



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO

**TEMA: “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”**

### **AUTORES:**

- NOLIVOS RAMÍREZ, CARLOS ALEXANDER
- PIZA REASCO, ROBERT ANTONIO

### **DIRECTOR:**

ING. SINGAÑA AMAGUAÑA, MARCO ADOLFO

**LATACUNGA 2021**



Planteamiento del Problema

Objetivos

Marco Teórico

Especificaciones para el proceso

Diseño del sistema SCADA

Implementación del sistema SCADA

Pruebas y Resultados

Conclusiones y Recomendaciones

Video



# Planteamiento del Problema

El consumo de los plástico en la sociedad moderna se estima que crece un 4% cada año y también representa el 12% de los residuos solidos urbanos a nivel mundial.



La investigación científica y experimentación ha permitido el desarrollo de procesos para aprovechar los residuos derivados del plástico. Este es el caso del reactor de pirólisis, que permite, a través de una reacción química, obtener hidrocarburos líquidos.



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 cual puede interferir en los resultados debido al error humano.



# Objetivos

## 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

## 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.



## Variables del proceso

Temperatura

Presión

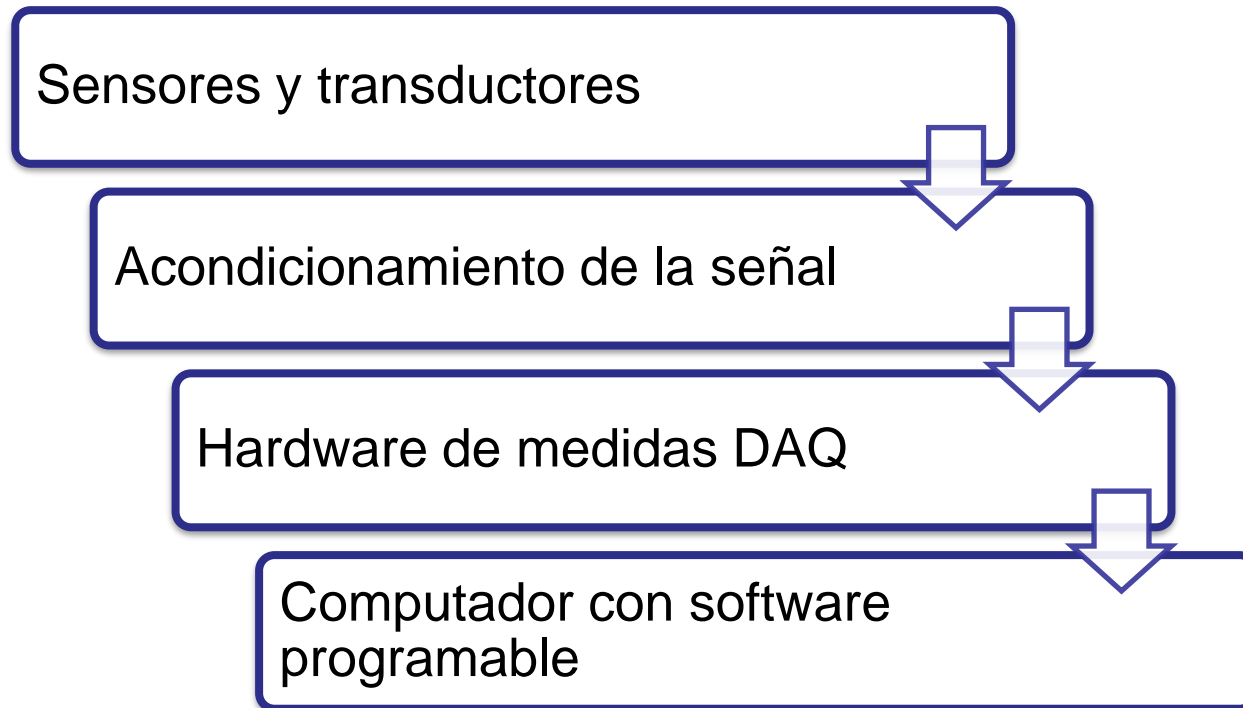
Velocidad de calentamiento

Tiempo de resiliencia

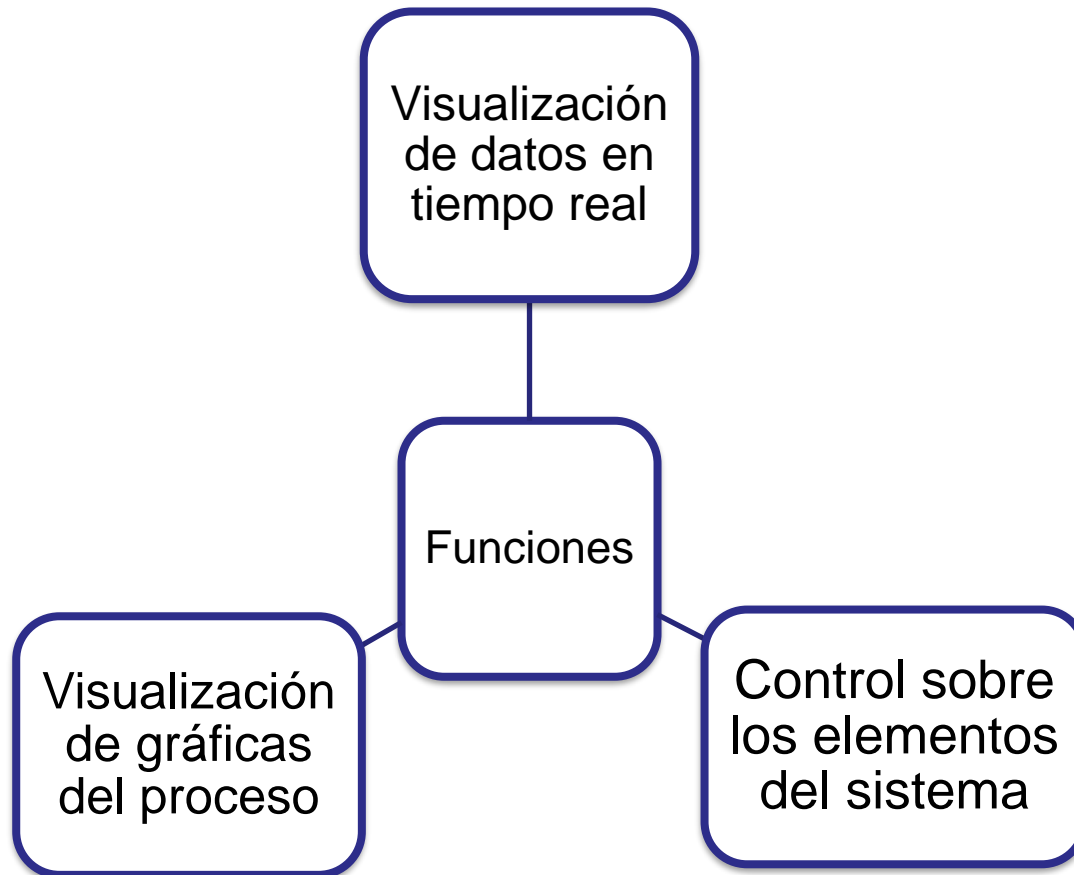


## Adquisición de señales

La adquisición de datos es el proceso de obtener un valor medible de un fenómeno eléctrico o físico y consiste en cuatro elementos esenciales



## Interfaz Humano Máquina



# Diseño Sistema SCADA

## ESPECIFICACIONES PARA EL PROCESO

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





## SELECCIÓN DE LA CAMISA DE CALENTAMIENTO

Ecuación para obtener el calor necesario y posteriormente calcular la potencia requerida

$$Q = m * c * \Delta T$$

$$P = \frac{Q}{n * t}$$

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

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



## DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL DE FASE

Para diseñar el circuito de control de fase se consideran los siguientes elementos:

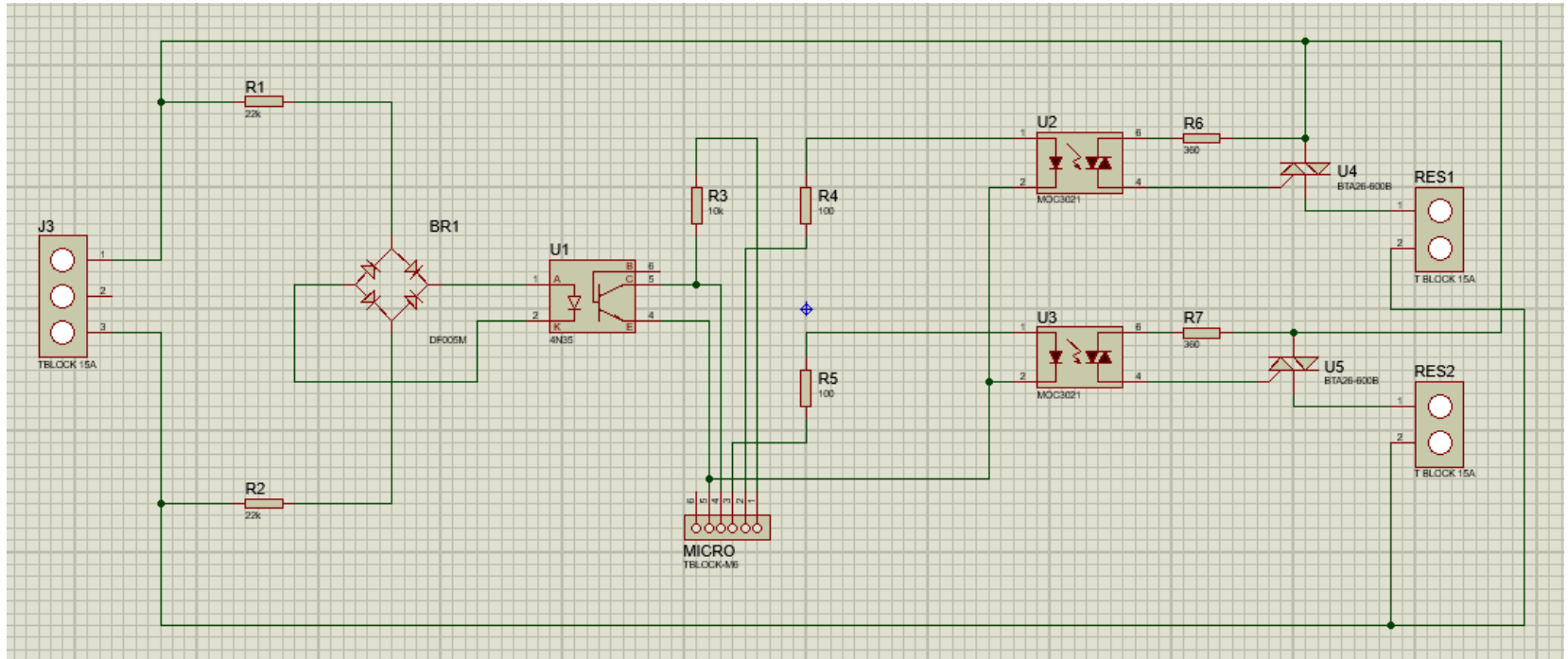
- Resistencias
- Opto – Triac
- Opto - Transistor
- Triac
- Puente de diodos

$$I_{reac} = \frac{3800W}{220Vac} = 17,3A$$

$$I_{tolva} = \frac{1800W}{220Vac} = 8,2A$$



# Diseño Sistema SCADA



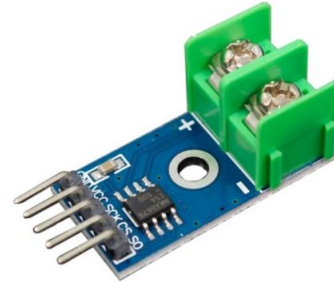
# Diseño Sistema SCADA

## SELECCIÓN DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA



### Termocupla tipo K

- Fabricante: Twidec
- 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

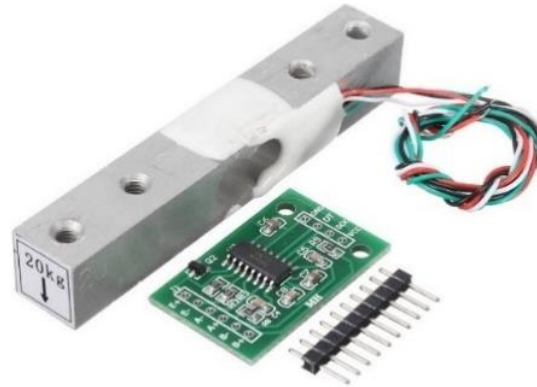


### Max6675

- 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



## SELECCIÓN DE LA CELDA DE CARGA



Celda de carga:

- Modelo: FZ1439
- Capacidad de carga nominal: 20Kg
- Dimensiones: 80x12.7x12.7mm
- Material: aluminio
- Temperatura de trabajo: -10°C a 50°C
- Sobre carga de seguridad: 150%
- Precisión: 0.02% FS

HX711:

- 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

## SELECCIÓN DE LA VÁLVULA MOTORIZADA

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 10000 ciclos



## SELECCIÓN DE LOS SENSORES DE PRESIÓN



Transmisor de presión:

- 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



Torre de enfriamiento:

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

# Diseño Sistema SCADA



## Convertor de corriente a voltaje:

- 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:  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $+60^{\circ}\text{C}$



## ADC ADS1115:

- Voltaje de operación: 2V a 5,5V
- Corriente:  $150 \mu\text{A}$
- Velocidad de muestreo: 8 Hz a 860 Hz
- Resolución: 16-bit
- Canales: 4 canales de entrada
- Interfaz de comunicación I2C



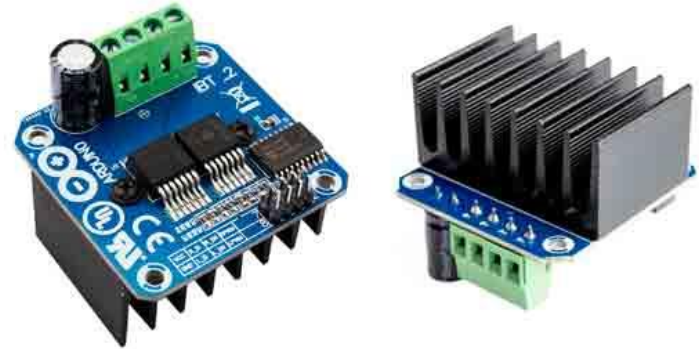


# Diseño Sistema SCADA

## SELECCIÓN DEL MOTOR



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



- 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
- Entrada máxima de frecuencia: 25 KHz



## SELECCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE CONTROL Y MONITOREO

### Raspberry PI 4

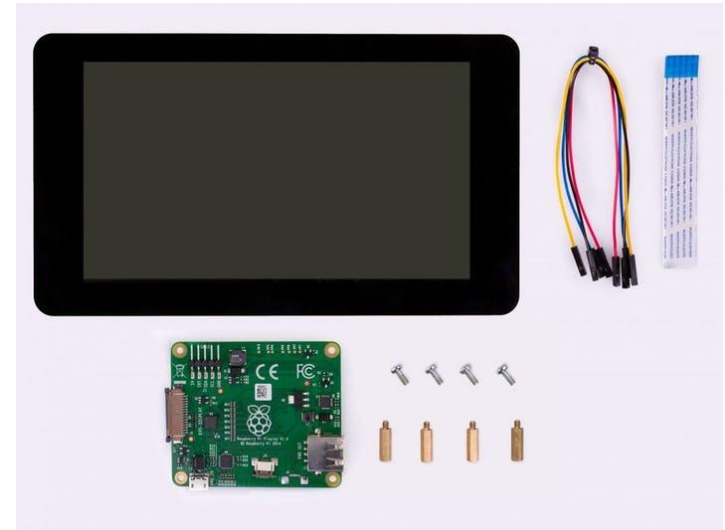
- Procesador: ARM Cortex-A72
- Frecuencia de reloj: 1,5 GHz
- GPU: VideoCore VI (con soporte para OpenGL ES 3.x)
- Memoria: 8 GB LPDDR4 SDRAM
- Conectividad: Bluetooth 5.0, Wi-Fi 802.11ac, Gigabit Ethernet
- Puertos: GPIO 40 pines 2 x micro HDMI 2 x USB 2.0 2 x USB 3.0 CSI (cámara Raspberry Pi) DSI (pantalla tácil) Micro SD Conector de audio jack USB-C (alimentación)



# Diseño Sistema SCADA

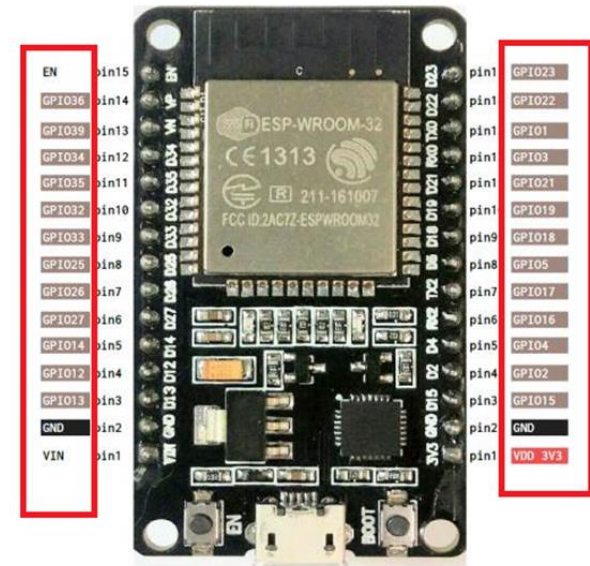
## Pantalla táctil Raspberry:

- 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



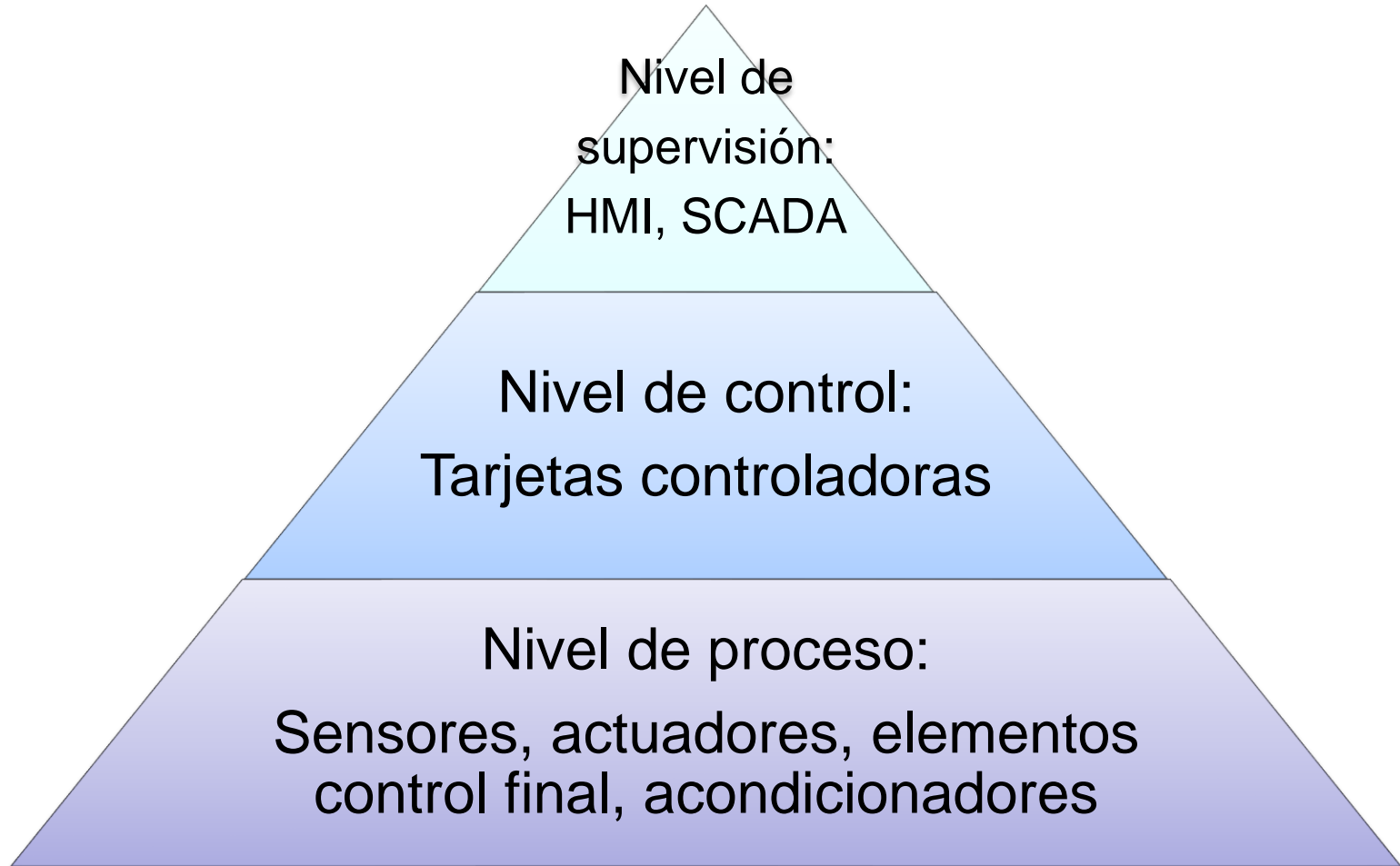
# Diseño del sistema SCADA

- 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



# *Diseño del sistema SCADA*

## PIRÁMIDE DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO



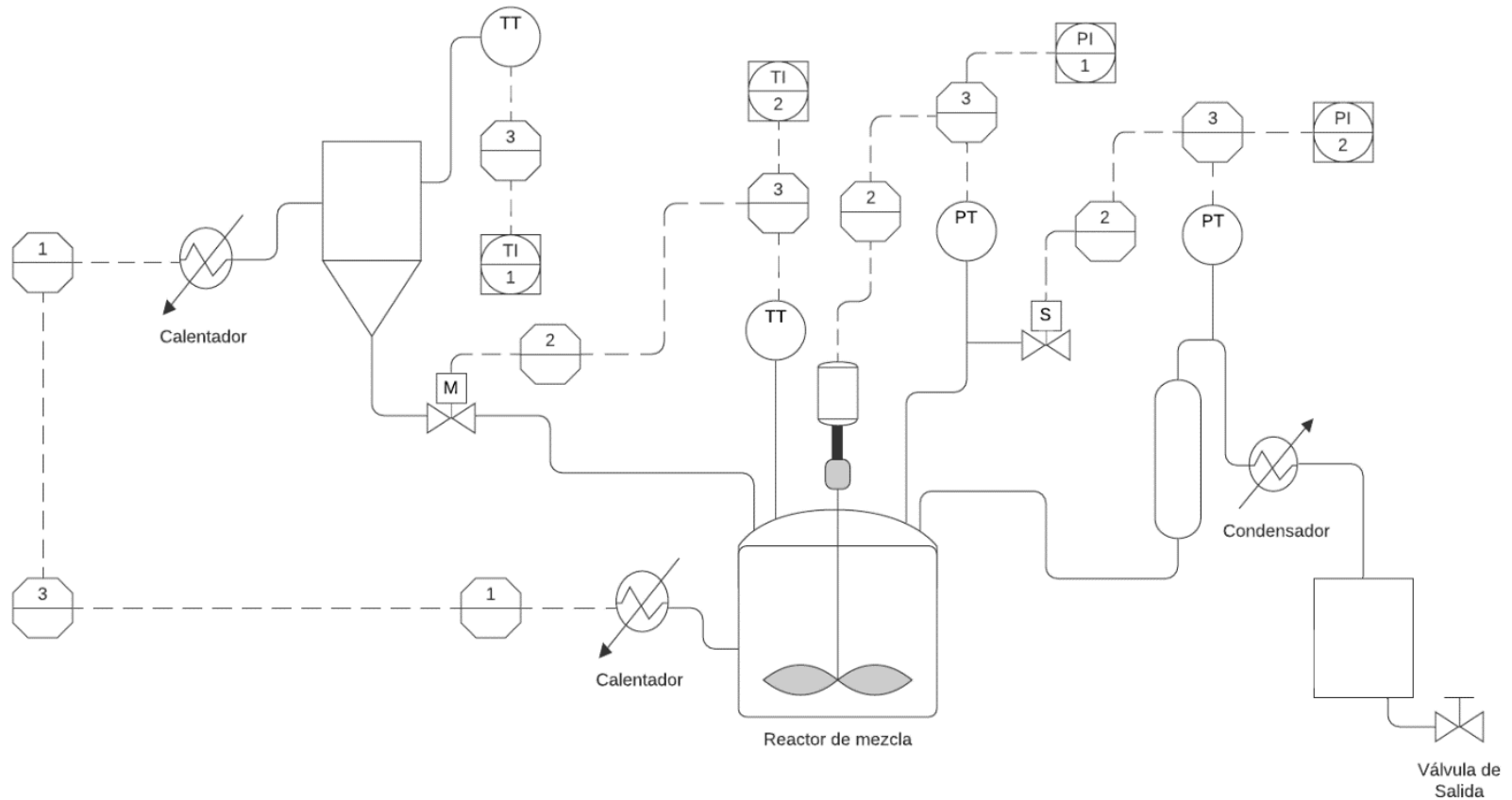
# Diseño del sistema SCADA

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	--	--	--



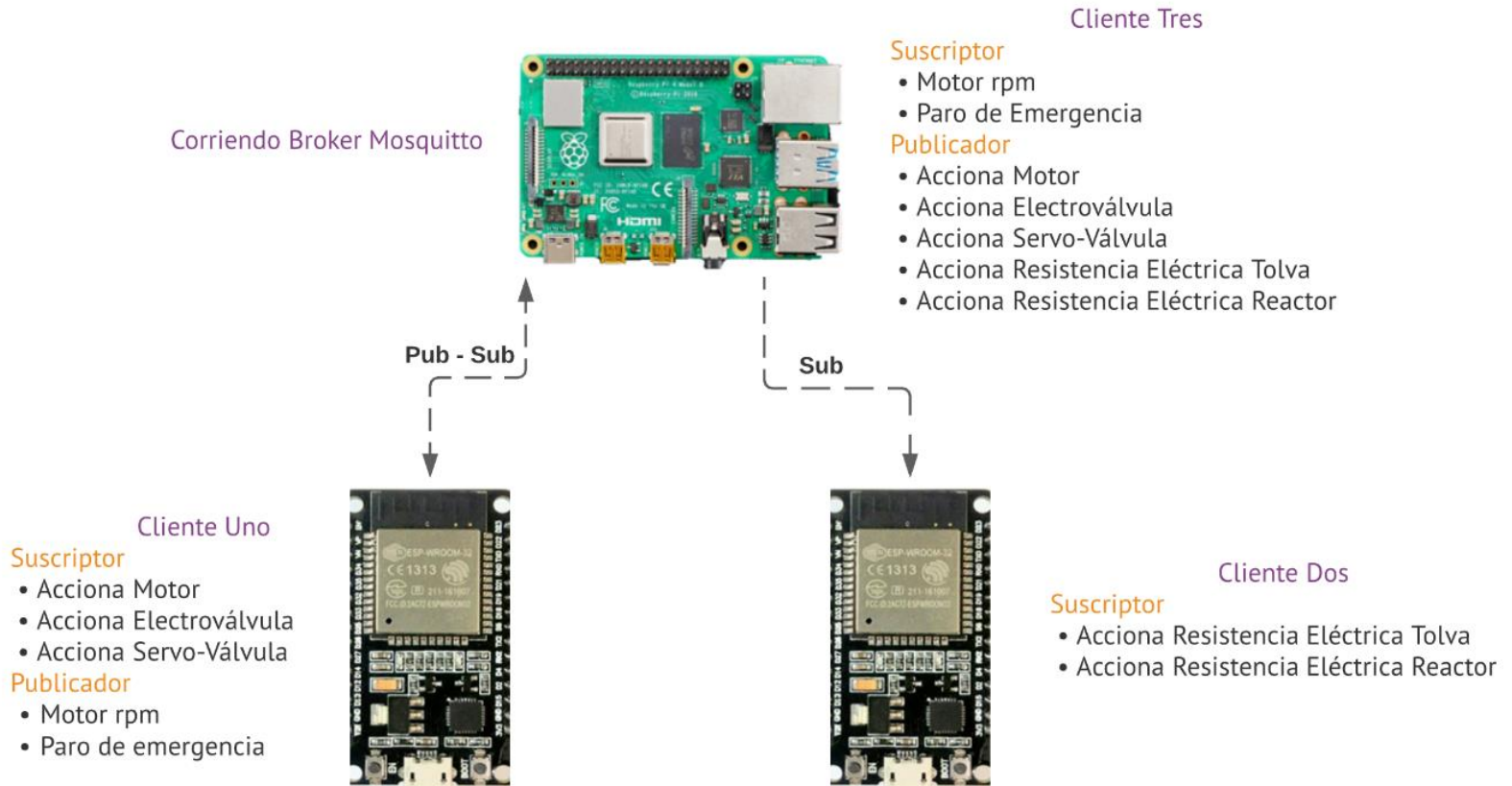
# Diseño del sistema SCADA

## DIAGRAMA DE INSTRUMENTACIÓN



# Pruebas y Resultados

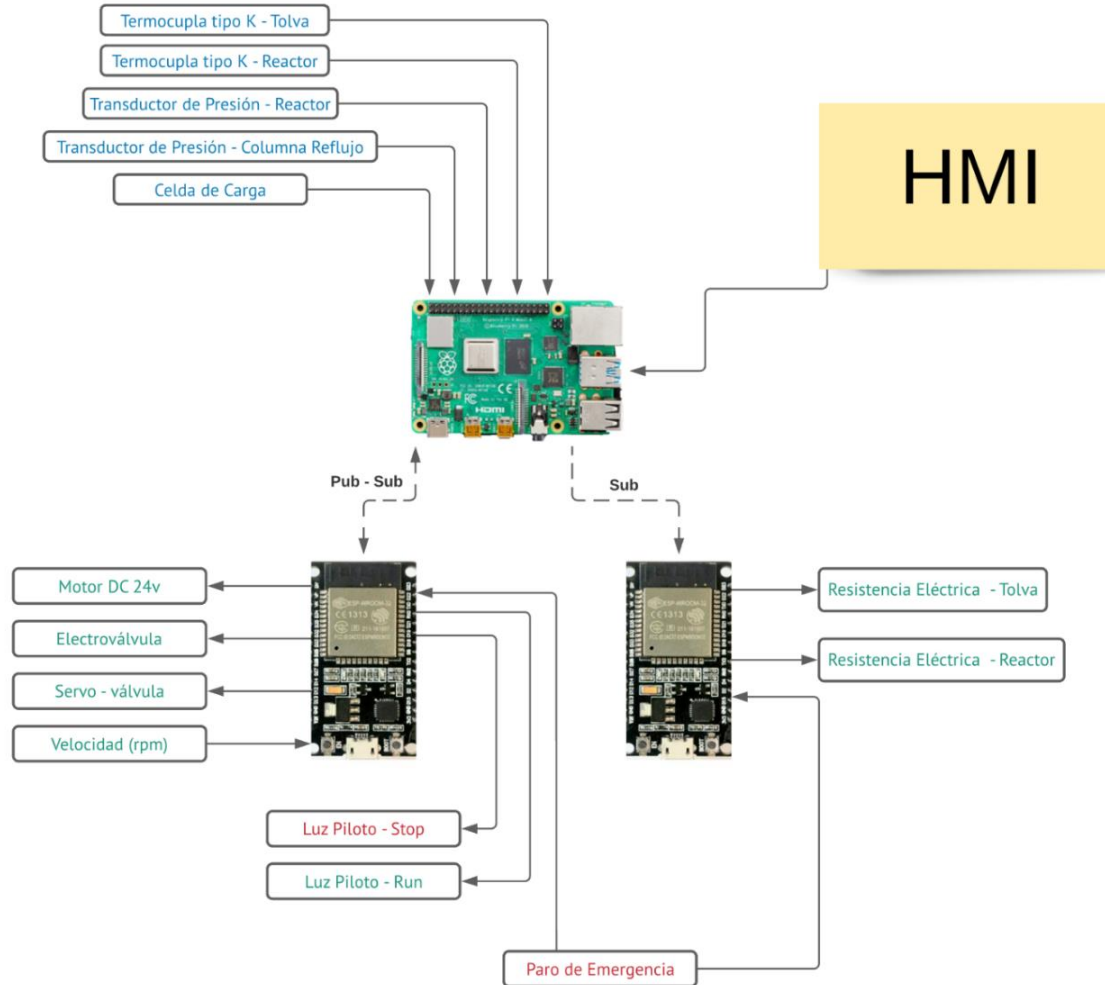
## DISEÑO DE LA RED DE COMUNICACIÓN





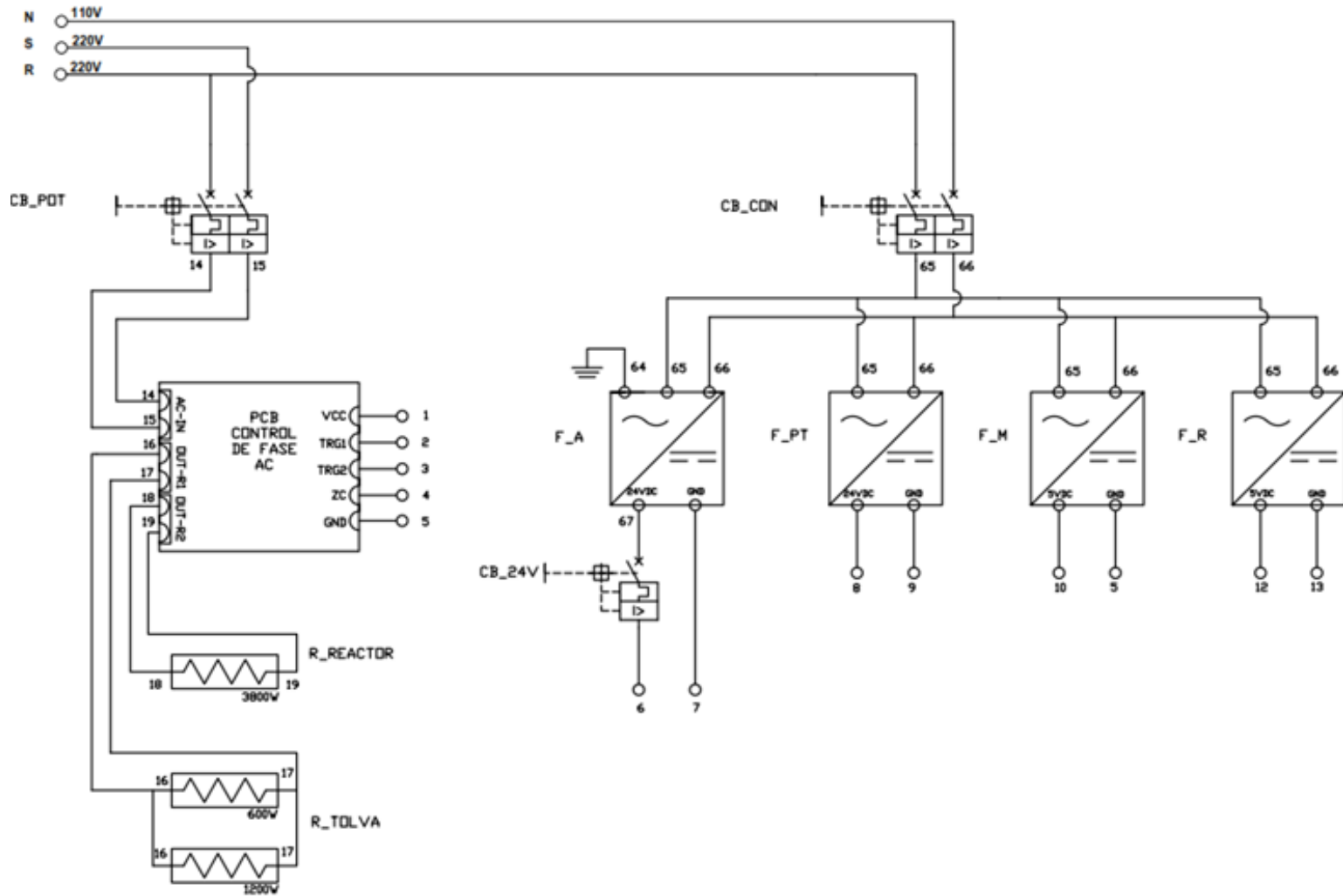
# Diseño del sistema SCADA

## DÍAGRAMA GENERAL DEL SISTEMA

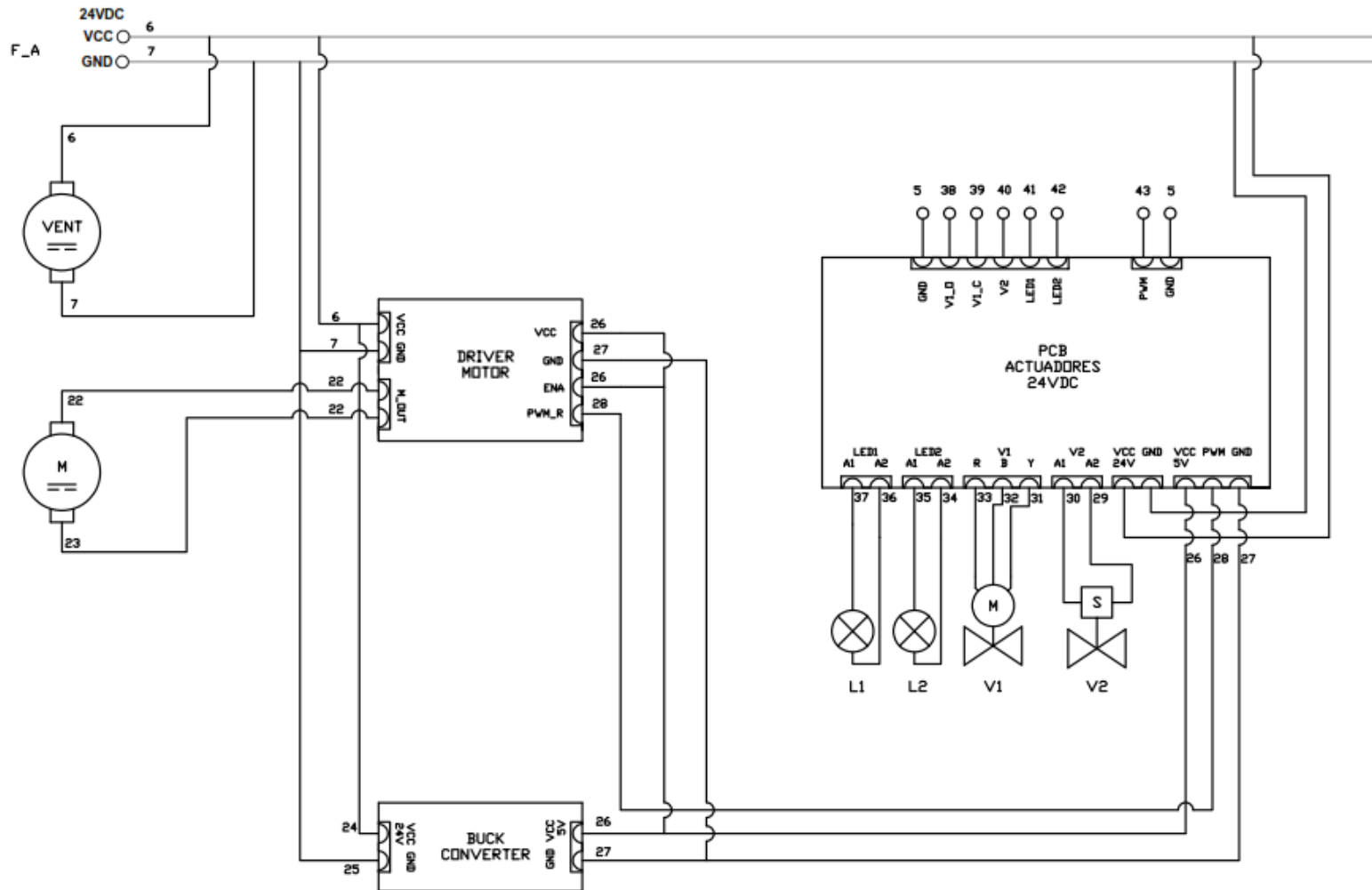


# Diseño del sistema SCADA

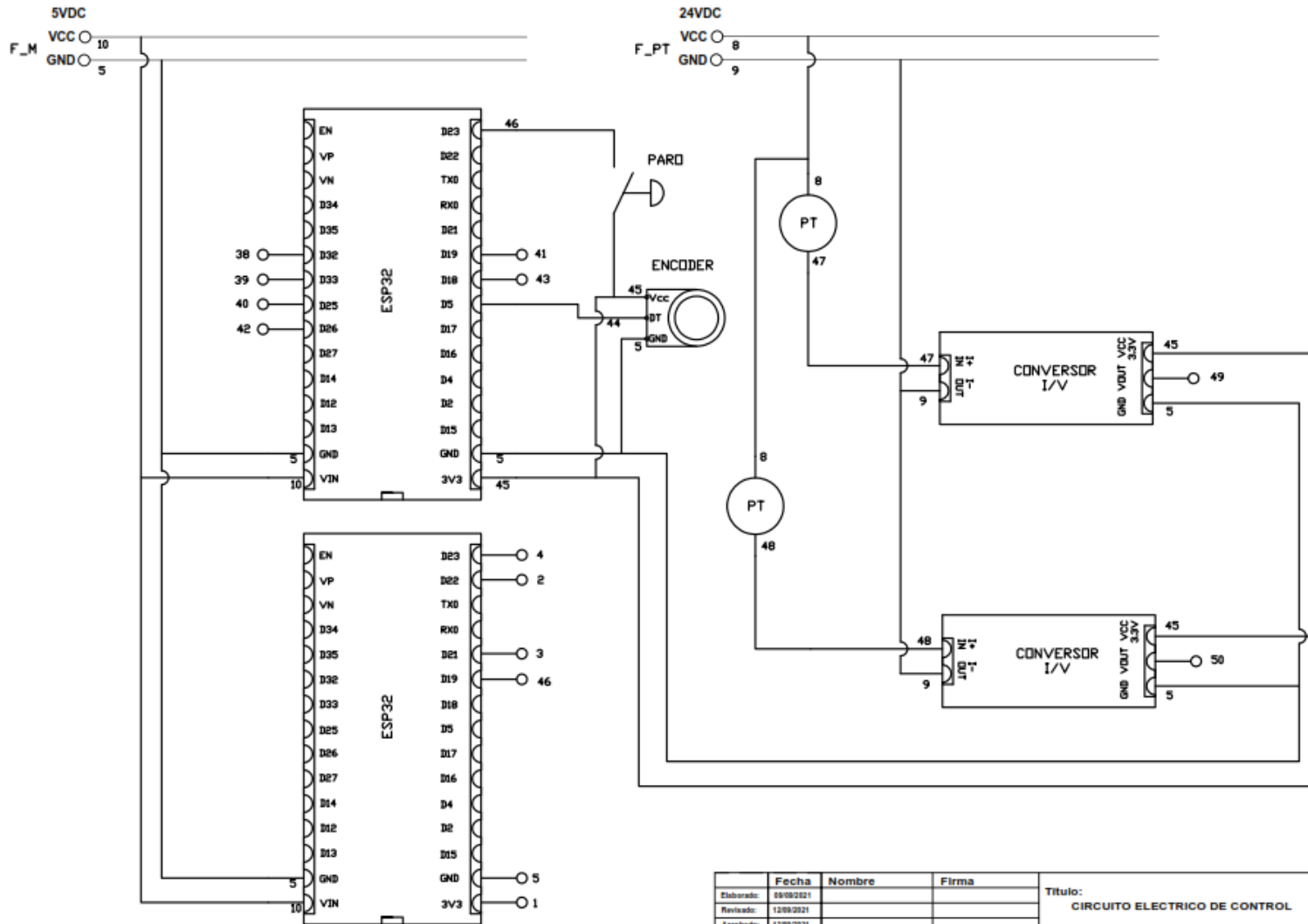
## DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO



# Diseño del sistema SCADA



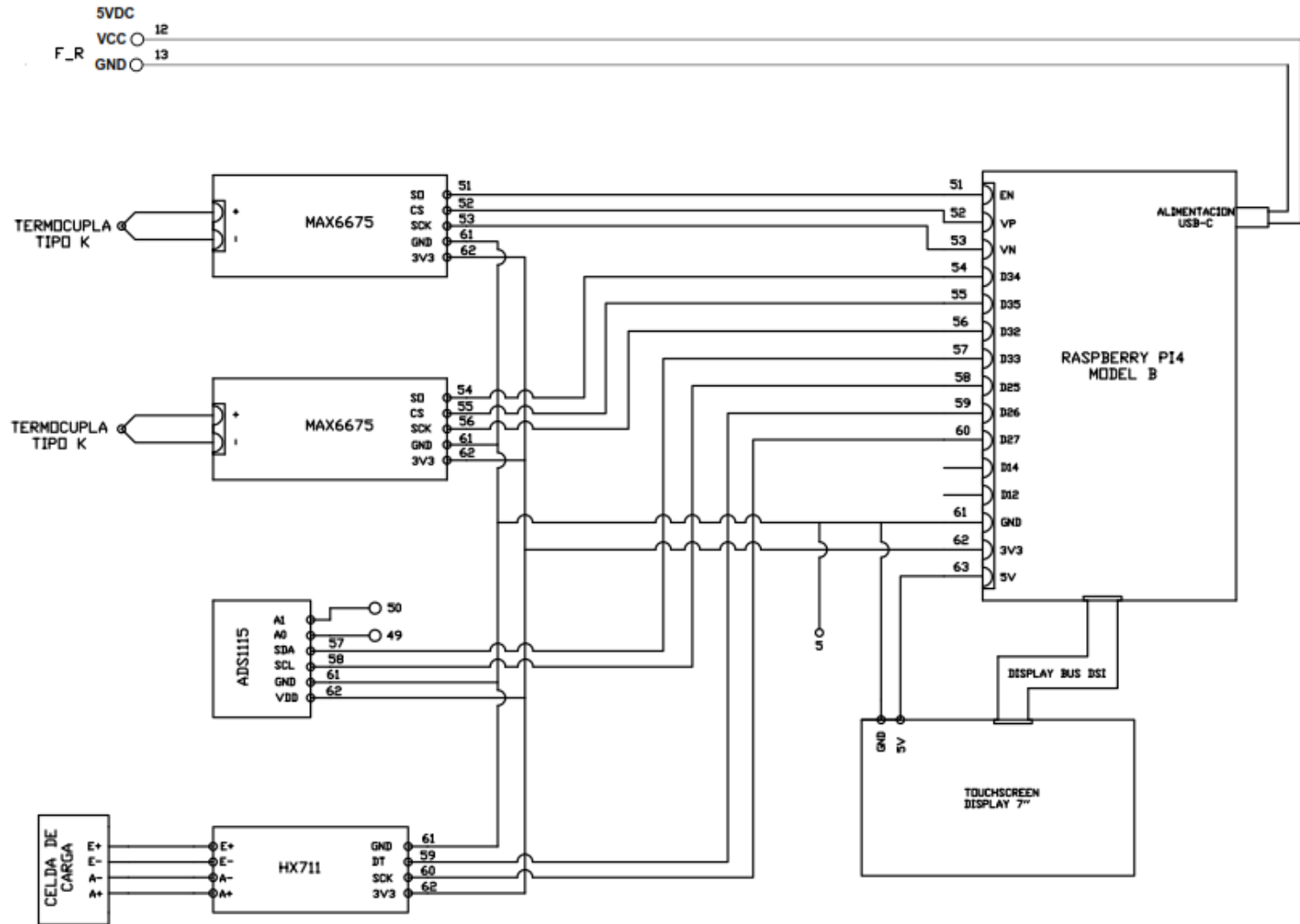
# Diseño del sistema SCADA



	Fecha	Nombre	Firma	Título:	Escala:
Elaborado:	08/09/2021			CIRCUITO ELECTRICO DE CONTROL	1 : 1
Revisado:	12/09/2021				
Aprobado:	12/09/2021				

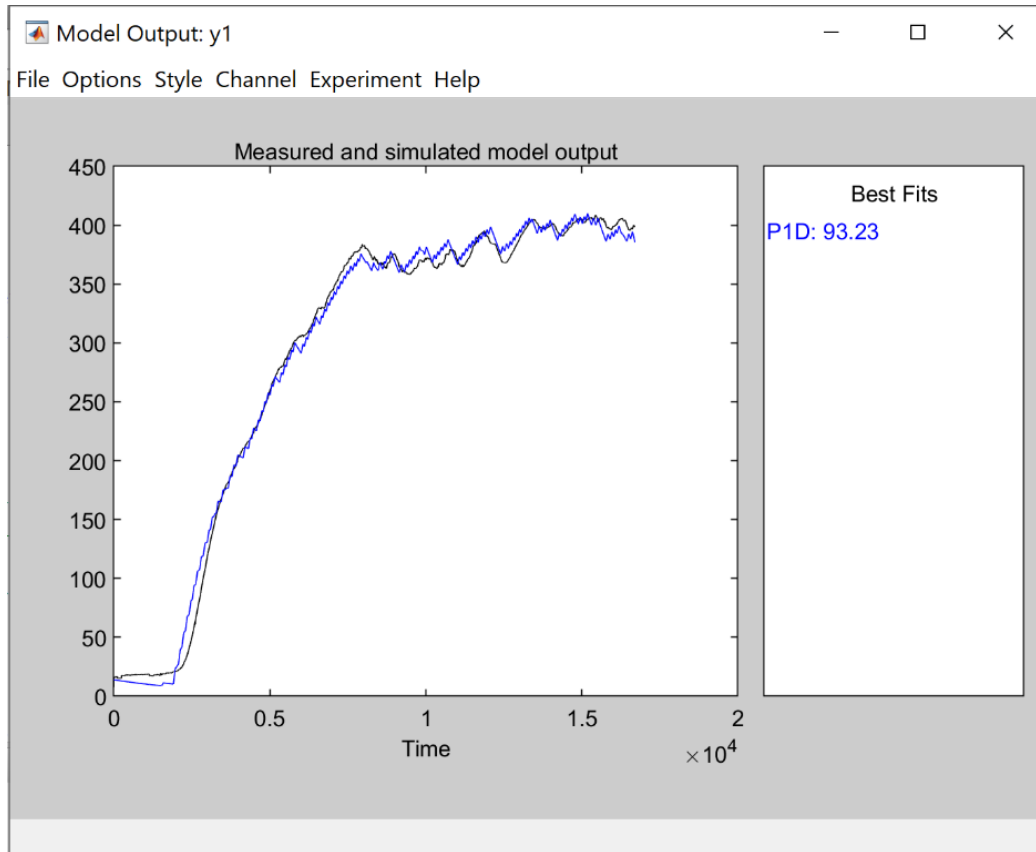


# Diseño del sistema SCADA



# Diseño del sistema SCADA

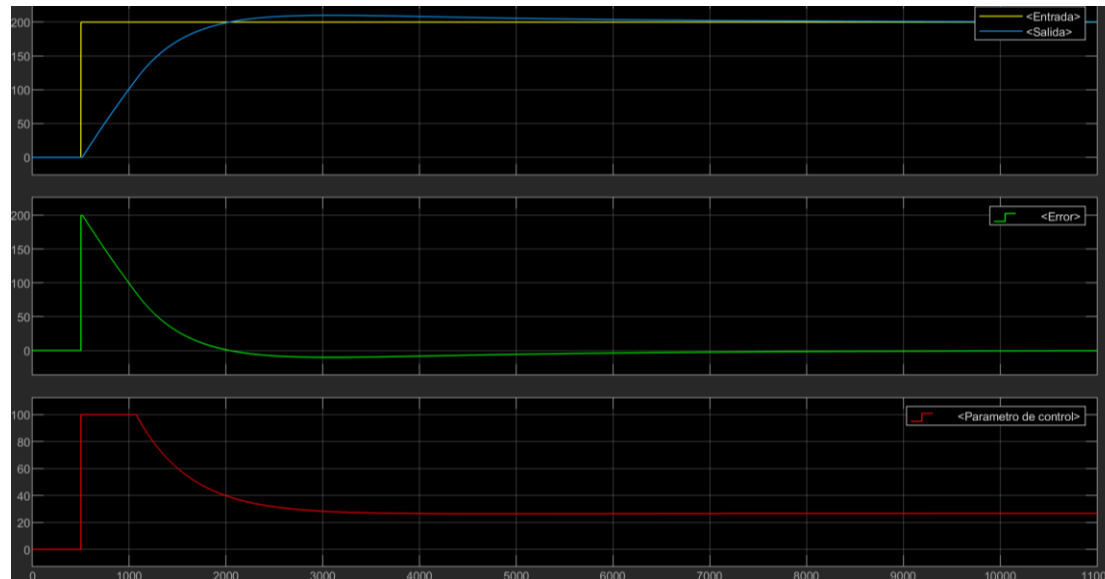
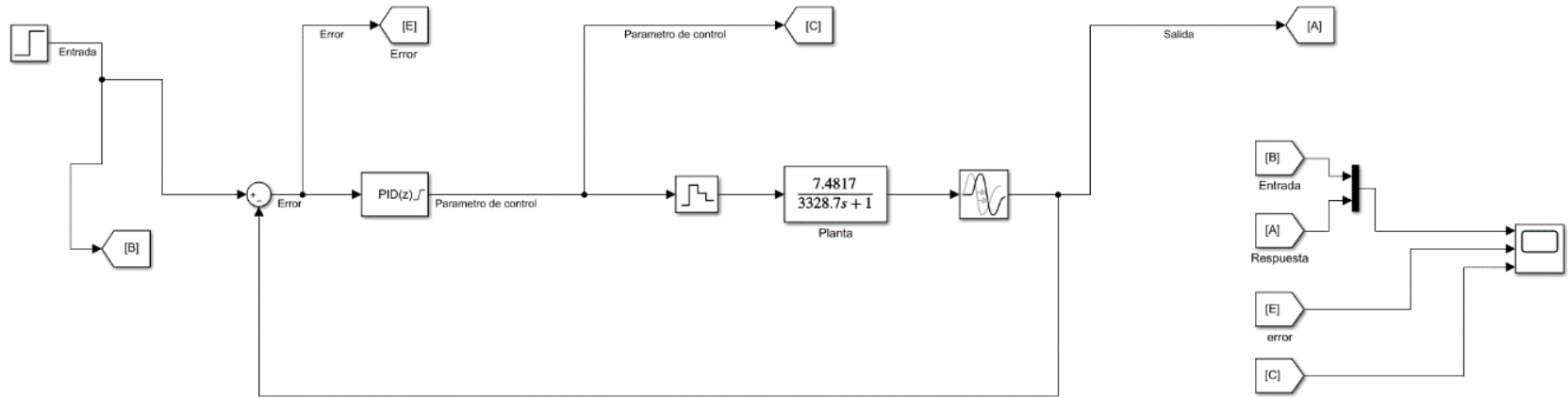
## DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL



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

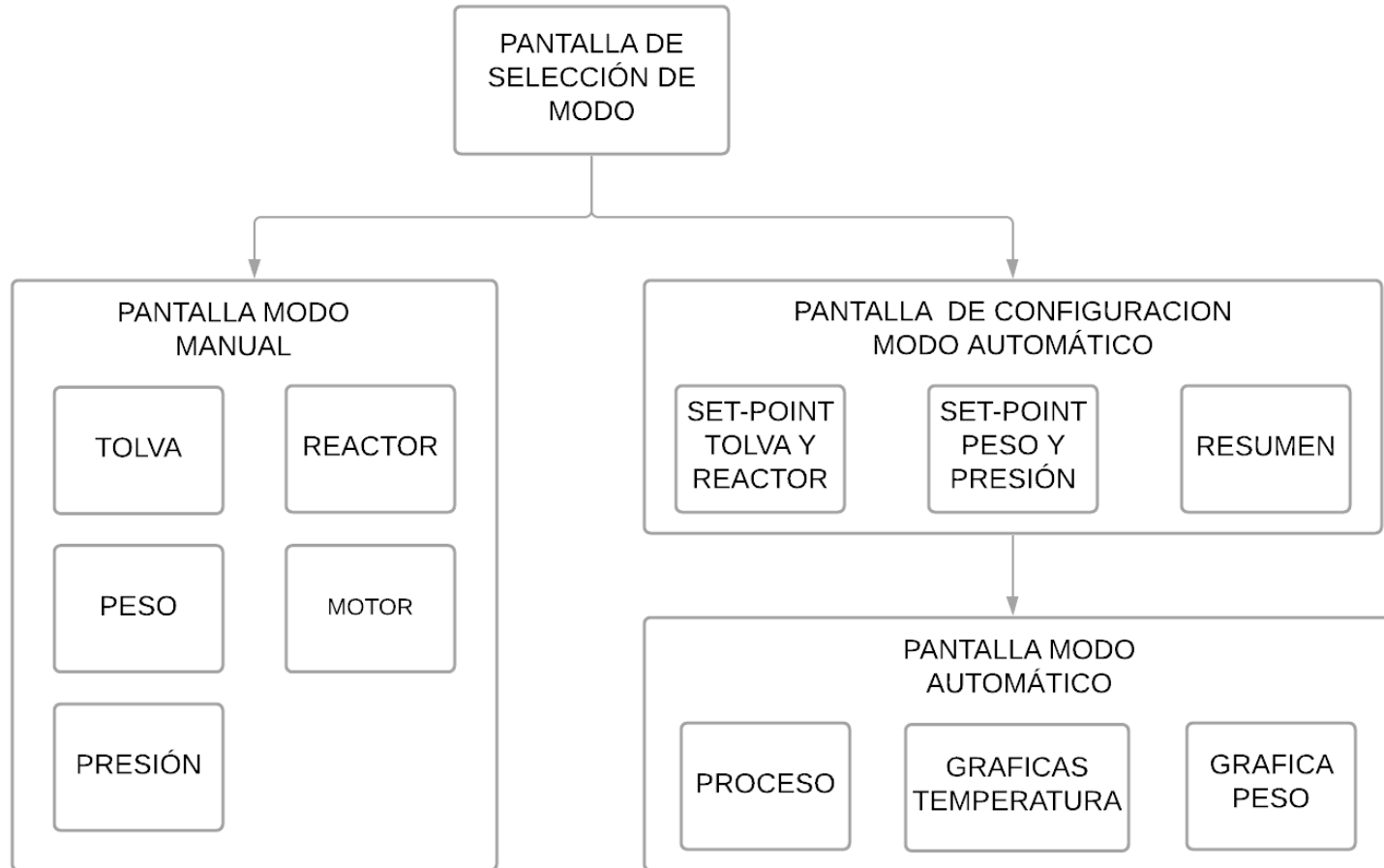


# Diseño del sistema SCADA



# Diseño del sistema SCADA

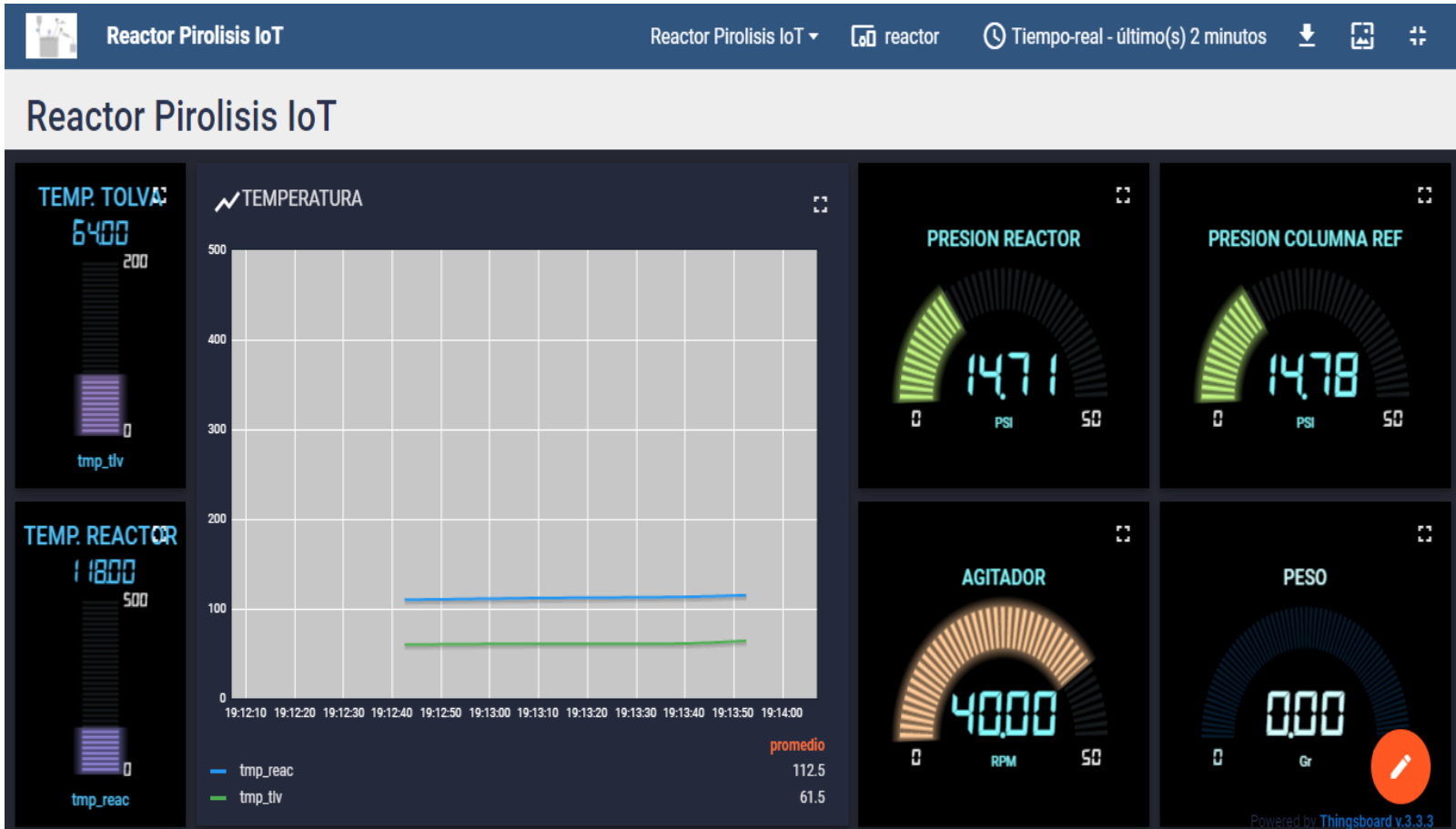
## DISEÑO DEL INTERFAZ HUMANO MÁQUINA





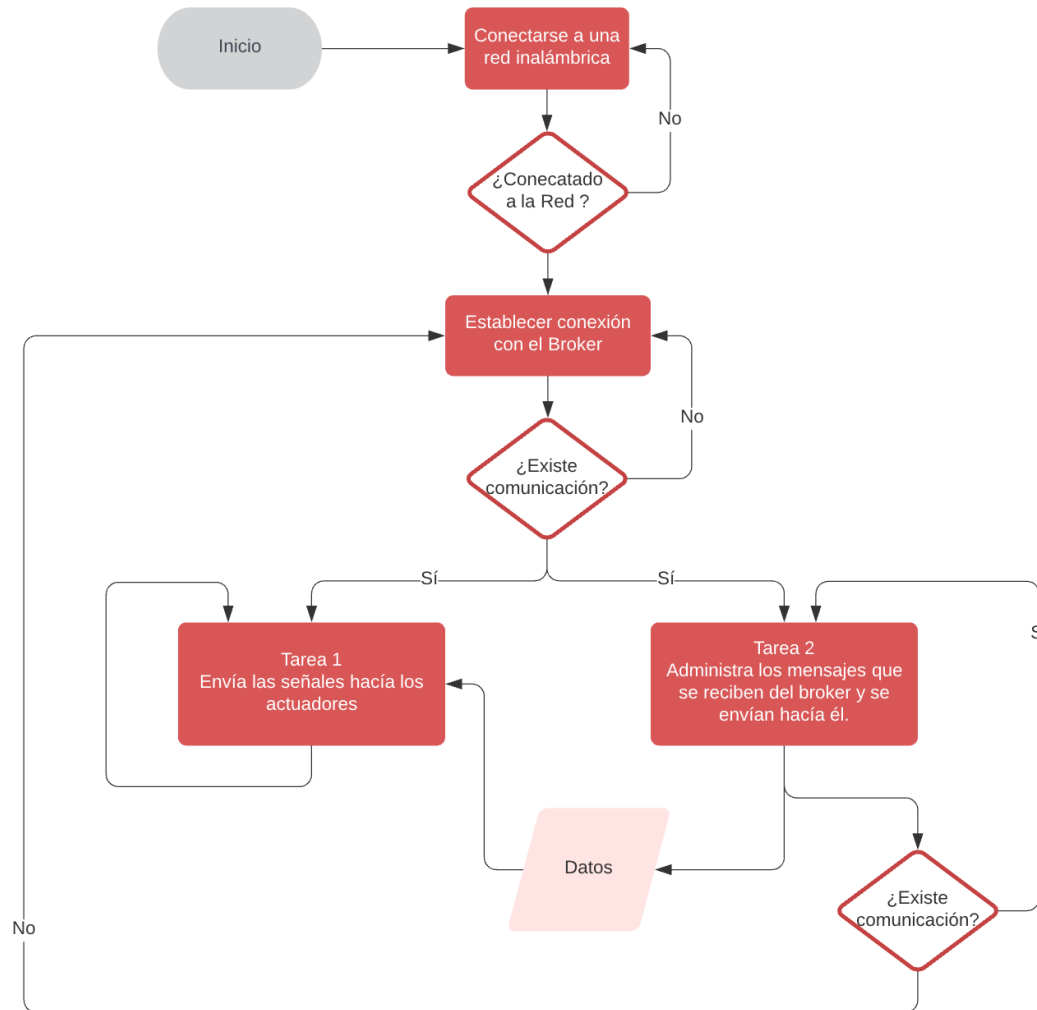
# Diseño del sistema SCADA

## DISEÑO DEL IOT



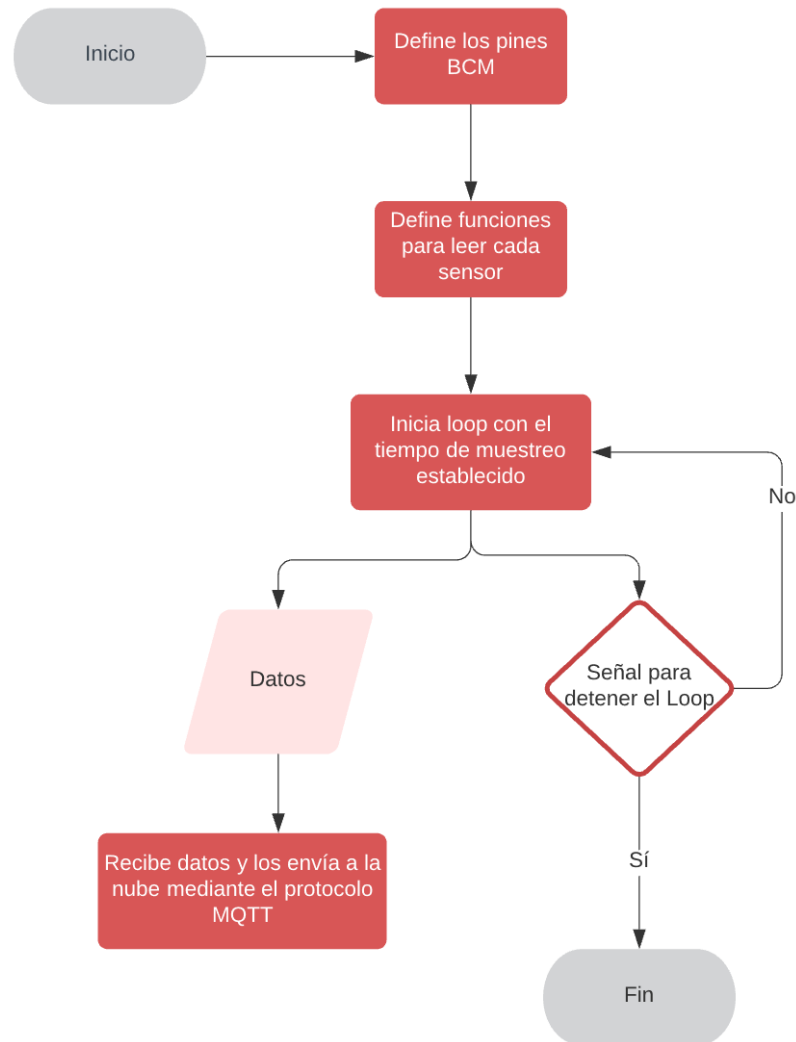
# Implementación del sistema SCADA

## IMPLEMENTACIÓN PARA EL CLIENTE 1 Y 2



# Implementación del sistema SCADA

## IMPLEMENTACIÓN EN LA RASPBERRY PI 4

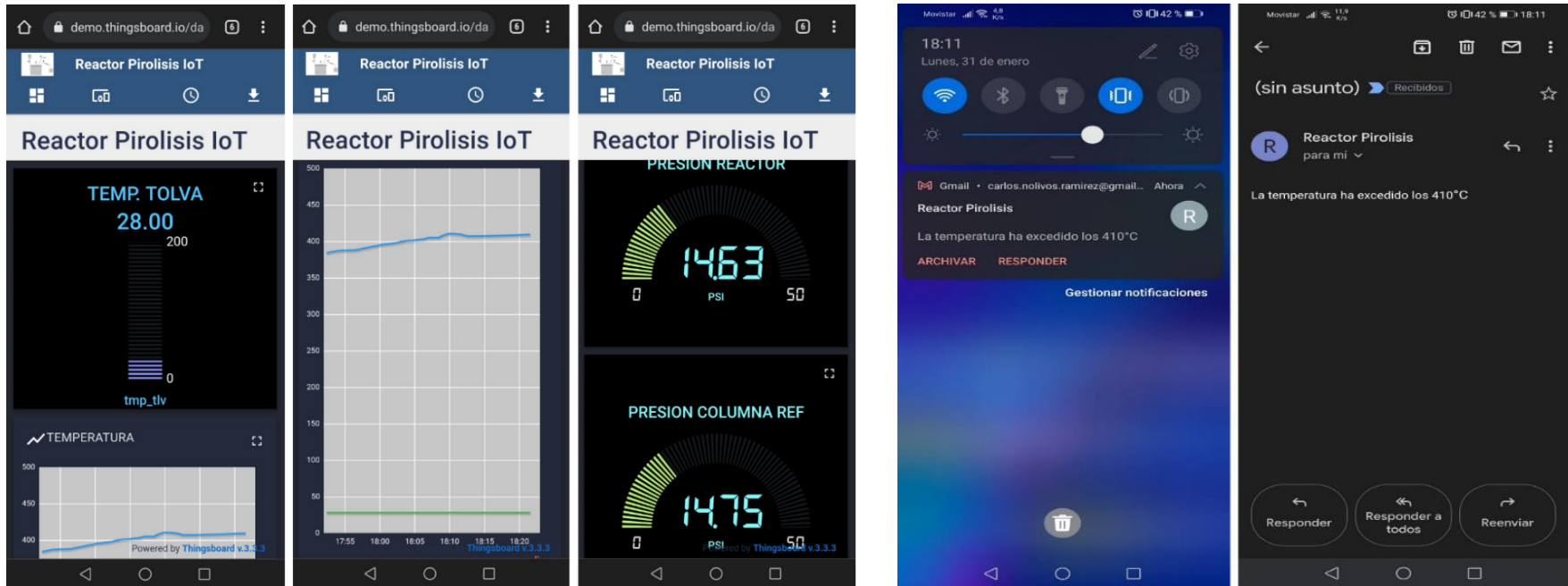


# Implementación del sistema SCADA



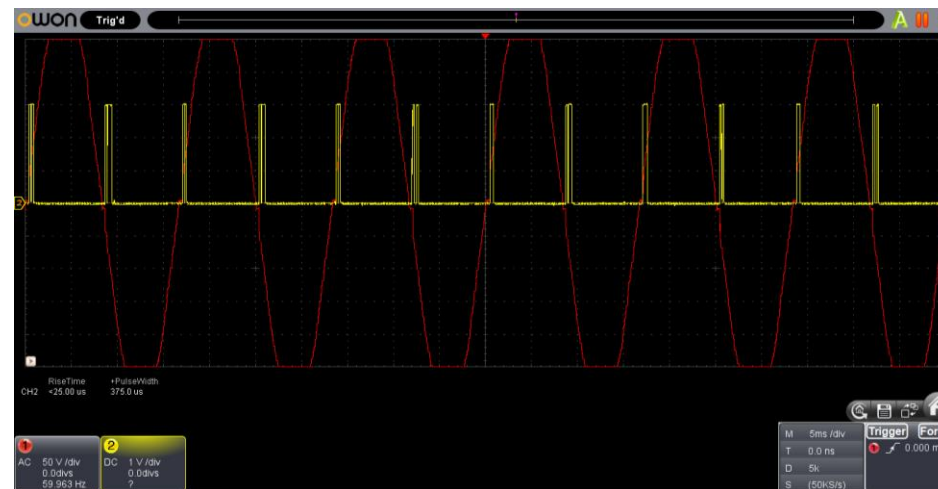
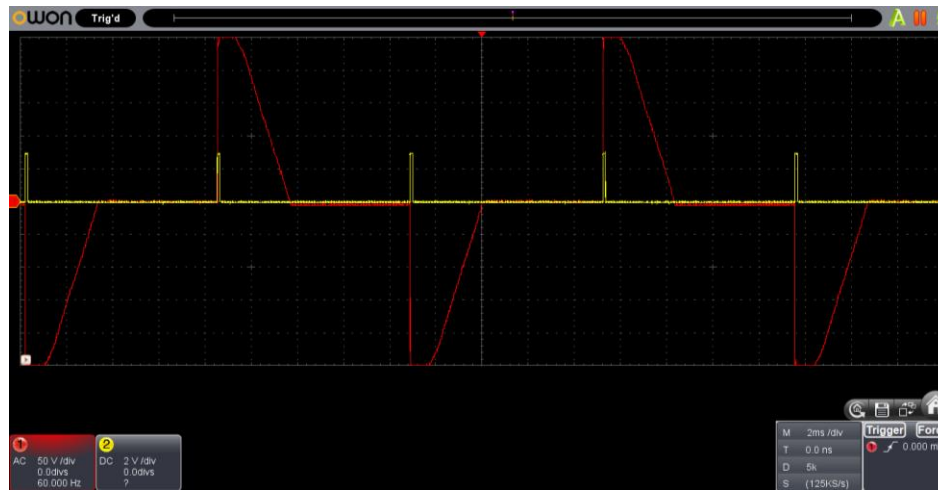
# Implementación del sistema SCADA

## IMPLEMENTACIÓN DEL IOT



# Pruebas y resultados

## SISTEMA ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

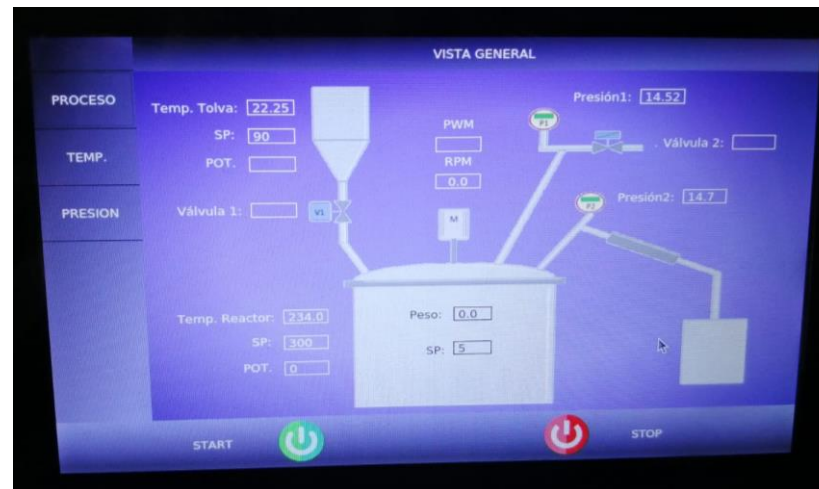


# Pruebas y resultados

## PRUEBAS DEL SISTEMA SCADA

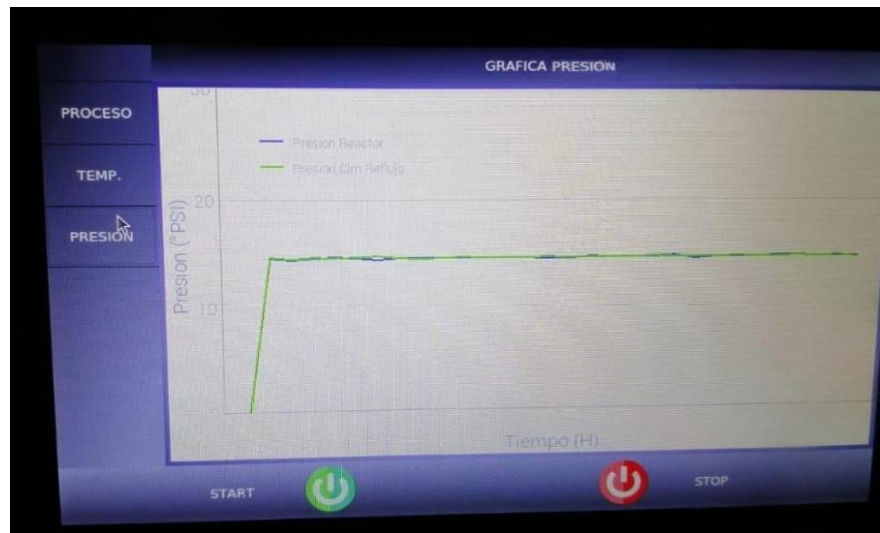
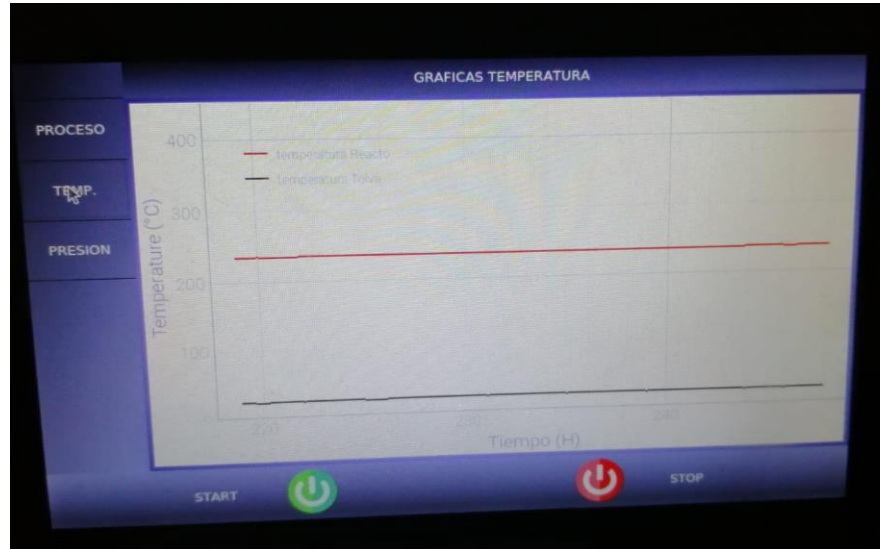


# Pruebas y resultados





# Pruebas y resultados



# Pruebas y resultados

## PRODUCTO OBTENIDO



# Pruebas y resultados

Para validar la hipótesis planteada, se toma como referencia la velocidad de calentamiento del reactor de 5°C/min, ya que 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.

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



# Pruebas y resultados

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

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

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

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

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

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.



# 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.



# Conclusiones

- 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 Kp, Kd y Ki, 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.



# Conclusiones

- 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.



# Conclusiones

- 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.





# Conclusiones

- 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.



# Conclusiones

- 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.



# 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 elemento 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.



# Recomendaciones

- 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.







# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# GRACIAS

