



**PROTOTIPO A ESCALA DE UN EQUIPO RTU PARA LA MEDICION Y CONTROL DE  
NODOS EN UNA MICROGRID**

**CESAR EDUARDO DIAZ LONDOÑO  
ANDRES EDUARDO NIETO VALLEJO**

**DIRECTORES**

**ING. DIEGO ALEJANDRO PATIÑO GUEVARA ph. D.**

**ING. DAVID FERNANDO MEJIA BONILLA**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
CARRERA DE INGENIERIA ELECTRONICA  
BOGOTA D.C.**

**2013**

## 1. TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION.....	3
2. MARCO CONCEPTUAL.....	4
3. ESPECIFICACIONES.....	8
4. DESARROLLO.....	19
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	28
6. CONCLUSIONES.....	49
BIBLIOGRAFIA.....	50
MATERIAL COMPLEMENTARIO.....	51

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se está haciendo necesaria la exploración de nuevos sistemas de generación de energía distribuida, que permitan suplir la gran demanda de energía que está superando la capacidad instalada de los sistemas de generación actuales. Es por esto que nace la necesidad de investigar en la dirección de las redes inteligentes como las microgrids, que pueden ofrecer un mejor servicio a los usuarios de la red [1]. Una microgrid es un sistema que opera dentro de una red de distribución eléctrica y cuenta con generadores de energía alternativa que se integran a la red principal para contribuir con la entrega de energía [2]. Adicionalmente, cuenta con sistemas de almacenamiento, control y supervisión, que permiten tener un monitoreo y un control para su correcta operación [3]. Una de las principales características con las que cuentan este tipo de redes es la medición de energía de forma inteligente para obtener valores en tiempo real del estado y consumo de los usuarios, así como la generación de los distintos generadores distribuidos. Los dispositivos RTU (Remote Terminal Unit) / AMI (Advanced Measurement Instrumentation) son los encargados de realizar estas mediciones para optimizar el manejo de los recursos de la red [4]. 3

El presente proyecto pertenece al grupo de investigación CEPIT y hace parte de la continuación del trabajo de grado 1106 RED PARA UN SISTEMA DE GENERACION DE ENERGIA DISTRIBUIDO en donde se realizó una maqueta para representar el funcionamiento de una microgrid. Adicionalmente, este proyecto forma parte del desarrollo del proyecto mayor SILICE III que está siendo realizado por la Pontificia Universidad Javeriana para COLCIENCIAS y CODENSA.

El objetivo principal de este proyecto es diseñar un equipo de medición RTU/AMI para instalarlo en los nodos de generación y de carga dentro de la red de distribución eléctrica a escala que se va a desarrollar en el proyecto SILICE III, con el fin de hacer la medición de las variables eléctricas, enviar la información a una estación central (computador) y hacer el control en las redes. Dentro de los principales intereses esta medir variables de voltaje, corriente, frecuencia y potencia con el fin de tener una comunicación bidireccional entre la estación central y el equipo RTU que permita realizar un monitoreo y a su vez recibir comandos para hacer el control de conexión y desconexión de los nodos en la red.

Este libro pretende describir el proceso de desarrollo del equipo RTU con el fin de ilustrar la utilidad que tiene dentro de una red de distribución eléctrica, ofreciendo seguridad a los usuarios de la red debido al sistema automático de conexión/desconexión contra fallas que junto con el sistema de comunicaciones inalámbrico permite montar un sistema SCADA para tener una completa supervisión y control de la red. Es importante recordar que el objetivo de este proyecto es representar un funcionamiento básico con fines educativos, lo cual hace que no pueda ser considerado aun como un producto definitivo para llevar al mercado.

## 2. MARCO CONCEPTUAL

Para poder comprender mejor este documento es importante tener claridad en los conceptos de DG (Distributed Generation), Microgrid, Sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), MTU (Master Terminal Unit), RTU (Remote Terminal Unit), AMI (Advanced Metering Infrastructure) y comunicación SPI.

### **Generación Distribuida**

Debido al constante crecimiento en la demanda de energía, se ha creado la necesidad de aumentar la capacidad de los generadores de energía convencionales, lo que está generando un agotamiento en los combustibles fósiles. Es por esto, que los países están comenzando a buscar generadores de energía alternativa.

Adicionalmente, con el fin de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, se están desarrollando nuevas tecnologías que permitan utilizar fuentes de energía renovables con el fin de dejar a un lado las fuentes convencionales y ayudar a proteger el medio ambiente [5].

Los generadores utilizados en generación distribuida son generalmente de baja capacidad, y usualmente son instalados cerca a las zonas de carga. Debido a la cercanía entre los generadores y las cargas se reducen las pérdidas de transmisión y distribución, y adicionalmente reduce los costos de instalación y mantenimiento. [6]

### **Microgrid**

Una microgrid es una red de distribución activa de baja potencia diseñada para suplir energía a cargas pequeñas como áreas residenciales, comerciales, industriales y públicas. Por lo general están compuestas por generadores de energía alternativa como paneles solares, turbinas de viento, celdas de combustible, entre otros, que se integran a la red principal de distribución junto con sistemas de almacenamiento, monitoreo y control en los nodos de generación y de carga. Una microgrid tiene la capacidad de operar en modo semiautomático, en donde puede operar conectada a la red principal o en modo aislado, de tal manera que puede ser utilizada para suplir energía en zonas remotas en donde la instalación de una red de distribución convencional se hace difícil. Adicionalmente, ofrece un mayor abastecimiento, confiabilidad y calidad de la energía. Y al contar con generadores de energía alternativa reduce las emisiones de CO<sub>2</sub>, haciendo que estos sistemas sean más amigables con el medio ambiente [6].

En la figura 1 se puede ver una configuración típica de una microgrid.

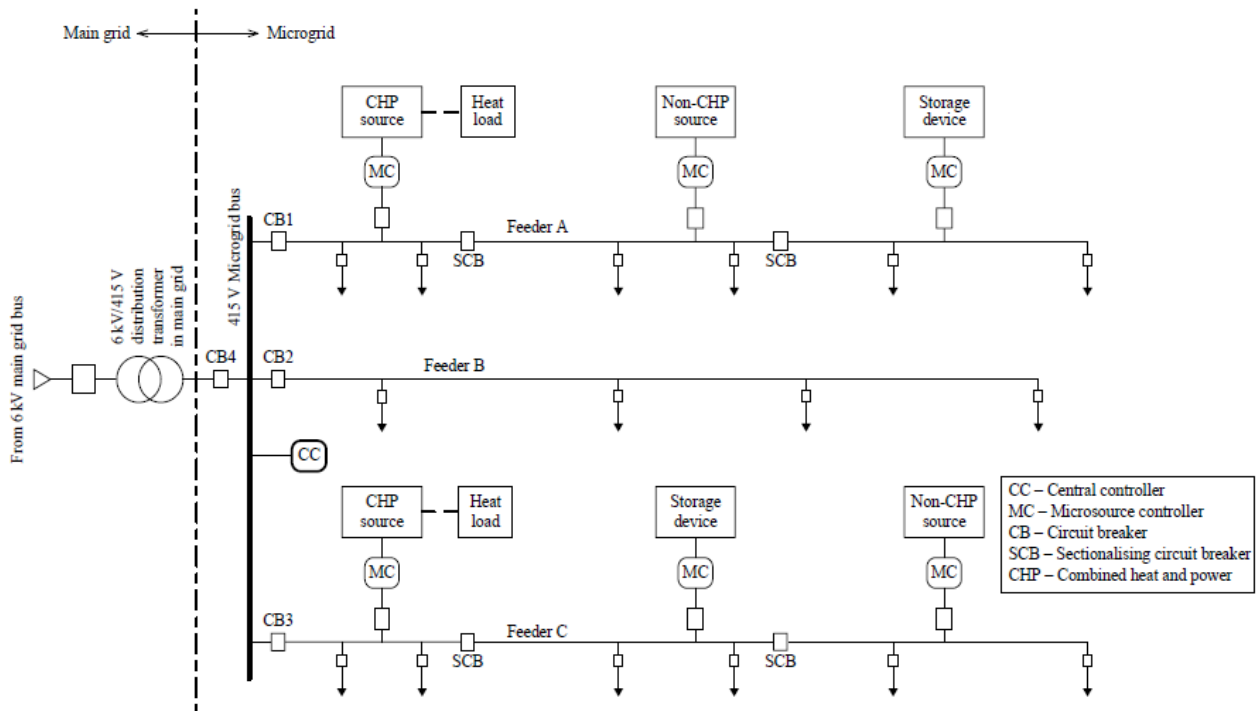


Figura 1. Configuración típica de una Microgrid [6]

En la figura anterior se puede ver que la microgrid está compuesta por varias fuentes de baja capacidad que se encuentran instaladas cerca a los nodos de carga. También se puede observar que cada nodo de generación y carga cuenta con un sistema de medición y control CB (Circuit Breaker) encargado de conectar y desconectar los nodos. De esta manera, se puede cambiar el modo de operación de la microgrid para que trabaje conectada a la red principal o en modo aislado, en donde dependiendo del caso, también será necesario desconectar algunos nodos de carga de baja prioridad (cargas no sensibles) para alcanzar a suplir las necesidades de las cargas de alta prioridad. Todo este sistema de medición y control está sujeto a una estación central de control para realizar el control y la supervisión de toda la red.

Por lo general estas redes utilizan sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) para hacer el control y supervisión de datos en la red. Este sistema permite recoger información de múltiples equipos de medición y a la vez enviar instrucciones a los dispositivos controladores encargados de hacer la conexión de los nodos en la red.

### Sistema SCADA

Estos sistemas SCADA están compuestos por una terminal maestra MTU, un sistema de comunicaciones y una estación remota RTU; que en conjunto se encargan de hacer la adquisición, supervisión y control de toda la red [6].

### Equipos RTU

Estos equipos cuentan con sensores que se encargan de recolectar la información del proceso para luego enviarla a una estación maestra, adicionalmente tienen la capacidad de hacer procesamiento local de la información y realizar acciones de control [6].

## Equipos MTU

Este equipo hace parte de la estación central y es el encargado de comunicarse con todas las estaciones RTU con el fin de seguir un esquema de comunicaciones Master-Slave. Los equipos MTU por lo general vienen acompañados de una interfaz gráfica HMI con el fin de que un operador pueda supervisar la información que está siendo enviada por parte de los dispositivos esclavos RTU.

En la figura 2 se muestra una arquitectura básica de la comunicación entre el equipo MTU con los equipos RTU.

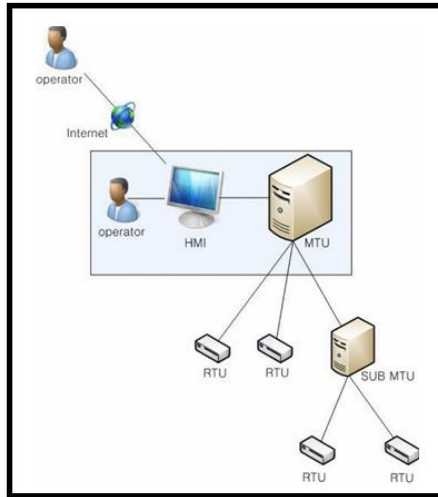


Figura 2. Arquitectura básica de comunicaciones entre MTU y RTU's [7]

## AMI

Es un sistema compuesto por hardware y software encargado de medir, recolectar y analizar la energía, para que junto con una red de comunicaciones y sistemas de control se pueda hacer monitoreo en tiempo real de la energía y control automático a través de una estación central [8].

## Comunicación SPI

Es un protocolo de comunicaciones síncrono, que se usa para transferir información entre dos o más circuitos integrados [1].

La transmisión y sincronización de los datos se realiza utilizando 4 señales:

*CLOCK*: son 8 ciclos de reloj que se utilizan para la sincronización, en donde por cada pulso se envía o se recibe un bit.

*MOSI*: salida de datos del maestro y entrada de datos del esclavo.

*MISO*: Entrada de datos del maestro y salida de datos del esclavo.

*SS*: se usa para activar el esclavo o para seleccionar un esclavo en una comunicación

En la figura 3 se muestran la conexión que se debe hacer para poder establecer una comunicación entre un dispositivo esclavo y un dispositivo maestro [2].

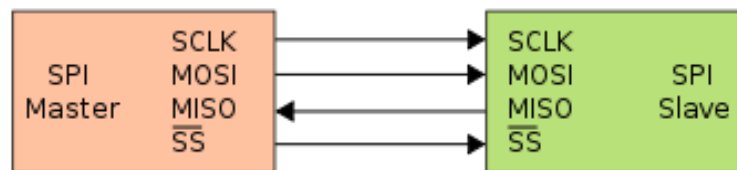


Figura 3. Comunicación SPI maestro-esclavo

### Comunicación inalámbrica

Para la comunicación inalámbrica existen los módulos XBee, ver Figura 4, basados en el estándar IEEE 802.15.4, la cual es punto a punto y tiene un bajo consumo, facilidad en la integración de aplicaciones y soporta topologías de red en malla.

Existen módulos XBee Serie 1 y Serie 2, una diferencia radica en el alcance de transmisión, teniendo los serie 1 un rango de 30 metros en interiores y 100 metros en exteriores mientras que los serie 2 tienen un alcance de 40 metros en interiores y 120 metros en exteriores. Estos módulos no son compatibles entre series, por lo cual para la transmisión de los datos inalámbricos se deben hacer en una sola serie [10].



Figura 4. Módulo XBee

### 3. ESPECIFICACIONES

El equipo RTU está compuesto por 3 módulos; 2 módulos secundarios encargados de desconectar la red eléctrica en caso de detectar variaciones significativas de voltaje y corriente, que puedan afectar la carga en los nodos de la microgrid, y un módulo principal encargado de realizar las mediciones de las variables eléctricas en la red eléctrica para enviar la información a una estación central, hacer control local accionando un relé y a la vez coordinar las acciones de control de los módulos secundarios.

Los módulos secundarios están compuestos por:

#### Entradas:

- (1) Red eléctrica de 12 V AC (Análoga).
- (1) Alimentación (Análoga).
- (1) Recibir órdenes de desconexión por parte del módulo principal.
- (1) Recibir órdenes de re-conexión por parte del módulo principal.

#### Salidas:

- (1) Red eléctrica de 12 V AC (Análoga).
- (1) Indicador falla en voltaje.
- (1) Indicador falla en corriente.
- (1) Indicador estado del relé.

El módulo principal está en capacidad de medir variables eléctricas como voltaje, corriente, potencia y frecuencia con una precisión del 2%. Este dispositivo está compuesto por:

#### Entradas:

- (1) Red eléctrica de 12 V AC (Análoga).
- (2) Indicador falla en voltaje de los 2 módulos secundarios.
- (2) Indicador falla en corriente de los 2 módulos secundarios.
- (2) Indicador estado relé de los 2 módulos secundarios.
- (1) Rx, recibir instrucciones de la estación central.

#### Salidas:

- (1) Red eléctrica de 12 V AC (Análoga).
- (2) Alimentación para los 2 módulos secundarios (Análoga).
- (2) Enviar órdenes de desconexión a los 2 módulos secundarios.
- (2) Enviar órdenes de re-conexión a los 2 módulos secundarios luego de una falla en corriente.
- (1) Tx, enviar información a la estación central.

Para el procesamiento y ejecución de tareas dentro del módulo principal, se cuenta con un microcontrolador PIC18F4620 que tiene incorporadas funciones RTOS que permiten controlar la duración de la ejecución de cada tarea, y con esto tener un sistema determinístico.



También se cuenta con un sensor de potencia CS5463 que tiene incorporado un módulo de comunicación SPI para poder llevar la información al microcontrolador del módulo principal.

El módulo principal también cuenta con un módulo XBee para establecer una red inalámbrica que permita hacer la comunicación entre la estación central MTU y el equipo RTU.

El consumo aproximado del módulo secundario es de 200mW, mientras que el consumo del módulo principal es de aproximadamente 400mW.

## DESCRIPCION GENERAL Y DIAGRAMA EN BLOQUES

En este trabajo de grado se desarrolló un equipo RTU capaz de realizar mediciones en los nodos de una microgrid a escala y a su vez enviar la información a una estación central para poder hacer un monitoreo del estado de la red. Adicionalmente, este equipo es capaz de realizar acciones de control con el fin de mantener la microgrid dentro de sus modos de operación.

En la figura 5 se muestra un diagrama de bloques general del equipo.

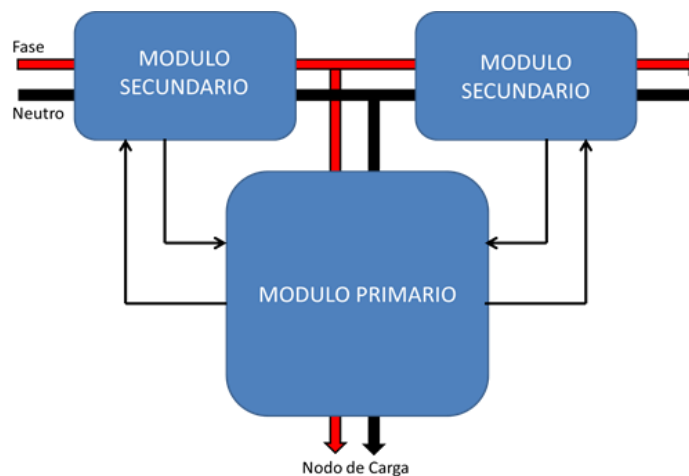


Figura 5. Diagrama en bloques general del equipo RTU

### Módulo secundario

El módulo secundario es el encargado de detectar variaciones significativas en la señal de la red eléctrica, y en caso de superar un umbral definido por medio de comparaciones análogas se activa automáticamente un relé para desconectar la red eléctrica y evitar daños en la carga.

Para poder determinar los niveles de voltaje y corriente en la red, es necesario tener un circuito de acondicionamiento de voltaje y uno de corriente con el fin de enviar una señal adecuada al microcontrolador PIC16F628A, para interpretar las características de la red eléctrica y tomar decisiones de forma automática para el accionamiento de un relé.

Este microcontrolador PIC16F628A envía constantemente una señal digital al microcontrolador PIC18F4620 del módulo principal para indicar si el relé se encuentra abierto o cerrado. Adicionalmente, envía información sobre el estado de fallas en corriente o voltaje, y así mismo está en capacidad de recibir

órdenes por parte del microcontrolador PIC18F4620 del módulo principal para el accionamiento del relé del módulo secundario.

En la figura 6 se muestra un diagrama de bloques detallado del módulo secundario.

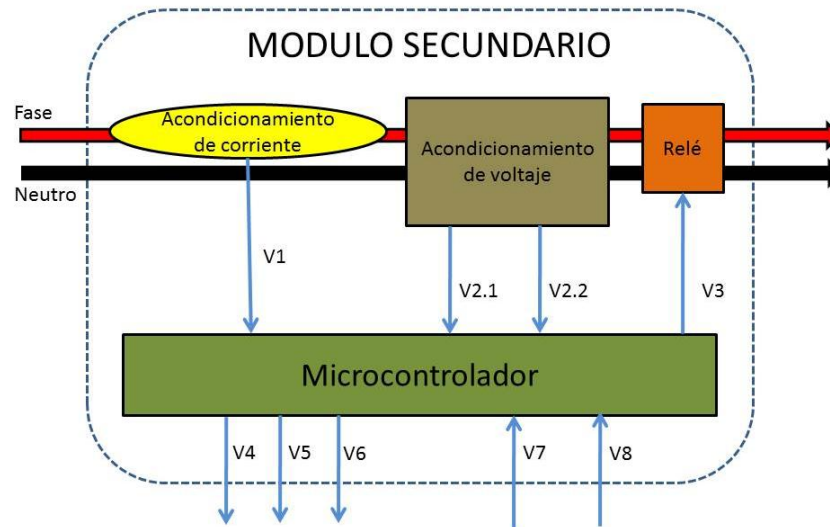


Figura 6. Diagrama en bloques módulo secundario del equipo RTU

El bloque de ACONDICIONAMIENTO DE CORRIENTE es un circuito compuesto por un sensor de corriente ASC714 Allegro de efecto hall, que lo que hace es entregar un voltaje proporcional (V1) a la corriente de la red eléctrica. Este voltaje se ajusta dentro de los rangos de operación del MICROCONTROLADOR con el fin de realizar una comparación análoga y en caso de superar un voltaje de referencia inmediatamente se envía una señal (V3) para abrir el RELÉ y desconectar la red eléctrica para evitar daños en la carga.

El esquemático de este acondicionamiento de corriente se encuentra en el Anexo 1.1, donde se muestra un circuito compuesto por el sensor de corriente, un filtro para eliminar el offset a la salida del sensor de corriente, un detector de picos y a la salida un filtro que elimine componentes AC y minimice el Ripple. Esto se realiza para que a la salida entregue un voltaje DC que varíe con las variaciones de corriente de la línea. Para esto se tomaron mediciones en simulación a la salida del filtro que elimina el offset, a la salida del filtro que elimina componentes AC y así mismo del Ripple de esta señal, los cuales se encuentran registrados en la Tabla 1.

Corriente (A)	$V_{AC}$ ( $V_{RMS}$ )	$V_{DC}$ (V)	Ripple ( $mV_{p-p}$ )
0.5	0.10	0.38	<2
1	0.20	0.82	<2
2	0.40	1.67	2
3	0.60	2.43	2
4	0.79	2.63	2

Tabla 1. Datos de la simulación del acondicionamiento de corriente en el módulo secundario.

En la figura 7 se muestra la simulación a una corriente de  $4A_{RMS}$ . El canal A (amarillo) muestra la salida del sensor de corriente en un voltaje proporcional donde se ve que sale con un Offset de 2.5V y una amplitud de  $2V_{p-p}$  aproximadamente. Mientras que el canal B (verde) muestra la señal a la salida del acondicionamiento (voltaje DC) que será enviada al microcontrolador.

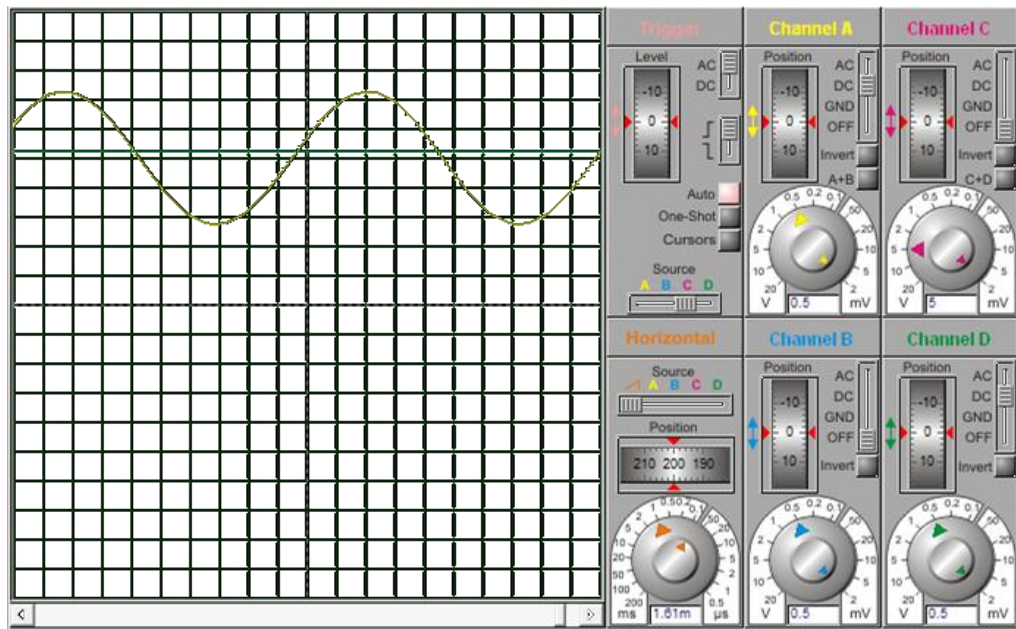


Figura 7. Simulación señal DC del acondicionamiento de corriente en el módulo secundario.

Debido a que la señal a la salida del sensor de corriente es AC es necesario utilizar un filtro pasa bajos para enviar una señal DC al microcontrolador, en donde se hace necesario tener en cuenta el ripple que va a tener la señal para no tener variaciones significativas en los niveles de voltaje a la entrada del microcontrolador. En la figura 8 se muestra el ripple de la simulación anterior donde se ve que no sobrepasa los  $2mV_{p-p}$ .

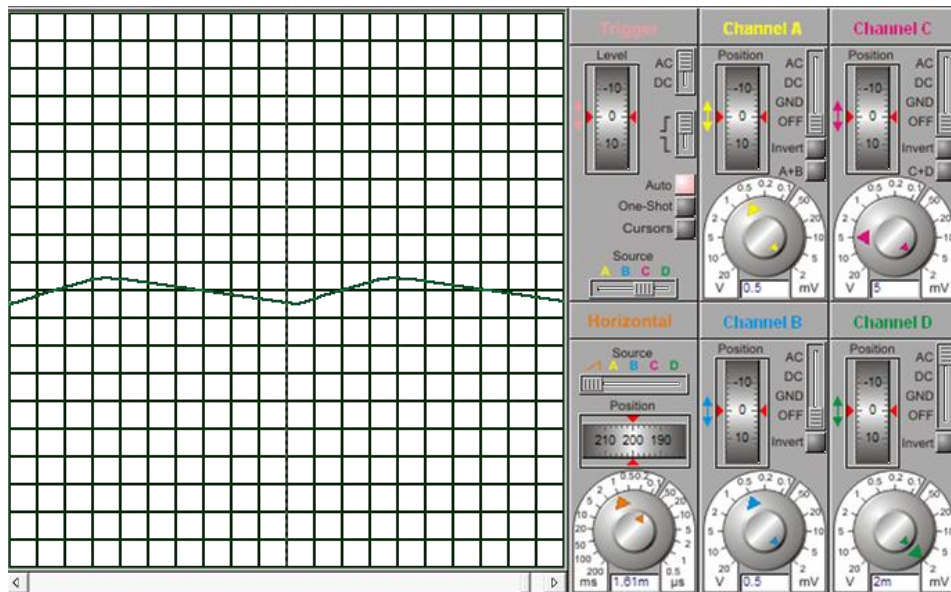


Figura 8. Ripple de la señal DC del acondicionamiento de corriente en el módulo secundario.

El bloque de ACONDICIONAMIENTO DE VOLTAJE es un circuito que da la información de baja tensión ( $V_{2.1}$ ) o sobretensión ( $V_{2.2}$ ), compuesto por un rectificador de onda completa, un arreglo de resistencias, un condensador con el fin de eliminar componentes AC, un comparador y un transistor que opera como interruptor. La señal  $V_{2.1}$  entrega un voltaje DC proporcional al voltaje AC de la entrada, que está dentro del rango de operación del MICROCONTROLADOR para así poder realizar una comparación análoga y en caso de superar un voltaje de referencia inmediatamente se envía una señal ( $V_3$ ) para abrir el RELÉ y desconectar la red eléctrica para evitar daños en la carga. Mientras que la señal  $V_{2.2}$  entrega un voltaje de 5V o 0V dependiendo si hay sobretensión o no, y en el momento de detectar una sobretensión se envía una señal ( $V_3$ ) para abrir el RELÉ y desconectar la red eléctrica.

El esquemático de este acondicionamiento de voltaje se encuentra en el Anexo 1.2. Para este circuito se tomaron mediciones en simulación a la entrada del comparador (nivel DC), a la salida del comparador (detección de sobretensión), y en el colector del transistor (nivel DC para baja tensión), variando el voltaje de la línea. Así mismo del ripple de señal de salida por el colector del transistor, los cuales se encuentran registrados en la Tabla 2.

$V_{AC} (V_{RMS})$	Entrada comparador $V_{DC} (V)$	Salida comparador $V_{DC} (V)$	Colector del transistor $V_{DC} (V)$	Ripple ( $mV_{p-p}$ )
9	2.46	0.04	2.45	2
10	2.77	0.04	2.76	2
11	3.10	0.05	3.09	2
12	3.45	0.05	3.45	3
13	3.80	0.05	3.80	3
14	4.35	4.98	0.00	-

Tabla 2. Datos de la simulación del acondicionamiento de voltaje en el módulo secundario.

En la figura 9 se muestra la simulación a un voltaje de  $12V_{RMS}$ . El canal A (amarillo) muestra el voltaje de la línea, mientras que el canal B (verde) muestra la salida en voltaje DC por el colector del transistor, que será enviada al microcontrolador.

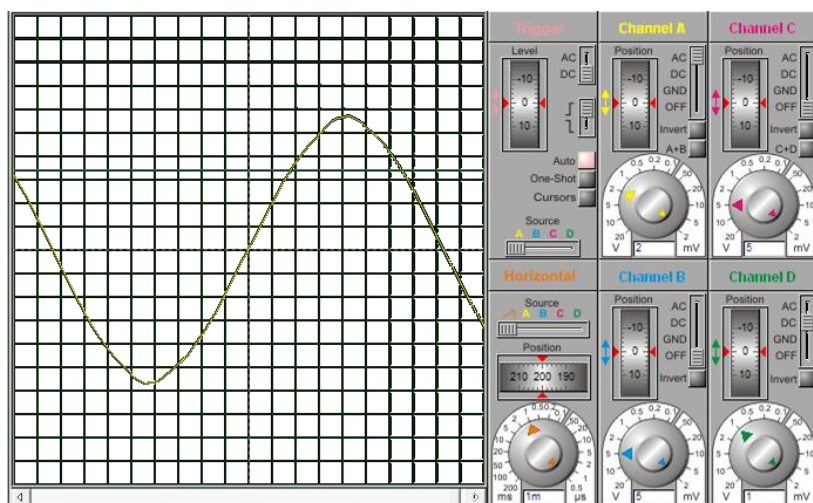
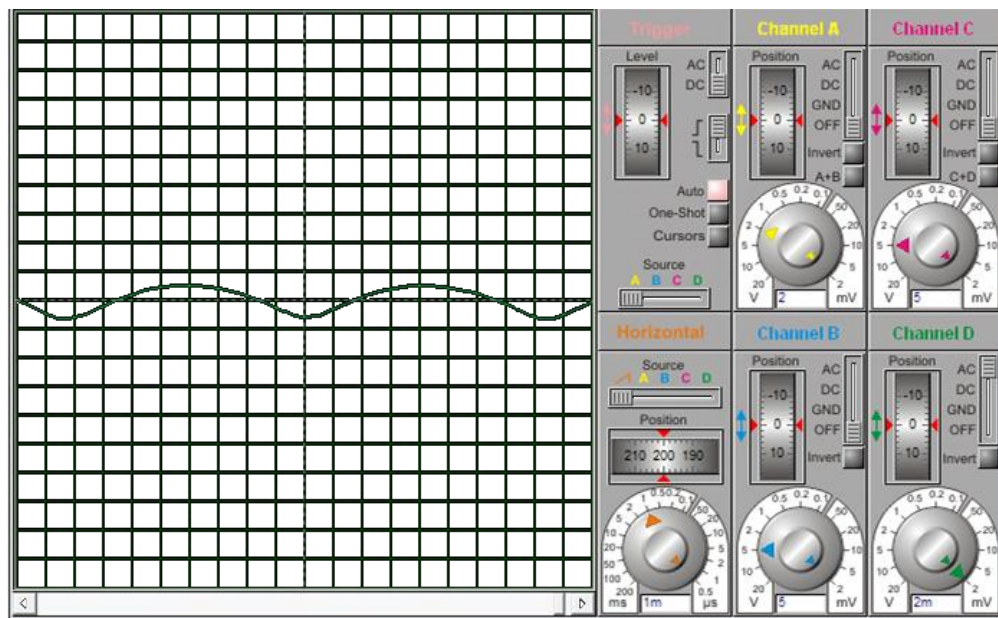


Figura 9. Simulación señal DC del acondicionamiento de voltaje en el módulo secundario.

Debido a que la señal de la línea es AC también es necesario obtener una señal DC para ser enviada al microcontrolador, es necesario conocer el ripple que va a tener la señal para no tener problemas con los niveles entregados. En la figura 10 se muestra el ripple de la simulación anterior el cual es aproximadamente de  $3mV_{p-p}$ .



**Figura 10. Ripple de la señal DC del acondicionamiento de voltaje en el módulo secundario.**

Adicionalmente el MICROCONTROLADOR tiene 3 puertos de salida para enviar información sobre el estado del RELÉ (V4), voltaje (V5) y corriente (V6) al módulo principal que es el encargado de enviar toda la información del estado de la red a una estación central MTU. También cuenta con 2 puertos de entrada para recibir órdenes del módulo principal, uno con el fin de desconectar el RELÉ de forma manual en caso de que la estación central MTU lo solicite, y el otro de re-conexión para conectar el relé y que la red opere normalmente.

En la figura 11 se muestra el diagrama de flujo del comportamiento del microcontrolador del módulo secundario. Cuando fluye energía en el módulo secundario y es acondicionada para que entre al microcontrolador, éste realiza una comparación análoga para voltaje y corriente que dependiendo de su estado, es decir si hay falla o no, envía una señal para abrir el relé o mantenerlo cerrado. Al mismo tiempo el microcontrolador está enviado el estado del relé al módulo principal indicando si hay falla en voltaje o en corriente. Por otro lado, el relé también se puede abrir con una orden desde la estación central, la cual primero llega al módulo principal y desde ahí es enviada al secundario.

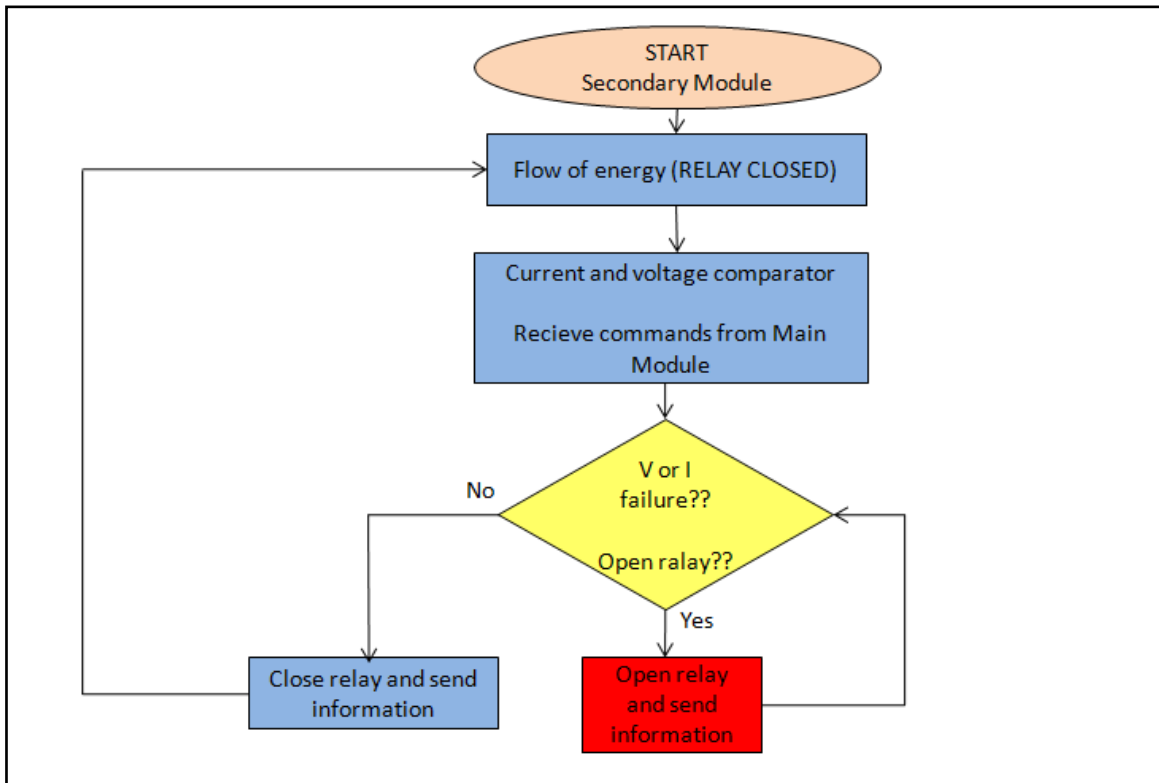


Figura 11. Diagrama de flujo del microcontrolador del módulo secundario.

### Módulo principal.

En la figura 12 se muestra un diagrama de bloques detallado del módulo principal.

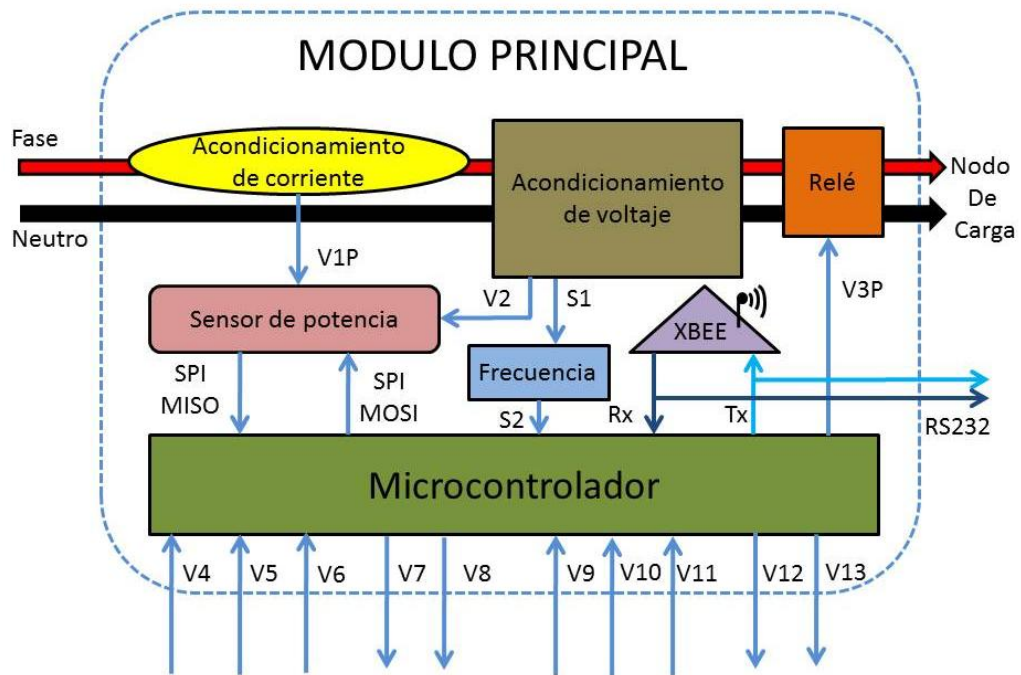


Figura 12. Diagrama en bloques módulo principal del equipo RTU



El bloque de ACONDICIONAMIENTO DE CORRIENTE es un circuito compuesto por un sensor de corriente ASC714 de Allegro de efecto hall que lo que hace es entregar un voltaje proporcional a la corriente de la red eléctrica. Este voltaje ( $V_{IP}$ ) se ajustó dentro de los rangos de operación del SENSOR DE POTENCIA CS5463 con el fin de que éste pueda hacer una medición de la señal para luego enviar la información al MICROCONTROLADOR.

El esquemático de este acondicionamiento de corriente se encuentra en el Anexo 1.3. Este circuito a la salida del sensor de corriente tiene conectado un amplificador operacional con salida diferencial en su conexión típica, luego tiene el circuito recomendado por el sensor de potencia para la entrada de corriente, el cual cumple la función de eliminar ruido a 60 Hz y dar una referencia de 0V para la salida del acondicionamiento. La Tabla 3 muestra la simulación de este circuito midiendo a la salida y variando la corriente de la línea.

Corriente (A)	$V_{AC}$ ( $V_{RMS}$ )
0.5	0.02
1	0.04
2	0.08
3	0.12
4	0.16

Tabla 3. Datos de la simulación del acondicionamiento de corriente en el módulo principal.

La figura 13 muestra la simulación a una corriente de  $4A_{RMS}$ , la cual es la máxima a medir. El canal A (amarillo) muestra el voltaje a la salida del sensor de corriente en su componente AC. Mientras que el canal C + D (Rojo) muestra la salida diferencial del acondicionamiento con un voltaje de  $230mV_p$  aproximadamente, que será enviada al sensor de potencia.

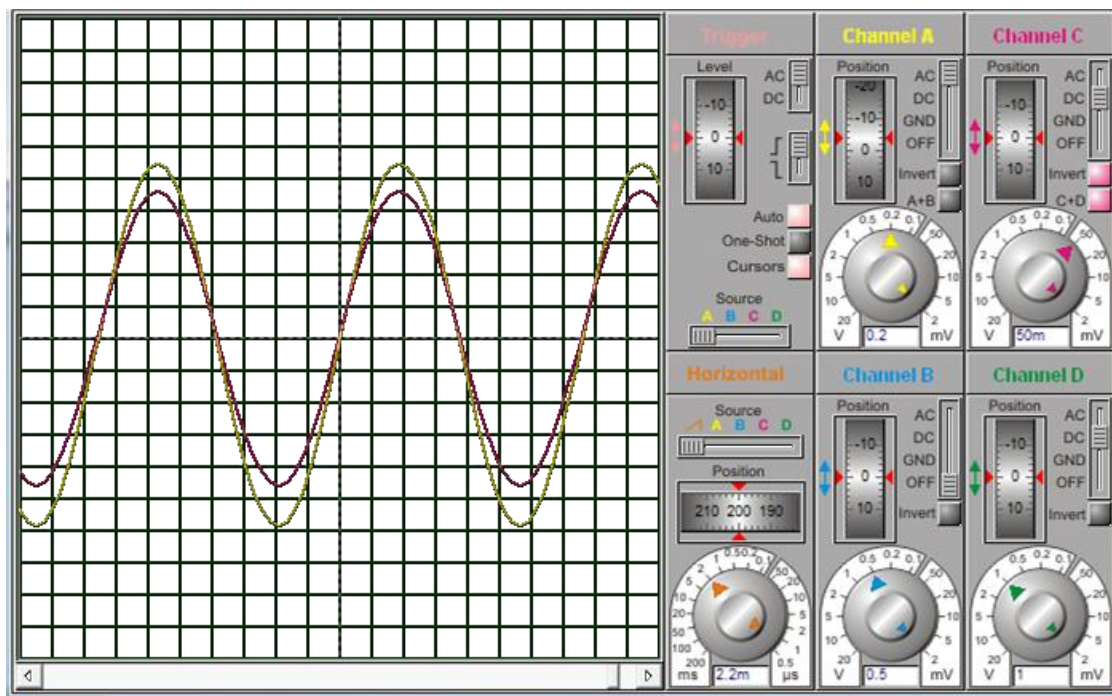


Figura 13. Simulación señal del acondicionamiento de corriente en el módulo principal.

El ACONDICIONAMIENTO DE VOLTAJE es un circuito compuesto por un transformador y un arreglo de resistencias para adecuar una señal de voltaje ( $V_2$ ) a la entrada del SENSOR DE POTENCIA con el fin de poder hacer la medición de las variables eléctricas.

El esquemático de este acondicionamiento de voltaje se encuentra en el Anexo 1.4. La Tabla 4 muestra la simulación de este circuito midiendo a la salida y variando el voltaje de la línea.

$V_{AC} (V_{RMS})$	$V_{AC} (V_{RMS})$
9	0.11
10	0.13
11	0.14
12	0.15
13	0.16

Tabla 4. Datos de la simulación del acondicionamiento de voltaje en el módulo principal.

La figura 14 muestra la simulación a un voltaje de  $12V_{RMS}$ , el cual será el voltaje ideal de la red eléctrica. El canal A (amarillo) muestra el voltaje de la línea, mientras que el canal B (verde) muestra la salida del acondicionamiento con un voltaje de  $215mV_p$  aproximadamente, que será enviada al sensor de potencia.

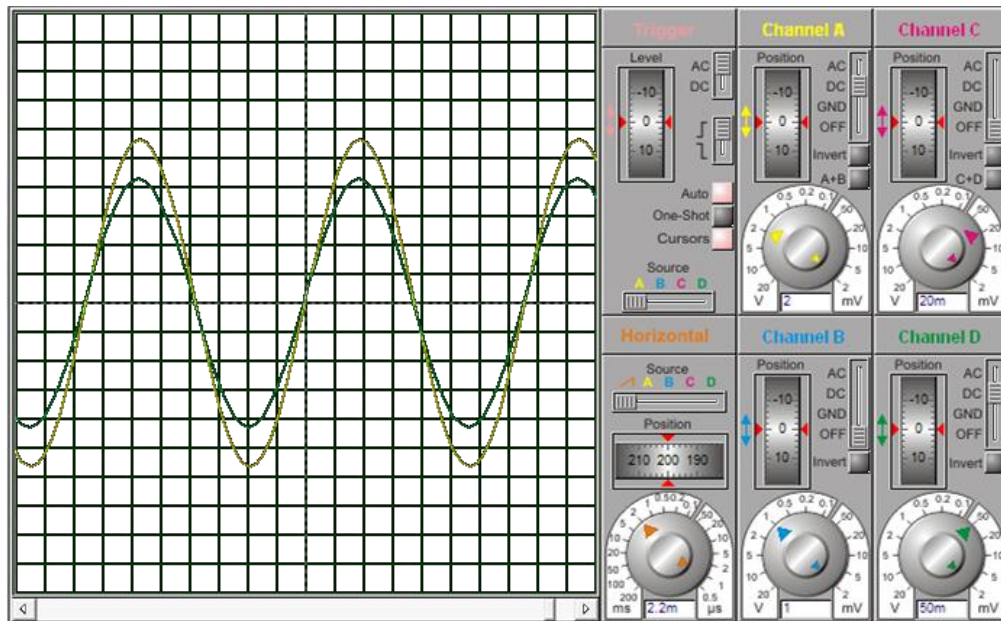


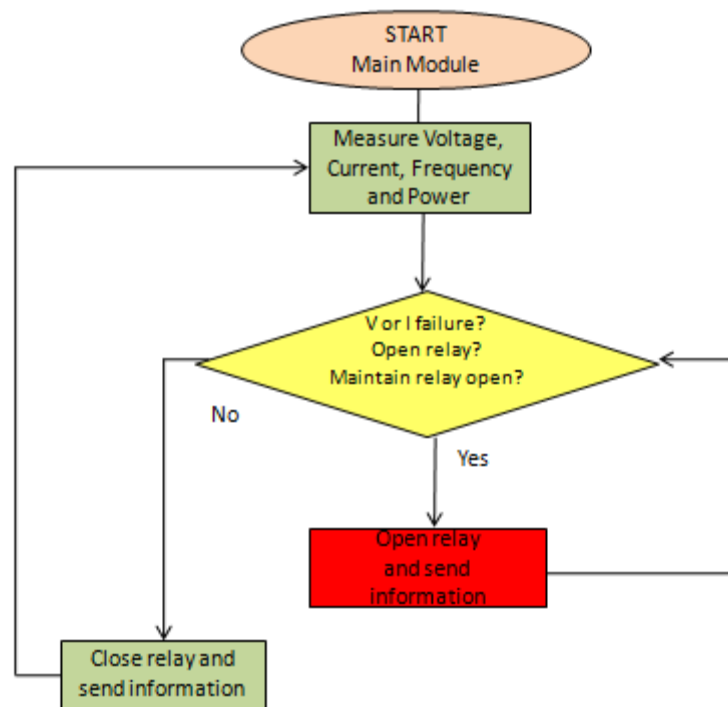
Figura 14. Simulación señal del acondicionamiento de voltaje en el módulo principal.

El bloque de FRECUENCIA es el acondicionamiento para la medición de frecuencia. Este circuito tiene como entrada la salida del transformador del acondicionamiento de voltaje (S1), la cual entra a un comparador y un conversor de frecuencia a voltaje LM2907, con el fin de tener a la salida un nivel de voltaje DC (S2) proporcional a la frecuencia de la red de energía, y que está dentro del rango de operación del MICROCONTROLADOR. El esquemático de este acondicionamiento de frecuencia se encuentra en el Anexo 1.5.

Como se ve en el diagrama de flujo de la figura 15, el MICROCONTROLADOR es el encargado de recibir la información de la medición de las variables eléctricas por medio del SENSOR DE POTENCIA y



con ayuda de la comunicación SPI, para luego enviar esta información por el puerto serial USART al módulo de comunicaciones XBEE con el fin de establecer una red inalámbrica para transferencia de información con la estación central. Adicionalmente, en caso de que se detecte una falla en la red eléctrica automáticamente el MICROCONTROLADOR enviará una señal (V3P) para abrir el RELÉ y desconectar la red eléctrica para evitar daños en la carga. El microcontrolador también puede recibir órdenes de la estación central ya sea para accionar el RELÉ del módulo principal o para enviar a su vez una orden para accionar el RELÉ de los módulos secundarios.



**Figura 15. Diagrama de flujo del microcontrolador del módulo principal.**

Para aclarar la forma en que se transfieren los datos medidos por parte del sensor de potencia al microcontrolador, se puede ver el diagrama de flujo de la comunicación SPI que se encuentra en la Figura 16.

Para este caso, la comunicación SPI el microcontrolador se configura como dispositivo Maestro y el sensor de potencia como esclavo. El dispositivo esclavo cuenta con un puerto SS/CS (slave select) activo en bajo. Para poder enviar o recibir información es necesario que este puerto se encuentre activado, y para lograr esto se debe enviar una señal activa en bajo desde el dispositivo maestro al puerto SS/CS del dispositivo esclavo.

El dispositivo maestro cuenta con un puerto de salida MOSI/SDO que es el encargado de enviar los datos, este puerto debe ir conectado al puerto de entrada MOSI/SDI del dispositivo esclavo. De igual forma el dispositivo maestro cuenta con un puerto de entrada MISO/SDI para recibir la información por parte del esclavo, este puerto debe ir conectado al puerto de salida MISO/SDO del dispositivo esclavo.

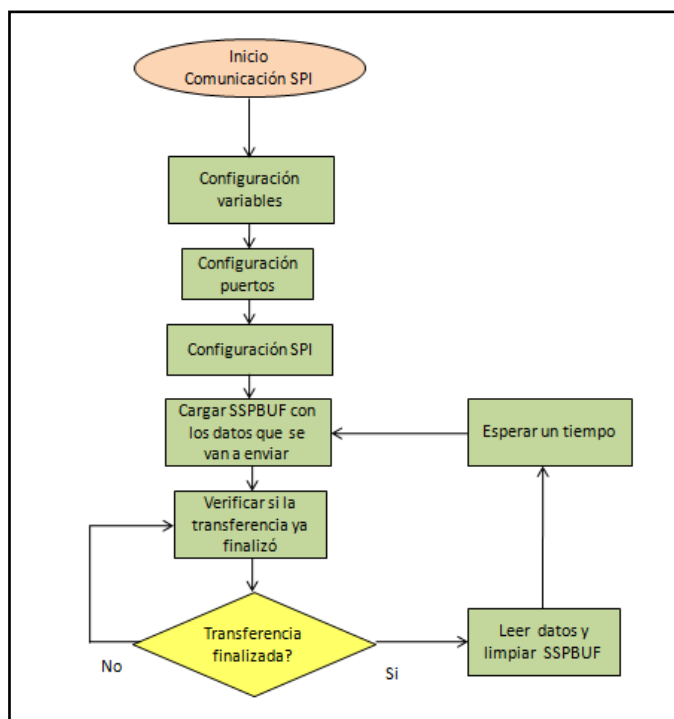


Figura 16. Diagrama de flujo de la comunicación SPI.

La RTU además de tener de comunicación inalámbrica por medio del módulo XBee, cuenta con comunicación serial RS232. El esquemático de la conexión RS232 se encuentra en el Anexo 1.6.

En la Figura 17 se muestra el diagrama de bloques completo de la RTU.

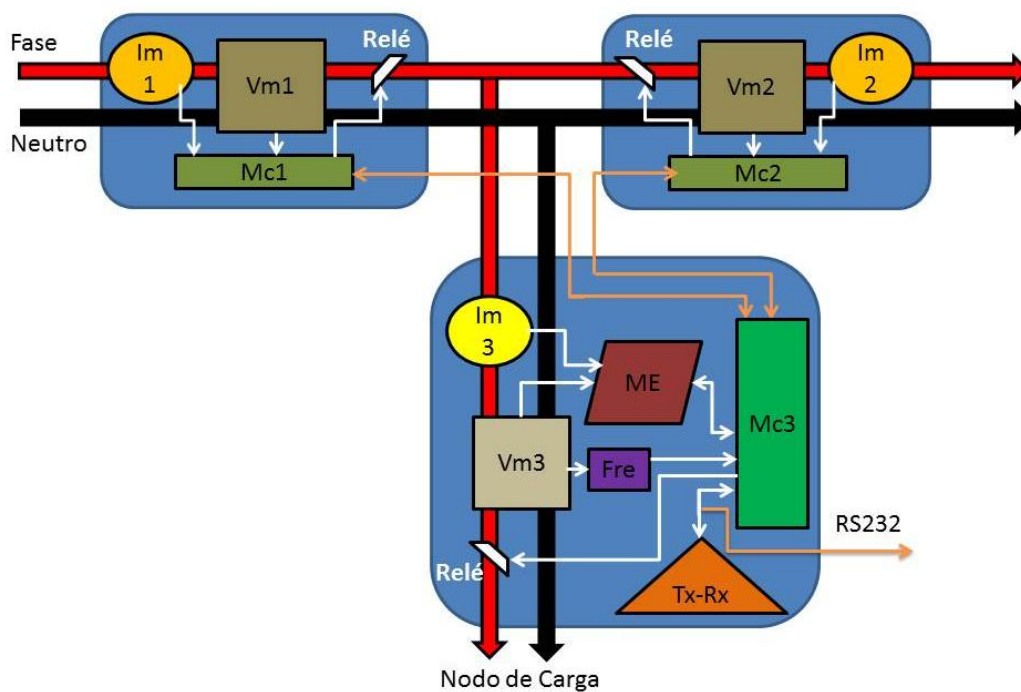


Figura 17. Diagrama en bloques completo del equipo RTU.

## 4. DESARROLLOS

El equipo RTU que se desarrollo está compuesto por 3 módulos, lo cuales fueron presentados en los diagramas de bloques de las figuras 5, 6, 12 y 17.

Es importante resaltar que el módulo principal está en capacidad de cumplir con la mayor parte de las funciones de la RTU, es decir, está en capacidad de realizar mediciones de las variables de la red eléctrica, accionar un relé para la conexión/desconexión de los nodos de carga, y establecer una comunicación inalámbrica con una estación central MTU.

### Módulo secundario

A diferencia del módulo principal, los módulos secundarios están diseñados para accionar un relé con un tiempo de respuesta más corto para desconectar la red principal y proteger las cargas. Adicional a esto, los módulos secundarios cumplen la normatividad IEEE 1159 en cuanto a perturbaciones de tensión se refiere. Esta norma explica que en variaciones de corta duración, más claramente las instantáneas, no se deben tener en cuenta para la desconexión de la energía de la red. Estos módulos tienen en cuenta los huecos de tensión (figura 18) y las elevaciones de tensión (figura 19) según la tabla 5.

Tipos de variación	Duración	Tiempo (ms)	Magnitud
<b>Huecos de tensión (Sag)</b>			
Instantáneos	0.5 – 30 Ciclos	500	0.1 – 0.9 p.u.
<b>Elevaciones de tensión (Swell)</b>			
Instantáneos	0.5 – 30 Ciclos	500	1.1 – 1.8 p.u.

Tabla 5. Perturbaciones según la norma IEEE 1159.

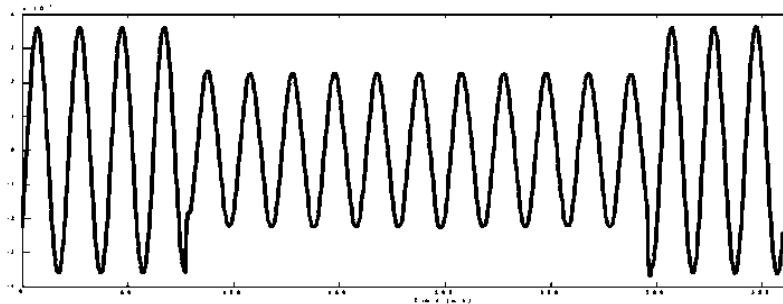


Figura 18. Huecos de tensión.

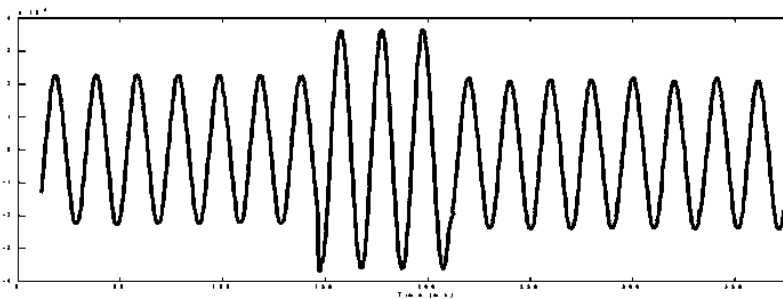
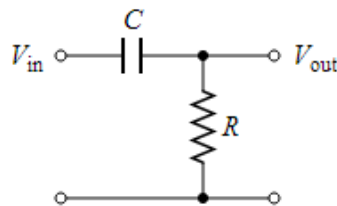


Figura 19. Elevación de tensión.

Por otro lado, la corriente también contará con un tiempo de 500ms después de detectar una elevación de corriente para desconectar la energía de la red.

En este módulo se entregan las señales de corriente RMS y voltaje RMS de la línea, en voltaje DC entre 0V y 5V para que ser interpretadas por el microcontrolador PIC16F628A. Teniendo en cuenta que el sensor de corriente ACS714 entrega 185mV/A se decide implementar el circuito como detector de picos recomendado por el fabricante, ya que se desean obtener las variaciones en un nivel DC.

Este circuito se puede ver en el Anexo 1.1, donde muestra a la salida del sensor de corriente un filtro pasa altos el cual busca quitar el offset. El filtro implementado se puede ver en la Figura 20.



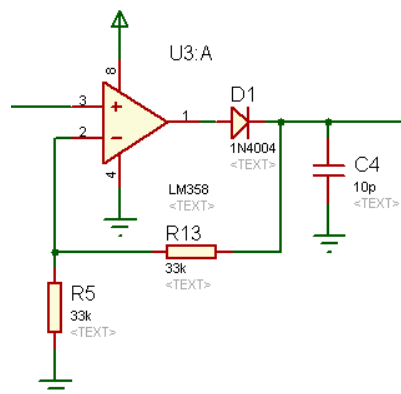
**Figura 20. Filtro pasa altos.**

Para este filtro se realizaron los cálculos con frecuencia de corte de 1Hz, con el fin de tener a la salida una señal solo con componente AC. Entonces,

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Lo cual indica que se necesita un  $\tau$  (constante de tiempo) igual a 159ms, por lo cual se escoge una resistencia de  $1M\Omega$  y se calcula el condensador, teniendo como resultado que debe ser de  $0.156\mu F$ , y se aproxima a  $0.1\mu F$  ya que este es un valor comercial.

Después de este filtro la señal entra en al detector de picos mostrado en la Figura 21. Este circuito es un rectificador de media onda de precisión, el cual sigue los picos de voltaje de la señal de entrada y almacena en el capacitor el valor máximo que se haya alcanzado. Entonces cuando llega una señal pico mayor, se almacena este nuevo valor. El amplificador operacional mostrado en la Figura 21, es alimentado con 5V provenientes de un regulador, así como todo el acondicionamiento.



**Figura 21. Detector de picos.**

A la salida de este detector de picos se tendrá una señal DC con un valor máximo de  $3V$ , la cual corresponde a  $4.5A_{RMS}$ , (máxima corriente que fluirá) esta señal tiene un pequeño ripple el cual se reduce un poco con un filtro pasa bajos que elimine algunas componentes AC. El filtro pasa bajos se muestra en la Figura 22.

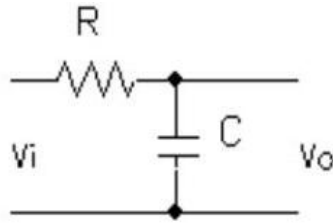


Figura 22. Filtro pasa bajos.

Para este filtro se tiene un  $\tau$  (constante de tiempo) igual a  $150ns$ , con una resistencia de  $10k\Omega$  y un condensador  $15pF$ . Ya que esta constante de tiempo es más rápida, hará que el condensador almacene más rápido el máximo valor. Aunque al implementarlo no hay una gran diferencia.

Por otro lado, en la Tabla 1 se ve que para  $4A_{RMS}$  el valor DC a la salida es de  $2.63V$ , con lo cual se programa el microcontrolador para que cuando llegue a  $3V$  el pin encargado de este acondicionamiento mande una señal al relé para que desconecte la red.

Para el acondicionamiento de voltaje se usa un puente rectificador de diodos con el fin de convertir la corriente alterna en continua, luego pasa por un filtro que reduce el ripple que viene de la señal de  $60\text{ Hz}$ , para luego con un divisor de voltaje ajustar el voltaje de salida, y por último se pone un condensador para disminuir aún más el ripple de la señal. Esta salida se usa para la detección de falla en voltaje para niveles bajos y altos. Para la detección en nivel alto, se toma esta salida y se compara con un nivel que es graduable por medio de un trimmer, y si este valor es mayor entonces el comparador pondrá en a su salida  $5V$ , que serán enviados al microcontrolador indicando que ha ocurrido falla en voltaje. Por otro lado, cuando esto sucede al poner  $5V$  en la salida, se corta un transistor que se encuentra funcionando en modo interruptor el cual corta la señal que se compara en el microcontrolador para detectar la falla en voltaje por nivel bajo (ver Figura 24).

Para el cálculo del divisor se midió el voltaje DC en la salida del rectificador cuando en la línea había  $10.8V_{RMS}$  que es el límite inferior de este acondicionamiento, lo cual dio  $13.4V$ . Entonces,

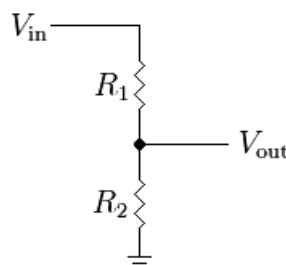


Figura 23. Divisor de voltaje.

Donde  $V_{out} = 3.15V$  y  $V_{in} = 13.2V$

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in}$$

Si se escoge  $R_1 = 10k$  entonces  $R_2 = 3.3k$ .

Por lo cual el microcontrolador se programa para que cuando llegue a 3.15V el pin encargado de este acondicionamiento mande una señal al relé para que desconecte la red. Para esta detección de falla se hace una histéresis interna en el microcontrolador para que cuando el módulo reconecte la red, el voltaje de la red se encuentre en  $10.8V_{RMS}$  y no tener un parpadeo con la conexión, ya que esta conexión se hace automática, así mismo para verificar que el voltaje ya está cercano a  $12V_{RMS}$ .

Mientras que para la detección de falla por nivel alto se realiza con el amplificador operacional que se encuentra en estado saturado ( $V_o = 5V$  o  $V_o = 0V$ ). En donde el cambio de estado se generara cuando el nivel de la entrada no inversora supera el voltaje determinado por el timmer en la entrada inversora del operacional, que está definido en 3.85V (ver Figura 24). Cuando el voltaje comienza a bajar después de haber estado en falla por nivel alto, el transistor va a estar cerrado y no va a conducir por el colector hasta que el voltaje de la entada no inversora sea menor al de la inversora.

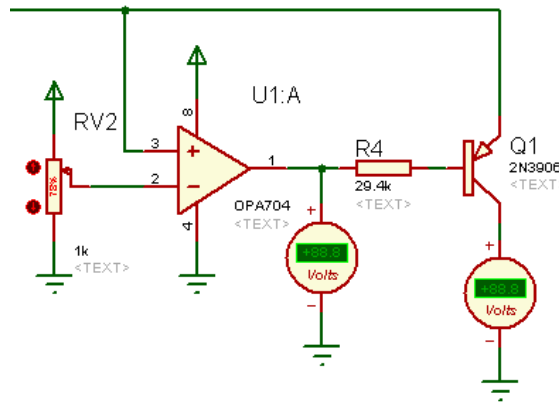


Figura 24. Comparador, Salidas para falla de voltaje en nivel alto.

En el Anexo 2.1 se puede ver el código de programación del microcontrolador PIC16F628A del módulo secundario, en el cual se configuró el módulo de comparación análoga, módulo de voltaje de referencia y un temporizador para poder establecer el control del equipo.

### Módulo principal

En este módulo es necesario entregar las señales de corriente RMS y voltaje RMS de la línea en voltaje AC pero con una amplitud limitada por el sensor de potencia. Teniendo en cuenta que el sensor de potencia Cirrus Logic CS5463 en su entrada análoga diferencial de voltaje acepta un rango máximo de  $500mV_{p-p}$ , y en su entrada análoga diferencial de corriente a la cual se le debe entrar en voltaje acepta igualmente un rango de  $500mV_{p-p}$ , se realizan los acondicionamientos bajo estos parámetros.

Así como en el acondicionamiento de corriente del módulo secundario, en este también se usa el sensor de corriente ACS714 pero en este caso a la salida tendrá un trimmer que es usado para la calibración de corriente del equipo RTU, aumentando o disminuyendo el paso del voltaje de salida del sensor de corriente. Luego pasa por un amplificador operacional diferencial con la configuración mostrada en la

Figura 25. Esta configuración se usa para la aplicación con una sola fuente para el THS4521 que es un amplificador operacional diferencial de alta velocidad.

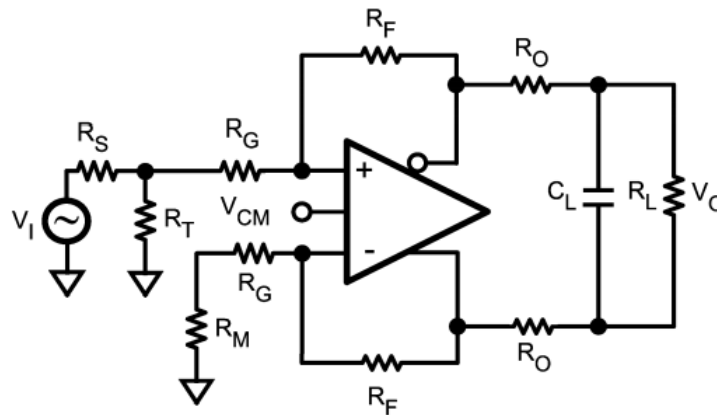


Figura 25. Configuración del amplificador operacional diferencial.

Esta configuración se rige por las siguientes ecuaciones:

$$A_v = \frac{R_F}{R_G}$$

$$R_{IN} = \frac{R_G}{1 - \left(\frac{R_F}{2*(R_F+R_G)}\right)}$$

$$R_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_S} - \frac{1}{R_{IN}}\right)}$$

$$R_M = R_T || R_S$$

Por lo tanto si se desea una ganancia  $A_v = 1.64$  los valores de resistencias que cumplen esta condición son:  $R_F = 1.64k\Omega$  y  $R_G = 1k\Omega$ , así mismo se puede calcular  $R_{IN} = 1450,55\Omega$ . Si  $R_S = 4k\Omega$ , que es el trimmer usado para calibrar de la medición de corriente y cual tiene un valor de  $10k\Omega$ , entonces  $R_T = 2446.81\Omega$  teniendo en cuenta que se van a emplear resistencias de montaje superficial  $R_T = 2.43k\Omega$  y  $R_M = 1.64k\Omega$ . Como  $R_M$  y  $R_G$  van conectadas en serie, se opta por poner una resistencia de  $2.7k\Omega$ .

A la salida este acondicionamiento se tiene un arreglo de resistencias y un condensador en paralelo recomendado por el fabricante del sensor Cirrus Logic para entrar la señal diferencial, esto se hace con el fin de minimizar el ruido de la línea a 60Hz.

Para el acondicionamiento de voltaje se usa un transformador como el de la Figura 26 con el fin de bajar el voltaje de la línea en una proporción y luego con un divisor de voltaje ajustar el voltaje a lo permitido por la entrada del sensor de potencia.

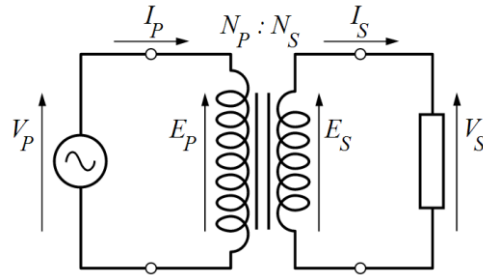


Figura 26. Transformador.

La relación de transformación  $m$  de la tensión entre el bobinado primario y el bobinado secundario depende de los números de vueltas que tenga cada uno.

$$m = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s}$$

Se desea que la relación  $N_p : N_s$  sea **4:1** en otras palabras  $m = 4$ , entonces para esto se toma un valor alto a medir que es  $15V_{RMS}$  que será  $V_p$ , y se calcula el valor de  $V_s = 3.75 V_{RMS}$ . La construcción de este transformador se realizó por medio de un fabricante de transformadores, al cual se le entregaron especificaciones de potencia, voltaje de entrada y voltaje de salida.

Para calcular el divisor de voltaje se debe tener en cuenta que a su salida el máximo valor a medir no puede ser mayor a  $250mV_p$  que es lo que le entra al sensor de potencia. Entonces se decide que para los  $15V_{RMS}$  a la entrada del sensor le lleguen  $200mV_p$ .

$$V_{RMS} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} = \frac{200m}{\sqrt{2}} = 0.1414V_{RMS}$$

Entonces con el divisor de voltaje de la Figura 23, se tiene que  $V_{out} = 0.1414V_{RMS}$  y  $V_{in} = 3.75V_{RMS}$

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in}$$

Si se escoge  $R_1 = 22k\Omega$  entonces  $R_2 = 862\Omega$ , se escoge entonces un trimmer de  $1k\Omega$  para poder variar la amplitud de la señal y poder calibrar la medida de voltaje.

Para el acondicionamiento de frecuencia se usó un conversor de frecuencia a voltaje. El conversor es el LM2907, el cual por medio de la conexión de unos condensadores y resistencias se configura el rango de frecuencias que se desea variar y tener un voltaje proporcional a la salida.

Para la medición de corriente se toma la señal de salida del transformador usado en el acondicionamiento de voltaje, esta señal se pasa por un divisor de voltaje el cual permite que la señal tenga una amplitud permitida por la entrada de la siguiente etapa, en donde será convertida la señal seno en una señal cuadrada por medio de un amplificador operacional *rail to rail*, comparando la señal de entrada con 0 voltios, y teniendo a la salida una señal cuadrada de 0V a 5V. Lo anterior se hace ya que al LM2907 se le debe entrar con una señal cuadrada.



El LM2907 tiene una linealidad en voltaje típicamente del 0.3%, lo cual es aceptable para la medición de frecuencia. Por otra parte, el circuito implementado para este acondicionamiento se encuentra en el Anexo 1.5, donde se puede ver que en los pines 3 y 4 del LM2907 se encuentran un condensador C2 y una resistencia R3 en paralelo configurando un pasa bajos para integrar la señal de voltaje. La Figura 27 muestra el LM2907 donde se ve que el integrado tiene un comparador con histéresis por donde va a entrar la señal cuadrada, y en su entrada inversora el nivel con el cual se va a comparar que se configuró en 2.5V con un divisor resistivo.

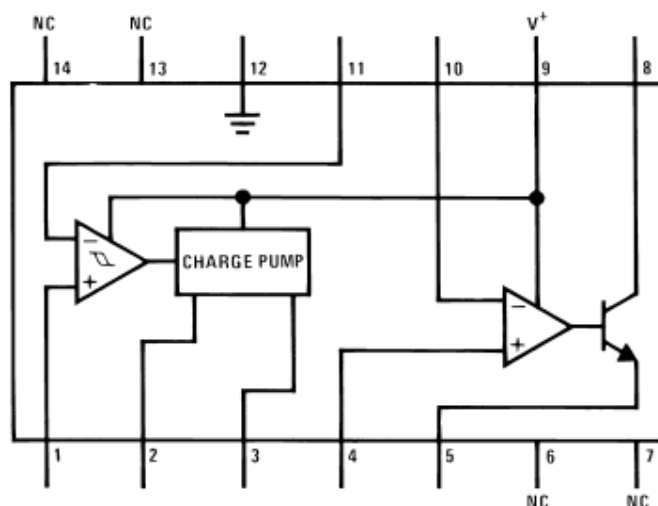


Figura 27. Configuración LM2907.

Para el uso de este integrado el fabricante indica que el condensador que se pone en el pin 2 (C1) debe ser mayor a 100pF para mantener la compensación interna de la bomba (*Charge pump*) y no tener errores en la integración con R3.

En el Anexo 2.2 se puede ver el código de programación del microcontrolador PIC18F4620 del módulo principal, en el cual se configuró el módulo de comunicación SPI para establecer comunicación con el sensor de potencia, el módulo EUSART para la comunicación con el módulo XBee y por RS232, un ADC, y un temporizador para llevar los tiempos de algunas de las tareas que fueron definidas utilizando funciones RTOS con el fin de manejar los tiempos de ejecución de las tareas.

En la tabla 6 se puede ver la lista de las características de tiempo de todas las tareas que fueron configuradas para operar con funciones RTOS.

TAREA	TIEMPO MAXIMO DE EJECUCION (ms)	PERIODO DE ACTIVACION (ms)
Hacer mediciones	2	40
Enviar datos	5	40
Ejecutar control automático	1	40
Ejecutar control manual	3	40
Almacenar en memoria EEPROM	3	1200

Tabla 6. Tareas programadas con restricciones de tiempo.

Los tiempos de ejecución de las tareas que se muestran en la tabla 6 corresponden a la máxima velocidad que puede operar el módulo principal garantizando tiempo real, sin embargo, con el fin de poder ilustrar los resultados del trabajo se aumentó el tiempo de activación en la tarea de envío de datos con el fin de hacer mucho más lento el monitoreo y poder observar lo que está sucediendo.

Para la comunicación inalámbrica se usaron módulos XBee Serie 1. En cuanto a la conexión del módulo XBee en el impreso, se implementó un divisor de voltaje a la entrada del puerto RX debido a que el microcontrolador le envía los datos digitales de 0V y 5V, y estos módulos se alimentan con 3.3V, por lo tanto en la entrada RX se tienen datos digitales de 0V y 3.3V. Así mismo la alimentación de este módulo XBee se realizó con un regulador a 3.3V.

Para la configuración de estos módulos se usó el software X-CTU. Primero se conecta la tarjeta de desarrollo con el módulo XBee en el computador por su entrada USB, luego se abre el programa X-CTU y en la ventana *PC Settings* se configuran los *Baud* a 9600 la cual es la velocidad, se selecciona el puerto COM al que está conectado la tarjeta y se da click en test para verificar que esté conectado. Este paso se puede ver en la Figura 28.

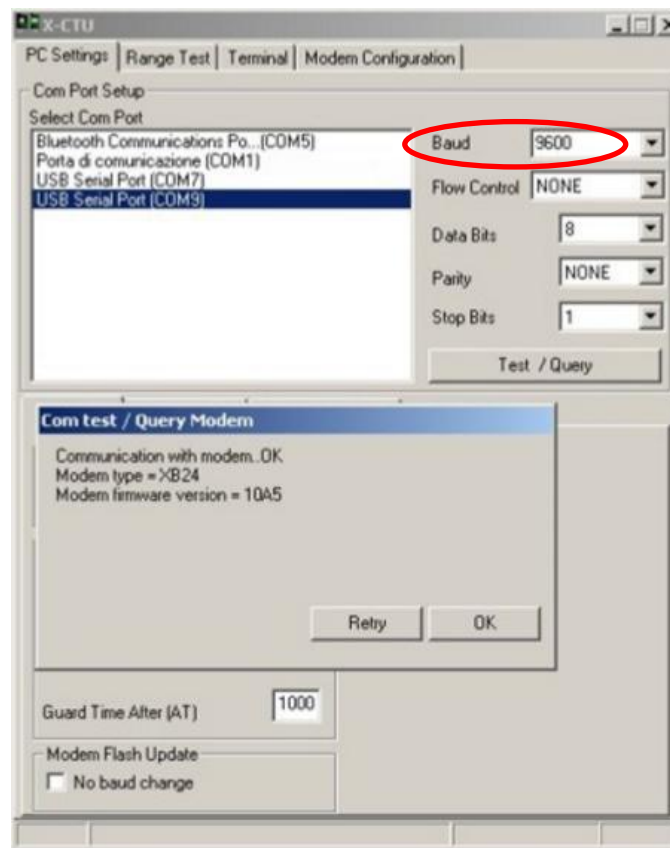


Figura 28. Prueba de conexión en X-CTU para módulo XBee.

Luego de verificar la correcta conexión del XBee se procede a configurar en modo transparente. Lo primero que se realiza es abrir la ventana *Modem Configuration*, se da click en *Read* y salen los parámetros que ya tiene configurados, para esta comunicación se deben configurar 4 parámetros, el PAN ID que es el número con el que se identifica la red y por ende deben ser el mismo en los 2 módulos XBee, el DH que para identificar que se comunica con el DL, y por último el MY que es la dirección propia de cada módulo, luego se da click en *Write* para guardar los parámetros en el módulo y ya se puede usar, la

Figura 29 muestra estos parámetros a configurar. Además de configurar estos datos se debe verificar que la velocidad de transmisión este en 9600 Baud. En la Tabla 5 se muestra los parámetros definidos para los módulos XBee, tanto para el de la RTU como para el de la MTU.

Parámetros	XBee RTU	XBee MTU
PAN ID	3332	3332
DH	0	0
DL	1	0
MY	0	1

Tabla 5. Parámetros para configurar los módulos XBee.

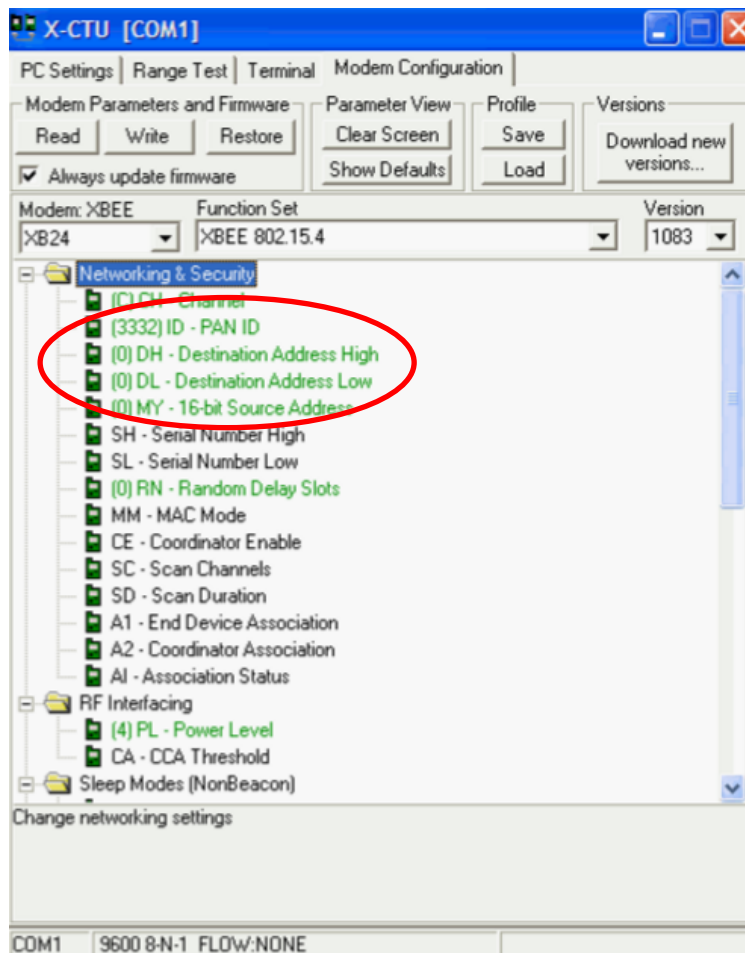


Figura 29. Configuración X-CTU para módulo XBee.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para comprobar el correcto funcionamiento del equipo se realizaron 4 pruebas conectando el equipo a una red de  $12 V_{RMS}$  la cual fue generada por medio de un Variac y un transformador uno a uno. A esta red se le generaron variaciones de carga y amplitud en el voltaje para analizar el comportamiento del equipo frente a fallas de sobrecorriente y fallas de voltaje.

En estas pruebas se registró en un computador la información que se enviaba por la red inalámbrica para comprobar que la información de las variables si es acertada, así como el estado de voltaje, corriente y el relé de los tres módulos. Se verificó el envío de órdenes desde un computador para accionar los relés de los tres módulos de forma manual.

Las mediciones realizadas fueron comparadas con los resultados obtenidos por medio de instrumentos de medición de buena precisión del laboratorio, más específicamente con el analizador de energía Fluke 43B para comprobar que las variables medidas si cumplían con la precisión deseada.

En la Figura 30 se muestran los tres módulos, Principal, Secundario A y Secundario B, correspondientes a la RTU.

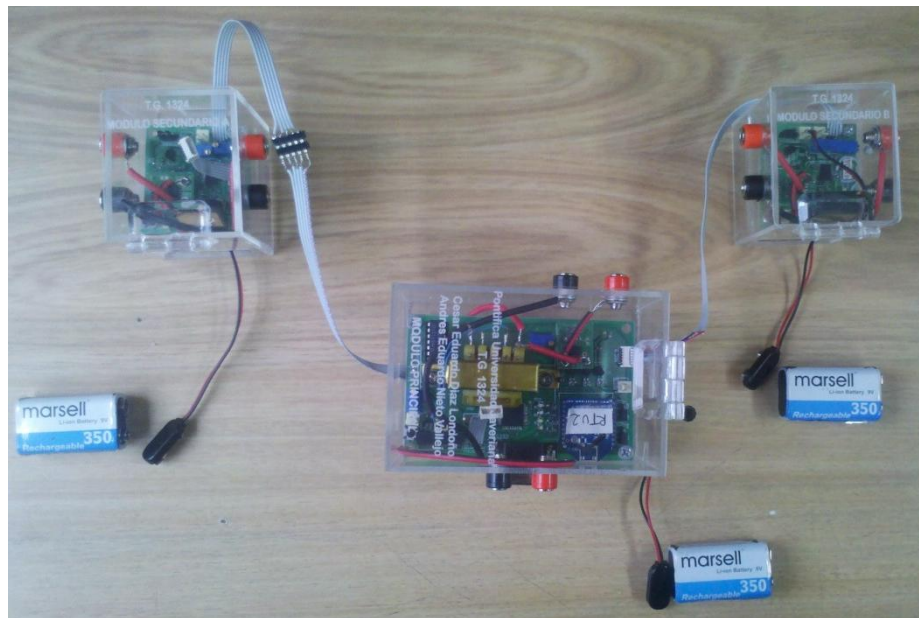


Figura 30. RTU, Módulos Principal, Secundario A y Secundario B.

### Módulo secundario

Este módulo cuando detecta falla de un hueco o una elevación de tensión por fuera del rango de operación que es de  $\pm 10\%$  en  $12 V_{RMS}$ , es decir, fuera del rango de entre  $10,8 V_{RMS}$  y  $13,2 V_{RMS}$ , espera 500ms y si se mantiene la falla abre el relé, prende un led rojo indicando la falla y envía una señal al módulo principal que indica la falla en el monitoreo de la estación central, si no dura más de 500ms no se desconecta la red. Cuando una falla se soluciona y el valor del voltaje supera la histéresis, el módulo se reconecta cerrando el relé automáticamente. Mientras que cuando ocurre una falla de sobrecorriente, la cual se detectara por encima de  $4 A_{RMS}$ , igualmente espera 500ms y si se mantiene la falla abre el relé, prende un led amarillo y envía otra señal al módulo principal para indicar la falla en el monitoreo de la

estación central. A diferencia del voltaje esta falla no se soluciona automáticamente, se debe reconectar enviándole un comando desde la estación central, ver Tabla 7. El módulo tiene un led blanco que indica si el relé está abierto o cerrado, cuando esta encendido es porque el relé está cerrado y la energía fluye hacia la salida.

En este módulo se puede modificar el nivel donde se desee detectar la falla de sobrecorriente variando un *trimmer*. También hay un *trimmer* que modifica el nivel de falla de elevación de tensión, mientras que el nivel para fallas de huecos de tensión se hace mediante la programación interna del microcontrolador configurando un voltaje de referencia. Adicionalmente el módulo puede ser alimentado con una pila de 9V, que es regulado a 5V o desde el módulo principal que le envía 5V, lo único que hay que hacer en el secundario es cambiar de posición un *jumper*. La Figura 31 muestra el montaje de este módulo, y el *layout* se encuentra en el Anexo 3.1.



Figura 31. Montaje módulo Secundario.

### Módulo principal

Este módulo realiza la medición de las variables de energía como voltaje, corriente, potencia y frecuencia de la red eléctrica y las envía a la estación central. Los datos que llegan de las variables se multiplican por unos factores con el fin de visualizar las medidas con una precisión del 2%. Para el cálculo de estos factores se optó por tomar los 2 bytes más significativos entregados por el sensor de potencia y realizar la siguiente aproximación:

$$V = B_1 * X1 + B_2 * Y1$$

$$I = B_1 * X2 + B_2 * Y2$$

$$F = B_1 * X3$$

Dónde:

$B_1$  es el MSB

$B_2$  es el LSB

$Xn$  es el factor de conversión para  $B_1$ ;  $n=1,2,3$

$Yn$  es el factor de conversión para  $B_2$ ;  $n=1,2,3$

$V$  es el voltaje en V

$I$  es la corriente en mA

$F$  es la frecuencia en Hz

Por ejemplo, si el resultado en una medida de voltaje es  $B_1 = 30$  y  $B_2 = 100$ , entonces la medición será igual a:

$$\begin{aligned} V &= B_1 * X + B_2 * Y \\ V &= 30 * 0.353 + 100 * 0.0012 \\ V &= 10.59 + 0.12 \\ V &= 10.71V \end{aligned}$$

Otro ejemplo, es si el resultado en una medida de corriente es  $B_1 = 23$  y  $B_2 = 70$ , entonces la medición será igual a:

$$\begin{aligned} I &= B_1 * X + B_2 * Y \\ I &= 23 * 22.7 + 70 * 0.09 \\ I &= 522.1 + 6.3 \\ I &= 528.4mA \end{aligned}$$

Para lograr la precisión del 2% se definen varios factores de conversión en ciertos rangos de cada variable eléctrica. La Tabla 6 muestra todos los factores de conversión para cada variable.

VARIABLE	RANGO B1	FACTOR X PARA B1	FACTOR Y PARA B2
<b>Voltaje</b>	$14 \leq V \leq 25$	0.328	0.0012
	$26 \leq V \leq 27$	0.34	0.0012
	$28 \leq V \leq 29$	0.35	0.0012
	$30 \leq V \leq 32$	0.353	0.0012
	$33 \leq V \leq 34$	0.362	0.0012
	$35 \leq V \leq 36$	0.367	0.0012
	$37 \leq V \leq 39$	0.372	0.0012
	$40 \leq V$	0.377	0.0012
<b>Corriente</b>	$4 \leq I \leq 5$	19.20	0.10
	$6 \leq I \leq 8$	21.2	0.10
	$9 \leq I \leq 10$	21.8	0.10
	$I=11$	22.1	0.10
	$12 \leq I \leq 15$	22.3	0.10
	$16 \leq I \leq 22$	22.5	0.10
	$23 \leq I \leq 30$	22.7	0.09
	$31 \leq I \leq 39$	22.8	0.09
	$40 \leq I \leq 70$	23	0.06
	$71 \leq I \leq 110$	22.9	0.06
$111 \leq I$	22.8	0.06	
<b>Frecuencia</b>	$100 < F < 160$	2.32	0

Tabla 6. Factores de conversión para la medición de las variables eléctricas.

Además de medir variables eléctricas el módulo principal también cuenta con protecciones para fallas de sobrecorriente que se indican en el montaje con un led amarillo, huecos y elevaciones de tensión que se indican en el montaje con un led rojo, las cuales son configuradas en el código de programación del microcontrolador, ver Anexo 2.2.

Este módulo es el que envía toda la información de las medidas de las variables eléctricas, el estado de voltaje, corriente y relé de cada módulo (estado completo de la RTU). Y también del estado de la memoria EEPROM, que es usada para almacenar datos del monitoreo de la red. Esta memoria se manipula desde la estación central, ya que se puede ver la información almacenada y también borrar esta información para

dejar libre ese espacio y que pueda volver a almacenar por medio de unos comandos, ver Tabla 7. En el montaje del módulo principal se tiene un led azul que si se encuentra encendido es porque la memoria está llena.

Desde la estación central no solo se puede manipular la memoria, también se puede desconectar o conectar cualquier módulo que se desee, esta lista de comandos se muestra en la Tabla 7.

ASCII	HEX	SIMBOLO	COMANDO
97	41	A	Desconecta el relé del módulo secundario A.
65	61	A	Conecta el relé del módulo secundario A.
98	62	B	Desconecta el relé del módulo secundario B.
66	42	B	Conecta el relé del módulo secundario B.
99	63	C	Reconecta el relé de módulo secundario A si ha detectado falla en corriente.
100	64	D	Reconecta el relé de módulo secundario B si ha detectado falla en corriente.
122	7A	Z	Desconecta el relé del módulo principal
90	5A	Z	Reconecta el relé del módulo principal
121	79	Y	Muestra el almacenamiento de la memoria y detiene el monitoreo.
89	59	Y	Reanuda el monitoreo.
120	78	X	Borra toda la memoria EEPROM.

**Tabla 7. Comandos de control enviados desde la estación central.**

La RTU tiene la opción de alimentarse completamente (Principal y Secundarios) con una sola pila de 9V, que se conecta al módulo principal y este alimenta con 5V los dos secundarios. Así mismo tiene la opción de comunicarse inalámbricamente o por el puerto serial RS232.

Otra ventaja que posee, es que es un equipo que permite calibrarse en la medición de voltaje, corriente, potencia y frecuencia por medio de trimmers y de la programación del microcontrolador. En la Figura 32 se muestra el montaje de módulo principal, este módulo también cuenta con un led blanco que si se encuentra encendido es porque el relé está cerrado y fluye energía hacia la salida. El Anexo 3.2 muestra el *layout* de este módulo.



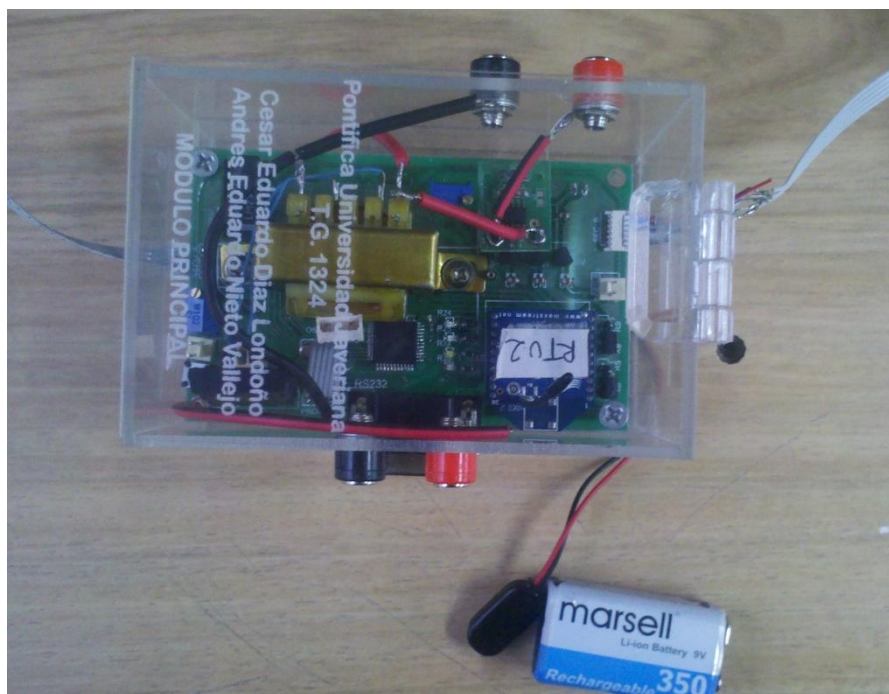


Figura 32. Montaje módulo Principal.

Para verificar el funcionamiento de la RTU se realizaron 4 pruebas las cuales están documentadas a continuación:

### Prueba 1

Esta prueba se realizó solo con el módulo principal (P), la red de energía eléctrica y dos cargas, un bombillo y un reóstato. El esquemático de esta prueba se muestra en la Figura 33, y el montaje en la Figura 34.

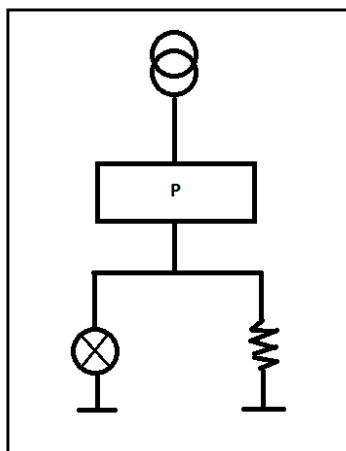


Figura 33. Esquemático prueba 1.

En la siguiente imagen se puede ver el montaje de la prueba, en donde se usa un variac para simular la red eléctrica y poder variar su voltaje para así generar fallas de huecos y elevaciones de tensión, también se cuenta con un reóstato como carga que sirve para variar la corriente de la red y generar fallas de sobre



corriente. También se tiene un Fluke 43B que muestra la medición de voltaje, corriente y frecuencia que se compara con los datos dados por el monitoreo.

Para esta prueba se dejó el nivel de falla en corriente en 600mA y debido a que no hay módulos secundarios conectados no se presta atención al monitoreo de esos estados.

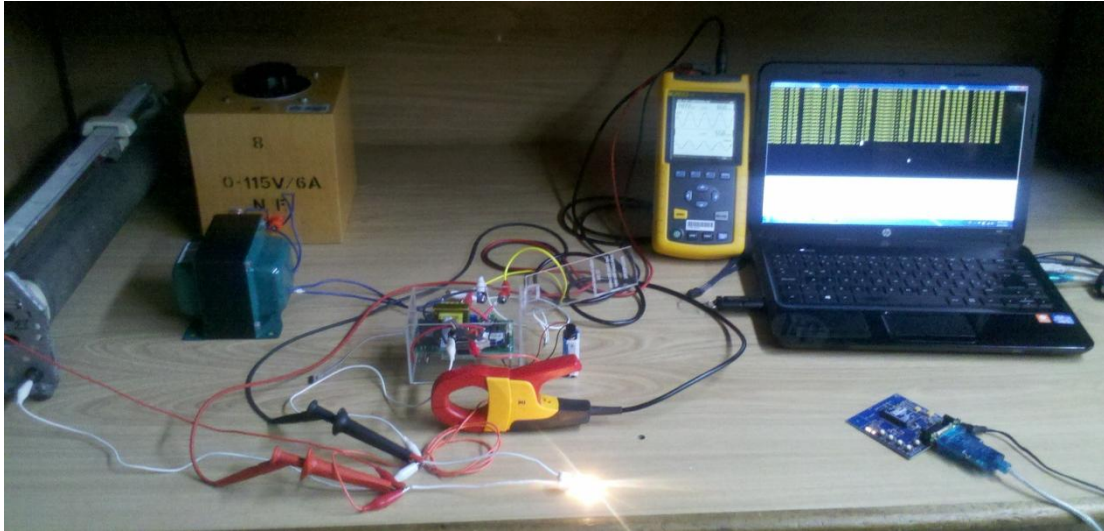


Figura 34. Montaje prueba 1.

La trama de datos será de la siguiente forma:

Voltaje= \_\_ Corriente=\_\_ Potencia=\_\_ Frecuencia=\_\_ SA: “Secundario A” (Voltaje) (Corriente) (Relé) SB: “Secundario B” (Voltaje) (Corriente) (Relé) P: “Principal” (Voltaje) (Corriente) (Relé) (Memoria)

Dónde: OK, indica que no hay falla para voltaje o corriente, el relé está conectado y espacio en memoria.

XX, indica que hay falla para voltaje o corriente, el relé está desconectado y la memoria está llena.

Lo primero que se verifica es que los comandos de desconexión y conexión estén funcionando perfectamente, lo cual se puede ver en la Figura 35, donde en las primeras 4 líneas el sistema está operando en modo normal con el relé cerrado. En la línea 5 se envía el comando z para la desconexión, quedando así el relé abierto. En las líneas 6 a 10 se ve que sigue desconectado, pero en la línea 11 se conecta de nuevo con el comando Z y el proceso vuelve a la normalidad, con sus medidas de energía.

voltaje = 10.61	corriente = 549.57	potencia = 5.91	frecuencia = 59.91	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 10.62	corriente = 549.93	potencia = 5.93	frecuencia = 59.91	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 10.60	corriente = 548.94	potencia = 5.89	frecuencia = 59.48	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 10.60	corriente = 549.21	potencia = 5.89	frecuencia = 60.34	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 12.01	corriente = 273.80	potencia = 3.31	frecuencia = 59.91	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK	XX XX
voltaje = 12.38	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 60.34	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 12.37	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 60.34	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 12.36	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 60.34	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 12.40	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 12.41	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 11.30	corriente = 438.80	potencia = 5.05	frecuencia = 59.48	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK	XX voltaje
voltaje = 10.61	corriente = 550.11	potencia = 5.92	frecuencia = 60.34	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 10.62	corriente = 549.57	potencia = 5.93	frecuencia = 59.91	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 10.64	corriente = 549.48	potencia = 5.94	frecuencia = 60.34	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 10.62	corriente = 550.02	potencia = 5.93	frecuencia = 59.91	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 10.61	corriente = 550.02	potencia = 5.92	frecuencia = 60.34	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX

Figura 34. Prueba 1, comandos de conexión y desconexión.

En la Figura 35 se muestra el funcionamiento normal del módulo, donde realiza el monitoreo constante de las variables de energía y los estados del módulo principal funcionando correctamente.

voltaje = 12.47	corriente = 579.20	potencia = 7.24	frecuencia = 59.91	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK XX
voltaje = 12.50	corriente = 577.84	potencia = 7.26	frecuencia = 59.48	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK XX
voltaje = 12.46	corriente = 578.30	potencia = 7.22	frecuencia = 59.91	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK XX
voltaje = 12.51	corriente = 577.84	potencia = 7.26	frecuencia = 59.48	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK XX
voltaje = 12.50	corriente = 579.20	potencia = 7.28	frecuencia = 59.48	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK XX
voltaje = 12.47	corriente = 577.58	potencia = 7.22	frecuencia = 60.34	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK XX
voltaje = 12.53	corriente = 578.65	potencia = 7.30	frecuencia = 60.34	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK XX
voltaje = 12.51	corriente = 577.67	potencia = 7.26	frecuencia = 59.48	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK XX

Figura 35. Prueba 1, funcionamiento normal.

La Figura 36 muestra una falla en sobrecorriente en la línea 6, mostrando que llego a una corriente de 1274,06mA generando una falla en corriente y desconectando la red eléctrica. Se puede ver que la falla en corriente se mantiene indicada sin importar que la corriente haya disminuido. Para poder reconectar la red, es necesario que el operario envíe el comando Z.

voltaje = 12.53	corriente = 549.48	potencia = 6.93	frecuencia = 59.05	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK XX
voltaje = 12.50	corriente = 547.23	potencia = 6.86	frecuencia = 58.62	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK XX
voltaje = 12.50	corriente = 546.24	potencia = 6.85	frecuencia = 58.18	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK XX
voltaje = 12.53	corriente = 545.52	potencia = 6.87	frecuencia = 58.62	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK XX
voltaje = 12.48	corriente = 548.49	potencia = 6.85	frecuencia = 57.75	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK XX
voltaje = 10.63	corriente = 1274.06	potencia = 13.64	frecuencia = 58.62	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK XX XX XX
voltaje = 14.57	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 58.62	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK XX XX XX
voltaje = 14.53	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 58.62	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK XX XX XX
voltaje = 14.57	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 58.18	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK XX XX XX
voltaje = 14.57	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 58.62	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK XX XX XX
voltaje = 14.53	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 58.18	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK XX XX XX
voltaje = 14.58	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 57.75	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK XX XX XX
voltaje = 14.57	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 58.62	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK XX XX XX

Figura 36. Prueba 1, falla de sobre corriente.

## Prueba 2

Esta prueba se realizó con el módulo secundario A (a) y el módulo principal (P) conectados en serie, la red de energía eléctrica y dos cargas, un bombillo y un reóstato. El esquemático de esta prueba se muestra en la Figura 37, y el montaje en la Figura 38.

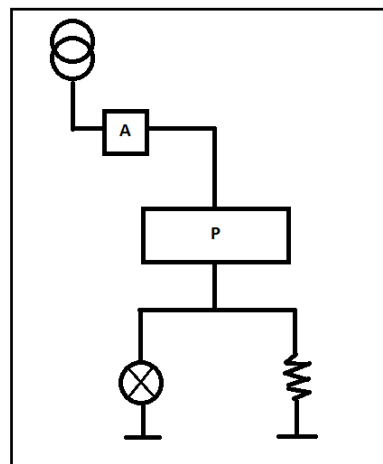


Figura 37. Esquemático prueba 2.

Para esta prueba se configuró el nivel de falla en corriente del módulo secundario A en 450mA y se dejó en 600mA la del módulo principal. Por otro lado, los niveles para las fallas de voltaje se dejaron en el secundario en  $\pm 10\%$  (10.8V y 13.2V), mientras que en el principal se ubicaron en 10.2V y 14V.



Figura 38. Esquemático prueba 2.

Para esta prueba no se tendrá en cuenta el monitoreo del secundario B ya que no está conectado.

Lo primero que se evaluó en esta prueba fue el inicio de operación de los módulos, en donde se tiene el generador de energía apagado para la instalación de equipo. Luego se arranca la generación de energía y el primer módulo en conectarse automáticamente es el secundario A. Al conectarse, la energía llega a la entrada del módulo principal, y al hacer la medición detecta que no hay falla en voltaje pero el relé sigue abierto hasta que se le envié el comando Z para reconectar. Los datos del monitoreo se encuentra en la Figura 39.

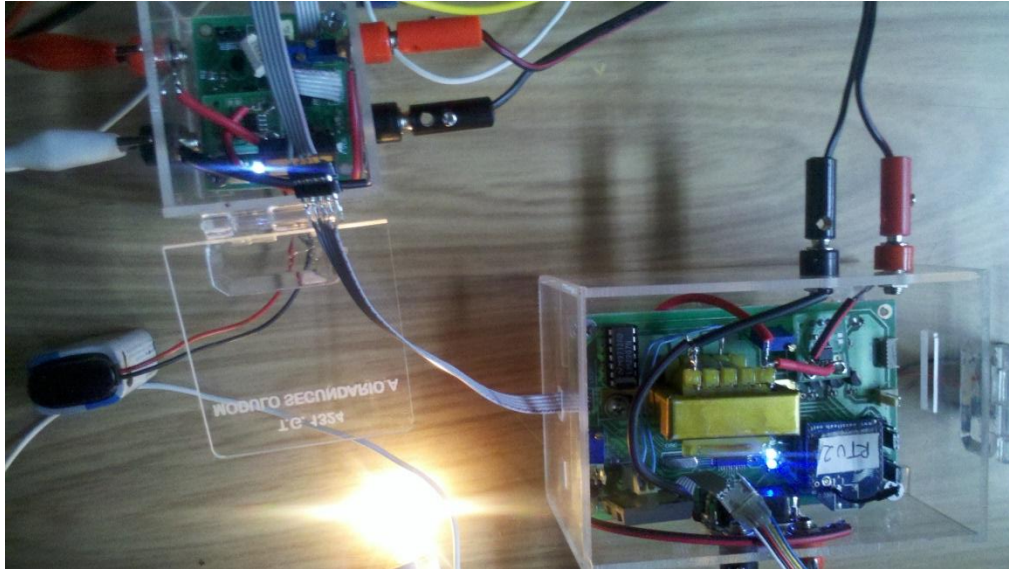
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 2.70	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 32.75	SA: <b>OK</b> OK OK	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 11.59	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 56.89	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: <b>OK</b> <b>OK</b> <b>XX</b>	XX
voltaje = 11.59	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 11.96	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 11.59	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 11.58	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 11.97	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX

Figura 39. Prueba 2, inicio del sistema.

En la Figura 40 se muestra el monitoreo del funcionamiento normal de esta prueba, el cual es con los módulos secundario A y principal conectados y dejando fluir energía a la carga como se ve en la Figura 41.

voltaje = 11.96	corriente = 409.80	potencia = 4.88	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.58	corriente = 408.90	potencia = 4.95	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.94	corriente = 409.20	potencia = 4.86	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.97	corriente = 409.30	potencia = 4.88	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.58	corriente = 409.30	potencia = 4.96	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.59	corriente = 409.60	potencia = 4.97	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.59	corriente = 409.60	potencia = 4.97	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX

Figura 40. Prueba 2, Monitoreo funcionamiento normal.



**Figura 41. Prueba 2, montaje funcionamiento normal.**

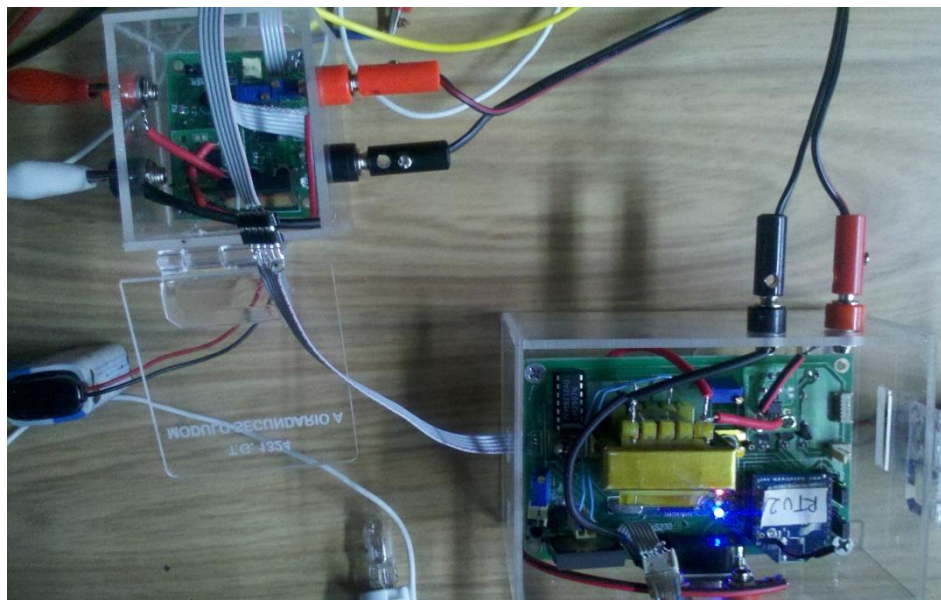
En la Figura 42, línea 4, se muestra el monitoreo del momento en que desde la estación central se le envía el comando de desconexión al módulo secundario A y se ve como el módulo principal deja de recibir energía y por ende mide cero en todas sus variables y muestra que tiene falla en voltaje, ya que tiene 0V a la entrada, y también que abre el relé.

voltaje = 10.96	corriente = 385.50	potencia = 4.31	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 10.97	corriente = 385.20	potencia = 4.32	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.00	corriente = 386.30	potencia = 4.36	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 10.98	corriente = 386.20	potencia = 4.34	frecuencia = 38.36	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 9.05	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX

**Figura 42. Prueba 2, monitoreo de desconexión del Secundario A desde la estación central.**

Este comportamiento de desconexión se muestra en la Figura 43 donde se ve que el módulo secundario A no tiene fallas en voltaje ni en corriente, pero tiene su relé abierto. Mientras que en el principal se ve que hay falla en voltaje y la memoria está llena.





**Figura 43. Prueba 2, desconexión del Secundario A desde la estación central.**

Cuando ya se ha realizado la acción que llevo a la estación central a desconectar el secundario A, se procede a conectar de nuevo la red eléctrica, enviándole el comando de conexión al secundario A, esto se puede ver en el monitoreo de la Figura 44.

voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 11.96	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 48.27	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: 01 OK XX	XX
voltaje = 11.96	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 58.62	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 12.01	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 60.34	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 12.01	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 11.98	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 11.98	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX

**Figura 44. Prueba 2, monitoreo de conexión del módulo secundario A.**

Al conectar el módulo secundario A ya le llega energía al módulo principal entonces quita la falla en voltaje, pero mantiene el relé cerrado hasta que se le envíe el comando Z. La Figura 45 muestra el comportamiento descrito.

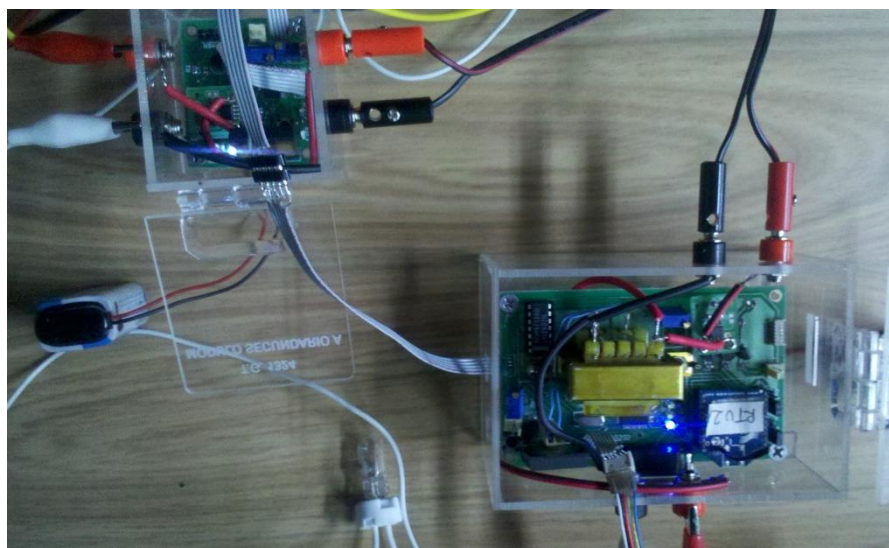


Figura 45. Prueba 2, conexión del módulo secundario A.

En esta prueba se realizó una falla de hueco de tensión que duro más de 500ms, la cual se puede ver en la línea 3. El voltaje que alcanzo a medir el monitoreo en la falla fue de 10.10V y fue cuando el módulo secundario A mostro la falla en voltaje y desconecto el relé, y con esto el módulo principal detecto falla en voltaje y abrió el relé. Este monitoreo se puede ver en la Figura 46, mientras que la falla se puede ver en la Figura 47.

voltaje = 12.06	corriente = 392.70	potencia = 4.76	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.53	corriente = 386.10	potencia = 4.64	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 10.10	corriente = 341.80	potencia = 3.69	frecuencia = 35.77	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 8.18	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 35.34	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 12.09	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 57.75	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 12.06	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 12.12	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 12.11	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX

Figura 46. Prueba 2, monitoreo de Falla en voltaje detectada por el módulo secundario A.

En este mismo monitoreo se ve que en la línea 7 el módulo secundario A ya detecto que la red eléctrica está en un valor de voltaje aceptable y reconecto automáticamente permitiendo el flujo de energía al módulo principal, el cual quita la falla de voltaje pero mantiene el relé cerrado.

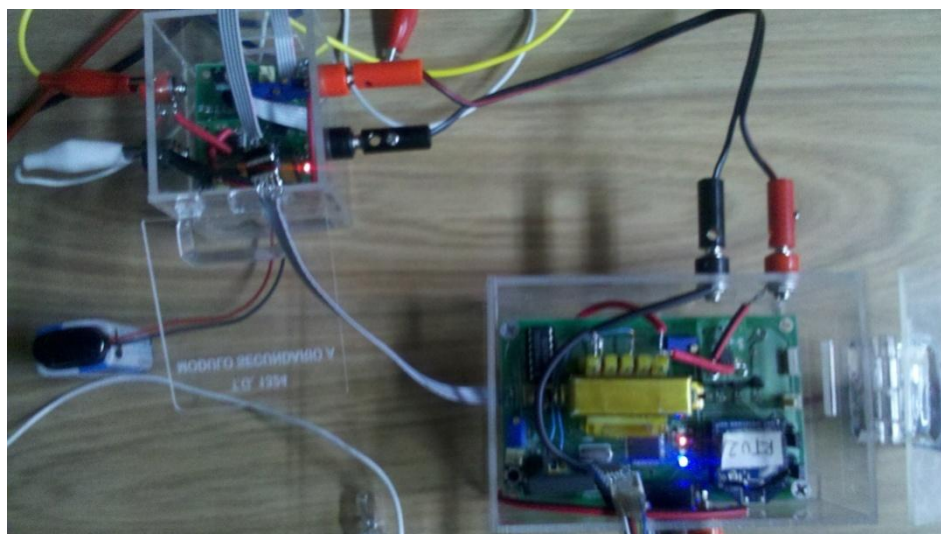


Figura 47. Prueba 2, falla en voltaje detectada por el módulo secundario A.

En la Figura 48 se puede observar el monitoreo de una falla en sobrecorriente detectada por el módulo secundario A. En esta imagen se ve como la corriente va subiendo hasta superar los 450mA, generando una falla y abriendo el relé del secundario A.

voltaje = 11.94	corriente = 390.70	potencia = 4.64	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.96	corriente = 390.50	potencia = 4.65	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.97	corriente = 395.90	potencia = 4.73	frecuencia = 60.34	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.55	corriente = 429.20	potencia = 5.17	frecuencia = 59.01	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 15.94	SA: OK XX XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 5.17	SA: OK XX XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK XX XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK XX XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK XX XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK XX XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX

Figura 48. Prueba 2, Monitoreo Falla en corriente detectada por el módulo secundario A.

En la Figura 49 se muestra la falla en corriente del monitoreo anterior.

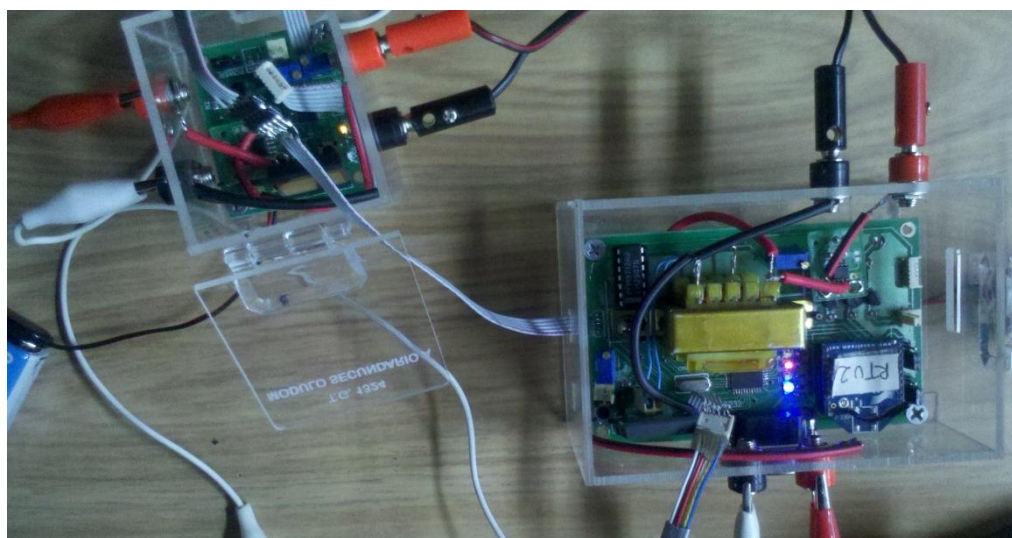


Figura 49. Prueba 2, Falla en corriente detectada por el módulo secundario A.

Para reconectar el sistema, se verifica que ya no haya falla en corriente en la red eléctrica y se le da el comando de reconexión al módulo secundario A, este monitoreo se muestra en la Figura 50.

voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK XX XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK XX XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK XX XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK XX XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK XX XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: OK XX XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 12.97	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 42.67	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 13.14	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 58.18	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 13.26	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 13.23	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 13.21	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX

Figura 50. Prueba 2, monitoreo reconexión después de Falla en corriente en el módulo secundario A.

### Prueba 3

Esta prueba se realizó con el módulo secundario A (A) y a su salida conectados el módulo principal (P) y el módulo secundario B (B), la red de energía eléctrica, dos cargas: un bombillo y un reóstato para salida del módulo principal y una carga: un bombillo para la salida del módulo secundario B. El esquemático de esta prueba se muestra en la Figura 51, y el montaje en la Figura 52.

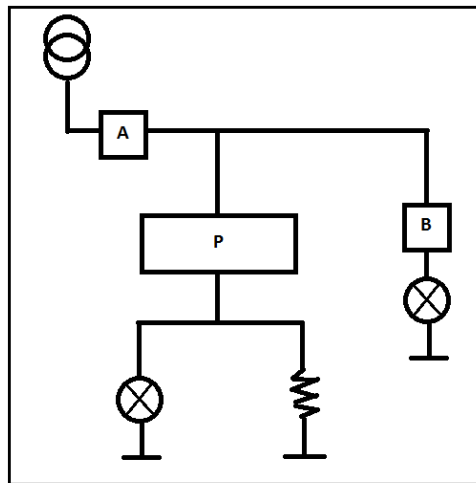


Figura 51. Esquemático Prueba 3.

Para esta prueba se configuro el nivel de falla en corriente del módulo secundario A en 800mA y se dejó en 600mA la del módulo principal, mientras que el secundario B se dejó en 500mA.





**Figura 52. Montaje prueba 3.**

Para el inicio de esta prueba se tiene que la red eléctrica está apagada y por lo tanto los tres módulos indican falla en voltaje y relé abierto. Cuando se enciende la red eléctrica, la energía fluye por el secundario A activándolo automáticamente y entregándole energía tanto al secundario B que también se activa automáticamente, como al módulo principal que espera el comando desde la estación central, esto se ve en la Figura 53 en la línea 6.

voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: XX OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: XX OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: XX OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: XX OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: XX OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 12.45	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 48.27	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK XX	XX
voltaje = 12.50	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 58.62	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK XX	XX
voltaje = 12.46	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK XX	XX
voltaje = 12.47	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK XX	XX
voltaje = 12.51	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK XX	XX
voltaje = 12.47	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK XX	XX

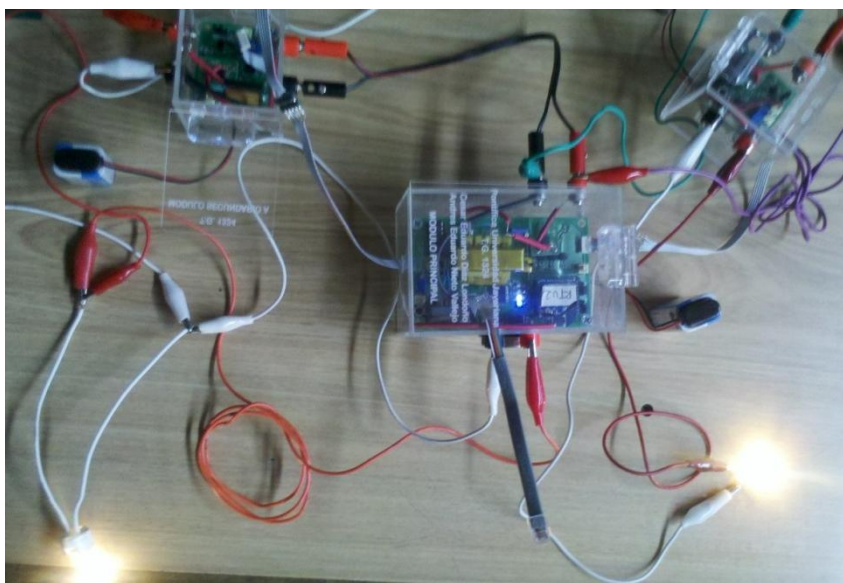
**Figura 53. Prueba 3, inicio del sistema.**

En el momento que se le envía la señal Z al módulo principal, este conecta dejando fluir la energía y encendiendo el bombillo. En ese momento se puede decir que está operando en modo normal. La Figura 54 muestra el monitoreo de este funcionamiento donde todos los estados de los módulos están en OK.

voltaje = 11.43	corriente = 301.69	potencia = 3.59	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.45	corriente = 302.60	potencia = 3.61	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.44	corriente = 302.60	potencia = 3.61	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.42	corriente = 302.00	potencia = 3.59	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.41	corriente = 301.60	potencia = 3.58	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.46	corriente = 302.10	potencia = 3.61	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.46	corriente = 302.50	potencia = 3.62	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX

**Figura 54. Prueba 3, monitoreo funcionamiento normal.**

La Figura 55 muestra el estado del funcionamiento normal de la prueba 3.



**Figura 55. Prueba 3, Funcionamiento normal.**

En la Figura 56 se muestra como se genera una pequeña falla de hueco de tensión la cual es detectada por el Secundario B en la línea 3, quedando desconectada la carga de este secundario. Pero después de un tiempo en la línea 11 el voltaje vuelve a subir dejando el sistema en su funcionamiento normal.

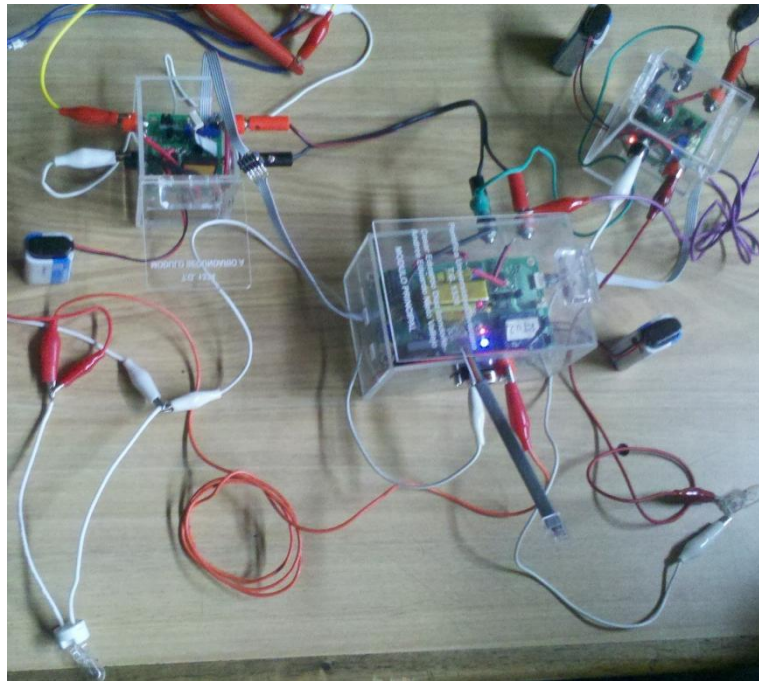
voltaje = 11.45	corriente = 388.60	potencia = 4.60	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.46	corriente = 389.60	potencia = 4.62	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.22	corriente = 382.50	potencia = 4.48	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: XX OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.37	corriente = 386.50	potencia = 4.51	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: XX OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.49	corriente = 390.70	potencia = 4.66	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: XX OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.54	corriente = 392.30	potencia = 4.72	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: XX OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.49	corriente = 391.80	potencia = 4.67	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: XX OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.49	corriente = 391.90	potencia = 4.67	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: XX OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.50	corriente = 392.00	potencia = 4.68	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: XX OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.55	corriente = 392.40	potencia = 4.73	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: XX OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 12.00	corriente = 397.70	potencia = 4.76	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 12.12	corriente = 402.40	potencia = 4.93	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 12.13	corriente = 402.50	potencia = 4.93	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX

**Figura 56. Prueba 3, Falla en voltaje del secundario B.**

Si ahora el voltaje cae a un valor significativo, va a desconectar el Secundario A dejando sin energía a todas las cargas. Como se ve en la Figura 57 en la línea 3, primero se cae el voltaje en el secundario B desconectando su relé y luego en la línea 4 se desconecta el secundario A lo cual hace que se desconecte el principal. Este estado se muestra en la Figura 58.

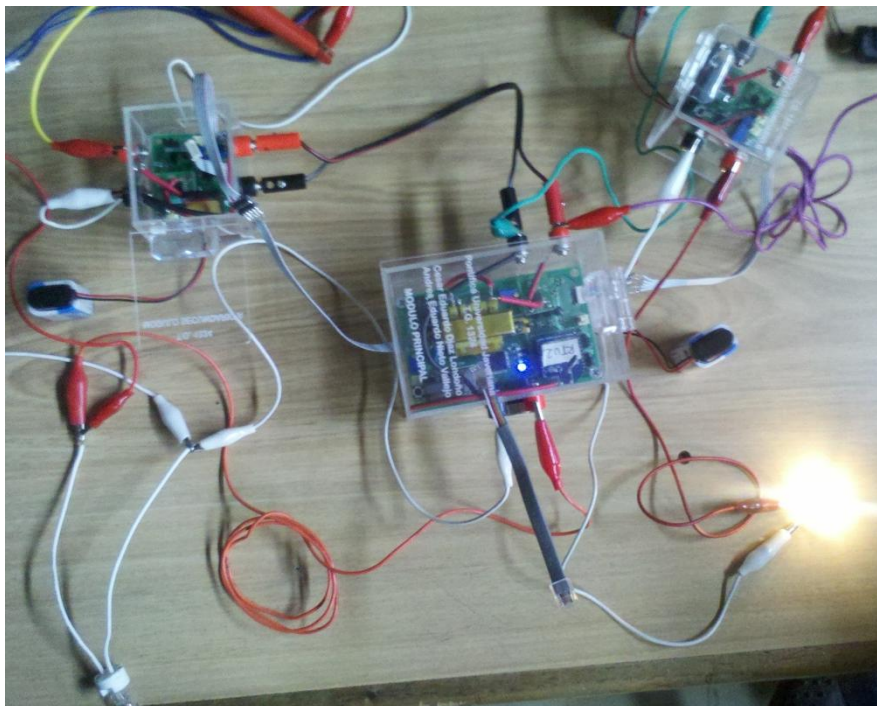
voltaje = 12.15	corriente = 403.10	potencia = 4.96	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 12.09	corriente = 401.60	potencia = 4.89	frecuencia = 60.34	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.37	corriente = 385.60	potencia = 4.50	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: XX OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 0	corriente = 173.10	potencia = 1.20	frecuencia = 76.72	SA: XX OK XX	SB: XX OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 80.17	SA: XX OK XX	SB: XX OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 79.74	SA: XX OK XX	SB: XX OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 79.74	SA: XX OK XX	SB: XX OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 80.60	SA: XX OK XX	SB: XX OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 76.29	SA: XX OK XX	SB: XX OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 80.17	SA: XX OK XX	SB: XX OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 67.24	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: XX OK XX	XX
voltaje = 11.54	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK XX	XX
voltaje = 11.58	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK XX	XX
voltaje = 11.55	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK XX	XX
voltaje = 11.52	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK XX	XX

**Figura 57. Prueba 3, monitoreo Falla en voltaje de los tres módulos.**



**Figura 58. Prueba 3, Falla en voltaje de los tres módulos.**

Si luego de la falla se soluciona y el voltaje vuelve a un rango aceptable, los secundarios A y B se conectarán automáticamente, como se ve en la Figura 57 en la línea 11 dejando solo al principal desconectado esperando la señal de conexión. El último estado se puede ver en la Figura 59.



**Figura 59. Prueba 3, esperando comando para conectar módulo principal después de falla en voltaje.**

Por último para esta prueba, se realiza una falla de sobrecorriente. Donde se alcanza a detectar un valor de corriente de 791mA en la línea 6 de la Figura 60. Claro que antes de detectarse esta falla, el módulo secundario B detecta falla de voltaje en la línea 5, debido a que al subir la corriente, el voltaje bajo



sacándolo de su rango aceptable. Debido a que la activación de falla en corriente en el módulo principal está configurada en 600mA, al pasar una corriente mayor se desconecta y esto hace que el voltaje suba un poco haciendo que el secundario B se reconecte automáticamente, este estado se puede ver en la Figura 61.

voltaje = 11.36	corriente = 399.20	potencia = 4.65	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.41	corriente = 400.10	potencia = 4.70	frecuencia = 60.34	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.39	corriente = 399.90	potencia = 4.69	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.37	corriente = 400.00	potencia = 4.67	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.21	corriente = 452.60	potencia = 5.30	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: XX OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 10.85	corriente = 791.93	potencia = 8.89	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK XX XX	XX
voltaje = 12.95	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK XX XX	XX
voltaje = 12.90	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK XX XX	XX
voltaje = 12.93	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK XX XX	XX
voltaje = 12.96	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK XX XX	XX
voltaje = 12.90	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK XX XX	XX
voltaje = 12.91	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK XX XX	XX
voltaje = 12.93	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK OK	P: OK XX XX	XX

Figura 60. Prueba 3, Monitoreo para falla en corriente en módulo principal.

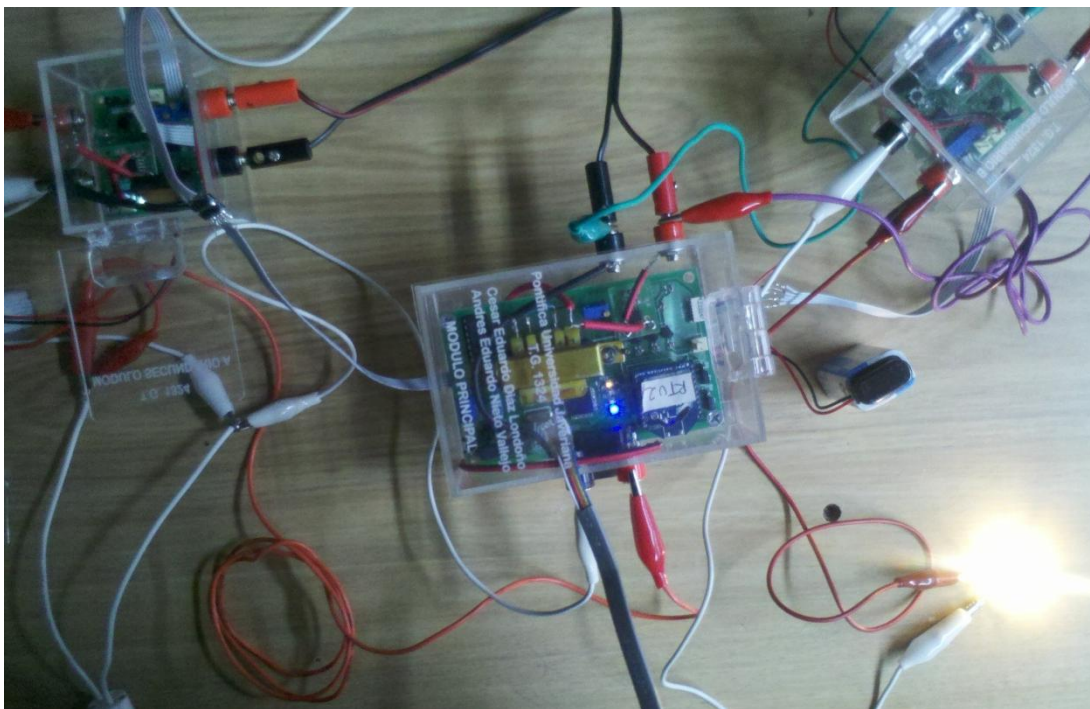


Figura 61. Prueba 3, falla en corriente en módulo principal.

## Prueba 4

Sistema con redundancia, el esquemático de esta prueba se ve en la Figura 62.

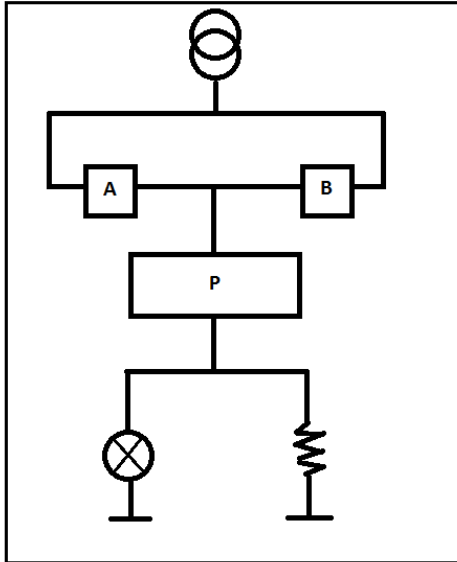


Figura 62. Esquemático Prueba 4.

Para instalar el equipo es importante desconectar la energía que proviene del generador. Luego se conectan los 3 módulos y se alimentan desde su batería. Por seguridad se envía un comando a ambos secundarios para que se mantengan desconectados. Luego se activa el generador y se puede observar en la línea 4 de la Figura 63 que los secundarios ya no detectan falla pero igual se mantienen desconectados.

En este caso el módulo secundario A se configura para falla de 800mA y el principal para falla de 500 mA.

Cuando el módulo A recibe el comando de reconexión, inmediatamente se cierra permitiendo el flujo de energía hasta el módulo principal.

```
voltaje = 0 corriente = 0 potencia = 0 frecuencia = 0 SA: XX OK XX SB: XX OK XX P: XX OK XX XX
voltaje = 0 corriente = 0 potencia = 0 frecuencia = 0 SA: XX OK XX SB: XX OK XX P: XX OK XX XX
voltaje = 0 corriente = 0 potencia = 0 frecuencia = 0 SA: XX OK XX SB: XX OK XX P: XX OK XX XX
voltaje = 0 corriente = 0 potencia = 0 frecuencia = 0 SA: OK OK XX SB: OK OK XX P: XX OK XX XX
voltaje = 0 corriente = 0 potencia = 0 frecuencia = 0 SA: OK OK XX SB: OK OK XX P: XX OK XX XX
voltaje = 0 corriente = 0 potencia = 0 frecuencia = 0 SA: OK OK XX SB: OK OK XX P: XX OK XX XX
voltaje = 13.11 corriente = 0 potencia = 0 frecuencia = 35.34 SA: OK OK OK SB: OK OK XX P: XX OK XX XX
voltaje = 13.08 corriente = 0 potencia = 0 frecuencia = 57.75 SA: OK OK OK SB: OK OK XX P: OK OK XX XX
voltaje = 13.08 corriente = 0 potencia = 0 frecuencia = 59.91 SA: OK OK OK SB: OK OK XX P: OK OK XX XX
voltaje = 13.08 corriente = 0 potencia = 0 frecuencia = 60.34 SA: OK OK OK SB: OK OK XX P: OK OK XX XX
voltaje = 13.14 corriente = 0 potencia = 0 frecuencia = 60.34 SA: OK OK OK SB: OK OK XX P: OK OK XX XX
voltaje = 13.13 corriente = 0 potencia = 0 frecuencia = 59.91 SA: OK OK OK SB: OK OK XX P: OK OK XX XX
```

Figura 63. Prueba 4, inicio del sistema.

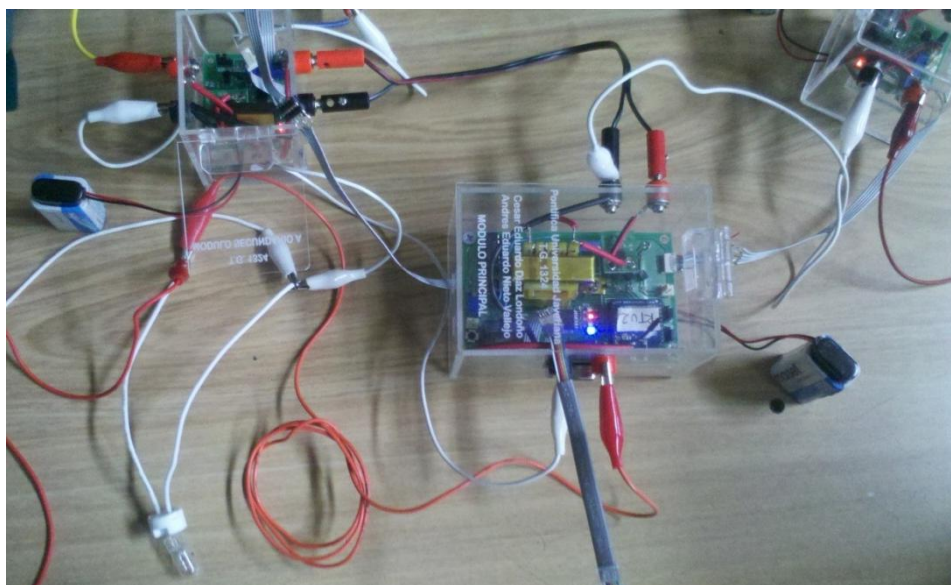


Figura 64. Prueba 4, sistema en su inicio.

Antes de reconectar el módulo principal, se configuro el reóstato para que pidiera una corriente alta. En el momento en el que se envía el comando para reconectar el módulo principal (línea 6, de la Figura 65), se ve que el módulo principal alcanza a medir una corriente alta detectando una sobrecorriente y por tal motivo se desconecta inmediatamente.

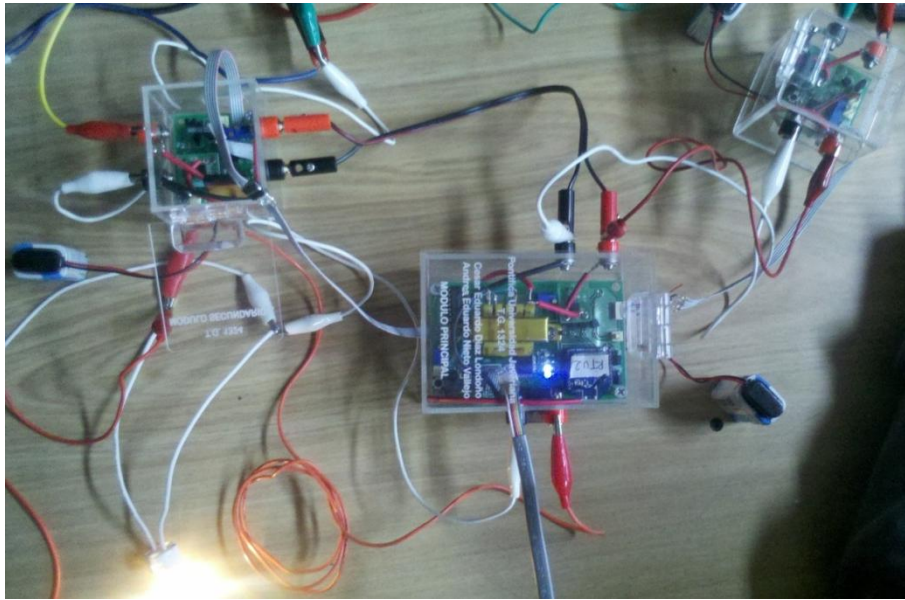
voltaje = 13.11	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 13.09	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 13.08	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 13.08	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 13.12	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 60.34	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 10.73	corriente = 695.22	potencia = 7.66	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK XX XX	XX
voltaje = 13.08	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK XX XX	XX
voltaje = 13.13	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK XX XX	XX
voltaje = 13.12	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK XX XX	XX
voltaje = 13.09	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK XX XX	XX
voltaje = 13.12	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK XX XX	XX
voltaje = 13.14	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK XX XX	XX
voltaje = 13.11	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK XX XX	XX
voltaje = 13.10	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK XX XX	XX
voltaje = 13.13	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK XX XX	XX

Figura 65. Prueba 4, monitoreo de falla en arranque.

Luego de ajustar el reóstato para disminuir la corriente de la carga y nuevamente enviar un comando de reconexión al módulo principal, se puede ver en la línea 5 de la Figura 66 que comienza a fluir la energía a través del módulo secundario A, luego por el módulo principal, hasta la carga. Este estado se muestra en la Figura 67.

voltaje = 13.11	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 13.11	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 13.12	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 13.13	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK XX	XX
voltaje = 12.13	corriente = 345.10	potencia = 4.27	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.52	corriente = 388.70	potencia = 4.66	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.53	corriente = 388.40	potencia = 4.67	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.53	corriente = 388.50	potencia = 4.66	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.51	corriente = 388.00	potencia = 4.64	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.51	corriente = 388.10	potencia = 4.65	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX

Figura 66. Prueba 4, monitoreo del arranque.



**Figura 67. Prueba 4, Redundancia por Secundario A.**

Si se simula una falla en la red eléctrica como se muestra en la Figura 70 que conecta el secundario A, se puede observar que en la línea 7 de la Figura 68 el secundario A detecta la falla, se desconecta y por lo tanto el módulo principal también se desconecta.

voltaje = 11.54	corriente = 388.80	potencia = 4.67	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.52	corriente = 388.50	potencia = 4.66	frecuencia = 60.34	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.53	corriente = 387.80	potencia = 4.66	frecuencia = 59.05	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.55	corriente = 388.70	potencia = 4.68	frecuencia = 60.34	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.56	corriente = 389.50	potencia = 4.70	frecuencia = 59.91	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.51	corriente = 388.40	potencia = 4.65	frecuencia = 59.48	SA: OK OK OK	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.11	corriente = 373.30	potencia = 4.29	frecuencia = 31.03	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: OK OK OK	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 8.18	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX

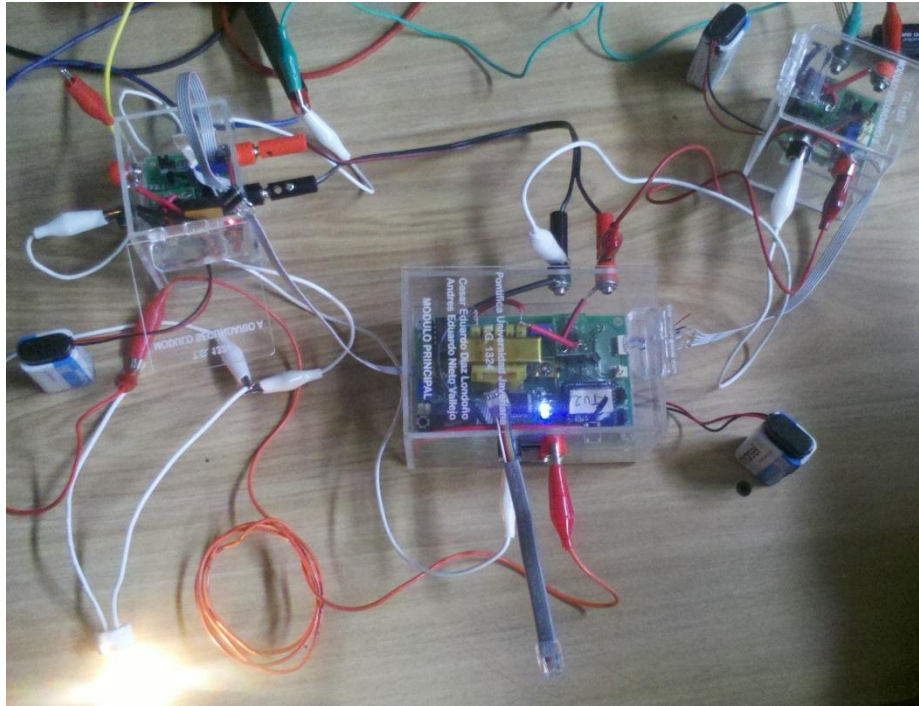
**Figura 68. Prueba 4, falla de red en secundario A.**

Luego de tener el daño en la red que conecta al secundario A, se envía un comando para asegurar de que no va a volver a conectar para luego enviar un comando (fila 5 en la Figura 69) al secundario B con el fin de que reconecte. Luego de enviar el comando (fila 6) se puede ver que el módulo principal comienza a medir y que únicamente se encuentra esperando la orden desde la estación central para reconectar y poder seguir alimentando la carga. En la fila 11 se puede ver que el módulo principal ya reconecto garantizando la redundancia en la alimentación de la carga. Este estado se puede ver en la Figura 70.



voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK XX	P: XX OK XX	XX
voltaje = 0	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 0	SA: XX OK XX	SB: OK OK OK	P: XX OK XX	XX
voltaje = 13.24	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 50.00	SA: XX OK XX	SB: OK OK OK	P: OK OK XX	XX
voltaje = 13.12	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: XX OK XX	SB: OK OK OK	P: OK OK XX	XX
voltaje = 13.13	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 60.34	SA: XX OK XX	SB: OK OK OK	P: OK OK XX	XX
voltaje = 13.14	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: XX OK XX	SB: OK OK OK	P: OK OK XX	XX
voltaje = 13.14	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 60.34	SA: XX OK XX	SB: OK OK OK	P: OK OK XX	XX
voltaje = 13.13	corriente = 0	potencia = 0	frecuencia = 59.48	SA: XX OK XX	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.22	corriente = 381.40	potencia = 4.47	frecuencia = 59.91	SA: XX OK XX	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.35	corriente = 384.80	potencia = 4.47	frecuencia = 59.05	SA: XX OK XX	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX
voltaje = 11.39	corriente = 382.90	potencia = 4.48	frecuencia = 59.91	SA: XX OK XX	SB: OK OK OK	P: OK OK OK	XX

**Figura 69. Prueba 4, monitoreo conexión secundario B en redundancia.**



**Figura 70. Prueba 4, conexión secundario B en redundancia.**



## 6. CONCLUSIONES

Se desarrolló un equipo de medición que permite ilustrar la funcionalidad que tiene una RTU dentro de una microgrid a escala. Permitiendo hacer mediciones de las variables eléctricas, monitoreo constante sobre el estado de la red, detección de fallas, sistemas de protección por nivel para voltaje y corriente, detección de la ubicación de las fallas, y múltiples configuraciones al contar con tres módulos que permiten obtener distintos resultados dependiendo de la configuración del equipo y la administración que se le haga a la red para controlar el flujo de energía.

Este proyecto se realizó con el fin de hacer mejoras en los dispositivos desarrollados en el trabajo de grado anterior; se solucionaron los problemas que se tenían al medir la frecuencia, se agregaron nuevos sistemas de protección para proteger las cargas, sistema de almacenamiento de datos y ejecución de tareas haciendo uso de funciones RTOS para el monitoreo y control. También se agregaron nuevos comandos que permiten controlar los distintos módulos del equipo con el fin de ofrecer diversas modalidades para la operación de la microgrid, de tal manera que se pueda ilustrar el funcionamiento formando distintos escenarios.

Con el fin de utilizar estos equipos en el proyecto SILICE III, el equipo fue desarrollado utilizando componentes de montaje superficial con el fin de reducir el tamaño y poder hacer su instalación dentro de la maqueta. También se tuvieron en cuenta distintos mecanismos para la detección de fallas con el fin de ilustrar el funcionamiento del equipo frente a algunos tipos de fallas que pueden ocurrir en la realidad.

Aunque el equipo fue desarrollado con fines educativos y no comerciales, fue necesario diseñar un sistema de calibración para llevar a cabo las mediciones y poder evaluar en su totalidad todas las funciones que ofrece el equipo.

Este proyecto de grado va a permitir que los estudiantes de la universidad puedan tener un mayor acercamiento en el tema de redes inteligentes. De esta manera se van a poder desarrollar nuevas ideas y nuevos proyectos que aporten resultados valiosos de investigación para que en un futuro se pueda desarrollar grandes proyectos de ingeniería a nivel nacional para todas las redes eléctricas en Colombia.

## BIBLIOGRAFIA

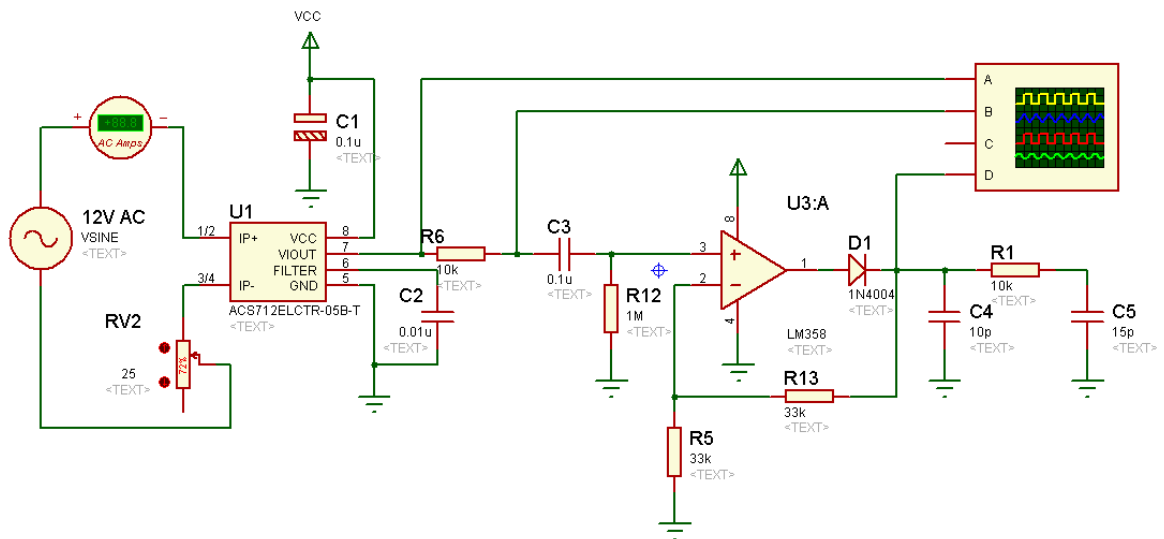
- [1] Donghwa Shin, Younghyun Kim, Yanzhi Wang and Massoud Pedram, “Battery-Supercapacitor Hybrid System for High-Rate Pulsed Load Applications”, Seoul National University and University of Southern California.
- [2] Ortiz Salomón, “La tercera revolución industrial”, Mundo Eléctrico, Edición especial Smart Grids, Diciembre 2012.
- [3] T. L. Vandoorn, B. Zwaenepoel, J. D. M. De Kooning, B. Meersman, and L. Vandeveldel, “Smart microgrids and virtual power plants in a hierarchical control structure,” 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, pp. 1–7, Dec. 2011.
- [4] Byong-Kwan Yoo, Seung-Ho Yang, Hyo-Sik Yang, Won-Yong Kim, Yu-Seok Jeong, Byung-Moon Han and Kwang-Soo Jang, “Communication Architecture of the IEC 61850-based Micro Grid System”, Journal of Electrical Engineering & Technology, 2011.
- [5] Thomas Ackermann, Göran Andersson, Lennart Söder, “Distributed Generation: A Definition”, Electric power system research 2001
- [6] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury and P. Crossley, “Microgrids and Active Distribution Networks”,
- [7] Rob Vandenbriink, Authentication Issues between entities during protocol message exchange in SCADA Systems. Retrieved from <https://isc.sans.edu/forums/diary/Authentication+Issues+between+entities+during+protocol+message+exchange+in+SCADA+Systems/13927>
- [8] Michael A Hyams, “Microgrids: An Assessment Of The Value, Opportunities And Barriers To Deployment In New York State”, September 2010.
- [9] Jose Sebastian Espejo Uribe, David Fernando Mejia Bonilla, Diana Patricia Riaño Riaño, “Red para un sistema de generación de energía distribuido”, proyecto de grado 2012

# MATERIAL COMPLEMENTARIO

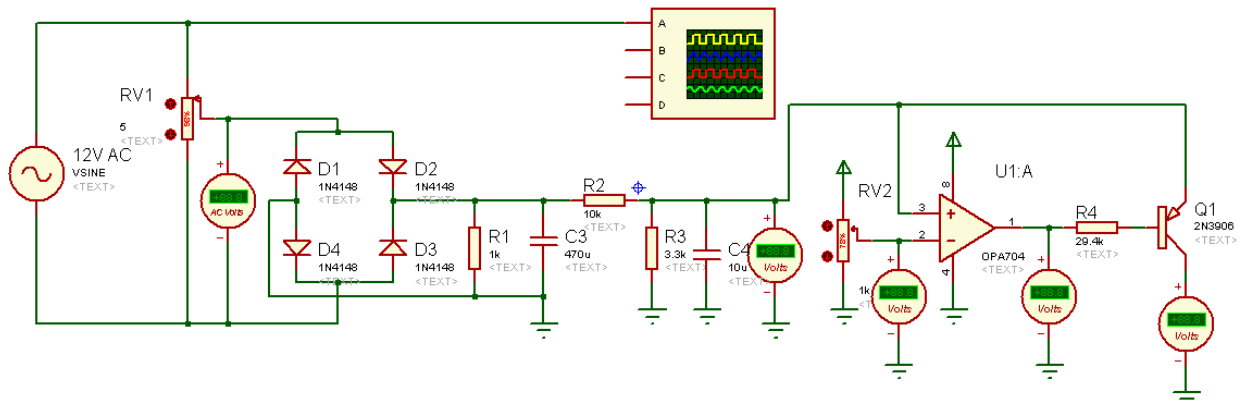
## ANEXOS:

### Anexo 1. Esquemáticos acondicionamientos RTU.

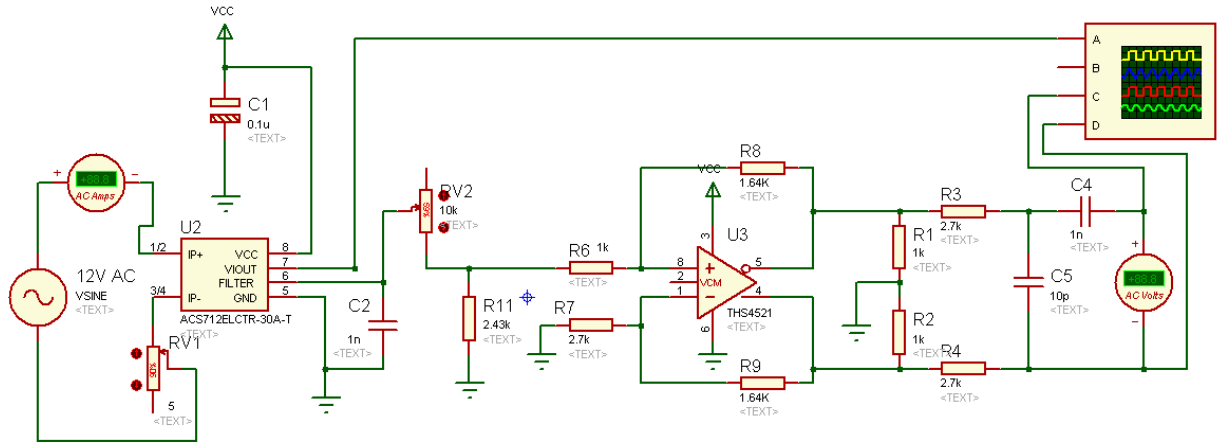
#### 1.1 Esquemático acondicionamiento de corriente, módulo secundario.



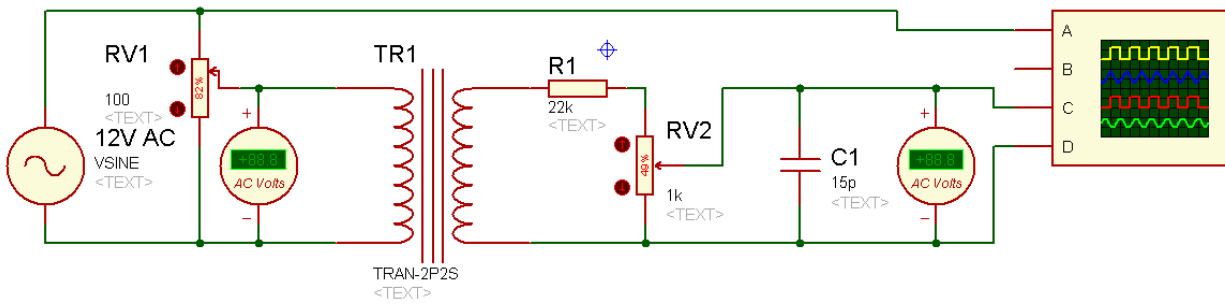
#### 1.2. Esquemático acondicionamiento de voltaje, módulo secundario.



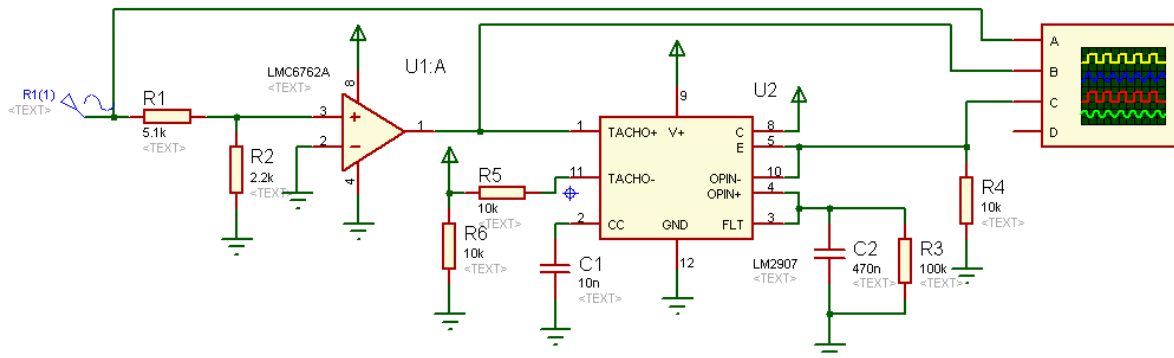
### 1.3. Esquemático acondicionamiento de corriente, módulo principal.



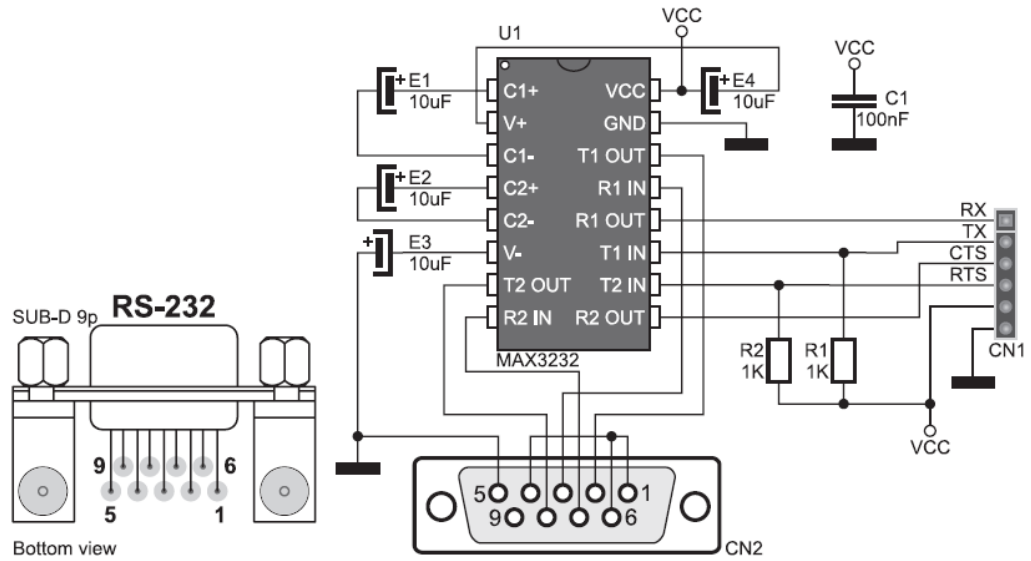
### 1.4. Esquemático acondicionamiento de voltaje, módulo principal.



### 1.5. Esquemático acondicionamiento de frecuencia.



### 1.6. Esquemático conexión RS232.



Los demás Anexos se encuentran el formato digital.