó anteriormente.

Figura 48

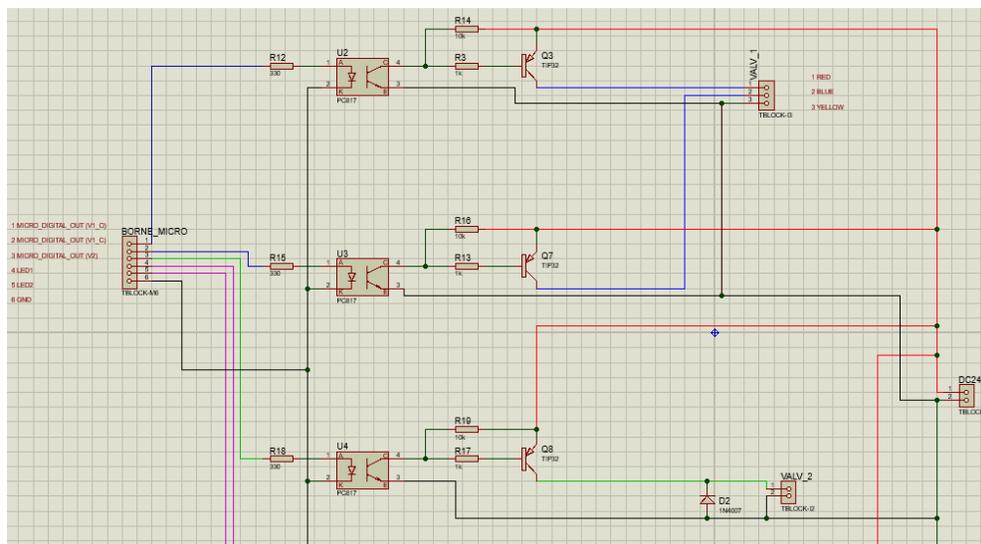
Circuito para control de las luces piloto



La figura 49 muestran el circuito para el control de la válvula motorizada y la válvula solenoide.

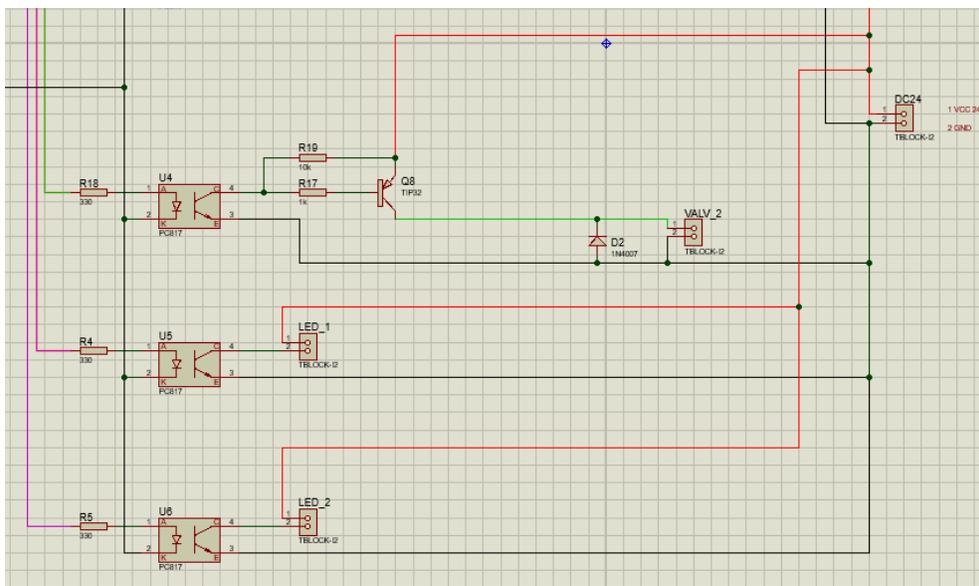
Figura 49

Circuito para las válvulas



Nota. Las conexiones de color rojo y negro corresponden a la alimentación de 24V y GND respectivamente, mientras que las de color azul corresponden a la válvula motorizada y en verde para la válvula solenoide.

El circuito para la activación de las luces piloto con el transistor del optoacoplador se presenta en la figura 50.

Figura 50*Circuito luces piloto*

Nota. Las conexiones de púrpura corresponden a la señal para la activación de las luces desde el microcontrolador.

También es necesario aislar la señal PWM que ingresa al driver para el control del motor agitador. El módulo se alimenta a 5Vdc, por tanto, se requiere reducir el voltaje de alimentación de los actuadores de 24Vdc. Para esto se recurre a un módulo reductor de voltaje step-down denominado también como convertidor buck que se encuentra en el mercado local en una versión que soporta un voltaje de entrada hasta 30Vdc y la salida se puede regular hasta de 0Vdc a 25Vdc con una corriente de 3A, el cual se muestra en la figura 51.

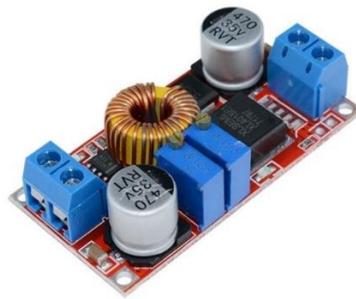
A continuación, se detalla sus especificaciones:

- Tipo: Buck, Step-Down
- Voltaje de entrada: 8Vdc a 34Vdc
- Voltaje de salida: 1.25Vdc a 32Vdc

- Corriente de salida ajustable: 5A máximo
- Eficiencia: 96%

Figura 51

Convertidor reductor de voltaje

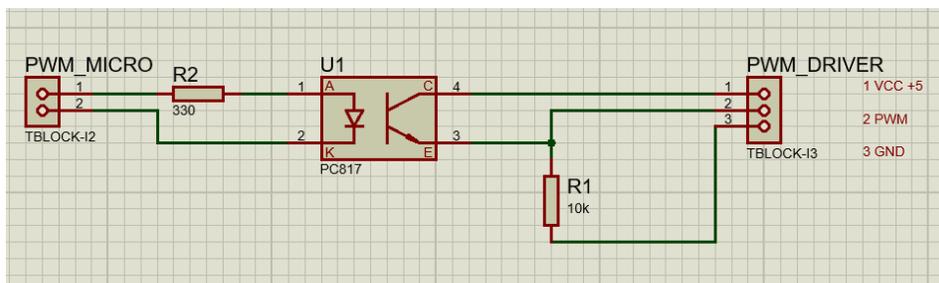


Nota. Tomado de Robot [Imagen], por (Robot, 2021). CC BY 2.0

Implementando un circuito con un opto-transistor en configuración no inversora para enviar la señal al driver que controla el motor, se tiene el esquema que se muestra en la figura 52. Los terminales PWM_MICRO corresponden a la señal que sale del microcontrolador y GND respectivamente, mientras que los terminales PWM_DRIVER corresponden a la alimentación de 5Vdc desde el convertidor buck, la señal PWM que va al driver y GND del circuito de 24Vdc.

Figura 52

Aislamiento de la señal PWM con optoacoplador



El dimensionamiento de las resistencias R1 y R2, se realizó bajo el mismo criterio empleado para calcular los elementos para el circuito de las válvulas. Comprobando de no superar el valor de 50mA en I_C , se calcula la corriente, con la diferencia que el voltaje de alimentación del transistor es de 5Vdc.

$$I_C = \frac{5Vdc}{10K\Omega} = 0.5mA$$

Para la entrada del Opto-transistor se debe cumplir con la corriente I_F del diodo emisor:

$$I_F = \frac{3.3Vdc}{330\Omega} = 10mA$$

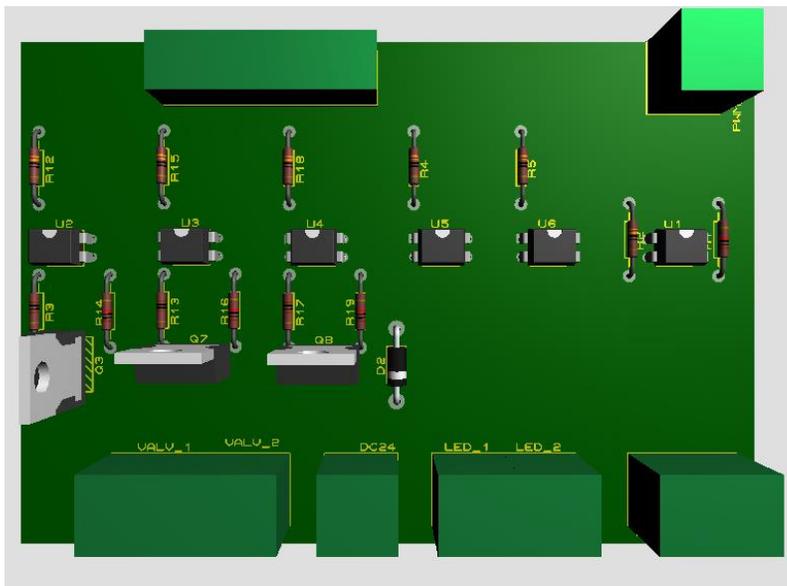
Por lo que la resistencia estándar de 330Ω se ajusta de manera adecuada al requerimiento.

Implementando el circuito para las válvulas, las luces piloto y el aislamiento de la señal PWM del motor en una sola PCB se obtiene la placa para todos los actuadores a 24Vdc, que se puede observar en el apartado de anexos (Anexo A6).

La figura 53 muestra la PCB generada en el software Proteus que se implementara de forma física.

Figura 53

Placa electrónica para los actuadores de 24Vdc



Nota. El circuito para el aislamiento del PWM está separado del circuito de los demás actuadores, sin embargo, la entrada de todos los opto-transistores comparten GND de los microcontroladores.

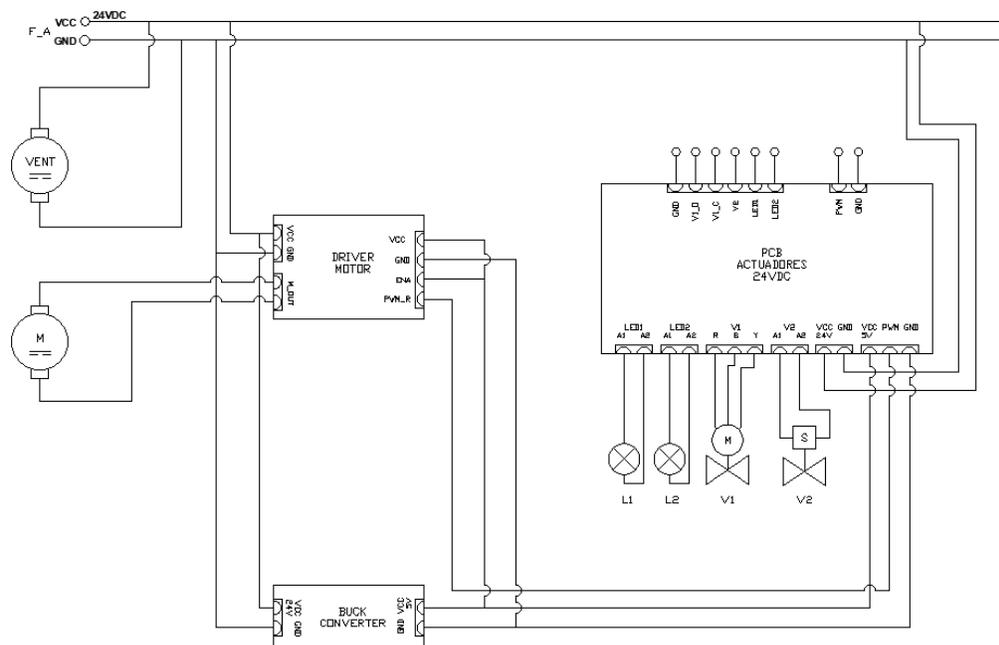
Adicionalmente a los actuadores también se implementará un ventilador para enfriar los elementos electrónicos que pueden incrementar su temperatura como transistores, Triac también los microcontroladores ESP32 y la Raspberry Pi 4.

El ventilador adquirido posee una potencia de 35W, se seleccionó el más adecuado en base a su tamaño y voltaje de alimentación.

Con el diseño de la placa electrónica para los actuadores, la selección del driver para el motor, del convertidor buck y del ventilador, se procede a realizar un esquema con todos los elementos como se indica en la figura 54.

Figura 54

Circuito eléctrico de control de 24Vdc



Nota. El ventilador se conecta de forma directa a la alimentación de 24Vdc.

Un aspecto bastante importante que se debe considerar, al tener todos los elementos que se conectarán a 24Vdc, es el elemento de mando y protección contra corto circuito. Para esto se suman las corrientes de todos los elementos.

$$I_T = I_M + I_{VM} + I_{VS} + I_{led1} + I_{led2} + I_{vent} \quad (16)$$

$$I_T = 6.25 + 0.083 + 1.25 + 0.02 + 0.02 + 1.5 = \mathbf{9.12A}$$

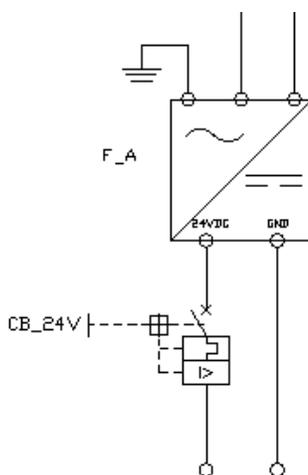
$$I_{CBA} = I_T * 1.25 = 11.4A$$

Partiendo de este valor se selecciona la fuente de alimentación de 24Vdc que abastezca con la corriente suficiente para todo el circuito. En el mercado se encuentran fuentes de 24Vdc con valores de corriente de 5A, 10A, y 15A, por lo que se seleccionó

la fuente de 15A. Esta fuente se conecta a 110V con tierra física como se visualiza en la figura 55.

Figura 55

Conexión fuente 24Vdc y breaker



Nota. La fuente tiene que conectarse con línea y neutro en 110V en los terminales específicos.

3.6.4. Circuito de control para los microcontroladores secundarios

En el circuito para los microcontroladores secundarios se diseñan las conexiones necesarias para su alimentación. En la hoja de datos del ESP32 se observa que su alimentación es de 5Vdc y dependiendo que funciones se realicen, puede tener un consumo de hasta 0.4A, por lo que se opta una fuente de 5Vdc a 2A para los dos ESP32.

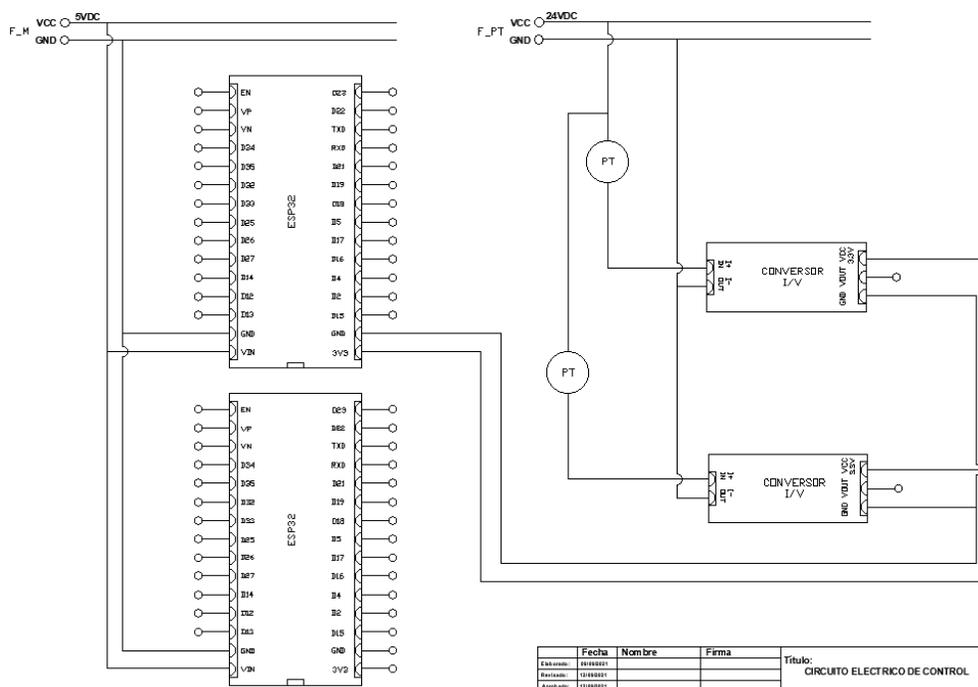
Adicionalmente, en este circuito se realizarán las conexiones para los transductores de presión. Estos transductores emiten una señal de corriente de 4mA a 20mA y se alimentan desde 9Vdc hasta 32Vdc; por tanto, se requiere otra fuente de alimentación ya que no se puede emplear la de los actuadores por el ruido que se

generaría en el circuito de los microcontroladores, así que se selecciona una fuente de 24Vdc a 800mA. Al convertor de corriente a voltaje seleccionado ingresará la señal de corriente del transductor y a la salida tendrá una señal de voltaje analógico dependiendo del valor de energización, como se alimenta con 3.3Vdc desde el ESP32 se tendrá una salida de 0Vdc a 3.3Vdc.

Teniendo en consideración lo previamente mencionado, se procede a realizar el esquema eléctrico para los microcontroladores y transductores de presión esto se ilustra en la figura 56.

Figura 56

Circuito eléctrico microcontroladores y transductores de presión



Nota. F_M corresponde a fuente microcontroladores y F_PT a fuente transductores de presión.

3.6.5. Circuito de control para el controlador central

El controlador central, la Raspberry Pi 4, se encargará de leer todos los sensores además de las otras funciones software que debe cumplir. Para esto es necesario tener los esquemas de conexión. La lectura de los sensores de temperatura se realizará a través del módulo acondicionador MAX6675 mediante comunicación SPI, este módulo tiene 5 terminales de conexión, 2 de alimentación y 3 de señal. El voltaje que admite es de 3.3Vdc por lo que se puede emplear los GPIO de la Raspberry Pi 4. De igual forma el módulo acondicionador para la lectura del peso admite 3.3Vdc y emplea comunicación I2C.

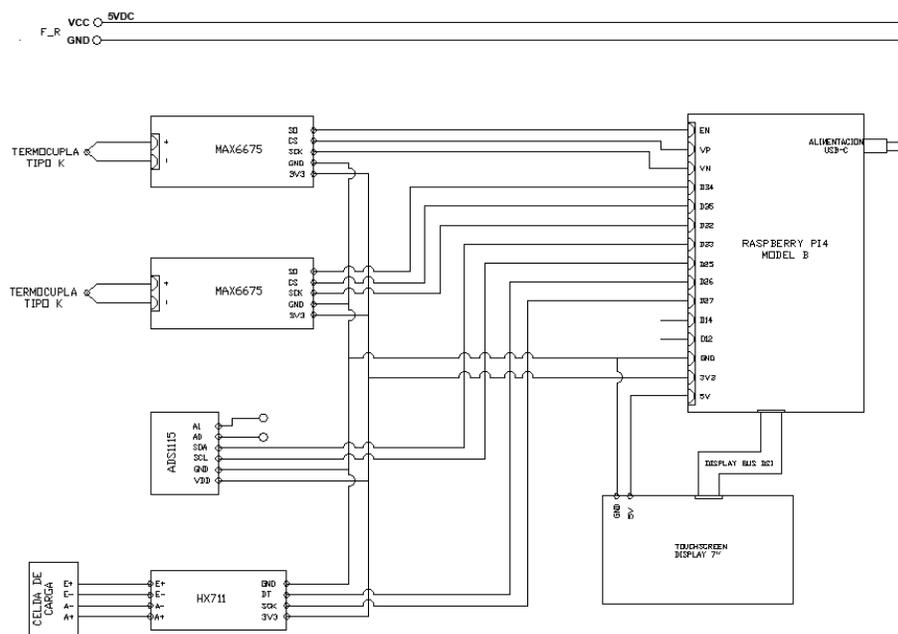
Para la lectura de los sensores de presión se emplea un conversor análogo-digital, el que se seleccionó es el ADS1115 que se alimenta a 3.3Vdc y posee 16 bits de resolución, a este módulo se pueden conectar hasta 4 entradas analógicas y transmitir los datos al maestro mediante comunicación I2C.

Adicionalmente se realizará la conexión de la pantalla táctil que permitirá el control y monitoreo del proceso local, esta se conecta a la Raspberry Pi 4, mediante bus DSI y alimentándola a 5Vdc desde los GPIO.

La alimentación del controlador central se realizará con la fuente de 5Vdc a 3.1A que viene incluida en la tarjeta Raspberry Pi 4. En la figura 57 se puede observar el circuito.

Figura 57

Circuito eléctrico controlador central



Nota. El GND de la Raspberry Pi 4 tiene que ser conmutado al GND de los microcontroladores secundarios para leer correctamente los datos de los transductores de presión.

Las fuentes de alimentación para los circuitos de control se alimentan a 110Vac y son 4 en total: fuente para los actuadores a 24Vdc, fuente para los microcontroladores, fuente para los transductores de presión y la fuente de la Raspberry Pi 4. Se selecciona un breaker para las fuentes y también para el sistema de refrigeración que incorpora el sistema para la condensación de los gases, el cual tiene un consumo de 3A.

$$I_T = I_{F-A} + I_{F-M} + I_{F-PT} + I_{F-R} + I_{ref} \quad (17)$$

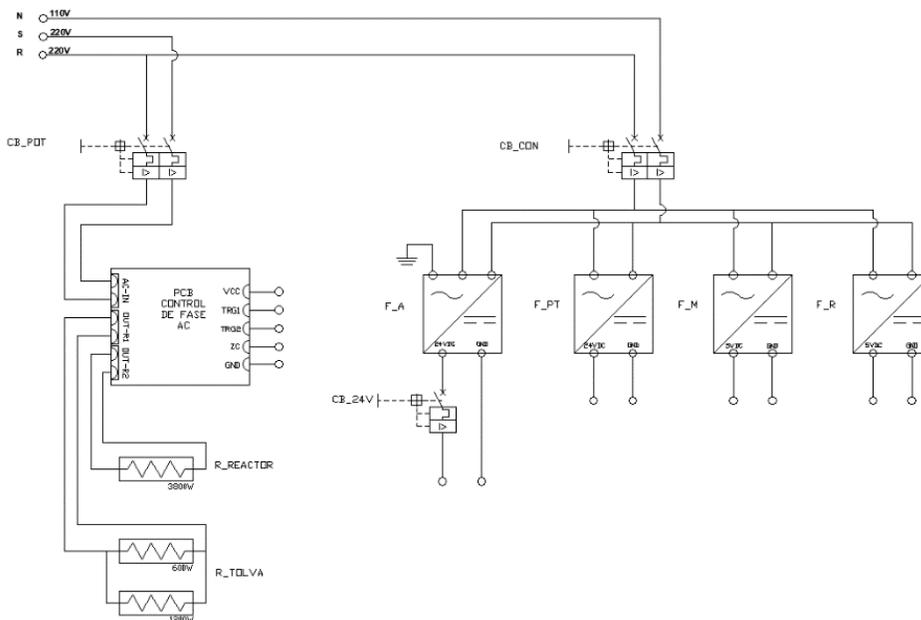
$$I_T = 15A + 2A + 0.8A + 3.1A + 3A = 23.8A$$

$$I_{CB-CON} = 23.8A * 1.25 = 29.75A$$

Por tanto, se selecciona un breaker de 30 A que opera a 110Vac y actualizando el esquema de potencia con la conexión del breaker y las fuentes queda la conexión que se muestra en la figura 58.

Figura 58

Circuito de potencia y fuentes de control



Nota. La alimentación total del sistema es bifásica a 4 hilos, con líneas R-S neutro y tierra.

3.7. Diseño del algoritmo de control para el reactor térmico

3.7.1. Obtención del modelo de la planta

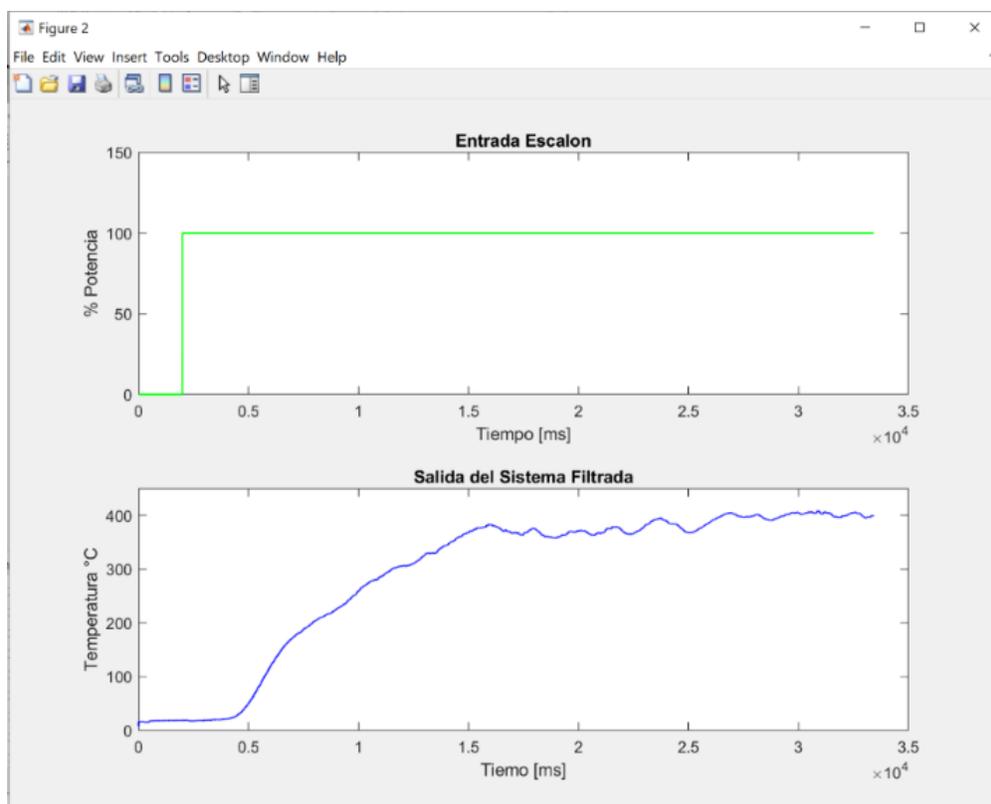
En la identificación de procesos se tiene por fin obtener un modelo dinámico de dicha planta con datos experimentales, esto se lleva a cabo después de haber establecido todo el diseño y poder hacer las primeras pruebas en la planta. Entonces se procede a realizar una recolección de datos de entradas y salidas que se envían al proceso, los datos de entradas serán el valor en % de potencia que se envía hacia la

resistencia y los datos de salida son las temperaturas en °C que sería como reacciona el sistema a su entrada. Estos datos se los toma cada 500 ms o también pueden ser tomados cada segundo, ya que el proceso por definición lento.

Los datos obtenidos se ingresan a Matlab para poder tener un modelo aproximado a la planta real en la figura 59 se muestra la gráfica de la entrada y la salida del proceso.

Figura 59

Entrada y salida para el reactor



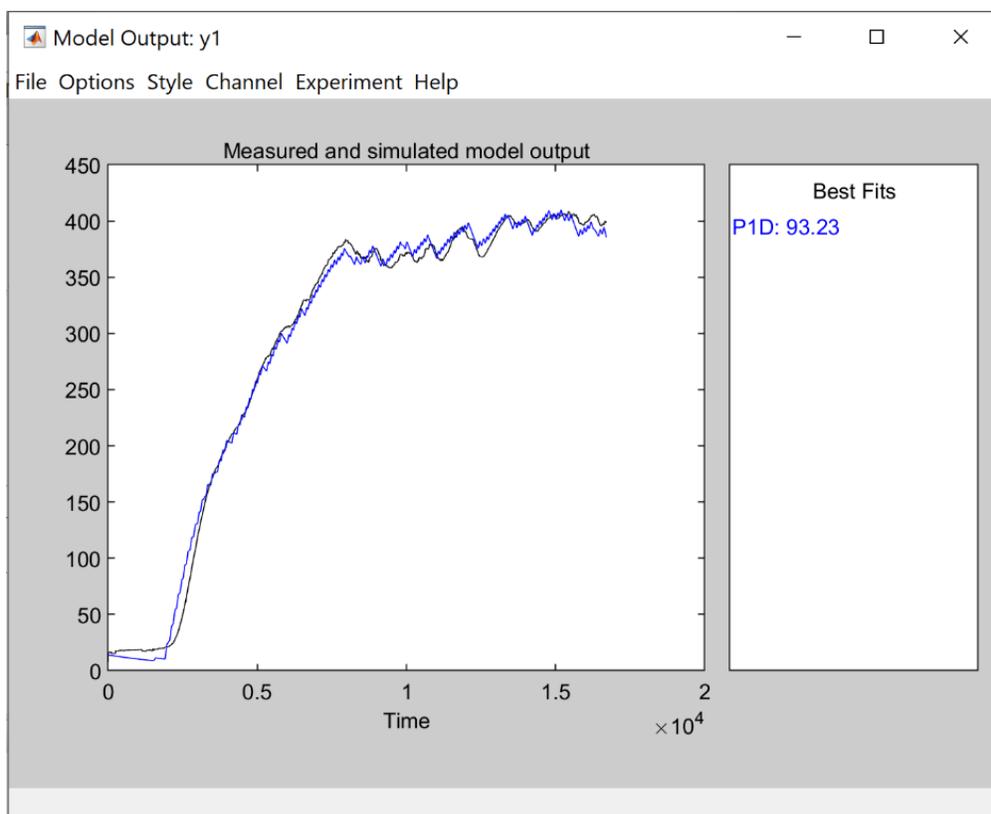
Nota. Estos datos fueron obtenidos de la planta física con algunas perturbaciones aplicadas

Con estos datos ya en Matlab se utiliza la herramienta System Identification, que sirve para aproximar modelos de plantas con una entrada y una salida como se muestra en la figura 60; además se obtiene una función de transferencia que se muestra en la

figura 61. El porcentaje de aproximación a la planta física es de 93.23% este porcentaje permite aceptar este modelo, porque solo con que sea mayor a un 70% se considera una buena aproximación. Para aproximar el modelo se selecciona un sistema de primer orden, esta acción es la más importante y depende del conocimiento previo que se tiene sobre la planta; en este caso como es un proceso de temperatura entonces un sistema de primer orden es el más apropiado. (Castaño, 2019)

Figura 60

Aproximación de la planta



Nota. Modelo obtenido con la aplicación de Matlab

Figura 61

Función de transferencia

```
>> PID

PID =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = ----- * exp(-Td*s)
      1+Tp1*s

      Kp = 7.4817
      Tp1 = 3328.7
      Td = 15

Name: PID
Parameterization:
  'PID'
  Number of free coefficients: 3
  Use "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using PROCEST on time domain data "mydata".
Fit to estimation data: 92.72%
FPE: 98.52, MSE: 98.5
```

Ecuación que describe el modelo de la planta.

$$G(s) = \frac{7.4817 * e^{-15s}}{1 + 3328.7s} \quad (18)$$

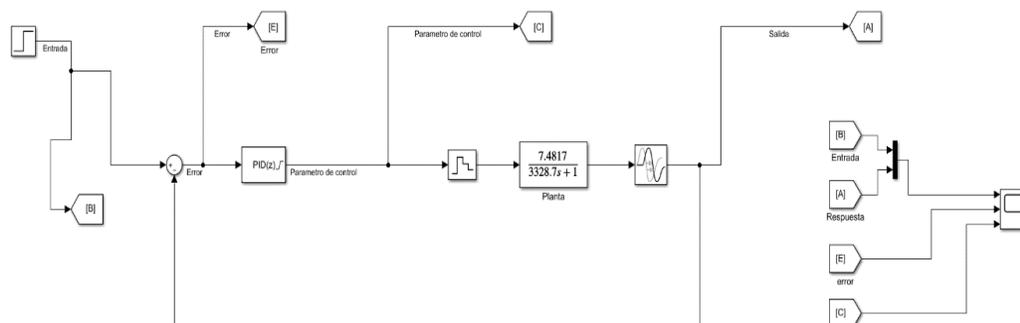
3.7.2. Controlador PID

Existen diferentes métodos para poder realizar la sintonización de un PID, el más conocido es la curva de reacción propuesta por Ziegler-Nichols, que también se pueden utilizar en diseños de controladores digitales y para esto se toma como punto de partida la ecuación de un controlador PID análogo.

Diagrama de bloque en lazo cerrado con la planta obtenida se muestra en la figura 62.

Figura 62

Diagrama de Bloques



Nota. En este diagrama de bloques se encuentra la planta $G(s)$ con su respectivo retardo, el controlador está en tiempo discreto y todo el sistema tiene un tiempo de muestreo de 0.5 segundos.

Se detalla la ecuación de un PID análogo para poder partir a la ecuación en diferencias de un PID discreto que es el que será implementado en la simulación.

$$u(t) = k_c e(t) + \frac{k_c}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt + k_c \tau_d \frac{de(t)}{dt} \quad (19)$$

Conociendo los valores de los siguientes parámetros:

$$k_p = k_c \quad (20)$$

$$k_i = \frac{k_c}{\tau_i} \quad (21)$$

$$k_d = k_c \tau_d \quad (22)$$

El modelo de un controlador PID discreto se detalla a continuación con una ecuación de diferencias por discretización, reemplazando la parte derivativa por la diferencia de dos puntos y la parte integral mediante la sumatoria trapezoidal.

$$u(k) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) + u(k-1) \quad (23)$$

Donde:

$$q_0 = k_c \left[1 + \frac{T}{2\tau_i} + \frac{\tau_d}{T} \right] = k_p + \frac{Tk_i}{2} + \frac{k_d}{T} \quad (24)$$

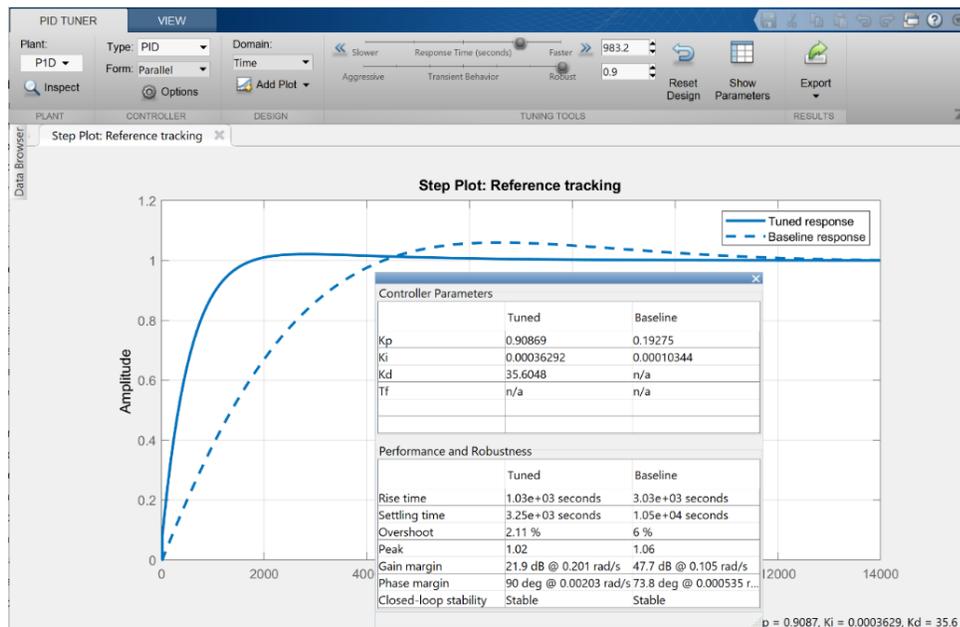
$$q_1 = -k_c \left[1 - \frac{T}{2\tau_i} + \frac{2\tau_d}{T} \right] = -k_p - \frac{Tk_i}{2} + \frac{2k_d}{T} \quad (25)$$

$$q_2 = \frac{k_d}{T} \quad (26)$$

Después de obtener la ecuación en diferencias y teniendo los parámetros q_0, q_1, q_2 en función de la constante proporcional, integral y derivativa. Se procede a utilizar el PID-tuner herramienta de Matlab para poder sintonizar el PID como se muestra en la figura 63, dicha herramienta entrega las constantes k_p, k_i, k_d con las que ya se puede poner en servicio el lazo de control.

Figura 63

Diseño del Controlador PID



Nota. Aquí se muestran las constantes sintonizadas y las recomendadas por el Software Matlab

La curva base es representada por las líneas entre cortadas y la diseñada es representada por la línea continua, como se puede observar los tiempos son menores en la diseñada ya que se escoge que el controlador sea rápido y robusto obteniendo así un tiempo de establecimiento de 55 minutos, lo cual es muy satisfactorio porque el proceso que se está operando es lento.

Cada constante del PID hace algo en específico en el sistema, la constante k_p modifica el parámetro de control en forma proporcional al error, la k_i mueve el parámetro de control a una velocidad proporcional a la desviación del error en cuanto a la constante k_d modifica el parámetro de control en forma proporcional a la velocidad de cambio de la desviación del error.

3.7.3. Controlador ON/OFF

Se toma en cuenta el análisis de este tipo de control porque responde muy bien para procesos lentos, y la mayoría de los controladores de temperatura funcionan con un simple control on/off o por ciclo integral. Teniendo en cuenta el elemento de control final, en este proyecto no presentaría ningún problema que se produzcan cambios rápidos de conmutación ya que el dispositivo es de conmutación rápida.

3.7.4. Simulación

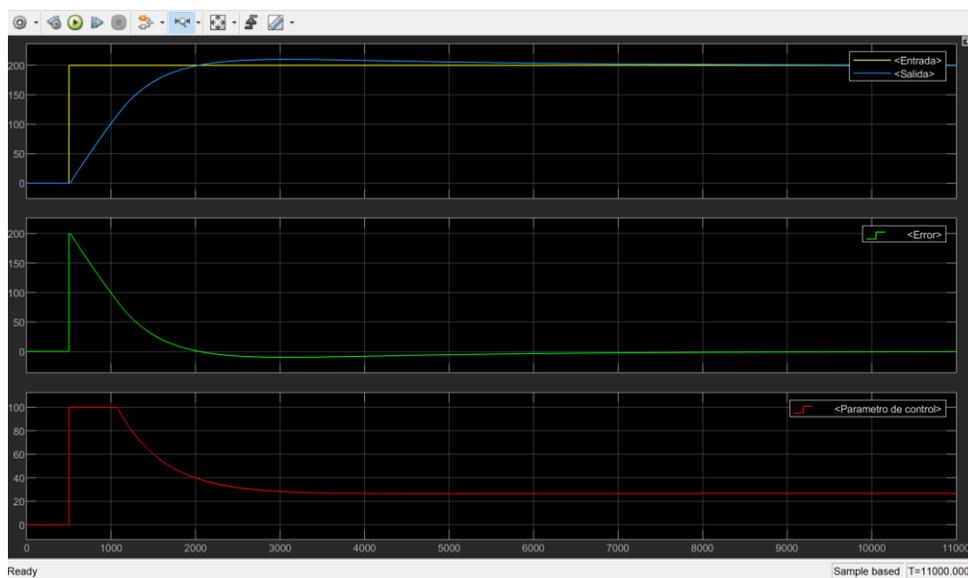
Se presentan la respuesta del sistema implementando el controlador PID discreto diseñado anteriormente, teniendo en cuenta que un simple PID no actúa bien con un proceso lento, ya que, no toma en cuenta el tiempo muerto que tiene el sistema.

En la figura 64 se visualiza la respuesta del sistema ante un Set-Point de 200°C se observa que el tiempo de subida y el tiempo de asentamiento es muy grande y por lo tanto demora para llegar a dicho Set-Point, el parámetro de control se envía a su máxima capacidad que sería el 100% de potencia que se le puede entregar a la carga, una vez que llega al valor deseado, el sistema tiene un pequeño sobre impulso pero al

final el error tiende a cero que es el objetivo a cumplir en cualquier sistema en lazo cerrado.

Figura 64

Simulación



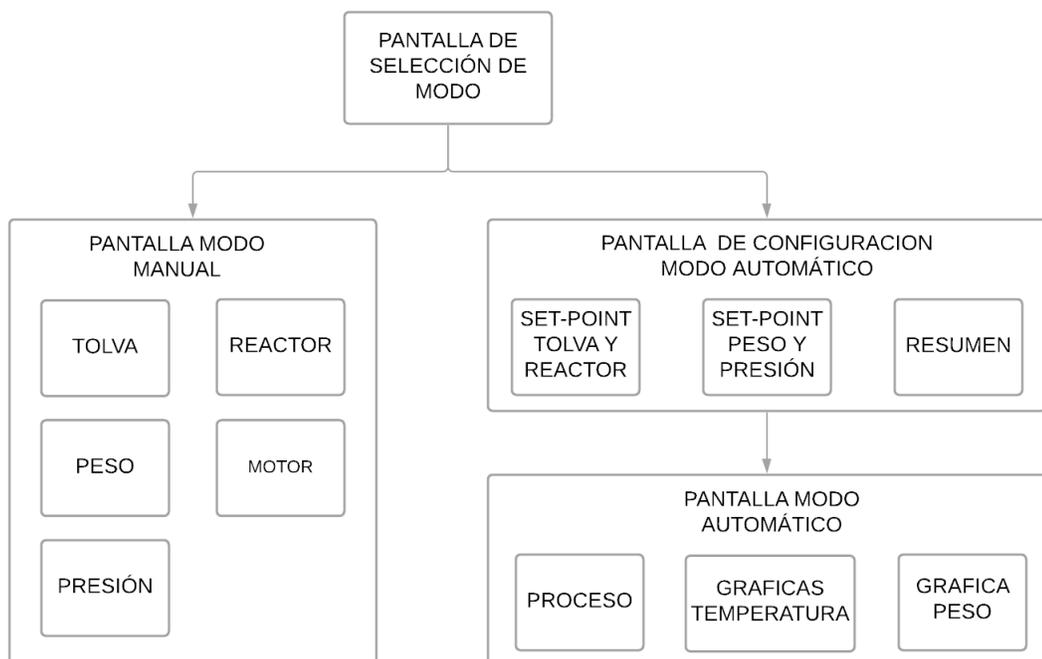
Nota. Graficas obtenidas del software Simulink

3.8. Diseño del interfaz humano máquina

El sistema cuenta con un HMI en el cual se podrá monitorear el proceso automático al establecer los Set-Point del algoritmo de control, pero también tendrá una pantalla de accionamiento manual en la cual se podrá verificar el correcto funcionamiento de los actuadores y la medición de los sensores.

3.8.1. Estructura del HMI

En la figura 65 se presenta un esquema con la estructura del HMI, al iniciar el sistema, lo primero que se visualizará en la pantalla es la selección de modo y desde este apartado se puede seleccionar acceder al modo manual y modo automático.

Figura 65*Estructura del HMI*

Nota. Un mapa que especifica la ubicación de cada pantalla.

3.8.2. Pantalla de selección de modo

Al iniciar el sistema, la primera pantalla que se presenta es de selección de modo de trabajo, en donde se elige mediante dos botones si se desea arrancar con el modo manual o con el modo automático y también tiene un botón para apagar el sistema, esto se puede visualizar en la figura 66.

Figura 66

Pantalla modo de operación



Nota. En este modo se presentan tres botones para direccionar a uno u otro modo y para apagar el sistema.

3.8.3. Pantalla modo manual

En la pantalla del modo manual como se muestra en la figura 67, se presenta un menú lateral con el cual se puede abrir las diferentes ventanas para controlar los actuadores y ver la señal de los sensores y también se ubica en la parte inferior un botón para regresar a la pantalla de selección de modo de trabajo. Con el botón “TOLVA” se muestra la ventana en donde se puede modificar la potencia que se entrega a la resistencia eléctrica a través de un deslizador en la parte izquierda, mientras que en la parte derecha se visualiza la temperatura del sensor que está vinculado directamente a la resistencia, de la misma forma está desarrollada la ventana “REACTOR”.

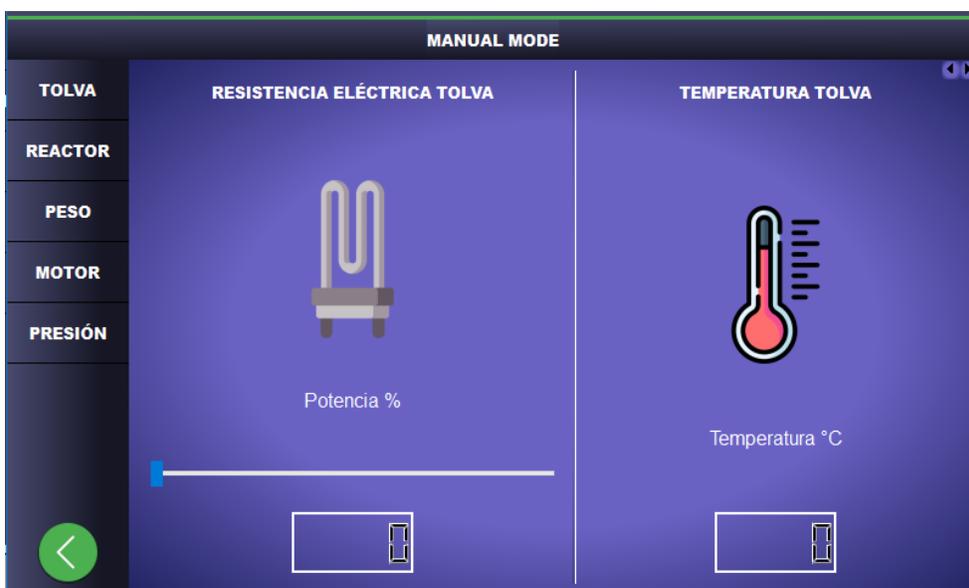
En la ventana “MOTOR” se puede modificar el valor PWM entregado al motor y se puede visualizar la velocidad con la que gira el eje.

En la ventana “PESO” se observa la medición del peso en el reactor, también se puede elegir el porcentaje de apertura de la válvula que alimenta el reactor con un deslizador.

En la ventana “PRESIÓN” se puede monitorear el valor de los dos transmisores de presión y se puede activar la electroválvula mediante un botón.

Figura 67

Pantalla modo manual



Nota. Se presenta cada actuador con su respectivo sensor.

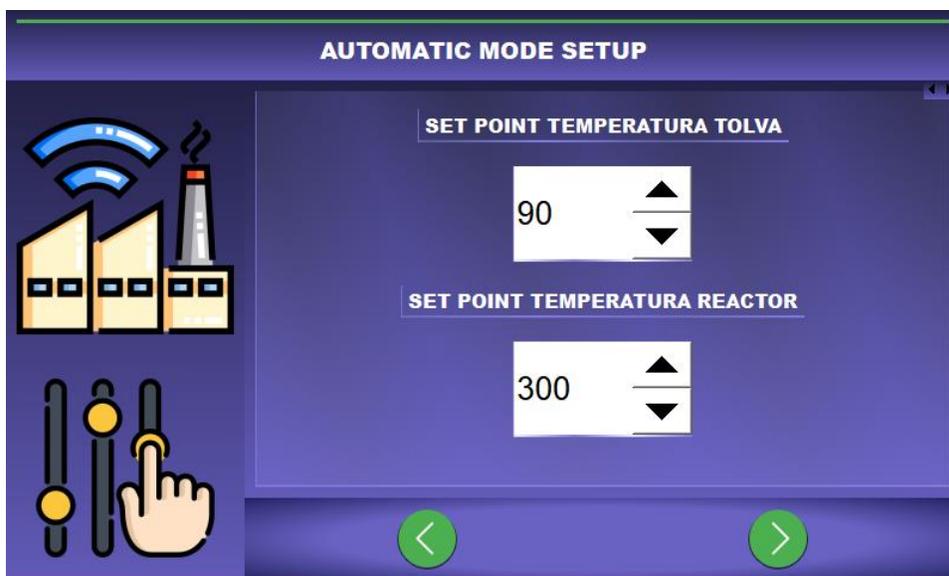
3.8.4. Pantalla de configuración del modo automático

Al seleccionar el modo automático se presentará una pantalla de configuración en la cual se establecerán los Set-Point de las variables del proceso como la

temperatura de la tolva, temperatura del reactor, peso y presión, como se puede visualizar en la figura 68.

Figura 68

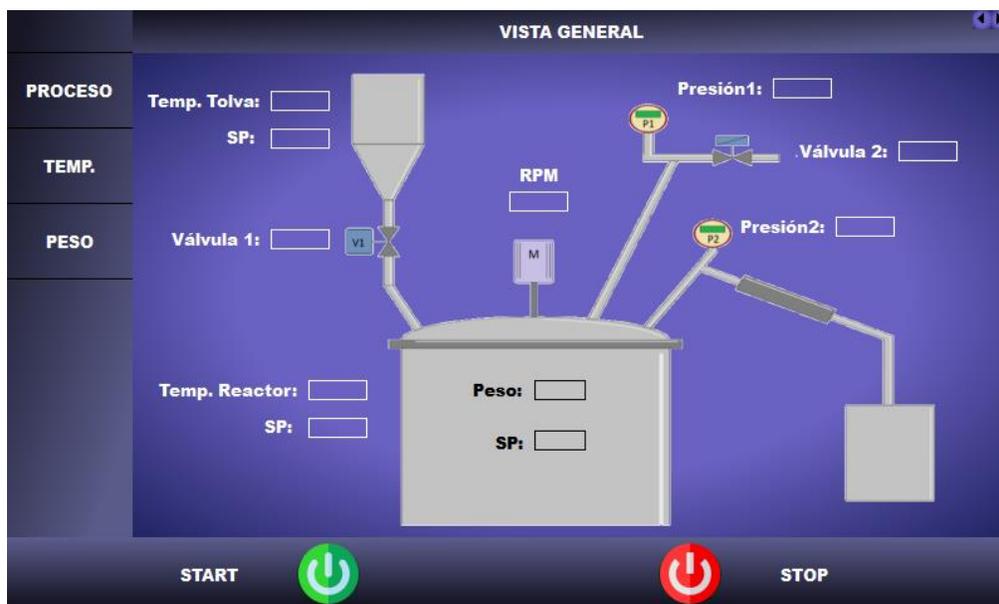
Configuración modo automático



Nota. Pantalla de ajuste donde se insertan los parámetros de operación.

3.8.5. Pantalla modo automático

En la pantalla modo automático se mostrará la vista general del proceso, esto se puede visualizar en la figura 69, de forma similar al modo manual, con el menú lateral se podrá desplazar entra las ventanas de las gráficas y del proceso. En las gráficas se muestran las variables que se requieren controlar para poder observar su evolución con el tiempo, dado que, las gráficas son en tiempo real, con una librería externa que permite montarla sobre un lienzo PyQt5.

Figura 69*Pantalla principal modo automático*

Nota. Aquí se muestran todos los datos en tiempo real de cada actuador y sensor esto permite tener una visualización general de todo el proceso.

El diseño de las pantallas se realizó con el software QT Designer, el cual posee las herramientas necesarias para insertar los elementos que se podrán visualizar en el HMI, tales como los campos de texto, pulsadores, deslizadores y otros elementos para el ingreso de datos. Los colores fueron seleccionados para que no canse a la vista del operador y que resalten con el texto y los demás elementos presentes en cada pantalla.

El HMI está pensado para que sea fácil e intuitivo de manipular, las pantallas contienen paneles laterales que facilitan el desplazamiento entre las pantallas y éstas a su vez contienen gráficos, botones y textos de los elementos físicos que se están controlando.

3.9. Diseño de la página web para la supervisión de los datos (IoT)

Para la visualización de los datos del proceso con IoT en una interfaz web se puede hacer de dos formas generales. La primera forma es adquirir los servicios de alguna empresa proveedora de servidores en la nube y alojar en el servidor la información que se visualizará en la página web, adicionalmente se debe tener conocimiento de programación en lenguajes como http, Php, JavaScript, entre otros. La otra opción es emplear una plataforma de IoT que tiene las herramientas necesarias para realizar la comunicación con dispositivos conectados a una red internet con distintos protocolos y también ofrecen elementos de gráficos que facilitan la visualización de los datos.

En la actualidad existe una gran cantidad de plataformas IoT, plataformas pagadas y otras open-source, las plataformas pagadas ofrecen una gran cantidad de herramientas, posibilidad de conectar múltiples dispositivos y gran cantidad de almacenamiento con análisis de datos estadístico, lo cual sirve para empresas industriales grandes con fines de lucro. Las plataformas open-source ofrecen los mismos servicios, pero de manera limitada, ya que se pueden conectar pocos dispositivos, la cantidad de almacenamiento es menor y no posee análisis de datos estadístico de la información que se aloja en sus servidores; sin embargo, se adapta mejor a la necesidad del sistema ya que no se manejarán grandes cantidades de información a comparación a una empresa y no se conectarán múltiples dispositivos.

Se opta por usar la plataforma Thingsboard.io para diseñar e implementar todo el sistema IoT, ya que permite conectarse a través del protocolo MQTT y además su configuración es sencilla; también ofrece un modo demo para tiempo ilimitado.

3.9.1. Conexión al broker MQTT

La plataforma Thingsboard.io permite la comunicación con los dispositivos mediante protocolo CoAP, MQTT y HTTP. Debido a que la red de comunicación del

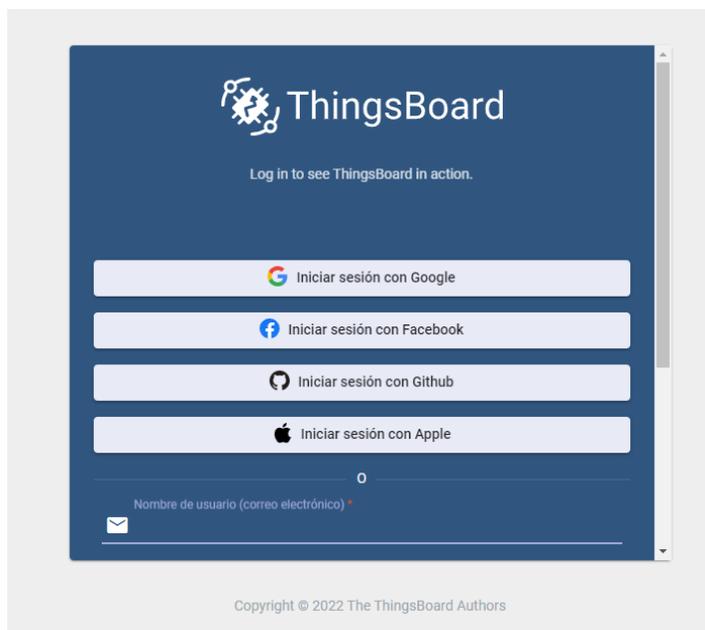
sistema está basada en el protocolo MQTT, se empleará este mismo medio para enviar los datos a la plataforma Thingsboard por la facilidad de implementación.

El primer paso es crear una cuenta ingresando a:

“https://demo.thingsboard.io/login”, como se observa en la figura 70.

Figura 70

Inicio de sesión en Thingsboard



Nota. Se puede iniciar sesión a través de las diferentes formas que se visualizan en la figura.

Dentro de la página se encuentra un panel lateral, en la sección “dispositivos” se agrega un nuevo dispositivo, se le da un nombre y sin cambiar la configuración por defecto, se da en “agregar”, como se muestra en la figura 71.

Figura 71

Creación de nuevo dispositivo

Nota. Se debe dejar el recuadro “es gateway” vacío.

Una vez creado, se podrá visualizar el dispositivo “reactor” en la lista de todos los elementos disponibles, figura 72, y es necesario dar click en el recuadro “Público” para que los datos se puedan ver dentro del panel gráfico que se desarrollará posteriormente, de otra forma solo se visualizarán los elementos gráficos, pero sin los datos recibidos al dispositivo.

Figura 72

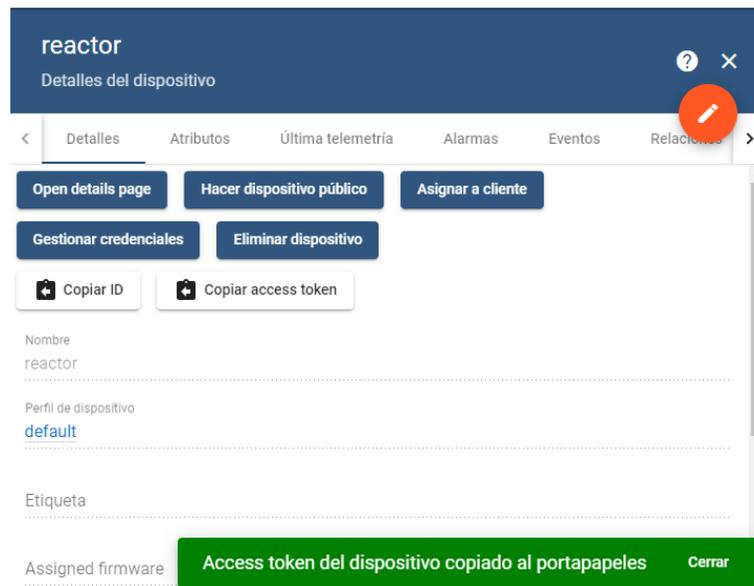
Configuración del dispositivo creado

Nombre	Perfil de dispositivo	Etiqueta	Cliente	Público	Es gateway	
reactor	default		Public	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	    
Charging Port 2	Charging port		Demo Customer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	    
Charging Port 1	Charging port		Demo Customer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	    
Air Quality Sensor T1	Air Quality Sensor			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	    

Al agregar un nuevo dispositivo, se creará un token de acceso que es necesario para que los datos se transmitan al dispositivo creado. Para obtenerlo se da click en “reactor” y posteriormente en “Copiar access token” como se visualiza en la figura 73.

Figura 73

Obtención del "Access token"



Nota. Se puede añadir etiqueta del dispositivo agregado de ser necesario.

Con el “Access token” conocido se procede a crear un cliente MQTT para enviar los datos al dispositivo creado dentro de la plataforma. El cliente debe tener la siguiente configuración de conexión:

- Username = Access token
- password = "" (no se usa, se deja vacío)
- broker = demo.thingsboard.io
- Puerto: 8333

El tema al que se publicarán los datos ya viene dado por la página de Thingsboard y se muestra de la siguiente forma:

- v1/devices/me/telemetry

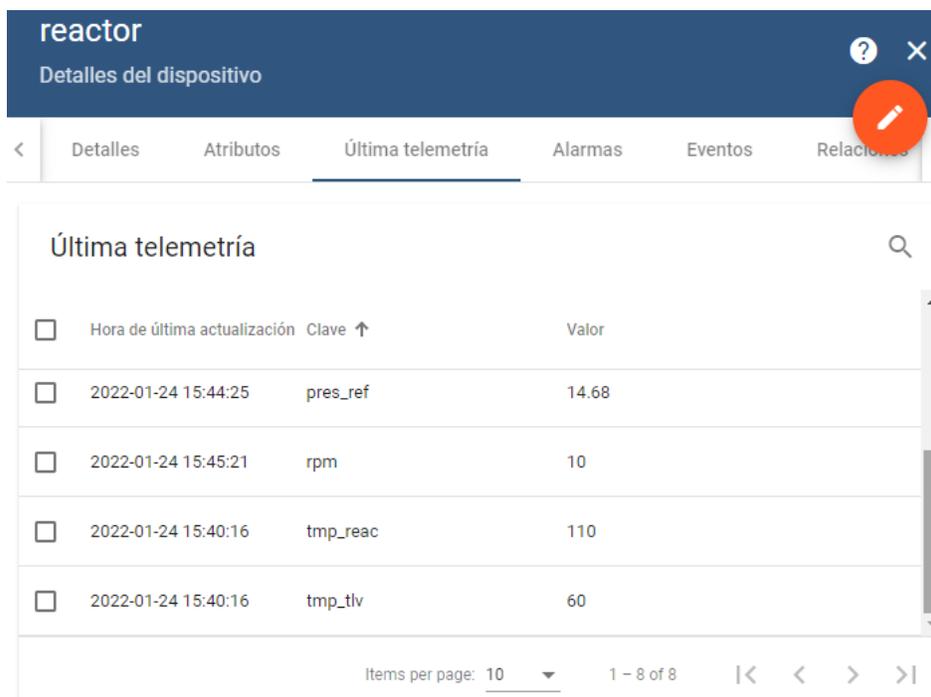
A diferencia de un broker MQTT convencional que permite crear múltiples topics para recibir la información, dentro de la plataforma se utiliza únicamente un tema general y los datos de las distintas variables se enviarán como un solo mensaje bajo formato JSON para facilitar el intercambio de información mediante la serialización y deserialización de los datos, estos deben contener un cadena de caracteres que representa el nombre de la variable seguido por el valor numérico o booleano de la variable. A continuación, se muestra el mensaje en formato JSON para enviar el valor de temperatura de la tolva, temperatura del reactor, presión del reactor, presión de la columna de reflujo, peso y revoluciones por minuto respectivamente.

- `{"tmp_tlv":60,"tmp_reac":110,"pres_reac":14.71,"pres_ref":14.78,"peso":0,"rpm":40}`

Al enviar el mensaje al dispositivo “reactor” enseguida se podrá visualizar en la página los datos que llegan como se observa en la figura 74.

Figura 74

Recepción de datos desde el cliente MQTT



<input type="checkbox"/>	Hora de última actualización	Clave ↑	Valor
<input type="checkbox"/>	2022-01-24 15:44:25	pres_ref	14.68
<input type="checkbox"/>	2022-01-24 15:45:21	rpm	10
<input type="checkbox"/>	2022-01-24 15:40:16	tmp_reac	110
<input type="checkbox"/>	2022-01-24 15:40:16	tmp_tlv	60

Items per page: 10 1 - 8 of 8 |< < > >|

Nota. Aquí se muestran todos los datos en tiempo real de las variables que llegan a la plataforma.

3.9.2. Creación de la Dashboard

A seleccionar cada variable, aparece la opción de “agregar a widget” y se podrá seleccionar entre diferentes estilos de indicadores gráficos para que se muestren los valores de las variables. Para los valores de temperatura se emplea un indicador digital vertical como se muestra en la figura 75, para mostrar el valor del peso se usará un indicador semicircular, como en la figura 76, mientras que para los valores de presión y velocidad del agitador se empleará otro indicador semicircular, pero con diseño distinto como se puede ver en la figura 77.

Figura 75

Indicador digital para la temperatura



Nota. El rango que viene por defecto se puede cambiar al igual que los colores del indicador.

Figura 76

Indicador digital para el peso



Nota. Al configurar el indicador se puede añadir texto para describir la variable que está mostrando que será el peso.

Figura 77

Indicador digital para la presión y rpm



Nota. Se puede configurar el widget para cambiar su aspecto, rangos numéricos y los nombres que se muestran.

Una vez configurados todos los indicadores se podrá visualizar de mejor manera los valores para cada variable según el rango máximo y mínimo que puede alcanzar. También se ubicaron dentro del panel principal para que se puedan observar fácilmente todos los elementos dentro de la página web. La figura 78 muestra el diseño final de la página con todos los indicadores del proceso.

Figura 78

Diseño final de la página IoT



Nota. La visualización de la página varía en dispositivos móviles ya que se adapta a las dimensiones de la pantalla.

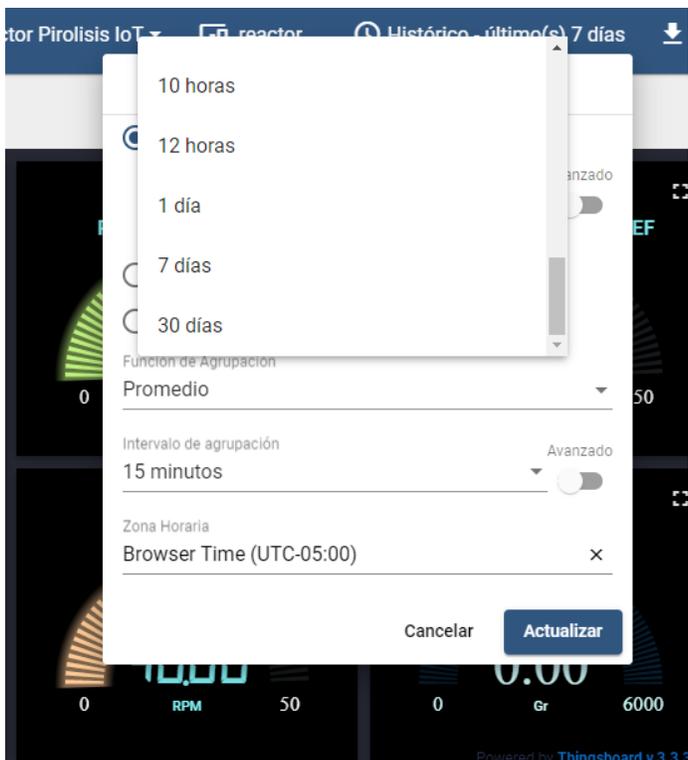
3.9.3. Funciones

La función principal de la página web es aplicar internet de las cosas en el proceso de pirólisis para poder monitorear las variables del sistema desde cualquier equipo que disponga conexión a internet y acceso a un navegador web.

Los valores del proceso se pueden observar en tiempo real mientras se envían datos desde la Raspberry Pi 4 a la plataforma y también se pueden visualizar datos de la gráfica de temperatura de proceso previos hasta un máximo de 30 días, como se muestra en la figura 79.

Figura 79

Histórico de datos de temperatura

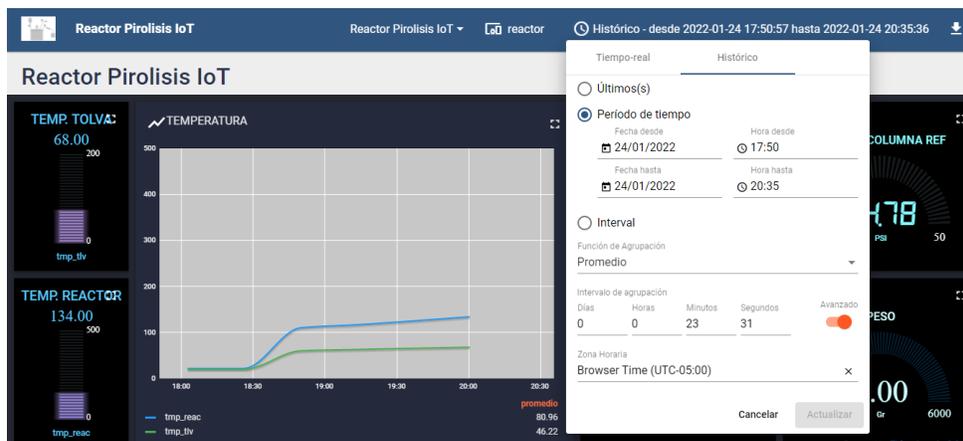


Nota. Los valores de datos históricos van desde 1 segundo hasta 30 días.

Adicionalmente se puede seleccionar un rango de tiempo específico en el cual visualizar las gráficas. La figura 67 muestra cómo se configura esta opción.

Figura 80

Datos históricos en un rango específico de tiempo



Nota. Se puede seleccionar la zona horaria dependiendo la ubicación en que se encuentra.

Adicionalmente a la visualización de las variables del sistema en la página web, el concepto de IoT comprende también avisos o notificaciones del proceso sin necesidad de estar pendiente a los datos en tiempo real. Para esto se recurre a servicio de mensajería e-mail que permitirá enviar mensajes a correos electrónicos de datos específicos sobre el proceso. Para que el mensaje llegue como notificación, el dispositivo debe estar configurado con el correo electrónico al que se enviará la información.

Esta función se implementa en el controlador central empleando SMTP que es un protocolo simple de transferencia de correos mediante las librerías disponibles para Python para facilitar el proceso.

Capítulo IV

4. Implementación del sistema SCADA

4.1. Programación de la unidad de control

En esta sección se tiene como objetivo explicar los elementos usados para implementar la programación de las tarjetas controladoras. Se utiliza el lenguaje de programación C para programar las dos tarjetas microcontroladoras, puesto que, este lenguaje es el más adecuado para tener acción directa con la parte física, es decir, todo el hardware del sistema. Para la parte de la Raspberry Pi 4, el cual es un microprocesador se utiliza el lenguaje Python que tiene la característica de ser multiparadigma.

4.1.1. Implementación para el cliente uno y dos

Para programar estos dos clientes “ESP32” se usan tres librerías específicas la primera es “Wifi.h” la cual permite establecer una conexión inalámbrica con cualquier router físico que este a su alcance siempre y cuando se ingrese la contraseña de la red, la segunda librería es “PubSubClient.h” que sirve para establecer comunicación con el broker “Mosquitto” el cual utiliza el protocolo de comunicación “MQTT”, la tercera es “ESPE32TimerInterrupt.h” que ofrece la facilidad de manejar “Timers”, es decir, interrupción por hardware para así poder implementar código sin retrasos, ya que, la función de los “Timers” es ejecutar tareas cada que se cumpla el tiempo establecido pero mientras eso ocurre, el programa principal se sigue ejecutando.

Para poder usar la placa ESP32 es necesario conocer la distribución de sus pines y cuales están disponibles para la aplicación que se requiere, aunque se puede definir las propiedades de los terminales mediante software, existen pines asignados por defecto que solo sirven para funciones específicas. Tomando en cuenta esta aclaración en la tabla 16 se muestran los pines del cliente uno utilizados y sobre que elemento de control final ejercerán acción.

Tabla 16*GPIO utilizados en cliente uno*

Pin Físico ESP32	Descripción
GPIO 18	Envía la señal de PWM hacía el circuito de activación para luego enviar la señal al puente H
GPIO 5	Lee la señal digital del enconder, se usa como una interrupción por hardware.
GPIO 17	Lee la señal del Botón de paro, usando una configuración Pull-Down.
GPIO 23	Lee la señal contraria al Botón de paro, usando una configuración Pull-Down
GPIO 19	Envía la señal de activación hacía el circuito acondicionador para luego pasar a encender o apagar la luz piloto verde.
GPIO 26	Envía la señal de activación hacía el circuito acondicionador para luego pasar a encender o apagar la luz piloto roja.
GPIO 32	Envía la señal de activación hacía el circuito acondicionar para encender o apagar el pin que permite abrir la válvula motorizada
GPIO 33	Envía la señal de activación hacía el circuito acondicionador para encender o apagar el pin que permite cerrar la válvula motorizada.
GPIO 25	Envía la señal de activación hacía el circuito acondicionador para activar o desactivar la electroválvula On/Off.

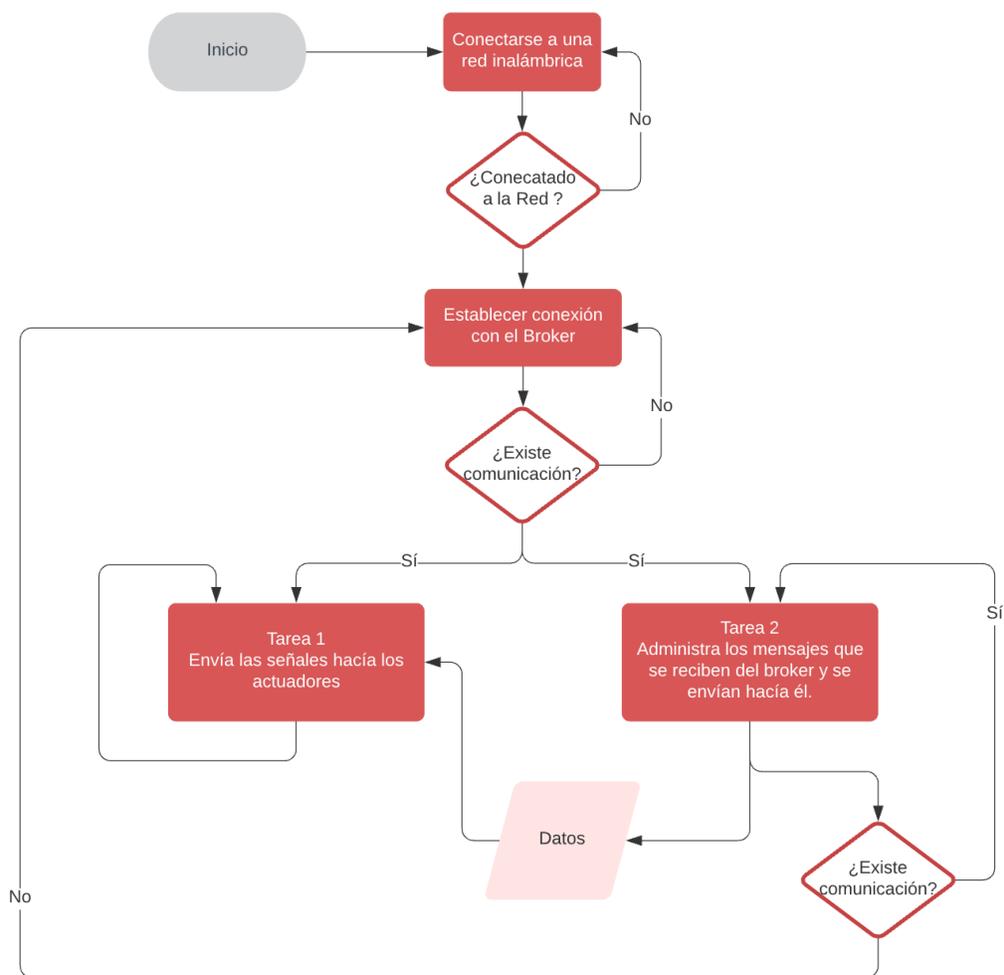
Nota. Descripción de los pines físicos utilizados para el cliente uno.

Para la implementación de la programación se usan los RTOS que significa sistema operativo en tiempo real. Es muy necesario, teniendo en cuenta que se necesita ejecutar varias tareas con retardos mínimos, como es mantener la conexión Wi-Fi, conectarse al broker para la comunicación con el servidor y ejecutar el algoritmo para activar la salida hacía los actuadores. Entonces un RTOS tiene la capacidad de ejecutar tareas de forma paralela pero siempre y cuando el microcontrolador usado lo admita, el ESP32 es una placa con unas características altas, la más relevante es que su procesador posee dos núcleos lo cual permite hacer un buen uso de los RTOS. Las

tareas que se ejecutarán en el primer núcleo serán, conexión Wi-Fi, y establecer la comunicación con el broker para poder administrar bien los mensajes que llegan hacia el ESP32, el segundo núcleo ejecutará las líneas de código para los actuadores; es decir, en este núcleo se usan todos los pines declarados en la tabla 10. La figura 81 muestra un diagrama de flujo de la implementación de la programación para este primer cliente.

Figura 81

Diagrama de flujo para el cliente Uno y Dos



Nota. Explicación gráfica de la programación para los dos clientes ESP32

Para la conexión al broker Mosquitto previamente instalado en la Raspberry Pi 4 se puede realizar mediante un usuario y una contraseña que se configurarán primero en los archivos donde está instalado el Broker Mosquitto, también se puede establecer conexión solo con la dirección IP del servidor que en este caso sería la dirección IP de la Raspberry Pi 4, en esta aplicación se utiliza la dirección IP del servidor que previamente debe estar dentro del ESP32 para establecer conexión.

Configuración que se necesita en el cliente tres para establecer comunicación con el broker se muestra en la figura 82.

Figura 82

Configuración cliente tres

```
def __init__(self, srv_address, prt):
    self.server_address = srv_address
    self.port = prt
    # Topics para leer sensores
    self.lisTopSn = ["planta/reactor/Temp", "planta/tolva/Temp2", "planta/reactor/Mass", "planta/reactor/Pres1",
                    "planta/reflujo/Pres2", "planta/reactor/rpm"]
    # Topics para enviar a los actuadores
    self.lisTopAct = ["planta/tolva/val_Pro", "planta/tolva/res_elec", "planta/reactor/resi_elec",
                     "planta/reactor/motor", "planta/reactor/val_alv"]
    self.clt_HMI = mqtt.Client()
    self.clt_HMI.on_connect = self.WhenConnect

def WhenConnect(self, client, userdata, flags, rc):
    if rc == 0:
        # print("Se ha conectado al servidor")
        self.clt_HMI.subscribe(
            [(self.lisTopSn[0], 0), (self.lisTopSn[1], 0), (self.lisTopSn[2], 0), (self.lisTopSn[3], 0),
             (self.lisTopSn[4], 0), (self.lisTopSn[5], 0)])
    # else:
    # print("Error en conexion")

def conectar(self):
    logging.info("Se ha conectado al servidor")
    self.clt_HMI.connect(self.server_address, port=self.port)
    self.clt_HMI.loop_start()

def desconectar(self):
    logging.info("Se ha desconectado del servidor")
    self.clt_HMI.disconnect()
    self.clt_HMI.loop_stop()

def publicar(self, valor, pos):
    self.clt_HMI.publish(self.lisTopAct[pos], valor)

if __name__ == "__main__":
    objMqtt = cmnc_server("127.0.0.1", 1883) # 10.2.129.83
```

Para este cliente se define la IP local porque el broker Mosquitto se está ejecutando en la misma Raspberry Pi 4 (maestro), además que se puede visualizar cómo se definen los topics dentro del código.

El cliente uno y dos (esclavos) tienen la misma configuración para establecer conexión con el broker, los parámetros requeridos se muestran en la figura 83.

Figura 83

Establecer parámetros

```
//variables para establecer conexion
const char* ssid = "ESPE"; //"Carlos"; //"Deapar"; //PSmart 2019
const char* password = ""; //"+++/adgjl--++"; //"12345678"; //
const char* mqttServer = "10.2.129.73"; //"192.168.43.167"; //
const int mqttPort = 1883;
```

Para la programación del cliente dos, se utiliza el mismo diagrama de flujo de la figura 81, este cliente se usa para activar las dos resistencias eléctricas que se tienen en la planta. Aquí se utilizan interrupciones por software y por hardware, ya que, se necesita leer el cruce por cero de la onda sinusoidal a 110Vac o 220Vac, con ello se puede sincronizar el disparo que se realiza con un tiempo establecido cada vez que la onda cruce por cero. Este tiempo se obtiene dividiendo la frecuencia de la red para dos, lo que resulta 8.333 ms, es decir, que puede escoger un tiempo desde 0 hasta 8.333 ms para disparar el Triac, que dejará pasar una porción de la onda sinusoidal de entrada. En la tabla 17 se muestra los GPIOs utilizados para este cliente.

Tabla 17*GPIO utilizados en cliente dos*

Pin Físico ESP32	Descripción
GPIO 23	Lee la señal de alto cada vez que la onda cruza por cero, este pin se lo configura como una interrupción por hardware.
GPIO 21	Envía una señal de alto hacia el Triac del reactor con lo cual se activará y dejará pasar la Proción de la onda.
GPIO 22	Envía una señal de alto hacia el Triac de la tolva con lo cual se activará y dejará pasar la Proción de la onda.
GPIO 19	Lee la señal del Botón de paro, usando una configuración Pull-Down.
GPIO 18	Lee la señal contraria al Botón de paro, usando una configuración Pull-Down.

Nota. Descripción de los pines físicos utilizados para el cliente dos

4.1.2. Implementación dentro de la Raspberry Pi 4

Para usar este microprocesador primero se instala el sistema operativo “Raspbian” el cual es una distribución Linux basado en Debian, después de ello se instala la librería PyQt5 que ayudará con la ejecución gráfica del HMI, dentro del programa principal se corre el HMI y ahí mismo se utiliza el concepto de hilos para poder correr tareas paralelas al hilo principal. El hilo principal se encargará de ejecutar toda la gestión gráfica y los eventos que ocurren dentro de la pantalla, el hilo secundario se encarga de ejecutar el programa para leer todos los sensores que se tienen presentes en la planta y a su vez implementar el algoritmo de control.

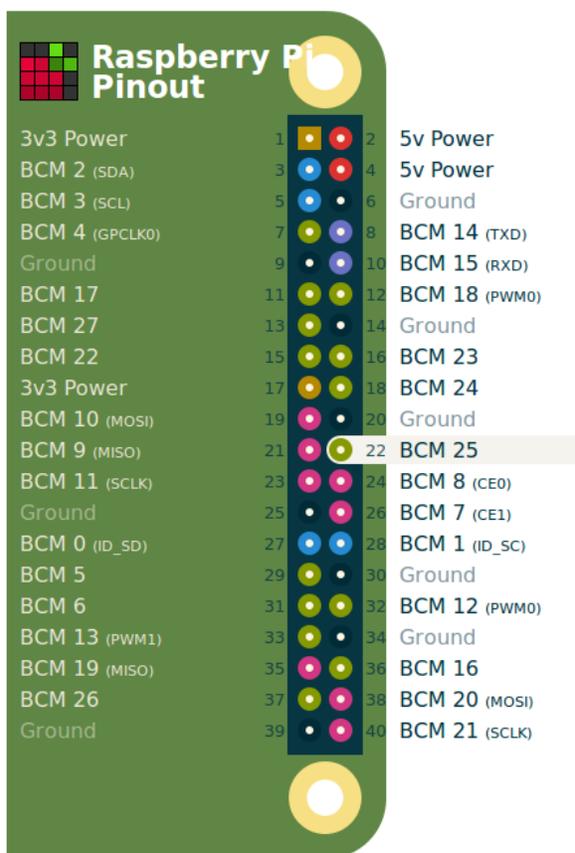
También se podrá visualizar los datos en tiempo real y sus respectivas gráficas, esto se realiza mediante la librería “PyQtGraph”, la cual permite crear lienzos sobre un Widget vacío y ahí poder incrustar la gráfica de los datos respecto al tiempo.

En cuanto a la lectura de datos se establece un período de muestro de 500ms; es decir, que cada 0.5 segundo se tomará lectura nuevamente de todos los sensores presente en el proceso, la Raspberry Pi 4 solo cuenta con pines de I/O digitales y otros pines dedicados para comunicación como es I2C, SPI y UART.

Hay que tener en cuenta la numeración de los pines de la Raspberry Pi 4 existen dos tipos, la numeración de los pines que se encuentran físicamente en la placa, se conoce como “Board” y la numeración de los pines BCM, esto se muestra de una forma gráfica en la figura 84.

Figura 84

GPIO de la Raspberry Pi 4



Nota. Tomado de ChitoRaspberryPi [Imagen], por (Avalos, 2017). CC BY 2.0

Entonces en el proceso se tienen diferentes sensores, pero para todos se usan acondicionadores; por lo tanto, para leer dichos sensores se implementa interfaces de comunicación; en la tabla 18 se muestran los pines utilizados y una breve descripción.

Tabla 18

BCM Utilizados

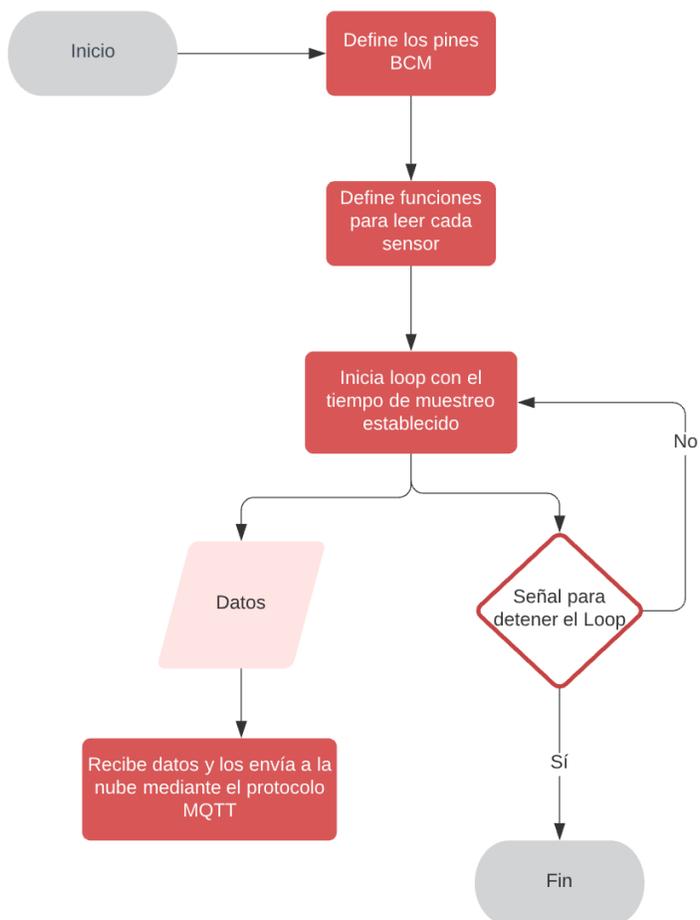
Pin BCM	Descripción
BCM 5, BCM 6	Estos pines se usan para leer el módulo HX711 que utiliza la comunicación serial I2C
BCM 2, BCM 3	Estos pines se usan para leer los datos del ADS1115 que utiliza la comunicación I2C y se pueden leer hasta 4 señales analógicas.
BCM 22, BCM 17, BCM 27	Pines para leer el módulo max6675 que ayuda a la lectura de la termocupla tipo k que está en el reactor, esto se hace mediante comunicación SPI.
BCM 8, BCM 11, BCM 9	Permite leer el otro módulo max6675 para la termocupla de la tolva.

Nota. Descripción de los pines usados en el cliente 3

El código implementado para la lectura de datos se explica con un diagrama de flujo en la figura 85, este algoritmo se implementa en un hilo secundario dentro del programa principal donde se ejecuta el HMI y aquí mismo se introduce el algoritmo de control para mantener la temperatura al Set-Point establecido.

Figura 85

Diagrama de flujo para la lectura de datos



Nota. Describe el proceso de lectura de los sensores y a su vez el envío de datos hacia la nube mediante el protocolo MQTT.

4.2. Implementación de algoritmos de control para el reactor térmico

Para proceder con la operación del reactor, se utiliza rampas de calentamiento, es decir, que por un tiempo se envía 100% de potencia a la resistencia eléctrica y cuando transcurre un tiempo establecido se envía 0% de potencia; esto se realiza por la siguiente razón: se necesita una velocidad constante de calentamiento, con ello se

puede establecer que la temperatura tenga un aumento gradual sin generar sobre impulso debido a la inercia del calor.

Una vez que la temperatura esté a 10°C de diferencia de llegar al Set-Point se activa el algoritmo de control, este valor ya se estableció con diferentes pruebas. Para la implementación del PID discreto se estableció la siguiente ecuación, donde $u(k)$ es el parámetro de control; es decir, el valor de salida del controlador y el que ingresa a la planta teniendo claro que este valor hay que saturarlo; en otras palabras, si envía un valor mayor a 100 se mantenga en 100 y si envía un valor menor que cero se establecer la variable en cero, ya que de 0-100 es lo que recibiría el elemento de control final para poder activar la resistencia. Se utilizan las muestras del error actual y dos muestras anteriores al error actual entonces esos datos se guardan en el algoritmo y se van actualizando mientras el tiempo transcurre. Las constantes q_0, q_1, q_2 se explicaron en el capítulo anterior; para esta implementación solo se debe obtener el valor final de cada constante y establecerlas en el algoritmo de control.

$$u(k) = q_0e(k) + q_1e(k - 1) + q_2e(k - 2) + u(k - 1) \quad (27)$$

Considerando que para procesos lentos un controlador on/off funciona de manera eficiente, se opta por implementar este tipo de control; se establece enviar el parámetro de control a cero cuando la temperatura iguale en valor a el Set-Point, y se determina enviar un valor de activación a la mitad de la potencia, esto ocurrirá cuando exista una diferencia de 4°C entre la temperatura y el Set-Point.

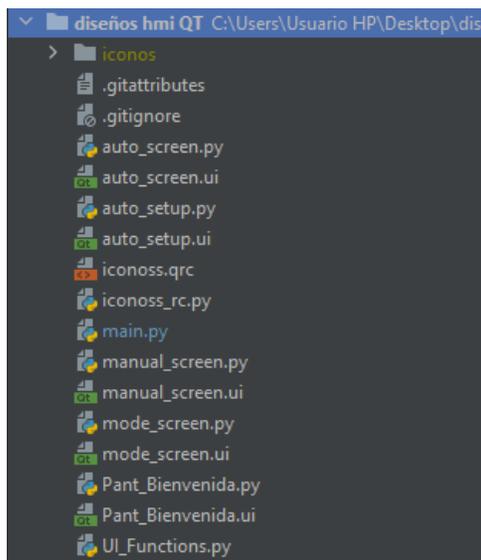
4.3. Implementación del HMI para el monitoreo y control del proceso

En el capítulo anterior se realizó el diseño del HMI de la parte gráfica y la estructura de las pantallas, pero se requiere que se programen para que tengan la funcionalidad requerida. La ventaja de haber realizado el diseño de las pantallas en el software QtDesigner es que se puede convertir en un archivo de Python para posteriormente agregar las funciones del HMI en un IDE de programación. Para cada

pantalla se generan dos archivos, un archivo con extensión “.ui” y el archivo convertido a Python con extensión “.py”, y se tiene 5 pantallas: pantalla de carga, pantalla selección de modo, pantalla modo manual, pantalla de configuración del modo automático y pantalla modo automático. Adicionalmente se crea un archivo “main.py” que tendrá la programación principal del HMI haciendo uso de las librerías de PyQt5 y un archivo “UI_Functions” que contiene unas funciones para dar animación a las pantallas. También es necesario convertir el archivo de iconos que se usan en el HMI con extensión “.qrc” a un archivo de Python. La figura 86 indica todos los archivos creados para el HMI.

Figura 86

Archivos creados para el funcionamiento del HMI



Nota. Los archivos .py de cada pantalla deben estar en la misma carpeta del programa principal “main.py”.

Dentro del programa principal “main.py” se crearán las clases para acceder a los elementos de cada pantalla, como cuadros de texto, indicadores numéricos, sliders y botones. En la figura 87 se muestran las clases del programa “main.py”.

Figura 87*Clases del programa principal*

```

15  ## clase pantalla modo de operacion
16  class ModeScreen(QMainWindow):...
50
51  ## clase modo manual
52  class ManualScreen(QMainWindow):...
194
195  ## clase configuracion modo automatico
196  class AutoSetupScreen(QMainWindow):...
256
257  ## clase modo automatico
258  class AutoScreen(QMainWindow):...
362
363  ## clase pantalla de carga
364  class PantInicio(QMainWindow):...
400
401  class cmnc_server():...
435
436  if __name__ == "__main__":...
441

```

Nota. La clase “cmnc_server” contiene la configuración para la conexión al broker MQTT.

Cada clase contiene un método de iniciación y los métodos específicos para los eventos propios de cada pantalla, como se muestra en la figura 88. Tomando como ejemplo la pantalla de selección de modo, la cual contiene tres botones, un botón para seleccionar la pantalla de modo manual, uno para ir al modo automático y otro para salir del programa, se deben incluir tres métodos que respondan a los eventos de pulsación de los botones.

Figura 88

Métodos para la clase "ModeScreen"

```

## clase pantalla modo de operacion
class ModeScreen(QMainWindow):
    def __init__(self):
        QMainWindow.__init__(self)
        self.modo = Ui_Mode_Window()
        self.modo.setupUi(self)
        # Cerrar Titulo y botones cerrar y minimizar
        self.setWindowFlag(Qt.FramelessWindowHint)
        ## Boton modo manual
        self.modo.btn_manual.clicked.connect(self.go_manual)
        ## Boton modo automatico
        self.modo.btn_auto.clicked.connect(self.go_auto_setup)
        ## Boton cerrar
        self.modo.btn_exit.clicked.connect(self.cerrar)
        """lambda: self.close()"""
    def go_manual(self):...
    def go_auto_setup(self):...
    def cerrar(self):...

```

Nota. El nombre de cada botón se estableció dentro al realizar el diseño en QtDesigner como por ejemplo "btn_manual".

De la misma forma que se realiza para la clase de selección de modo, se ejecuta en todas las clases, creando los métodos para cada evento que se tiene en las distintas pantallas como pulsación de botones, variación de valores de los deslizadores y otros elementos para ingreso de datos.

Con todos los eventos de las pantallas programados para su correcto funcionamiento, se procede a ejecutar el programa dentro de la Raspberry Pi 4 y visualizar el HMI en la pantalla Display LCD 7" comprobando el correcto funcionamiento de los elementos en cada modo.

En la figura 89 se puede observar la pantalla de modo automático para el control de la resistencia del reactor.

Figura 89

Pantalla modo manual para la resistencia del reactor

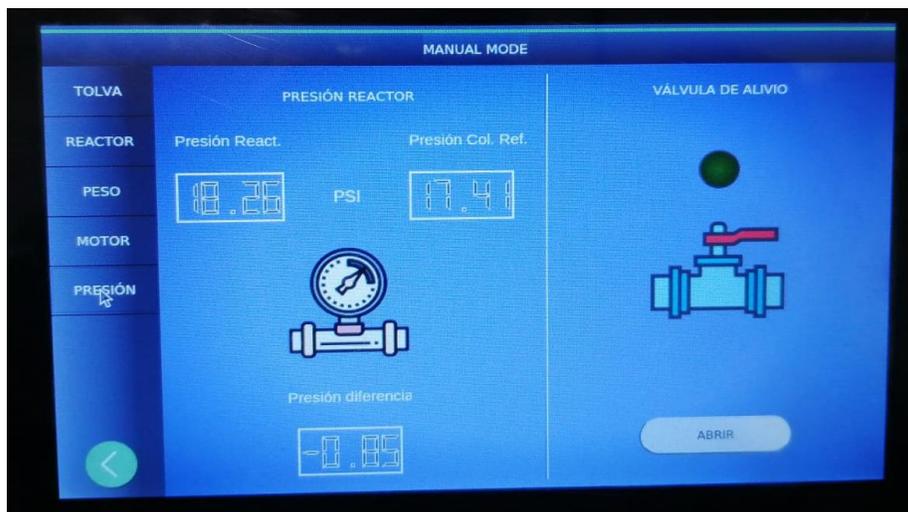


Nota. El slider de la potencia está al 20%, lo que indica que la resistencia está consumiendo el 20% de su potencia nominal.

En la figura 90 se muestra la pantalla del modo manual para el monitoreo de los transmisores de presión y el control de la válvula solenoide.

Figura 90

Pantalla modo manual para control de la presión



Nota. El indicador led sobre el icono de la válvula indica cuando la válvula está abierta.

Al acceder al modo automático, se visualiza el gráfico con la vista general del proceso y se presentan las variables con su respectivo Set-Point configurado, figura 91.

Figura 91

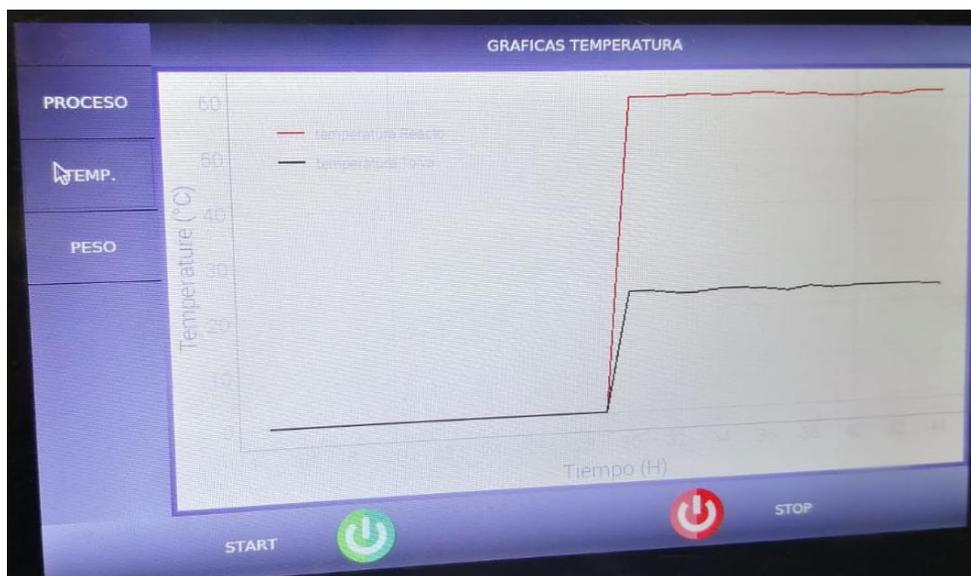
Pantalla modo automático



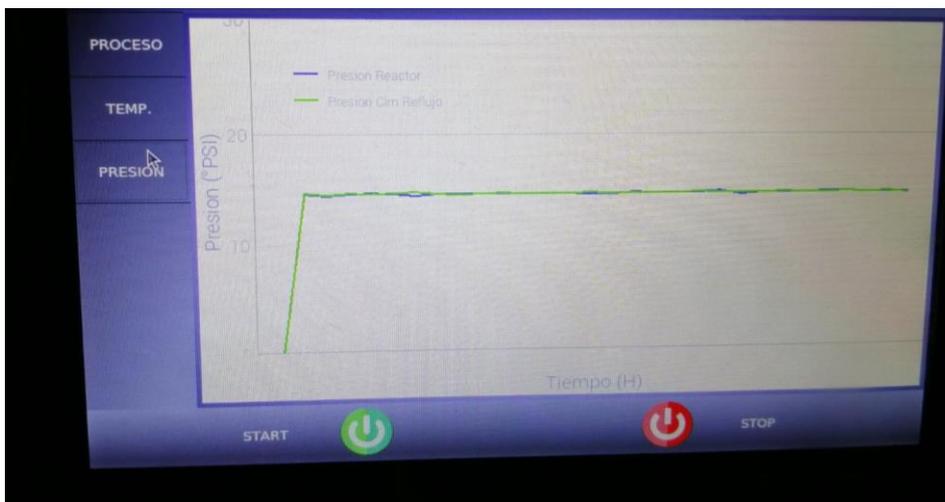
La figura 92 muestra la pantalla de las gráficas de temperatura al estar en modo automático, dichas gráficas a la temperatura del reactor y de la tolva en colores rojo y negro respectivamente.

Figura 92

Graficas de temperatura



En la figura 93 se puede visualizar la gráfica de los transmisores de presión dentro del modo automático, la presión del reactor se visualiza de color azul, mientras que la presión de la columna de reflujo de color verde.

Figura 93*Graficas de presión*

4.4. Aplicación del IoT para la supervisión del proceso

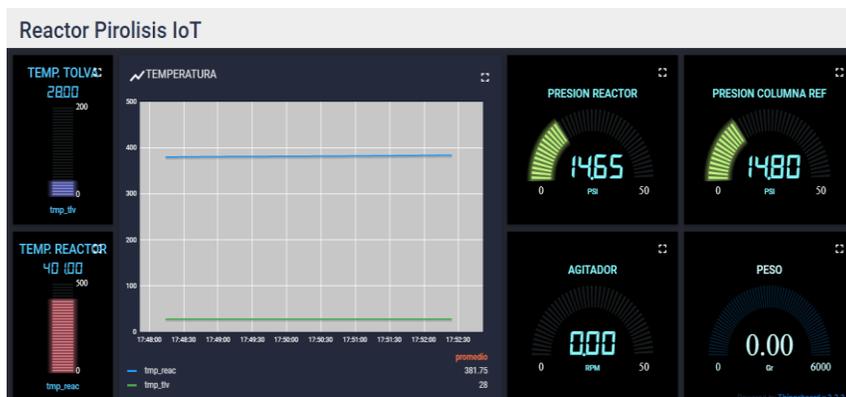
Previamente se realizó el diseño del dashboard de la página web para aplicar IoT al proceso y se realizó la configuración de comunicación para el envío de datos mediante protocolo MQTT de tal forma de tener la plataforma lista el momento de iniciar el proceso de pirólisis y poder visualizar las variables en una página web.

Accediendo a la página "<https://demo.thingsboard.io/dashboard/97872510-7d68-11ec-b563-3701f12552b4?publicId=b2c78980-7d5b-11ec-b563-3701f12552b4>" a través de un navegador se podrán monitorear las variables de temperatura, presión, peso y velocidad angular que intervienen en el proceso de pirólisis.

El cliente MQTT envía los datos al broker de la página de Thingsboard y éstos se visualizan en el dashboard como se muestra en la figura 94.

Figura 94

Monitoreo del proceso de pirólisis en la página web



Nota. La presión del reactor se visualiza de color azul, mientras que la presión de la columna de reflujo de color verde.

Al acceder a la página desde un dispositivo móvil, los indicadores se adaptarán a la pantalla mostrándose uno por uno, como se indica en la figura 95.

Figura 95

Página web desde un dispositivo móvil



La plataforma Thingsboard que se utilizó para implementar el seguimiento del proceso de pirólisis con IoT, es una versión demo de tiempo ilimitado. Esto una ventaja, ya que, se podrá hacer uso de la página en cualquier momento, sin necesidad de una suscripción pagada para acceder a sus servicios.

Dentro de la programación de la Raspberry Pi 4, se añadió la librería “smtplib” y “ssl” para poder enviar mensajes de correo electrónico mediante protocolo SMTP de forma segura.

La figura presenta 96 muestra la parte del código implementado para enviar un mensaje por correo, en donde “user” es el correo desde donde se envía el mensaje, “password” es la contraseña que permite acceder al correo, “destinatario” es el usuario al que se enviará el mensaje y “mensaje” es el contenido que se enviará por correo electrónico, en este caso la advertencia que la temperatura ha excedido los 410°C; por tanto el algoritmo accederá a esta función cuando la condición se cumpla como verdadera al comparar la temperatura del reactor con el valor mencionado anteriormente.

Figura 96

Código para enviar correos con Python

```
with smtplib.SMTP_SSL("smtp.gmail.com", 465, context=context) as server:  
    server.login(user, password)  
    server.sendmail(user, destinatario, mensaje)
```

Capítulo V

5. Pruebas y resultados

5.1. Pruebas y resultados

En este capítulo se describen las diferentes pruebas que se realizaron a la planta de pirólisis para establecer su correcto funcionamiento y así poder obtener hidrocarburos líquidos y a su vez la validación de la hipótesis que se refiere a mejorar el funcionamiento del proceso y el seguimiento del estado de la planta mediante la implementación de un sistema SCADA.

Para realizar las pruebas se decide dividir el proceso por partes, la primera prueba consiste en verificar el funcionamiento del sistema eléctrico y electrónico, la segunda se refiere a las pruebas realizadas a los sensores presentes en el proceso de pirólisis y la tercera es referente a las pruebas realizadas desde el HMI verificando el funcionamiento manual y automático.

5.2. Sistema eléctrico y electrónico

Estas prueba se realizaron al implementar todos los dispositivos seleccionados para la planta. El primer intento de arranque de la máquina no fue satisfactorio, debido a que, en la planta se presentaban cargas electrostáticas por los elementos eléctricos que están montados sobre su estructura metálica. Realizando diferentes mediciones de voltajes entre la red eléctrica con respecto a su estructura metálica, se observó que existía una diferencia de potencial entre línea y la máquina; por tanto, se opta aterrizar la planta.

El segundo inconveniente que se presentó, cuando se intentó arrancar la máquina, fue el ruido electrónico, generados por los componentes de potencia que son alimentados a 24Vdc. Como se conoce, el componente principal que genera ruido es la bobina, la cual está presente en la electroválvula, motor y servo-válvula. El ruido afecta a las tarjetas controladoras debido a la necesidad de conmutar los GND's para

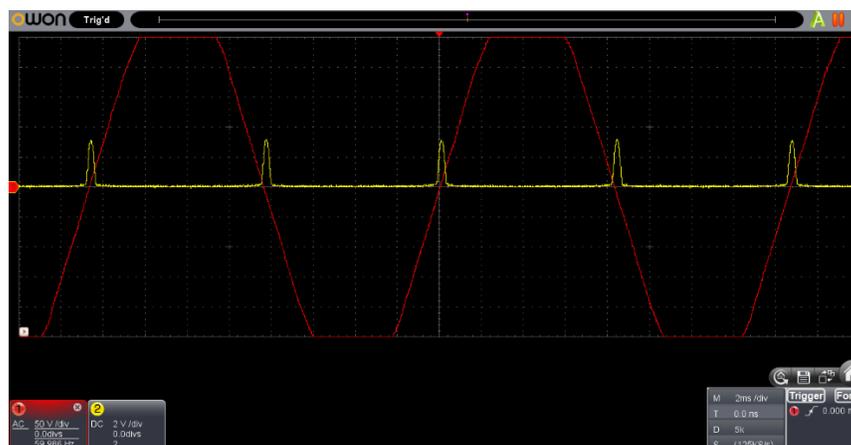
mantener la misma referencia, la solución a este problema se encontró implementando optoacopladores para todas las señales de salida hacía la parte de potencia; con esta modificación en el circuito electrónico se aísla la parte de potencia de 24Vdc con la de control de 5 Vdc.

5.2.1. Pruebas en los elementos de control final de las resistencias

Como es de conocimiento, estas placas manejarán una corriente mayor a 10A para cada resistencia, la cual es muy alta. La primera prueba realizada para el control de las resistencias se hizo con módulos dimmers basados en el Triac BT24 con corriente nominal de 24A; sin embargo, los elementos de la placa no estaban diseñados para disipar potencia elevada, por lo cual se decide diseñar e implementar un circuito de control de fase, y para la parte de potencia donde circulan cantidades de corrientes considerables se optó por usar conductores de calibre 10.

Posteriormente, se verificó que el ángulo de disparo sea el adecuado, esto se realiza con el osciloscopio analizando la onda de entrada, la señal de cruce por cero y su disparo.

En la figura 97 se muestra la señal de cruce por cero de la red eléctrica que sirve para sincronizar el disparo de los dos Triac que controlan las cargas resistivas. En el microcontrolador se lee esta señal en un pin de interrupción como flanco ascendente, esta señal está aislada con la parte de potencia por medio del opto-transistor 4N35.

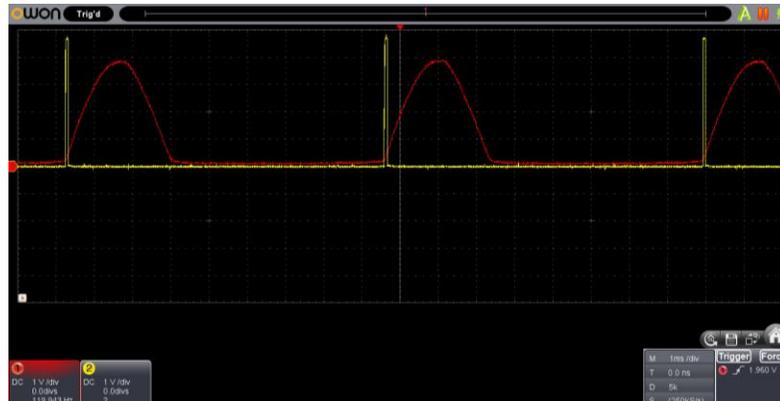
Figura 97*Cruce por cero*

Después de detectar la interrupción por hardware del cruce por cero, el microcontrolador emite la señal de disparo. Sabiendo que la onda completa de la red eléctrica tiene un período de 16.67ms, y que el Triac se dispara en cada semiperíodo, es decir, en 8.33ms, se programa el microcontrolador para que la señal de activación del Triac esté dentro de este periodo de tiempo.

En el programa se realiza un mapeo para que el operador pueda enviar desde el HMI el valor de potencia en porcentaje que estará consumiendo la carga, ya que, al ser una carga resistiva, la forma de onda de corriente y voltaje son las mismas; por tanto, si se envía el valor de 100%, el Triac dejará pasar toda la onda y su activación será a 0ms respecto a la detección del cruce por cero, como se muestra en la figura 98. De la misma forma, si se envía el valor de 0% de potencia, el disparo ocurrirá a los 8.33ms a partir de la detección del cruce por cero, haciendo que la onda de salida se recorte por completo, entregando a la carga un valor de 0Vac.

Figura 98

Señal de disparo y cruce por cero



En la figura 99 se muestra el disparo del Triac al 1%, la señal que sale del microcontrolador se observa de color amarillo, mientras que la onda entregada a la carga está de color rojo. El valor mínimo de disparo que se puede entregar a los Triac es de 1% que corresponde a 2.2Vac, ya que, al enviar un valor menor, la onda de salida se activa de forma incorrecta debido a la detección errónea del cruce por cero en su flanco de subida.

Figura 99

Disparo del Triac al 95% de la onda



En la figura 100 se muestra el disparo del Triac para que la carga consuma el 40% de potencia.

Figura 100

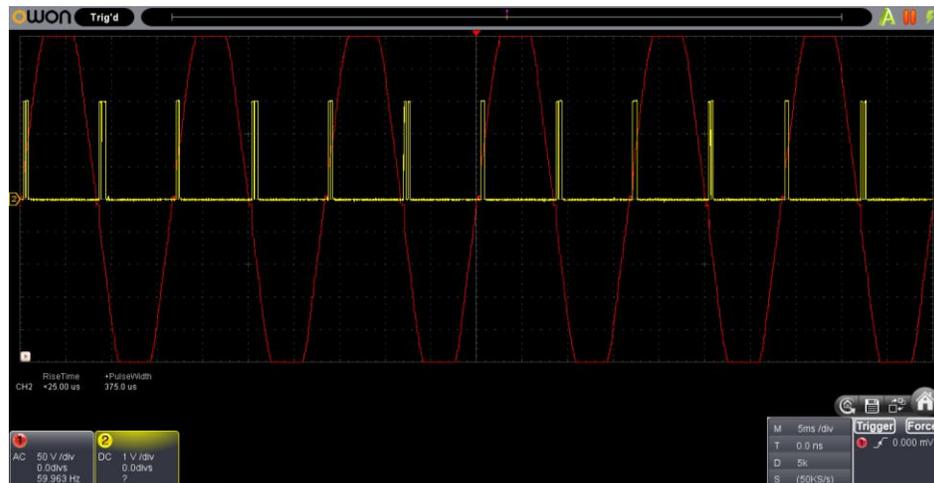
Disparo del Triac al 40% de la onda



En la figura 101 se muestra el disparo del Triac para entregar el 100% de potencia a la carga, haciendo pasar la onda completa.

Figura 101

Disparo del Triac 100% de la onda



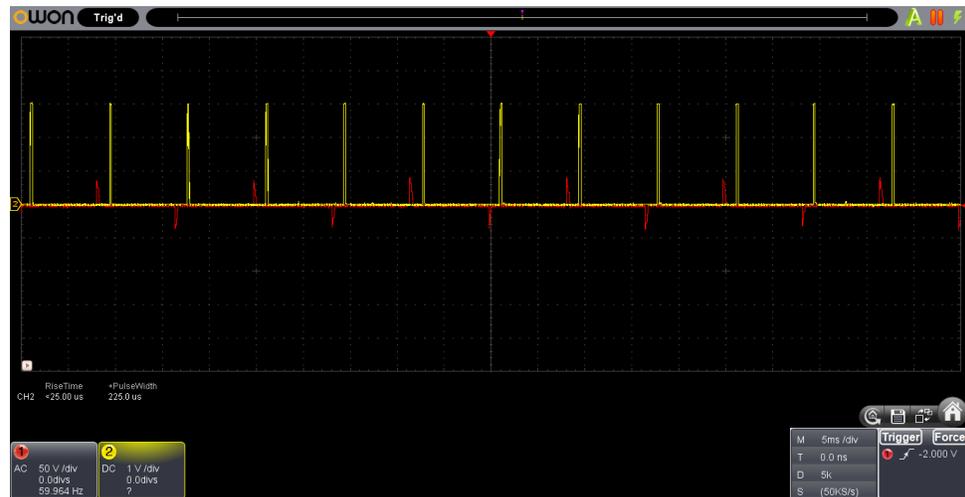
Como se observó en las figuras anteriores, se muestra el disparo de un solo Triac, pero se requiere controlar dos cargas resistivas individualmente, por lo que se añade en el programa del microcontrolador la señal para disparar otro tiristor.

La señal de cruce por cero es la misma, ya que, ambas resistencias están conectadas a la red eléctrica y tienen la misma onda de referencia, lo que cambia es la señal para la activación de cada Triac.

Como se visualiza en la figura 102, la señal de disparo del segundo Triac se encuentra desfasada de la señal de salida del primer Triac, ya que éste posee un valor de 20% y el primer Triac de 1%. De la misma forma que se realizó para el primer Triac, se añadió el mapeo para que reciba la señal en porcentaje y posteriormente tratarla en la programación para enviar la señal de disparo al Triac entre 0ms y 8.33ms.

Figura 102

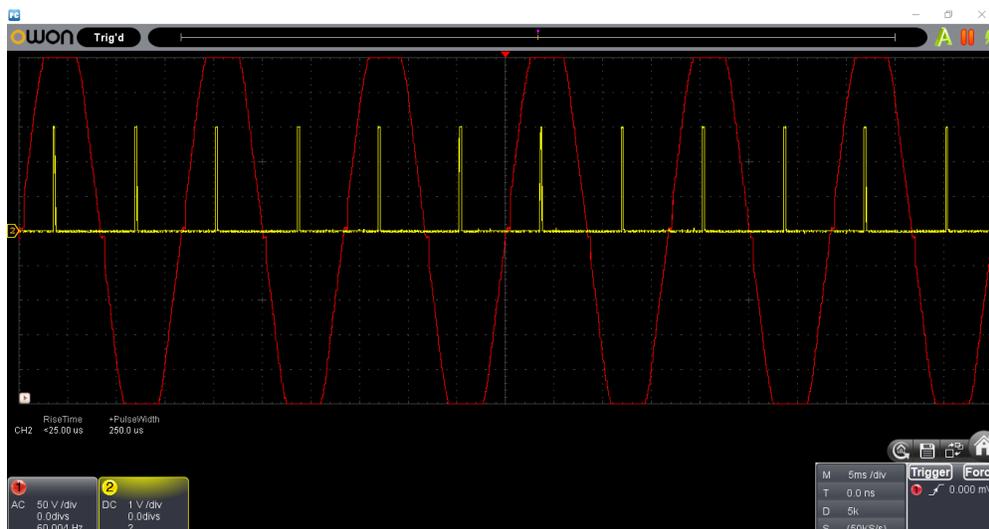
Disparo del Triac 2 respecto a la onda de salida 1



En la figura 103 se puede observar el disparo del segundo Triac al 50%, en amarillo respecto a la onda roja, que representa la salida del primer Triac. Aquí se puede evidenciar de mejor forma el desfase entre cada tiristor.

Figura 103

Disparo del Triac 2 a media onda respecto a la onda de salida 1



En la figura 104 se muestra el amperaje de la resistencia eléctrica del reactor al enviar el valor de 100%, que es de 12.16A que corresponde a la corriente máxima que consume la resistencia al hacer pasar la onda completa a la carga.

Figura 104

Amperaje de la resistencia del reactor al 100%



En la figura 105 se muestra la corriente que consume la resistencia del reactor al enviar el valor de 20% la cuál es de 1.68A.

Figura 105

Amperaje del reactor al 20%



5.3. Funcionamiento de los sensores presentes en la planta

Las primeras pruebas de medición de temperatura con la Raspberry Pi 4, realizadas con las termocuplas tipo K, adquiridas en el mercado nacional, presentaron inconvenientes al leer las dos señales simultáneamente, entregando el valor de “0” a cualquier temperatura que se encuentre realmente. El inconveniente era debido a la continuidad que presentaban el bulbo y el revestimiento metálico de las termocuplas con el terminal negativo del sensor, que a su vez, al estar alojadas en el reactor y tolva, ambos de material conductor, presentaban continuidad los terminales negativos de las termocuplas con toda la máquina. Para corregir el problema, se optó por adquirir dos termocuplas con toda la máquina. Para corregir el problema, se optó por adquirir dos termocuplas tipo K, importadas mismas que poseen aislamiento entre su cuerpo y terminales.

Con las termocuplas aisladas, se realizaron las pruebas de lectura de temperatura en la Raspberry Pi 4 teniendo resultados satisfactorios. Se pudo leer la temperatura real, la cual fue corroborada mediante un multímetro con sensor de temperatura, comprobando que ambas mediciones son iguales.

Para evaluar la lectura de los sensores de presión, se tomó como base la presión atmosférica de 14.7 PSI, con lo cual, se calibraron los módulos de conversión de corriente a voltaje para tener una salida de 0Vdc a presión atmosférica, y 3.3Vdc con el valor máximo de presión que puede leer el sensor. En la programación se ejecuta el mapeo de los valores de voltaje leídos con el ADC, teniendo en cuenta que la salida de los transmisores de presión es lineal. También es importante considerar que, para alimentar estos transductores se usó una fuente de 24Vdc independiente, ya que al alimentarlos con la fuente de 24Vdc de los actuadores, se tenían errores en la lectura de los datos debido al ruido que se genera en el circuito.

Lo último que se evaluó fueron las revoluciones por minuto que puede alcanzar el motor. Las lecturas obtenidas del encoder acoplado al eje, fueron de 47 rpm con el 100% de PWM, comprobando de tal forma que la velocidad leída es la misma proporcionada en la hoja de datos del motor.

5.4. Funcionamiento manual y automático desde el HMI

Modo Manual

Una vez realizadas las pruebas individuales de los elementos para comprobar su correcto funcionamiento, se procede a incorporar todos los sensores y actuadores al sistema SCADA para poder realizar pruebas de funcionamiento de todo el conjunto.

Lo primero que se debe hacer es alimentar el circuito de control de los microcontroladores y la Raspberry Pi 4, accionando el breaker bipolar que alimenta al condensador y la fuente de 24Vdc. Una vez que se encienda la Raspberry Pi 4 y se muestre el HMI en la pantalla, se acciona el breaker de los actuadores y por último se

alimenta la parte de potencia activando el breaker que entrega energía a las resistencias eléctricas. En la figura 106 se presenta una vista general del sistema, se puede identificar el panel de control con el HMI, las luces piloto y el paro de emergencia y el cajetín de breakers. El manual de operación de la máquina se detalla en el apartado de anexos (Anexo C5).

Figura 106

Planta en funcionamiento



Se comienza verificando el funcionamiento de la parte manual, visualizando el calentamiento del reactor, en la figura 107 se puede ver la pantalla que muestra la temperatura del reactor que está en 314°C, debido a que, se hizo un calentamiento previo y con ello también se puede verificar la corriente que se está entregando en ese momento a la carga que es de 3.14A, como se visualiza en la figura 108.

Figura 107

Pantalla Modo manual - Reactor

**Figura 108**

Corriente entregada al reactor a un 30% de Potencia



En la figura 109 se muestra también el modo de operación manual para el reactor, que se encuentra en 245°C, es decir, recién comienza con el calentamiento y en este momento está en un 20% de potencia entregada a la carga.

Figura 109

Calentamiento del reactor visualizado en el HMI



En la figura 110 se muestra la temperatura del reactor a 405°C; es decir, ya está en el punto máximo a donde debe de llegar y mantenerse hasta que se degrade todo el material y obtener la mayor cantidad de producto.

Figura 110

Temperatura del reactor a 405°C



En la figura 111 se muestra la pantalla de control manual para la presión, en este caso se muestra el valor de la presión atmosférica y también su respectivo actuador que se utiliza cuando hay un diferencial de presión mayor a 5 PSI, ya que esto indica que hay una presión relativamente alta, la cual ocurre por los gases generados en el interior del reactor y se debe de aliviarla con la válvula de escape.

Figura 111

Pantalla manual para el control de presión



Modo Manual

Al salir del modo manual, se puede elegir el modo automático desde la pantalla de selección de modo de operación. Cuando se selecciona el modo automático primero aparece la pantalla de configuración de dicho modo, en donde se deberá establecer los valores del Set-Point para la temperatura del reactor y la tolva, también para el peso y la presión.

Posteriormente a establecer los valores de Set-Point, se visualizará la pantalla del modo automático con la vista general del proceso, en donde se puede observar un gráfico del reactor de pirólisis con las variables de cada elemento, como se observa en la figura 112. Para cada elemento se muestra un recuadro con el valor de variable que está midiendo, el valor del Set-Point y el valor de control para el actuador de cada elemento.

Para empezar el proceso en modo automático se debe presionar el botón verde “START”. En el caso del reactor se puede observar que el valor del Set-Point es de 300°C, la temperatura medida en ese instante es de 234°C y el valor de potencia que está consumiendo la resistencia del reactor es de 0% en ese instante.

Figura 112

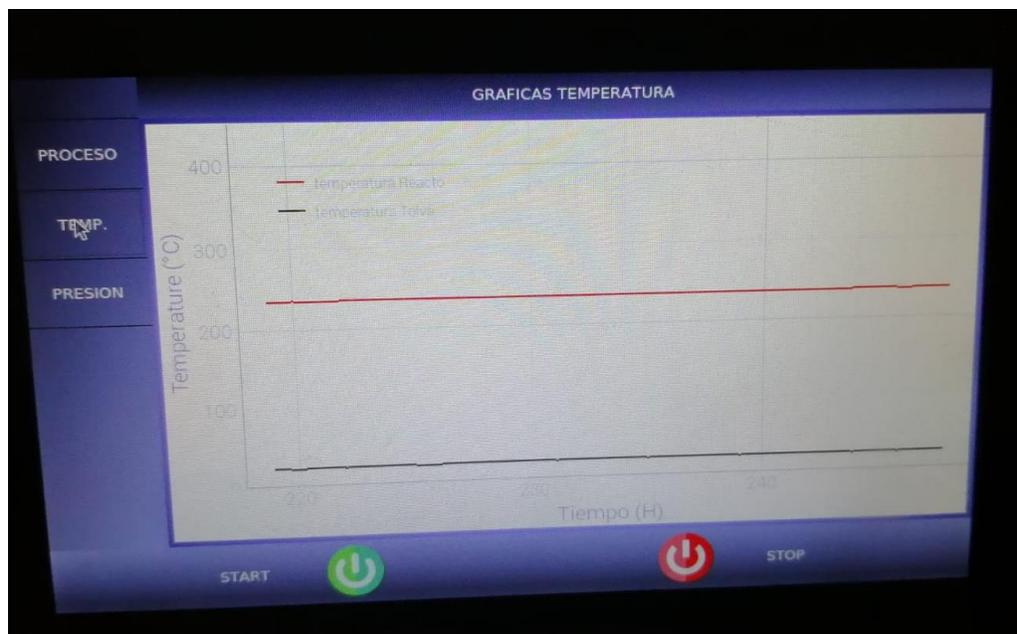
Modo automático - vista general



Al presionar el botón “TEMP.” se visualizará la pantalla de gráficas de temperatura, como se observa en la figura 113, en donde se puede apreciar en rojo la temperatura del reactor y en negro la temperatura de la tolva.

Figura 113

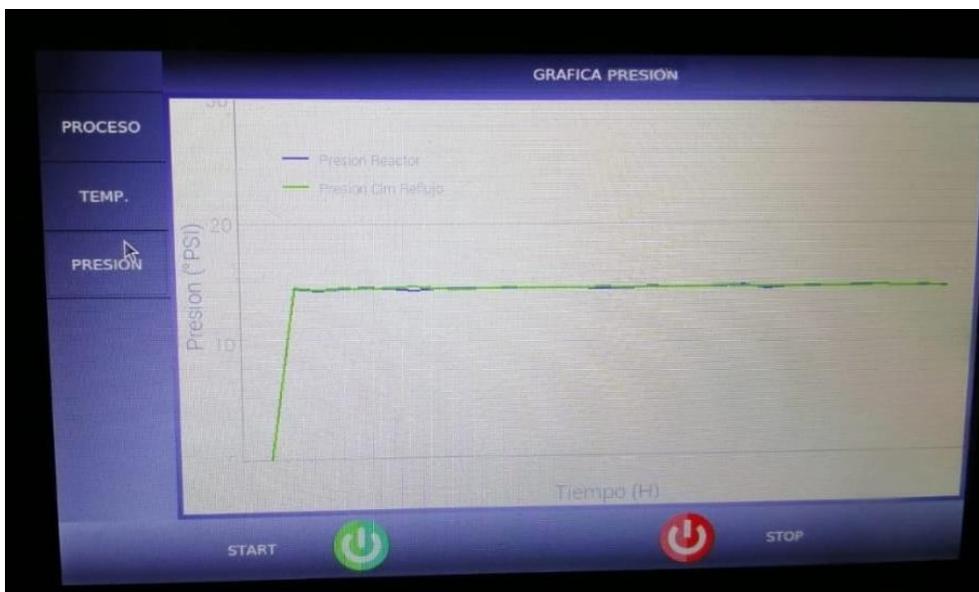
Modo automático - graficas temperatura



La figura 114 muestra las gráficas de los transmisores de presión ubicados en el reactor y en la columna de reflujo; en ese instante poseen una presión de 14.52 PSI y 14.7 PSI, respectivamente.

Figura 114

Modo automático - grafica presión



Al alcanzar el Set-Point de 400°C, la presión en el sistema empieza a incrementar, debido a los gases generados por la degradación del plástico, por lo que se debe abrir la válvula del depósito para los líquidos obtenidos, y después de 30 minutos empieza a descender el producto generado hasta la finalización del proceso.

En la figura 115 se visualiza el producto obtenido durante la prueba manual.

Figura 115

Producto obtenido en la prueba manual



En la figura 116 se muestra el producto obtenido en la prueba automática. La primera cantidad de producto generado, estuvo afectada por los residuos presentes en la máquina, debido a la prueba anterior; por tal motivo se puede observar el envase de mayor capacidad con un color más oscuro; mientras que los envases pequeños contienen líquido de mayor pureza que se obtuvieron en el tramo final del proceso de pirólisis.

Figura 116

Producto obtenido en la prueba automática



5.5. Funcionamiento del IoT

Accediendo a la página web diseñada en Thingsboard, para monitorear las variables del proceso de pirólisis, se puede visualizar los diferentes indicadores y las gráficas. Los valores de temperatura, presión, peso y velocidad del motor presentados, equivalen a los datos en tiempo real de la planta. También existe la posibilidad de visualizar los datos históricos de la gráfica de temperatura (variable de interés) hasta máximo 30 días antes.

Las notificaciones de mensaje por correo electrónico en los dispositivos vinculados llegarán cuando la temperatura del reactor térmico exceda los 410°C. En la figura 117 se puede observar la página web de la temperatura del reactor.

Figura 117

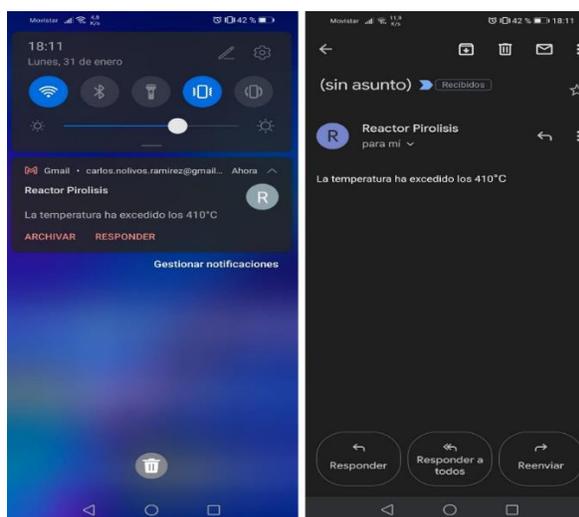
Página web del proceso de pirólisis



Al haber excedido la temperatura de 410°C en el reactor, se enviará un mensaje al correo notificando lo acontecido, figura 118, de tal forma que se puede estar alerta del proceso en cualquier momento, sin importar que se esté observando el HMI o la plataforma de IoT.

Figura 118

Notificación por correo electrónico



Según (Díaz, 2016), para realizar un proceso de pirólisis convencional, la temperatura debe comprender entre 200°C a 700°C y las rampas de calentamiento con las que se obtienen resultados satisfactorios varían entre 2.5°C/min, 5°C/min, 10°C/min y 20°C/min, manteniendo dichos valores constantes durante el proceso. En las pruebas realizadas emplea distintos materiales, entre ellos, polipropileno, el cual también se usa para realizar las pruebas de la máquina de pirólisis.

Para validar la hipótesis planteada, se toma como referencia la velocidad de calentamiento del reactor de 5°C/min, este dato permite mejorar el funcionamiento del proceso de pirólisis convencional al establecer la velocidad de calentamiento de 5°C/min de manera constante para obtener resultados satisfactorios. Este parámetro se logra alcanzar implementando correctamente el sistema SCADA con los dispositivos de instrumentación adecuados, con el algoritmo de control implementado en los controladores y el seguimiento del estado de la planta a través del HMI y del IoT.

Después de haber realizado las pruebas de funcionamiento en la parte automática se tomaron datos de temperatura en cada prueba, en total se realizaron 5 pruebas de calentamiento hasta lograr llegar al Set-Point establecido.

Según (Caleño, 2020), se determina 4 ensayos para validar el rendimiento del proceso de pirólisis; por tanto, tomando como referencia este valor mínimo de pruebas, se considera adecuado el valor que se estableció para la validación.

Las primeras 2 pruebas se realizaron sin materia prima y las restantes se realizaron con materia prima obteniendo los datos que se muestran en la tabla 19, estos datos son la velocidad de calentamiento que se tiene para cada prueba y con ellos se pretende validar la hipótesis con el método estadístico *t-Student*.

Tabla 19

Pruebas tomadas con su respectiva velocidad de calentamiento

Prueba N°	Velocidad de calentamiento
	V[°C/min]
1	5.3
2	5.2
3	5.4
4	5.5
5	5.1

5.5.1. Definición de la hipótesis

Se describe la hipótesis nula y la hipótesis alternativa según la velocidad de calentamiento del sistema.

$$H_0: \mu < 5^\circ\text{C}/\text{min} (\text{Velocidad de calentamiento según otras fuentes})$$

$$H_1: \mu > 5^\circ\text{C}/\text{min} (\text{Velocidad de calentamiento según otras fuentes})$$

H_0 El sistema no ha mejorado porque no cumple con la velocidad de calentamiento mayor a la recomendada por otras fuentes.

H_1 El sistema cumple con la velocidad de calentamiento mayor a la recomendada por otras fuentes.

5.5.2. Ejecución de cálculos necesarios para el análisis

Cálculo de la desviación estándar y promedio para los datos obtenidos.

Muestra

$$n = 5$$

Sumatoria de Velocidad de calentamiento V

$$\sum V = 26.5$$

Cálculo de la media

$$\bar{x} = \frac{\sum X}{n} \quad (28)$$

$$\bar{x} = \frac{26.2}{5}$$

$$\bar{x} = 5.3$$

Cálculo de la desviación estándar, para ello se sigue la tabla 20.

Tabla 20

Datos para el cálculo de la desviación estándar

x_i	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
5.3	0.00	0.00
5.2	-0.1	0.01
5.4	0.1	0.01
5.5	0.2	0.04
5.1	-0.2	0.04

$$s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (29)$$

$$s^2 = \frac{0.1}{4}$$

$$s^2 = 0.025$$

$$s = \sqrt{0.025}$$

$$s = 0.15811$$

Para establecer la zona de rechazo de H_0

Grados de libertad

$$g.l = \text{número de muestras} - 1$$

$$g.l = 5 - 1$$

$$g.l = 4$$

Entonces con estos grados de libertad se puede encontrar el valor crítico (t_{vc}) para la prueba, este dato se encuentra en la tabla de distribución *t-Student* de dos colas; antes de buscar el dato hay que definir el nivel de significancia, que generalmente se define como $\alpha = 0.05$, lo que significa que se puede tolerar una diferencia del 5% en los datos analizados.

$$t_{vc} = 3.50$$

Cálculo de la prueba *t-Student*

$$s\bar{x} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (30)$$

$$s\bar{x} = \frac{0.15811}{\sqrt{5}} = 0.07071$$

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s\bar{x}} \quad (31)$$

$$t = \frac{5.3 - 5}{0.07071}$$

$$t = 4.2426$$

Para rechazar o aceptar la hipótesis se verifica la siguiente comparación:

$$t > t_{vc}, \quad \text{Rechaza } H_0$$

$$t < t_{vc}, \quad \text{Acepta } H_0$$

En conclusión, se acepta la hipótesis alternativa ya que la t calculada es mayor a la t_{vc} crítica por lo tanto se rechaza la hipótesis nula. Analizando los datos de las

pruebas realizadas, se afirma que el diseño e implementación del sistema SCADA si mejora el funcionamiento del proceso de pirólisis ya que se acepta la hipótesis alternativa. La velocidad de calentamiento que se obtuvo en cada prueba es una variable de suma importancia para validar el resultado final, que es el hidrocarburo líquido obtenido, lo cual se logra con los dispositivos de instrumentación adecuados, con los algoritmos de control implementados y el seguimiento de la planta, gracias al HMI y al monitoreo de las variables del proceso por medio del IoT.

Capítulo VI

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- Se diseñó e implementó un sistema SCADA en el proceso de conversión de residuos plásticos de polipropileno en hidrocarburos líquidos por pirólisis térmica empleando técnicas de control para controlar las variables del sistema haciendo uso del internet de las cosas para monitorear el proceso desde cualquier dispositivo con conexión a internet.
- En base a la investigación bibliográfica realizada, se identificaron diferentes tipos de pirólisis: pirólisis convencional, pirólisis rápida y pirólisis catalítica. En la pirólisis convencional, la temperatura puede variar entre 200°C a 700°C y las rampas de calentamiento van desde 2.5°C/min hasta 20°C/min en un ambiente inerte libre de oxígeno. La pirólisis rápida mantiene el mismo rango de temperatura, pero con rampas de calentamiento superiores a 20°C/min. La pirólisis catalítica mantiene estas condiciones de operación; con la diferencia que se incluye un catalizador añadiendo otro elemento a la reacción, como el hidrógeno, controlando el flujo de entrada de este elemento al catalizador se puede obtener un producto con características químicas especiales. El proyecto realizado corresponde a un proceso de pirólisis convencional, que se estableció con el diseño de los elementos de instrumentación del sistema.
- Se configuró el sistema SCADA para el proceso de pirólisis, estableciendo el Set-Point de temperatura a 400°C con velocidad de calentamiento de 5°C/min, obteniendo como resultado la generación de hidrocarburos líquidos.
- Para el diseño del algoritmo de control, se identificó el modelo de la planta con los datos obtenidos al poner en operación la máquina en modo manual, posteriormente

se empleó el software Matlab para ingresar los datos de temperatura leídos y con la herramienta System Identification, se determinó la función de transferencia del sistema, la cual se ingresó dentro del toolbox PID-tuner para obtener las constantes K_p , K_d y K_i , que se implementaron en la simulación.

- Debido a las condiciones físicas de la planta, se observó que, por inercia el calor generado por las resistencias eléctricas, puede seguir aumentando la temperatura del reactor, 40°C más después de cortar la alimentación, en virtud de lo cual, se diseñó un sistema utilizando rampas de calentamiento por ciclo integral (ON-OFF), haciendo pasar a la carga la onda completa durante 1 minuto, entregando 220Vac, y recortándola por completo durante 40 segundos, entregando a la carga 0Vac. La alta frecuencia de conmutación que puede requerir el control ON-OFF, no es problema, ya que los tiristores admiten este modo de operación.
- En base a los requerimientos físicos del proceso de pirólisis, se seleccionó para el reactor térmico, una resistencia de 3800W, que permite alcanzar la temperatura de 400°C sin problemas, mientras que para la tolva se seleccionó una resistencia de 1800W para controlar la temperatura en 130°C . La medición de la temperatura se realiza con termocuplas tipo K junto al módulo acondicionador Max6675, con esto se puede leer los datos del sensor en la tarjeta controladora por medio de comunicación SPI. Para la lectura de la presión se seleccionaron dos transmisores de presión con señal de corriente, y para poder leer esta señal en un microcontrolador, se opta por un conversor de corriente a voltaje y un ADC de 16 bits con comunicación I2C. Se selecciona una válvula de seguridad para aliviar la presión en el reactor, ésta ejecuta a 24Vdc y se controla por medio de la placa electrónica diseñada. Estos dispositivos seleccionados e implementados en el sistema son suficientes para poder realizar el proceso de pirólisis convencional.

- Se realizó el diseño para el ingreso de la materia prima al reactor desde la tolva, seleccionando una válvula motorizada que permite abrir de manera proporcional en base a la medición del peso que se realiza con una celda de carga de 20Kg y el módulo acondicionador HX711. También se diseñó el sistema eléctrico para el agitador, seleccionando el puente H IBT2 que cumple con las características técnicas eléctricas del motor de 150W y estableciendo el circuito necesario para acoplar las señales de control del puente H.
- Debido a la carga electrostática en el reactor de pirólisis generada por los elementos eléctricos presentes en la máquina, se conectó la estructura metálica a tierra, con esto se asegura que no existan problemas con los elementos de control del sistema, los cuales se aislaron con optoacopladores para evitar ruido en las señales electrónicas.
- Para la implementación del sistema SCADA se planteó como controlador central una Raspberry Pi 4, con esta tarjeta se pueden leer todos los sensores de la planta mediante diferentes tipos de comunicación serial, los cuales vienen dados por los módulos acondicionadores, también ejecutó los algoritmos de control del sistema, operó como servidor para la comunicación con los microcontroladores secundarios y pondrá en marcha el HMI recurriendo a la librería que permite implementar una interfaz gráfica.
- Se diseñó el HMI para que se pueda operar en modo manual, en donde se podrán activar los actuadores del sistema y visualizar los datos de los sensores y verificar su estado de funcionamiento. También se puede operar en modo automático estableciendo el valor de Set-Point de temperatura del reactor y monitoreando los datos de los sensores y las señales de control. Esto permite tener una supervisión y control adecuado de la planta.

- Se desarrolló una arquitectura de red inalámbrica con conexión Wi-Fi para la comunicación de la Raspberry Pi 4 con los microcontroladores ESP32 por medio de protocolo MQTT para transmitir datos de forma rápida, sencilla y sin pérdida de información. La Raspberry Pi 4 se configuró como servidor (maestro), mientras que los ESP32 se configuran como esclavos y se conectan al servidor por medio de una dirección IP, por lo que se requiere que estos dispositivos estén conectados a la misma red, ya sea como red de área local o como red internet.
- Se implementó el monitoreo del proceso de pirólisis a través de la plataforma de IoT de Thingsboard.io, ésta permite visualizar las variables del sistema en tiempo real o datos históricos de hasta 30 días anteriores. Cabe recalcar, que es una versión demo de tiempo ilimitado que permite el acceso desde cualquier dispositivo con conexión a internet.

6.2. Recomendaciones

- Para implementar un tipo de pirólisis se recomienda analizar las variables que influyen en el proceso y así determinar la instrumentación necesaria para cumplir con los requerimientos.
- Al poner en operación la máquina se recomienda tomar los datos obtenidos en diferentes pruebas, de tal forma de poder analizar los distintos modelos que se obtienen según las características en que se realizaron las pruebas.
- Se recomienda el estudio de algoritmos de control que se pueda implementar para procesos lentos, de tal forma que se pueda comprobar su funcionamiento en la planta analizando el líquido obtenido.
- Realizar pruebas de funcionamiento de cada dispositivo que permita corroborar que es el adecuado para ser implementado en el sistema.

- Se recomienda implementar los dispositivos de instrumentación necesarios para no saturar de información al sistema, evitando insertar elementos que son irrelevantes en el proceso.
- Tener en consideración que para implementar o modificar códigos de programación dentro de la Raspberry Pi 4, debe tener conocimientos en linux, Python, C++ dependiendo la necesidad.
- El operador encargado de manipular el HMI debe de conocer las características de los elementos de instrumentación presentes en la máquina para evitar posibles daños en los equipos.
- Se recomienda usar comunicación inalámbrica, con el fin de evitar el cableado del dispositivo de control central con los controladores externos.
- Antes de energizar la máquina se debe verificar las conexiones de alimentación, comprobando que hay 220Vac en el breaker para la parte de potencia, 110Vac en el breaker para los circuitos de control; y es muy importante asegurarse que la conexión a tierra sea adecuada y que tenga un valor menor o igual a 0.1Vac para evitar problemas con los controladores.
- Al momento de iniciar el proceso, se debe evitar el contacto físico con la máquina ya que la temperatura elevada puede ocasionar daños al operador, solo se puede tener contacto con el tablero de control.
- Se debe tener en consideración que la plataforma de IoT Thingsboard.io es una versión demo que solo permite mostrar datos hasta 30 días atrás.
- Se recomienda terminar por completo el proceso una vez iniciado, para evitar que en las operaciones siguientes se mezclen los residuos con el producto que se está obteniendo.

6.3. Trabajos futuros

Se plantea como estudio a futuro, una alternativa para el controlar la potencia en las resistencias eléctricas, de tal forma que se pueda analizar su incidencia en las variables de temperatura. También se propone estudio, diseño e implementación de algoritmos de control que ayuden con una mejor obtención del hidrocarburo.

Bibliografía

- Arandes, J. M., Bilbao, J., & López, D. (2004). RECICLADO DE RESIDUOS PLÁSTICOS. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 28-45.
- Autycom. (17 de Agosto de 2018). *¿Qué es un sistema HMI?* Obtenido de autycom.com: <https://www.autycom.com/que-es-un-sistema-hmi/>
- Avalos, C. (21 de 05 de 2017). *ChitoRaspberryPI*. Obtenido de https://3.bp.blogspot.com/-c9jTTIpFtEo/WH87pOO3Kgl/AAAAAAAAALTM/7oPP9om5UH4F_OGtpiAMWNPEH3ZwvWK6gCEw/s1600/gpio.png
- Badia, J. (2007). *Caracterización termogravimétrica de las operaciones de reprocesado de poli(tereftalato de etileno) (PET)*. Valencia: UPV.
- Balseca, C., & Carrera, D. (2022). *Diseño y construcción de un sistema de reacción por pirólisis para la producción de combustible, a partir de polímeros urbanos de reciclaje para el laboratorio de Petroquímica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga*. Latacunga.
- Bellón, O., Tovar, E., & Muñoz, E. (2017). Simulación de un sistema de control de temperatura en un reactor de pirólisis de residuos plásticos urbanos. *INGENIUM*, 110-127.
- Caleño, F. (2020). *Evaluación de la pirólisis como un método para la obtención de combustibles líquidos a partir de los plásticos generados en la Universidad Autónoma de Occidente*. Santiago de Cali.
- Castaño, S. (05 de 04 de 2019). *Control Automatico Educación*. Obtenido de <https://controlautomaticoeducacion.com/microcontroladores-pic/adquisicion-de-datos-e-identificacion-de-un-horno-con-pic/>
- Castells, X. E. (2012). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A. Obtenido de <https://books.google.com.ec/books?id=qYmL8Q10TYcC&pg=PA478&lpg=PA478&dq=Este+proceso+fisicoqu%C3%ADmico+constituye+una+etapa+previa+a+la+combusti%C3%B3n+o+a+la+gasificaci%C3%B3n,+tambi%C3%A9n+se+encuentra+como+proceso+industrial+por+lo+cual+este+proceso+d>
- cdtecnologia.net. (11 de 08 de 2021). Obtenido de https://cdtecnologia.net/21062-large_default/convertidor-de-corriente-a-voltaje-xy-it0v.jpg
- Ceupe. (8 de Agosto de 2018). *¿QUÉ ES LA PIRÓLISIS?* Obtenido de ceupe.com: <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-pirólisis.html>
- Conesa, J. (1996). *Estudio de la pirólisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados*. Alicante: Universidad de Alicante.
- Correal Magda, R. A. (20 de 05 de 2021). *BID Mejorando Vidas*. Obtenido de <https://blogs.iadb.org/agua/es/desechos-a-recursos-gestion-residuos-solidos/>
- Díaz, M. (2016). *Obtención de combustibles a través de la pirólisis de plásticos de desecho*. Huesca.
- DirectIndustry. (s.f.). *DirectIndustry*. Obtenido de DirectIndustry: https://img.directindustry.es/images_di/photo-g/113675-16575022.webp

- Earl, B., DiCola, T., & Bearnese, B. (2012). *Adafruit*. Obtenido de learn.adafruit.com: https://cdn-learn.adafruit.com/guides/cropped_images/000/000/145/medium640/ADC1115_LRG.jpg?1520540044
- ELECTROCABLES. (2018). *FICHA TÉCNICA*. Obtenido de THHN #10 AWG UNILAY: https://www.electrocable.com/uploads/product_shop/ficha-tecnica-thhn-unilay-10.pdf
- ElectroniLab. (2019). Obtenido de <https://cdn.electronilab.co/wp-content/uploads/2019/07/Celda-de-carga-20kg-sensor-de-Fuerza-o-Peso-Convertidor-HX711-2.jpg>
- Espinoza, J., & Naranjo, T. (2014). *ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA PRELIMINAR PARA LA OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES MEDIANTE LA PIRÓLISIS DE RESIDUOS PLÁSTICOS GENERADOS EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA*. CUENCA.
- Esther, P. (06 de 05 de 2020). *ELBLOGVERDE*. Obtenido de <https://elblogverde.com/clasificacion-plasticos/>
- Estrada Roque, J. A. (30 de 07 de 2018). *LogicBus*. Obtenido de <https://www.logicbus.com.mx/acondicionador-de-senales.php>
- García Jaimes, L. E. (2009). *Control Digital Teoría y Práctica*. Medellín: Politécnico Colombiano JIC.
- Gordillo, J. (2018). *Diseño y simulación de un equipo generador de biocarbón utilizando materia orgánica residual*. Quito: Facultad de Ingeniería Mecánica-EPN.
- Grainger. (2021). *Grainger*. Obtenido de <https://www.ingelcom.com.ec/shop/product/s23839-breaker-riel-din-2p-32a-10ka-5sl4232-7rc-16991?category=140>
- Guio, O., & Navarro, A. (2019). *Diseño de un sistema de control de temperatura, haciendo uso de técnicas de control para optimizar un proceso de conversión de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos por medio de pirólisis*. Bucaramanga: Facultad de Ingeniería Mecatrónica-Universidad Santo Tomás, Bucaramanga.
- H., A. (18 de 04 de 2020). *Borrowbits*. Obtenido de <https://i0.wp.com/borrowbits.com/wp-content/uploads/2020/04/broker-MQTT.png?w=1488&ssl=1>
- Johanna Espinoza, J., & Naranjo, T. (2014). *Estudio de viabilidad técnica preliminar para la obtención de combustibles mediante la pirólisis de residuos plásticos generados en la Universidad Politécnica Salesiana*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Kasmuri, N. H., Kamarudin, S. K., Abdullah, S. R., Hasan, H. A., & Som, A. M. (2017). Process system engineering aspect of bio-alcohol fuel production from biomass via pyrolysis: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 914-923.
- Kasmuri, N., Kamarudin, S., Abdullah, S., Hasan, H., & Som, A. (2018). Integrated Advanced Nonlinear Neural Network-Simulink Control System For Production Of Bio-Methanol from Sugar Cane Bagasse Via Pyrolysis. *Energy*, 261-272.

- Klop. (18 de 04 de 2018). *ATEC ENERGY BLOG*. Obtenido de <https://3.bp.blogspot.com/-2Rt3VsjnA5I/XMlekzgK2tI/AAAAAAAAAFk4/dmp8hCy67cQA-AN05sOo3TyM1KelhjdMgCLcBGAs/s640/Piramides.png>
- Koyanagi, F. (12 de 03 de 2018). *instructables circuits*. Obtenido de <https://content.instructables.com/ORIG/FE4/P1BY/JEOILQDT/FE4P1BYJEOILQDT.png?auto=webp&frame=1&fit=bounds&md=46fc053ea8942e022c2706c54f0574c6>
- Lewis, J. (10 de April de 2019). <https://www.baldengineer.com/>. Obtenido de Low side vs. High side transistor switch: <https://www.baldengineer.com/wp-content/uploads/2019/04/Transistor-Drivers.png>
- Llamas, L. (28 de 09 de 2019). Obtenido de <https://www.luisllamas.es/wp-content/uploads/2019/11/arduino-bts9760-componente.jpg>
- López, J. (16 de Noviembre de 2020). *hipertextual*. Obtenido de Así de fácil puedes instalar Android 11 en tu Raspberry Pi 4: <https://i0.wp.com/hipertextual.com/wp-content/uploads/2020/05/hipertextual-llega-raspberry-pi-4-con-8-gb-ram-lleves-paso-mas-alla-tus-proyectos-2020501219.jpg?w=1500&ssl=1>
- Mancheno, M., Astudillo, S., Arévalo, P., Malo, I., Naranjo, T., & Espinoza, J. (2016). APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS PLÁSTICOS OBTENIENDO COMBUSTIBLES LÍQUIDOS, POR MEDIO DE PIRÓLISIS. *LA GRANJA:Revista de Ciencias de la Vida*, 53-59.
- Martínez, E. (08 de Enero de 2020). *La Vanguardia*. Obtenido de <https://www.lavanguardia.com/natural/20200108/472778372471/tiempo-tardadescomponerse-envase-plastico-en-el-mar-denuncia-contaminacion.html>
- MaxElectronica. (2019). Obtenido de https://maxelectronica.cl/940-large_default/modulo-conversor-adc-max6675-spi-para-termocuplas-tipo-k.jpg
- Mecafenix. (16 de Enero de 2018). *¿Qué es y para qué sirve un PLC?* Obtenido de [ingmecafenix.com](https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/que-es-un-plc/): <https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/que-es-un-plc/>
- MercadoLibre Ecuador Cia. Ltda. (8 de Enero de 2022). *MercadoLibre*. Obtenido de Mgsystem Conversor Corriente A Voltaje 4-20ma A 0-5v Arduino: https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_768181-MEC44998896651_022021-O.webp
- Mora, H. (2011). *Sistemas de adquisición y Procesamiento de datos*.
- National Instruments. (2012). *¿Qué es Adquisición de Datos?* Obtenido de <http://sine.ni.com/np/app/main/p/ap/daq/lang/es/pg/1/sn/n17:daq/fmid/652/>
- Ogata, K. (2010). *INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Ohmio. (11 de 04 de 2019). *Resistencias Eléctricas OHMIO*. Obtenido de <https://www.ohmio-ec.com/servicios>
- Ojeda, J. P. (10 de Septiembre de 2019). *Plataforma de información para políticas públicas de la Universidad Nacional de Cuyo*. Obtenido de <http://www.politicaspUBLICAS.uncuyo.edu.ar/articulos/index/generacion-de-residuos-de-plastico-la-importancia-de-la-prevencion>

- Oscar, C. (21 de 11 de 2021). *KeeUI Solar*. Obtenido de <https://keeui.com/2021/11/21/produccion-de-hidrogeno-metodos-convencionales-parte-2/>
- Pendino, C., & Crespo, M. (2015). *Introducción al modelado de Sistemas físicos*. Rosario: Universidad Nacional de Rosario.
- Proaño, O., & Crespo, S. (2009). Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos. *Revista Politécnica*, 137-144.
- ProElec. (07 de 08 de 2020). Obtenido de <https://prontoelectronica.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/boton.jpg>
- Raspberry. (15 de 09 de 2015). *Raspberry Pi*. Obtenido de https://images.prismic.io/rpf-products/432cfd901a27d4bbbddb761269547cedf4aa4c1b_display-kit-1-1510x1080.jpg?ixlib=gatsbyFP&auto=compress%2Cformat&fit=max&q=50&w=800&h=533
- Reiser, J. (10 de Julio de 2011). *WIKI*. Obtenido de Connection diagram of PNP and NPN transistor outputs for electronic pressure switches: https://blog.wika.com/files/2011/10/PNP_NPN_switching-outputs.jpg
- Robot. (Agosto de 2021). *robot.com.ve*. Obtenido de <http://robot.com.ve/wp-content/uploads/2021/08/AR2667-XL4015-v1.jpg>
- Rodríguez, P. (2013). *Diseño de Interfaces Hombre - Máquina (HMI)*. Obtenido de [sistemamid.com:](http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/619/620/621/3620.pdf)
<http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/619/620/621/3620.pdf>
- Smith, G. M. (01 de 03 de 2020). *Dewesoft*. Obtenido de <https://dewesoft.com/es/daq/que-es-adquisicion-de-datos>
- SOLID, U. (2020). Obtenido de https://cdn11.bigcommerce.com/s-ige284rpwh/images/stencil/1280x1280/products/703/2925/jfmsv00002_1___38621.1529034948.jpg?c=2590.1558582308.jpg?c=2
- Valois, M. (22 de Mayo de 2018). *Qué es internet de las cosas y cómo funciona*. Obtenido de [hostgator.com:](https://www.hostgator.mx/blog/internet-de-las-cosas/) <https://www.hostgator.mx/blog/internet-de-las-cosas/>
- Villar, M. (13 de 05 de 2021). *tecnología10.top*. Obtenido de <https://tecnologia10.top/ventajas-y-caracteristicas-de-los-chips-esp32/>
- Yudesign. (2016). *dreamstime*. Obtenido de <https://thumbs.dreamstime.com/z/parada-de-emergencia-2016453.jpg>

Anexos