



**FACULTAD
DE INGENIERIA**

Universidad de Buenos Aires

**CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN
SISTEMAS EMBEBIDOS**

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

**Medición y aceptación de parámetros en
transformadores de corriente alterna**

Autor:

Ing. Cristian Trinidad

Director:

Esp. Lic. Leopoldo A. Zimperz (Iris Tecnologia S.R.L.)

Jurados:

Gonzalo Sánchez (pertenencia)

Gerardo Puga (pertenencia)

Agustín Rey (pertenencia)

*Este trabajo fue realizado en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires,
entre junio de 2020 y junio de 2021.*

Resumen

La presente memoria describe el desarrollo de un prototipo encargado de medir, registrar y calificar los parámetros de transformadores de tensión alterna empleados en la fabricación de dispositivos electromédicos. Con este trabajo se busca acelerar el proceso de calificación de transformadores que actualmente se realiza manualmente por un operador. Este trabajo fue realizado para la empresa Iris Tecnología S.R.L.

Para llevar a cabo el trabajo se utilizaron algunos de los conceptos aprendidos a lo largo de la carrera como el manejo de tareas, colas y semáforos en sistemas operativos de tiempo real, acceso a un servidor web por medio de protocolos de internet como HTTP y conexiones inalámbricas, desarrollo de pruebas de aceptación y criterios generales de desarrollo circuitos impresos.

Índice general

Resumen	I
1. Introducción general	1
1.1. Introducción a los transformadores	1
1.1.1. Caracterización de transformadores	2
Ensayo de vacío	3
Ensayo de cortocircuito	3
Ensayo de aislamiento	4
1.2. Estado del arte	4
1.3. Motivación	5
1.4. Objetivos y alcance	5
1.4.1. Objetivos del trabajo	5
1.4.2. Alcance del trabajo	5
2. Introducción específica	7
2.1. Estructura general del sistema	7
2.2. Requerimientos	10
2.2.1. Requerimientos de hardware	10
2.2.2. Requerimientos relativos a los valores a medir	11
2.2.3. Requerimientos funcionales	11
2.2.4. Requerimientos de comunicación	11
2.2.5. Requerimientos de interfaz de usuario	12
2.3. Kit ESP32-DevKitC	12
2.3.1. Entorno de desarrollo ESP-IDF	14
2.3.2. ESP-Touch y SmartConfig	15
2.4. Sensor de tensión	15
2.5. Sensor de corriente	17
2.6. Impresora	18
2.6.1. Protocolo DPL	18
Comandos inmediatos	19
Comandos de sistema	19
2.6.2. Módulo adaptador RS232	20
2.7. Display alfanumérico	21
2.8. Módulos misceláneos	22
Módulo de relés	22
Módulo de alimentación	22
3. Diseño e implementación	25
3.1. Análisis del software	25
4. Ensayos y resultados	27
4.1. Pruebas funcionales del hardware	27

5. Conclusiones	29
5.1. Conclusiones generales	29
5.2. Próximos pasos	29
Bibliografía	31

Índice de figuras

1.1. Transformador de baja potencia ¹	1
1.2. Transformador monofásico ideal ²	2
1.3. Ensayo de vacío	3
1.4. Ensayo de cortocircuito	3
1.5. Ensayo de aislamiento entre bobinas	4
2.1. Diagrama en bloques del sistema	8
2.2. Diagrama de secuencia simplificado	9
2.3. ESP32-DevKitC V1	13
2.4. ESP32-WROOM-32	13
2.5. Aplicación Android ESP-Touch	15
2.6. Módulo sensor de tensión alterna	16
2.7. Ondas de entrada (Vin) y salida (Vout) del módulo @ Vcc = 5 V . .	16
2.8. Módulo sensor de corriente alterna	17
2.9. Impresora E-Class TM Mark III modelo E-4204B	18
2.10. Etiqueta resultante del comando de la columna Ejemplo de la tabla 2.3	20
2.11. Módulo adaptador RS232 a TTL	20
2.12. <i>Display</i> alfanumérico de 20x4	21
2.13. Módulo de relés	22
2.14. Módulo de alimentación	23

Índice de tablas

1.1. Estado del arte	4
2.1. Comandos protocolo DPL	19
2.2. Comandos inmediatos protocolo DPL	19
2.3. Comandos de sistema protocolo DPL	20
2.4. Señales de control y datos <i>display</i>	21
2.5. Instrucciones controlador HD44780	22

Capítulo 1

Introducción general

En este capítulo se presenta una introducción a los transformadores y sus ensayos de caracterización mas comunes. Asimismo, se introducen algunos equipos disponibles en el mercado y por último, se aborda el alcance y objetivo del trabajo realizado.

1.1. Introducción a los transformadores

Un transformador eléctrico es una máquina estática de corriente alterna que permite aumentar o disminuir la tensión y corriente de un circuito. La frecuencia de la onda de entrada se mantiene invariable a la salida y, en el caso de un transformador ideal, la potencia también se mantiene constante. El transformador utiliza el principio de la inducción electromagnética para su funcionamiento. En la figura 1.1 se muestra la imagen de un transformador típico de baja tensión [1], [2].



FIGURA 1.1. Transformador de baja potencia¹

El transformador está constituido por dos bobinas de material conductor devanadas sobre un núcleo cerrado de material ferromagnético. Las bobinados se denominan primario y secundario según corresponda a la entrada o salida del sistema. Las bobinas o bobinados están aislados eléctricamente entre sí, la única conexión entre estos la constituye el flujo magnético que se establece en el núcleo por la circulación de corriente por dichos bobinados. Por su parte, el núcleo generalmente se fabrica de láminas apiladas de hierro o acero, de esta forma, se optimiza el flujo

¹Imagen tomada de <https://www.ingmecafenix.com/electronica/transformador-electrico/>

magnético generado por las corrientes circulantes en los bobinados. En la figura 1.2 se muestra el principio de funcionamiento de un transformador.

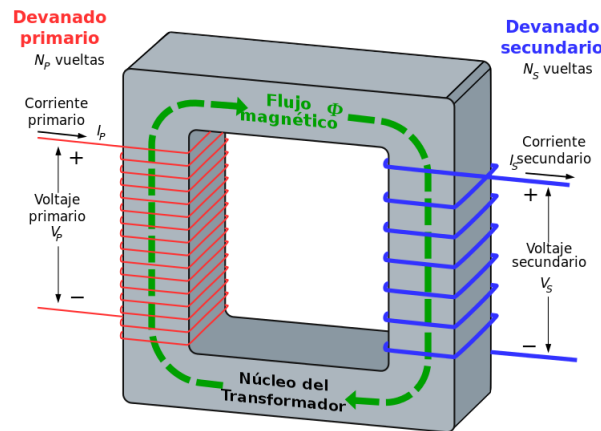


FIGURA 1.2. Transformador monofásico ideal²

Existen transformadores con más de dos bobinados y diferentes arquitecturas de conexión, un ejemplo lo constituye el transformador trifásico que está formado por 6 bobinados que pueden ser conectados en estrella o triángulo.

Actualmente, se pueden encontrar una gran variedad de transformadores para infinidad de aplicaciones, una clasificación posible es la siguiente [3]:

- Transformador de potencia.
- Transformador de distribución.
- Autotransformador.
- Transformador de corriente.
- Transformador de potencial.

Las aplicaciones van desde cargadores de teléfonos móviles hasta transformadores de potencia para estaciones y subestaciones de energía eléctrica.

1.1.1. Caracterización de transformadores

Para los cálculos de circuitos o líneas con transformadores se utiliza un circuito equivalente que representa el comportamiento del transformador real. Para la mayoría de los casos es suficiente con que dicho circuito equivalente represente el transformador en régimen permanente [1].

En general, se deben desarrollar diferentes ensayos sobre el transformador para determinar los parámetros de un circuito equivalente, entre los ensayos más comunes tenemos:

- Ensayo de vacío.
- Ensayo de cortocircuito.

²Imagen tomada de <https://es.wikipedia.org/wiki/Transformador>

- Ensayo de aislamiento.

En las siguientes secciones se brinda una introducción a los ensayos mencionados.

Ensayo de vacío

El ensayo de vacío es un método utilizado para determinar diversos parámetros del transformador mediante pruebas realizadas sin aplicar carga [4]. En la figura 1.3 se muestra el conexionado para este ensayo.

En este ensayo se alimenta el bobinado primario con la tensión nominal, se deja el secundario sin carga y se debe medir la tensión en los bornes del primario, la tensión en los bornes del secundario, la corriente en el devanado primario y la potencia del primario.

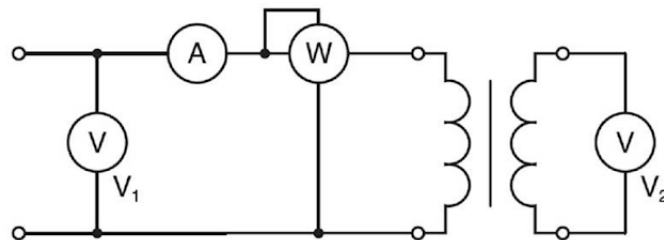


FIGURA 1.3. Ensayo de vacío

Ensayo de cortocircuito

El ensayo de cortocircuito permite determinar la impedancia de cortocircuito o impedancia en serie del transformador [5]. La impedancia de cortocircuito representa las pérdidas en el cobre de los devanados, así como la inductancia de dispersión y otras inductancias parásitas. En la figura 1.4 se muestra el conexionado para este ensayo.

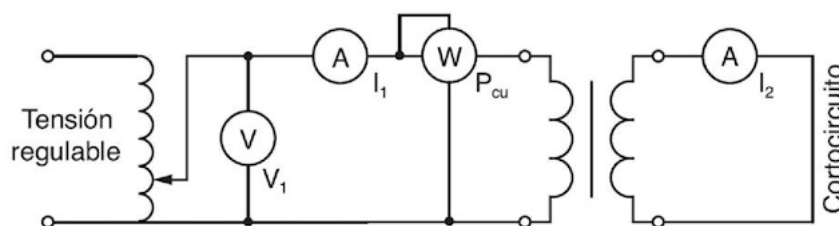


FIGURA 1.4. Ensayo de cortocircuito

En este ensayo se alimenta el bobinado primario con una tensión muy reducida, se coloca un cortocircuito en el bobinado secundario y se debe medir la tensión resultante en los bornes del primario, la corriente en el bobinado secundario, la corriente en el devanado primario y la potencia del primario. Para conseguir los valores reducidos de tensión es necesario un sistema de tensión ajustable como puede ser un autotransformador regulable. La tensión aplicada en el primario debe ser tal de hacer circular la corriente nominal por el bobinado secundario.

Ensayo de aislamiento

El ensayo de aislamiento permite determinar el estado del dieléctrico o aislante entre fases o entre una fase y el chasis del transformador [6]. La medida suele dar valores en el orden de los megaohmios, valor que se ve reducido si el aislante está deteriorado.

En la figura 1.5 se muestra un ensayo de aislamiento entre bobinas.

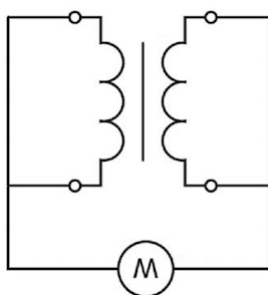


FIGURA 1.5. Ensayo de aislamiento entre bobinas

1.2. Estado del arte

En la actualidad existe una variedad de equipos con el fin de caracterizar transformadores de baja tensión. Estos son capaces de caracterizar transformadores de tensión y corriente, sobre los cuales se pueden realizar múltiples ensayos y así determinar diferentes parámetros. A su vez, cuentan con interfaces de comunicación variadas como Wi-Fi, Ethernet y USB, por medio de las cuales se pueden descargar los datos medidos a una computadora para su posterior análisis. Un punto importante de estos equipos es que por lo general poseen certificaciones internacionales como por ejemplo IECs para los procedimientos de medición.

Como ejemplos podemos citar el modelo MVCT de Megger [7] y el modelo iCT1 de Alta Nova [8]. En la tabla 1.1 se muestra una comparativa entre ambos equipos.

TABLA 1.1. Comparación de equipos comerciales

Características/Ensayos	MVCT (Megger)	ICT1 (Alta Nova)
Apto para transformador de corriente (TI) y tensión (TC)	x	x
Ensayo de relación de transformación	x	x
Resistencia de bobinados	x	x
Desviación de fase	x	x
Curva de saturación (TI)	x	x
Desmagnetización (TI)	x	x
Aislamiento	x	x
Interfaz Ethernet	x	x
Interfaz Wi-Fi		x
Interfaz USB	x	x

1.3. Motivación

Los transformadores son una parte esencial en muchos campos de la industria, son parte fundamental en el sistema de distribución de energía, así como en equipos que son alimentados desde la red. Por esta razón, es de vital importancia su estudio y establecer métodos para conocer su estado antes de su instalación y durante su servicio.

El transformador debe estar en óptimas condiciones al momento de su instalación para evitar posibles fallas del sistema donde es instalado. Un transformador cuyos parámetros esenciales están fuera de especificación puede generar un mal funcionamiento o inclusive sacar de servicio al sistema. Como ejemplo podemos citar los sistemas de distribución de energía eléctrica ya que deben ser sistemas de muy alta disponibilidad, donde un fallo en los componentes de estos sistemas puede devenir en la caída parcial o total del sistema distribución.

En el caso particular de la empresa Iris Tecnología S.R.L., que fabrica equipos electromédicos, necesita conocer si los transformadores provistos son aptos para ser utilizados en sus equipos. Para ello, la empresa cuenta con sistema de gestión de calidad basado en la norma ISO13485:2016.

Entre las tareas y controles necesarios para el sistema de gestión de la calidad se encuentra el ensayo y calificación de transformadores. Actualmente, esta tarea es realizada manualmente por un operador. Esta labor, además de insumir una gran cantidad de tiempo y ser muy repetitiva, presenta un gran riesgo de error humano y puede comprometer la seguridad del operario y la fiabilidad de los datos obtenidos.

La posibilidad de contar con un equipamiento que, con una mínima intervención del operador, pueda desarrollar los ensayos requeridos representa una gran ventaja para la empresa.

1.4. Objetivos y alcance

1.4.1. Objetivos del trabajo

El objetivo de este trabajo fue el desarrollo de un prototipo de hardware y software que permite automatizar el proceso de caracterización de transformadores de baja tensión utilizado. El prototipo desarrollado es casi autónomo, es decir, solo requiere una mínima intervención del operador para funcionar. Por otro lado, los resultados de la caracterización son enviados a un servidor web proporcionado por el cliente, mostrados en un *display* local e impresos en una etiqueta.

1.4.2. Alcance del trabajo

El presente trabajo tiene como alcance:

- El análisis, investigación y elección del hardware.
- La investigación del modelo de impresora a adquirir, cuyo protocolo debe estar disponible.

- El diseño e implementación del firmware del sistema en lenguaje C sobre FreeRTOS.
- El desarrollo de un prototipo funcional sobre un circuito impreso universal.

Queda excluido del alcance de este trabajo:

- El desarrollo de circuitos de medición de tensión y/o corriente alterna de precisión. Se acepta la precisión obtenida de módulos comerciales como el ZMPT101B.
- El desarrollo de fuentes de tensión alterna de precisión para alimentar los transformadores en ensayo.
- El desarrollo de una aplicación web desde la cual interactuar por Wi-Fi con el módulo.
- El desarrollo del servidor web o API de colección de datos.
- El desarrollo de un prototipo de fabricación escalable que cumpla con todas las certificaciones necesarias.
- El desarrollo de un circuito impreso, más allá del prototipo en placa universal.
- El diseño de circuitos de protección del operario contra descargas eléctricas de alta tensión. En este sentido, se asume que el operario que utilizará el dispositivo es idóneo en el tema. Asimismo, se asume que el cliente posee en sus instalaciones las medidas de seguridad pertinentes para el trabajo con altas tensiones, como disyuntores y puestas a tierras, acorde con la normativa vigente de Higiene y Seguridad en el Trabajo.

Capítulo 2

Introducción específica

En este capítulo se presentan una introducción al trabajo realizado así como los requerimientos del sistema que fueron oportunamente consensuados con el cliente. Posteriormente, se realiza una descripción de las tecnologías utilizadas.

2.1. Estructura general del sistema

En la figura 2.1 se muestra el diagrama en bloques simplificado del sistema. En la figura se observa el dispositivo diseñado, el cual se encuentra dentro de un recuadro, y el transformador a ensayar. Dentro del dispositivo diseñado se observan los siguientes bloques principales:

- Módulo ESP32 con Wi-Fi integrado.
- Bloques de acondicionamiento de señal y actuación para el bobinado primario y secundario.
- Interfaz de usuario: pulsadores, *display* y *buzzer*.
- Interfaz serie para impresora.
- *Switch* de seguridad. Se utiliza para indicar tapa de seguridad ha sido removida y el operario puede quedar expuesto a altas tensiones.
- Fuente de alimentación.

El trabajo desarrollado tiene como fin determinar si un transformador dado es apto o no para ser utilizado en determinados equipos. Para tal fin, se configuran umbrales de comparación por medio de una comunicación HTTP a un servidor web y se procede a compararlos contra mediciones realizadas sobre el transformador. Una vez realizadas las comparaciones, los resultados del ensayo se muestran localmente por medio de un *display*. Adicionalmente, los resultados y las mediciones realizadas son enviadas al servidor web del cliente utilizando el protocolo HTTP. Por otro lado, se cuenta con una impresora la cual imprime una etiqueta que permite la trazabilidad del transformador.

Todo el dispositivo es controlado por solo tres pulsadores: Testear, Configurar y Cancelar.

A continuación se detalla un resumen de las tareas realizadas en este trabajo:

- Mediciones de tensión y corriente a los transformadores bajo ensayo.
- Pedido de umbrales de aceptación a un servidor web.

- Emisión de aceptación o rechazo del transformador.
- Visualización en el *display* de los umbrales configurados y las mediciones realizadas.
- Envío de las mediciones a un servidor web por medio del protocolo HTTP.
- Gestión de la conexión Wi-Fi.
- Impresión de etiquetas.

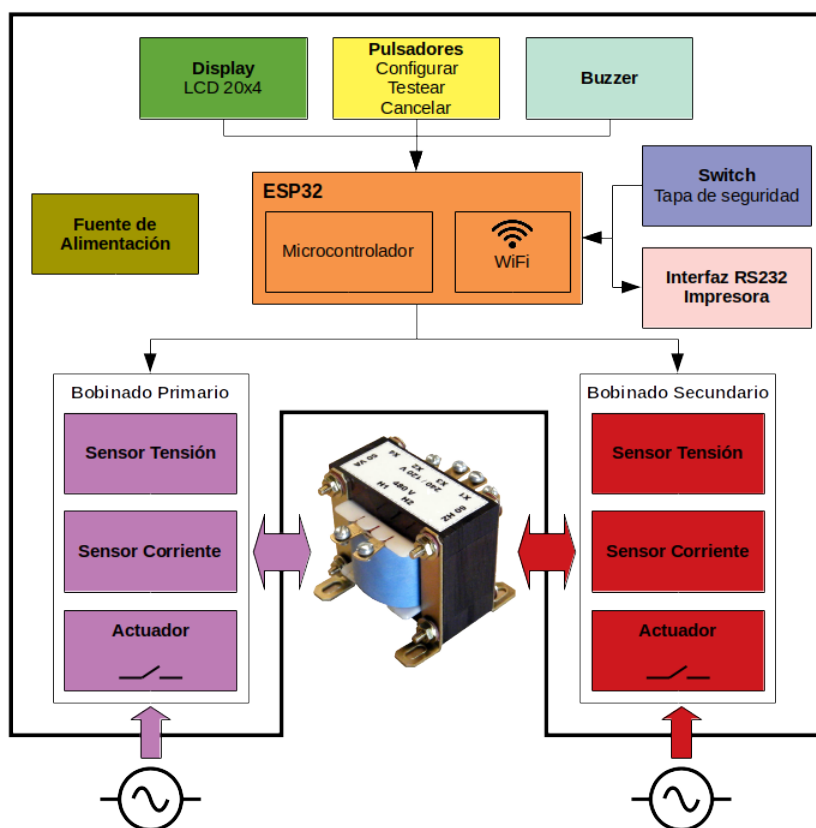


FIGURA 2.1. Diagrama en bloques del sistema

En la figura 2.2 se presenta un diagrama de secuencia simplificado del dispositivo cuyos estados se describen a continuación:

1. Inicialización del sistema.
2. Conexión a red Wi-Fi.
3. Espera por pulsadores. El operador debe pulsar Configurar para leer los umbrales de configuración desde el servidor web.
4. Luego, el operador debe pulsar Testear para iniciar la caracterización del transformador. Aquí se verifica que el equipo haya sido configurado previamente ya que no se puede caracterizar un transformador si no cuenta con los umbrales de comparación. En caso de estar configurado se procede a los siguientes pasos.
5. Energizar el bobinado primario con 230 V_{RMS} estabilizados (provistos externamente por el cliente).

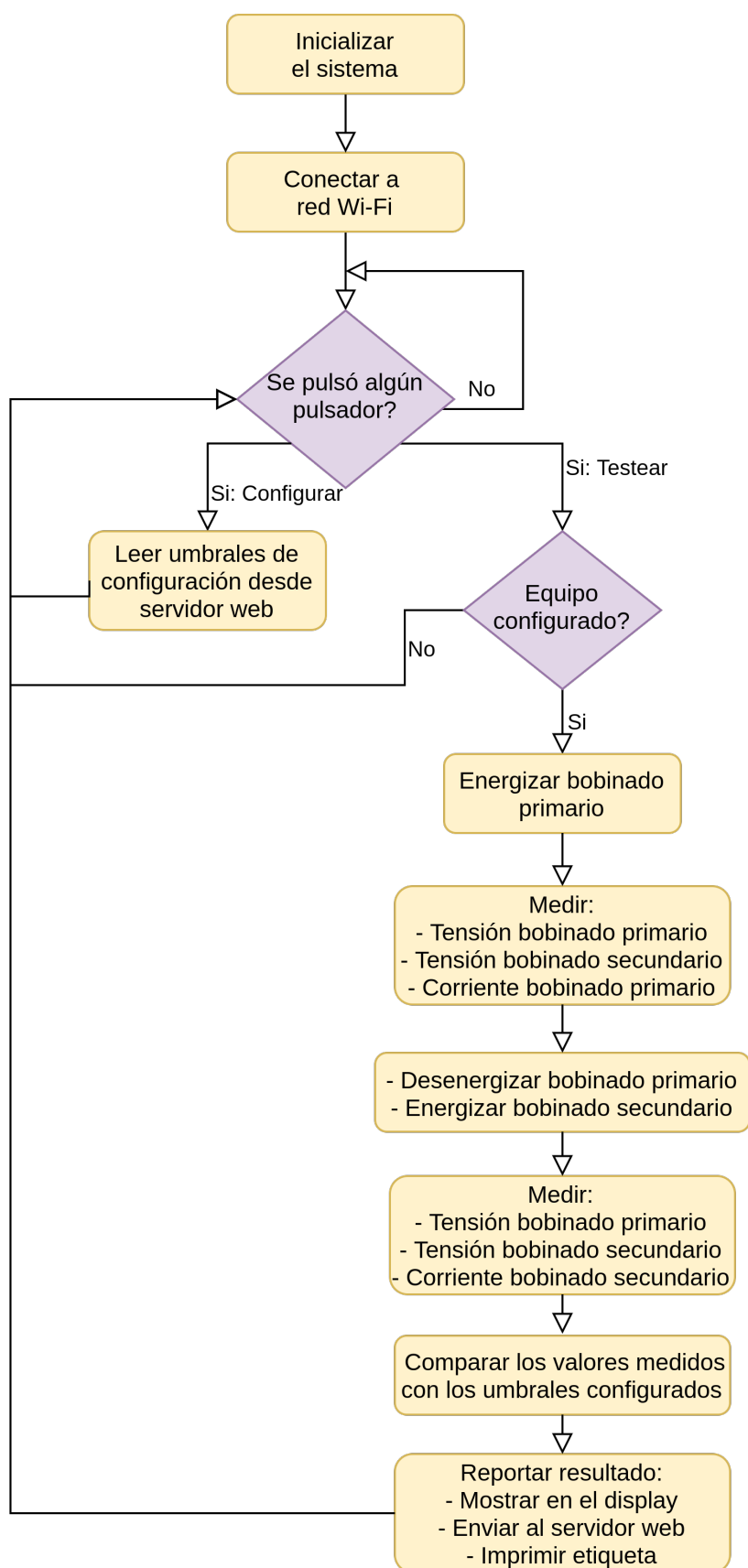


FIGURA 2.2. Diagrama de secuencia simplificado

6. Medir:
 - Tensión en bobinado primario.
 - Corriente que circula por el bobinado primario.
 - Tensión en bobinado secundario.
7. Desenergizar el bobinado primario.
8. Energizar el bobinado secundario con la tensión adecuada. Esta tensión se genera internamente a partir de la tensión de $230 V_{RMS}$.
9. Medir:
 - Tensión en bobinado primario.
 - Tensión en bobinado secundario.
 - Corriente que circula por el bobinado secundario.
10. Desenergizar el bobinado secundario.
11. Comparar los valores medidos con los umbrales configurados previamente y determinar si el transformador es aceptado o rechazado.
12. Reportar los valores medidos y los resultados obtenidos al:
 - Servidor web.
 - En el *display* local.
 - Imprimir una etiqueta.

2.2. Requerimientos

A continuación se enumeran los requerimientos consensuados con el cliente:

2.2.1. Requerimientos de hardware

1. El dispositivo debe ser diseñado en base al módulo ESP32.
2. El dispositivo debe ser capaz de medir tensiones y corrientes alternas de manera aislada del transformador bajo ensayo.
3. El dispositivo debe ser capaz de conmutar las tensiones primarias y secundarias.
4. El dispositivo debe tener un *display* LCD alfanumérico de 20x4 caracteres.
5. El dispositivo debe tener una interfaz Wi-Fi.
6. El dispositivo debe tener una interfaz RS232 capaz de manejar impresoras series.
7. El dispositivo debe alimentarse desde la red eléctrica Argentina $220 V_{RMS}/50$ hz, debiendo proveerse todas las alimentaciones a los diferentes módulos de hardware.

8. El dispositivo debe poseer un *switch* para indicar que la tapa de seguridad ha sido removida.
9. El dispositivo debe poseer tres pulsadores nombrados Configurar, Testear y Cancelar.
10. El dispositivo debe poseer un *buzzer*.

2.2.2. Requerimientos relativos a los valores a medir

1. Bobinado primario:
 - a) Rango tensión: 100 – 240 V_{RMS}
 - b) Rango corriente: 0 – 800 mA_{RMS}
2. Bobinado secundario:
 - a) Rango tensión: 0 – 30 V_{RMS}
 - b) Rango corriente: 0 – 1500 mA_{RMS}
3. Precisión en la medición de tensión: mejor al 1,5 % (puede variar en base a lo que se pueda conseguir en el mercado)
4. Precisión en la medición de corriente: mejor al 4 % (puede variar en base a lo que se pueda conseguir en el mercado)

2.2.3. Requerimientos funcionales

1. El dispositivo debe permitir que se configuren los umbrales mínimos y máximos para los parámetros medidos.
2. Los valores a configurar deben ser adquiridos solo por Wi-Fi, no se admite configuración local por teclado.
3. El dispositivo debe generar una confirmación de aceptación o rechazo del transformador en ensayo basado en los umbrales mínimos y máximos pre-seteados.
4. El dispositivo, luego de cada ensayo, independientemente del resultado, debe imprimir una etiqueta con la siguiente información:
 - a) Número de partida del transformador ensayado.
 - b) Condición de aceptado o rechazado.
 - c) Valores medidos de tensiones y corrientes.

2.2.4. Requerimientos de comunicación

1. Solicitar parámetros de configuración: el dispositivo debe generar un comando GET de HTTP a un servidor web (provisto por el cliente) para obtener los umbrales de aceptación y el número de partida del transformador a ensayar.

2. El dispositivo debe ser capaz de procesar la respuesta del comando GET que está en formato JSON.
3. Enviar resultados del ensayo: el dispositivo debe generar un comando POST de HTTP a un servidor (provisto por el cliente) con la información del transformador ensayado en formato JSON.

2.2.5. Requerimientos de interfaz de usuario

1. Sobre la funcionalidad de los pulsadores:
 - a) Configurar: al pulsar este pulsador el dispositivo debe generar el comando GET para solicitar al servidor web los parámetros de configuración del dispositivo a través de Wi-Fi.
 - b) Testear: al pulsar este pulsador el dispositivo debe iniciar la secuencia de testeo.
 - c) Cancelar: al pulsar este pulsador la secuencia de testeo en curso debe quedar abortada.
2. Sobre la funcionalidad del *display* LCD:
 - a) El dispositivo debe mostrar los umbrales configurados y los valores de las mediciones actuales.
 - b) Los valores de los umbrales configurados deberán permanecer en el *display* durante el ensayo.
 - c) El dispositivo debe mostrar los valores medidos del transformador ensayado luego de cada medición.
 - d) Luego de finalizado el ensayo, se debe mostrar un mensaje que indique que la información se ha enviado al servidor web y mantenerse el dispositivo bloqueado hasta que se haya recibido la respuesta del servidor.
3. Sobre el *buzzer*:
 - a) El dispositivo debe emitir un solo sonido de 0,5 segundos de duración para confirmar la aceptación del transformador.
 - b) El dispositivo debe emitir un sonido de repetición de 5 ciclos de 0,5 segundos de duración, con pausas de 0,5 segundos para confirmar el rechazo del transformador.

2.3. Kit ESP32-DevKitC

Para este trabajo se utilizó el kit de desarrollo ESP32-DevKitC [9] desarrollado por la empresa Espressif Systems, figura 2.3. Este kit integra un módulo ESP32-WROOM-32 [10] de la misma empresa, figura 2.4. El módulo ESP32-WROOM-32

es un microcontrolador de doble núcleo con interfaces Wi-Fi y Bluetooth. Además de las interfaces anteriores, el módulo cuenta con interfaces UART, SPI, numerosas entradas-salidas de propósito general, conversores analógico-digital y conversores digital-analógico.



FIGURA 2.3. ESP32-DevKitC V1



FIGURA 2.4. ESP32-WROOM-32

De las especificaciones del módulo ESP32-WROOM-32 se pueden destacar las siguientes:

- Procesador dual core Xtensa® LX6 de 32 bits.
- Velocidad de reloj de hasta 240 Mhz.
- 520 KB de RAM.
- 4 MB SPI flash.
- Wi-Fi integrado con posibilidad de trabajar como AP (*Access Point*) y SM (*Station Mode*).
- Bluetooth V4.2.
- 36 GPIO.

- Hasta 18 conversores analogico-digital (ADC) de 12 bits de resolución.
- 2 conversores digital-analógico (DAC) de 8 bits de resolución.
- 3 UART.
- 2 canales I2C.
- 4 canales SPI.
- Interfaz JTAG.

Dado que el ESP32-DevKitC integra al módulo ESP32-WROOM-32, puede que no todos sus periféricos y entradas salidas de propósito general estén disponibles.

A continuación se detallan las principales características del kit ESP32-DevKitC:

- Doble hilera de pines con casi todas las entradas-salidas de propósito general del ESP32-WROOM-32.
- Puente USB-UART conectado al módulo ESP32-WROOM-32. Esta interfaz es muy útil para programación y depuración.
- Regulador LDO para proveer alimentación a los elementos del kit.

2.3.1. Entorno de desarrollo ESP-IDF

Espressif Systems provee un entorno de desarrollo de software denominado ESP-IDF [11]. El entorno ESP-IDF contiene todo lo necesario para desarrollar aplicaciones para los módulos ESP-32 sobre cualquier sistema operativo: Windows, Linux o MAC OS. Este entorno de desarrollo es *Open-Source* y puede ser clonado desde un repositorio de GitHub¹. La empresa constantemente realiza actualizaciones y correcciones de fallas.

A continuación se listan algunas de las características más destacables del entorno ESP-IDF:

- Soporta *FreeRTOS* [12].
- Soporta diferentes controladores de periféricos (SPI, I2C, UART, GPIO, I2S, ADC, DAC, etc) [13].
- Soporta librerías para Wi-Fi [14] y Bluetooth [15].
- Soporta varios *stacks* de redes, por ejemplo TCP/IP.
- Soporta varias implementaciones de protocolos (DHCP cliente y servidor, HTTP cliente y servidor, MQTT, etc) [16].
- Soporta extensiones para Eclipse [17] y Visual Code [18].
- Está basado en CMake [19].

El entorno ESP-IDF no es parte del proyecto del usuario sino que debe ser enlazado por medio de la variable de entorno `IDF_PATH`. Esto último ayuda a separar el entorno de desarrollo del proyecto particular del usuario. Para utilizar ESP-IDF se requiere una estructura particular de archivos y carpetas para el proyecto [20].

¹Repositorio GitHub para el ESP-IDF <https://docs.platformio.org/en/latest/frameworks/espidf.html>

2.3.2. ESP-Touch y SmartConfig

Espressif Systems provee la aplicación móvil ESP-Touch [21] la cual puede ser usada con la librería SmartConfig [22] para configurar las credenciales de Wi-Fi en equipos que no posean una interfaz de usuario acorde para insertar esta información. En la figura 2.5 se muestra la interfaz de la aplicación ESP-Touch.

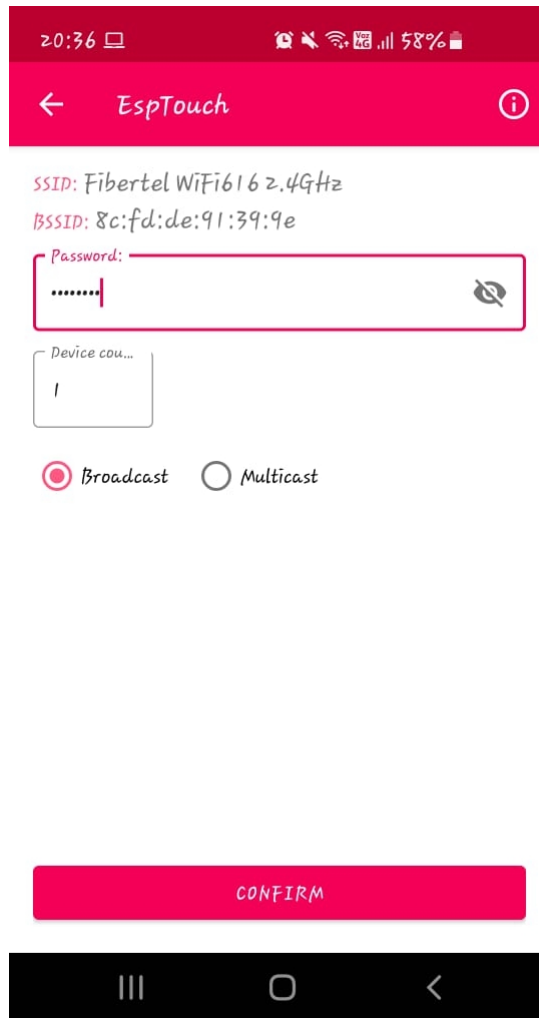


FIGURA 2.5. Aplicación Android ESP-Touch

La ventaja de esta tecnología es que el dispositivo no necesita conocer directamente el SSID o la contraseña de un punto de acceso (AP), en cambio esta información se proporciona mediante el teléfono móvil. ESP-Touch está disponible para Android e iOS.

2.4. Sensor de tensión

Para monitorear las tensiones del bobinado primario y secundario se utilizó el módulo de figura 2.6.

Este módulo es un sensor de tensión capaz de medir tensiones alternas de línea de 220 V_{RMS} de forma aislada. En la figura 2.7 se puede observar la tensión de

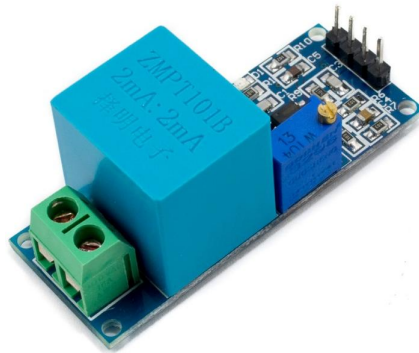
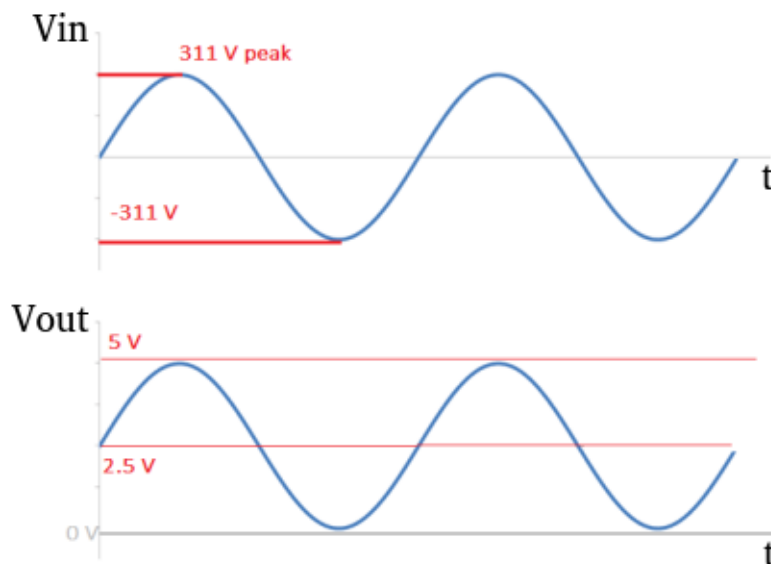


FIGURA 2.6. Módulo sensor de tensión alterna

entrada (V_{in}) y la tensión de salida (V_{out}) entregada por el módulo. El módulo provee una tensión de salida la cual está montada sobre un nivel continua igual a la mitad de la tensión de alimentación, esto ayuda a procesar la señal directamente con un ADC sin la necesidad de fuentes de alimentación negativas.

FIGURA 2.7. Ondas de entrada (V_{in}) y salida (V_{out}) del módulo @ $V_{cc} = 5\text{ V}$

El elemento principal del módulo es el transformador de corriente ZMPT101B de la empresa Qingxian Zeming Langxi Electronic [23]. Este componente es el encargado de proporcionar la aislación entre la alta tensión de línea y la baja tensión hacia el microcontrolador. El primario del transformador se conecta a la tensión alterna de la red a través de la bornera verde que se observa en la figura 2.6. En el lado secundario del transformador se tiene una resistencia serie (*shunt*) y un circuito amplificador basado en el operacional LM358 [24]. Adicionalmente, el circuito posee un potenciómetro para ajustar la ganancia del sistema.

Este módulo se utiliza en aplicaciones de domótica e IoT (Internet of Things) para el monitoreo de la tensión de línea.

Especificaciones técnicas del módulo:

- Tensión de alimentación (V_{cc}): 5-30 V.

- Tensión alterna de entrada máxima: $250 V_{RMS}$.
- Tensión de salida: onda senoidal $2,5 V_{PICO}$ @ $V_{CC} = 5 V$.
- Valor medio de la tensión salida: $2,5 V$ @ $V_{CC} = 5 V$.
- Dimensiones: $5 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2,4 \text{ cm}$.

2.5. Sensor de corriente

Para monitorear las corrientes del bobinado primario y secundario se utilizó el módulo de figura 2.8.

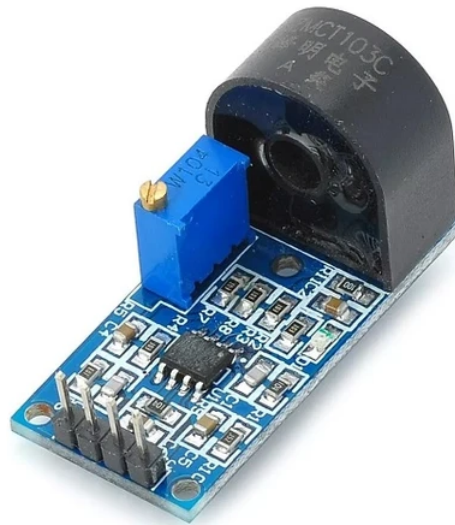


FIGURA 2.8. Módulo sensor de corriente alterna

Este módulo facilita el monitoreo de corrientes alternas de hasta $5 A_{RMS}$. Está basado en el transformador de corriente de alta precisión ZMCT103C de la empresa Qingxian Zeming Langxi Electronic [25]. El módulo es similar al módulo sensor de tensión presentado en la sección 2.4. La corriente de salida del transformador de corriente pasa por una resistencia serie (*shunt*) y luego es acondicionada por los amplificadores operaciones integrados en el LM358 [24]. La única diferencia entre el módulo sensor de corriente y el de tensión, es que el primero entrega una tensión alterna con valor medio cero, es decir, sin componente de continua. Esto último hace necesario alguna modificación adicional del módulo para entregar una tensión que sea siempre positiva.

Especificaciones técnicas del módulo:

- Tensión de alimentación (V_{CC}): $5\text{-}30 V$.
- Corriente de entrada nominal: $5 A_{RMS}$
- Tensión de salida: onda senoidal $2,5 V_{PICO}$ @ $V_{CC} = 5 V$.
- Valor medio de la tensión salida: $0 V$ @ $V_{CC} = 5 V$.

2.6. Impresora

Para este trabajo se utilizó una impresora de transferencia térmica modelo E-Class™ Mark III fabricada por Honeywell [26], ver figura 2.9. Las impresoras por transferencia térmica utilizan una cinta de tinta denominada *Ribbon* que con el calor del cabezal derrite la tinta sobre el papel. Este fenómeno permite imprimir códigos de barras, textos, etc. Estas impresoras son de bajo costo pero ofrecen como desventaja que solo imprimen en blanco y negro.



FIGURA 2.9. Impresora E-Class™ Mark III modelo E-4204B

Especificaciones técnicas del modelo E-4204B:

- Resolución: 8 puntos/mm (203 ppp).
- Velocidad máxima de impresión: 101 mm/s (4 pps).
- Ancho máximo de papel: 112 mm.
- Capacidad de rollo: diámetro externo 127 mm.
- Memoria: DRAM de 16 MB/Flash de 8 MB.
- Comunicación: USB 2.0 y RS232 serie.
- Lenguajes soportados: DPL(Datamax), ZPL(Zebra), EPL(Eltron), BPL(Boca), IPL(Intermec).
- Indicadores de estado: dos indicadores luminosos de tres colores.
- Dimensiones: 187 mm x 203,5 mm x 282 mm.
- Peso: 2,4 Kg.

2.6.1. Protocolo DPL

El protocolo DPL (*Datamax-O'Neil Programming Language*) es un protocolo propietario de la firma Datamax el cual puede ser utilizado para comunicarse con las impresoras E-Class™ Mark III [27]. Este es un protocolo punto a punto de tipo ASCII basado en la arquitectura maestro/esclavo. La impresora se conecta con el *host* sin intermediarios.

El protocolo está formado por comandos y parámetros asociados a estos comandos. En la tabla 2.1 se muestran los comandos disponibles.

TABLA 2.1. Tipos de comandos protocolo DPL

ASCII (HEX)	Tipo	Descripción
SOH (0x01)	Comando inmediato	Cuando la impresora recibe un comando inmediato, interrumpe su operación actual y pasa a ejecutarlo. Ejemplos: reinicio de la impresora, pedido de estado de la impresora.
STX (0x02)	Comando de sistema	Es el tipo de comando más comúnmente utilizado. Ejemplos: configurar el modo de trabajo métrico o imperial, tipo de alineación del texto a imprimir, indica el inicio y fin del texto a imprimir, etc.
ESC (0x1B)	Comando de carga de fuente	Este comando es utilizado para cargar una nueva fuente. Generalmente es utilizado por programas específicos para la creación de fuentes.

En las siguientes secciones se describen los comandos inmediatos y los comandos de sistema ya que fueron los utilizados en este trabajo.

Comandos inmediatos

En la tabla 2.2 se muestran los comandos inmediatos más utilizados, en la última columna se muestra la respuesta de la impresora.

TABLA 2.2. Comandos inmediatos protocolo DPL

ASCII (HEX)	Descripción	Respuesta
<SOH>A<CR> (0x01,0x41,0x0D)	Pedido de estado de la impresora. Para poder imprimir, todos los campos devueltos por la impresora deben ser el carácter 'N'	La respuesta son 8 caracteres 'Y' o 'N' mas el carácter <CR> de final de mensaje. abcdefgh<CR> a: Interprete de comandos ocupado b: Falla de papel c: Falla del <i>Ribbon</i> d: Imprimiendo lote (se pueden enviar varias etiquetas para imprimir) e: Impresora ocupada f: Impresora pausada g: Etiqueta presentada h: Falla interna
<SOH>*<CR> (0x01,0x2A,0x0D)	Pedido de reinicio de la impresora	<XON>R<CR>

Comandos de sistema

El principal uso de los comandos de sistema es enviar a la impresora los caracteres que se desean imprimir. Además de los caracteres a imprimir, se pueden configurar diferentes aspectos de la impresora tales como: temperatura del cabezal, alineación del texto, tipo y tamaño de la fuente, posición del texto, etc.

El comando <STX>L<CR> es el más utilizado. Este comando permite enviarle a la impresora una línea de texto a imprimir con su formato y ubicación. En la tabla 2.3 se muestra el formato para imprimir una línea de texto.

TABLA 2.3. Comandos de sistema protocolo DPL

Mensaje	Tipo	Descripción	Cantidad de caracteres	Ejemplo
a	Número	Dirección de rotación del texto: 1 = 0°, 2 = 90°, 3 = 180°, 4 = 270°	1	1
b	Número	Fuente a utilizar	1	3
c	Número	Multiplicador de ancho de fuente	1	1
d	Número	Multiplicador de alto de fuente	1	1
eee	Número	000	3	000
ffff	Número	Posición vertical del texto en mm	4	0140
gggg	Número	Posición horizontal del texto en mm	4	0000
jj...j	Caracteres	Texto a imprimir	Largo de la cadena	10K OHM 1/4 WATT

En el ejemplo de la tabla 2.3 se imprime la etiqueta mostrada en le figura 2.10.

10K OHM 1/4 WATT

FIGURA 2.10. Etiqueta resultante del comando de la columna Ejemplo de la tabla 2.3

Se pueden enviar varias líneas a imprimir en un solo comando, en este caso, para indicar el fin del texto se debe enviar E<CR>.

2.6.2. Módulo adaptador RS232

Para este trabajo se utilizó el módulo de la figura 2.11 para comunicar la impresora con la UART del microcontrolador. Este módulo está basado en el integrado MAX3232 [28] y adapta las señales del capa física RS232 a valores acordes para trabajar con el microcontrolador.

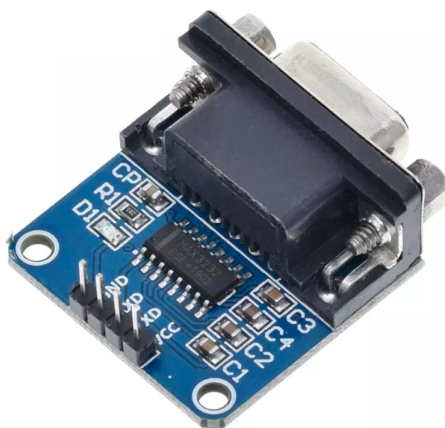


FIGURA 2.11. Módulo adaptador RS232 a TTL

2.7. Display alfanumérico

Para este trabajo se utilizó un *display* alfanumérico de 20 columnas por 4 líneas con controlador HD44780 de Hitachi [29], ver figura 2.12.



FIGURA 2.12. *Display* alfanumérico de 20x4

El *display* cuenta con una interfaz paralela de 8-bits (DB0-7) la cual puede ser utilizada en formato 4-bits haciendo 2 escrituras o lecturas. Cuenta también con tres líneas de control denominadas RS, R/W y EN. En la tabla 2.4 se muestran las señales necesarias para el manejo del *display*.

TABLA 2.4. Señales de control y datos *display*

Señal	Tamaño bits	Descripción
RS	1	Indica como interpretar los datos en el <i>bus</i> de datos DB. 0: Instrucción 1: Datos
R/W	1	0: Operación de lectura 1: Operación de escritura
EN	1	<i>Enable</i> : utilizado para indicar que hay datos validos en el <i>bus</i> de datos
DB	8	<i>Bus</i> de datos

Para utilizar el *display* se cuenta con 2 tipos de operaciones las cuales se diferencian por el bit de control RS:

- RS=0: Escribir/leer una instrucción.
- RS=1: Escribir/leer un carácter ASCII.

En la tabla 2.5 se muestran las instrucciones más utilizadas.

TABLA 2.5. Instrucciones más utilizadas para el controlador HD44780

Nombre	Valor hexa	Acción
Borrado	0x01	Borra la pantalla completa
Modo de entrada	0x04	Fijar dirección del cursor: izquierda o derecha
Control de encendido y apagado	0x08	- Encender o apagar la pantalla - Encender o apagar el cursor - Fijar tamaño del <i>bus</i> de datos
Fijar Set	0x10	- Fijar número de líneas - Fijar fuente de los caracteres

2.8. Módulos misceláneos

En esta sección se describe el módulo utilizado como elemento de maniobra para alimentar los bobinados del transformador y la fuente de alimentación utilizada en el trabajo.

Módulo de relés

Para este trabajo se utilizó el módulo de la figura 2.13 para poder conmutar las tensiones aplicadas a los bobinados del transformador bajo ensayo. Este módulo está compuesto por 8 relés los cuales pueden ser manejados en forma aislada por el microcontrolador a través de optoacopladores.

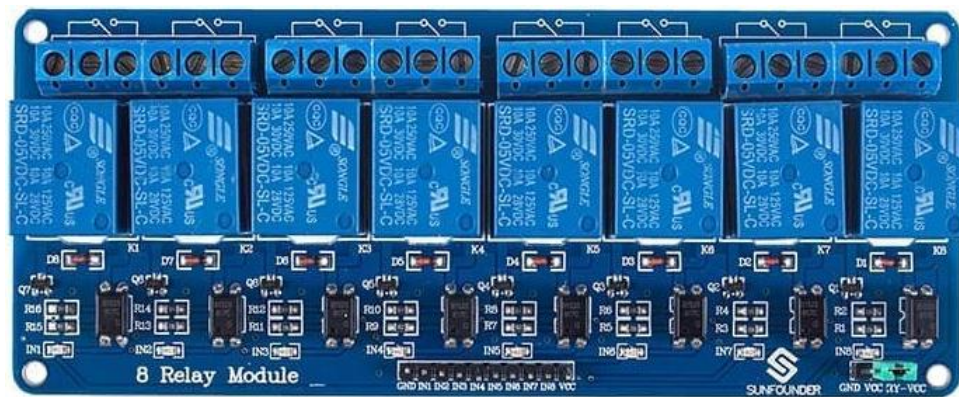


FIGURA 2.13. Módulo de relés

Módulo de alimentación

El dispositivo diseñado debe ser alimentado desde la red eléctrica de Argentina (220 V_{RMS} - 50 hz) para tal fin, se utilizó la fuente conmutada mostrada en la figura 2.14.



FIGURA 2.14. Módulo de alimentación

Especificaciones técnicas²:

- Tensión de entrada: 85 a 265 V_{RMS} 50 hz
- Corriente de entrada: 0,0273 A (110 V_{RMS}) y 0,014 A (220 V_{RMS})
- Tensión de salida: 5 V +/- 0,2 V
- Corriente de salida: 700 mA (800 mA_{PICO})
- Ripple: 60 mV
- Potencia: 3,5 W
- Eficiencia: 80 %
- Protección contra corto circuito.
- Temperatura de operación: -20 a 60 °C

²https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-700576819-fuente-aislada-switching-220v-5v-700ma-35w-20off-nut-JM#reco_item_pos=2&reco_backend=machinalis-v2p-pdp-boost-v2&reco_backend_type=low_level&reco_client=vip-v2p&reco_id=90222827-7627-46cb-9f2b-78620eec7ea2

Capítulo 3

Diseño e implementación

3.1. Análisis del software

La idea de esta sección es resaltar los problemas encontrados, los criterios utilizados y la justificación de las decisiones que se hayan tomado.

Capítulo 4

Ensayos y resultados

4.1. Pruebas funcionales del hardware

La idea de esta sección es explicar cómo se hicieron los ensayos, qué resultados se obtuvieron y analizarlos.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones generales

5.2. Próximos pasos

Bibliografía

- [1] Wikipedia. *Transformador*. <https://es.wikipedia.org/wiki/Transformador>. Abr. de 2021. (Visitado 07-05-2021).
- [2] Ingeniería Mecafenix. *¿Qué es un Transformador eléctrico y cómo funciona?* <https://www.ingmecafenix.com/electronica/transformador-electrico/>. Feb. de 2018. (Visitado 07-05-2021).
- [3] Ing. Patricio Concha Fuentes. *Tipos y aplicaciones de transformadores*. http://patricioconcha.ubb.cl/transformadores/gral_tipos_y_aplicaciones.htm. Jun. de 2003. (Visitado 07-05-2021).
- [4] *Ensayo en vacío de un transformador*. <http://instalacioneselectricasparatodos.blogspot.com/2016/12/ensayo-en-vacio.html>. Dic. de 2016. (Visitado 07-05-2021).
- [5] *Ensayo de cortocircuito de un transformador*. <http://instalacioneselectricasparatodos.blogspot.com/2016/12/ensayo-de-cortocircuito-de-un.html>. Dic. de 2016. (Visitado 07-05-2021).
- [6] Anthony Alvarez. *Pruebas de aislamiento y polaridad en un transformador*. <http://pruebasentranformadores.blogspot.com/2015/06/pruebas-de-aislamientos-de-un.html>. Jun. de 2015. (Visitado 07-05-2021).
- [7] Megger. *MVCT - Equipo de prueba de transformador de corriente y tensión*. Disponible: 2021-05-07. URL: <https://es.megger.com/products/medicion-transformadores/medicion-de-transformadores-de-corriente/mvct>.
- [8] ALTANOVA GROUP. *ICT1 Equipo para pruebas de transformadores de corriente y tensión*. Disponible: 2021-05-07. URL: <https://www.altanova-group.com/es/products/off-line-tests/ict1>.
- [9] Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd. *ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide*. Disponible: 2021-05-07. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>.
- [10] Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd. *ESP32WROOM32E - ESP32WROOM32UE Datasheet*. Disponible: 2021-05-07. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf.
- [11] Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd. *Espressif IoT Development Framework*. Disponible: 2021-05-07. URL: <https://www.espressif.com/en/products/sdks/esp-idf#:~:text=ESP\%2DIDF\%20is\%20Espressif's\%20official,as\%20C\%20and\%20C\%2B\%2B>.
- [12] Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd. *FreeRTOS*. Disponible: 2021-05-07. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/system/freertos.html>.
- [13] Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd. *Peripherals API*. Disponible: 2021-05-07. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/index.html>.

- [14] Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd. *Wi-Fi*. Disponible: 2021-05-07. URL: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/network/esp_wifi.html.
- [15] Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd. *Bluetooth API*. Disponible: 2021-05-07. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/bluetooth/index.html>.
- [16] Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd. *Application Protocols*. Disponible: 2021-05-07. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/protocols/index.html>.
- [17] Eclipse Foundation. *Eclipse*. Disponible: 2021-05-07. URL: <https://www.eclipse.org/>.
- [18] Microsoft Corporation. *Visual Studio Code*. Disponible: 2021-05-07. URL: <https://code.visualstudio.com/>.
- [19] CMake. *CMake*. Disponible: 2021-05-07. URL: <https://cmake.org/>.
- [20] Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd. *Build System (CMake)*. Disponible: 2021-05-07. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v3.3/api-guides/build-system-cmake.html>.
- [21] Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd. *ESP-Touch*. Disponible: 2021-05-07. URL: <https://www.espressif.com/en/products/software/esp-touch/overview>.
- [22] Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd. *SmartConfig*. Disponible: 2021-05-07. URL: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/network/esp_smartconfig.html.
- [23] Qingxian Zeming Langxi Electronic. *ZMPT101B precise voltage transformer*. Disponible: 2021-05-07. URL: <http://www.zeming-e.com/English/prodviewtype5-298.html>.
- [24] Texas Instruments. *LMx58-N Low-Power, Dual-Operational Amplifiers*. Disponible: 2021-05-07. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf>.
- [25] Qingxian Zeming Langxi Electronic. *ZMCT103C series current transformer*. Disponible: 2021-05-07. URL: <http://www.zeming-e.com/English/prodviewtype5-280.html>.
- [26] Honeywell. *E-Class Mark III Desktop Barcode Printer*. Disponible: 2021-05-07. URL: <https://www.honeywellaidc.com/en-ae/products/printers/desktop/e-class-mark-iii>.
- [27] Datamax-O'Neil. *Class Series II - Programmer's Manual*. Disponible: 2021-05-07. URL: https://www.honeywellaidc.com/en-ae/-/media/en/files-public/technical-publications/printers/1common/cl2_88-2341-01_1.pdf.
- [28] Texas Instruments. *MAX3232 3-V to 5.5-V Multichannel RS-232 Line Driver/Receiver*. Disponible: 2021-05-07. URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/max3232.pdf?ts=1619994386617&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
- [29] HITACHI. *HD44780U Datasheet*. Disponible: 2021-05-07. URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/63673/HITACHI/HD44780/+435JWUEGSzDpKdlpzc.hv+/datasheet.pdf>.