

Instrumentación y Monitoreo en Tiempo Real para un Módulo Solar Fotovoltaico en el
laboratorio de control e instrumentación E3T-UIS

Johan Enrique Herrera Celis

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

Ricardo Alzate Castaño

Doctorado en Ingeniería Informática y Automática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2020

Agradecimientos

A Dios por permanecer siempre a mi lado y guiarme en el transcurso de la carrera, a mis padres por su apoyo incondicional, su confianza y por nunca dejar que me rindiera, a mi familia por darme los mejores consejos.

Al profesor Ricardo Alzate por el conocimiento y tiempo empleado durante la ejecución del proyecto.

A cada una de las personas que hicieron parte de este sueño.

Tabla de Contenido

Introducción	13
1. Objetivos	19
2. Instrumentación del módulo fotovoltaico	20
2.1. Elementos de medición	20
2.1.1. Medición en DC	20
2.1.2. Medición en AC	21
2.2. Sistema de transferencia automática	21
2.2.1. Análisis de requerimientos	23
2.2.2. Implementación del esquema	25
2.3. Sistema para registro de datos	25
2.3.1. Subsistema para gestión de información	28
2.4. Prototipo final implementado	29
3. Interfaz para gestión de datos	33
3.1. Análisis de requerimientos	33
3.1.1. Interacción del usuario	34
3.1.2. Presentación de la información	35

3.1.3. Selección de herramientas de software	35
3.1.4. Análisis de actividades de usuario	36
3.2. Distribución de elementos en la interfaz	37
3.2.1. Encabezado y pié de página	37
3.2.2. Menús	37
3.2.3. Contenido	40
3.3. Análisis de operación del sistema	40
4. Recomendaciones	43
5. Trabajo futuro	43
6. Conclusiones	46
Referencias Bibliográficas	48
Apéndices	53

Lista de Figuras

Figura 1.	Esquema de las etapas del módulo fotovoltaico	15
Figura 2.	Módulo instalado en laboratorio de la E3T-UIS	16
Figura 3.	Medidor de potencia DC <i>PWRcheck</i>	21
Figura 4.	Medidor de potencia AC <i>EASTRON</i>	22
Figura 5.	Tranferencia automática <i>ABB</i> modelo OTM C21D	23
Figura 6.	Relé de potencia VRPL08	24
Figura 7.	Implementación para transferencia automática: (a) Esquema de mando; (b) Esquema de potencia	26
Figura 8.	Diagrama esquemático para sistema implementado	27
Figura 9.	Sistema de desarrollo para <i>Raspberry</i> modelo Pi 3 B	28
Figura 10.	Configuración cliente-servidor para <i>Raspberry</i> Pi 3 B	29
Figura 11.	Algoritmo para gestión de información programado en <i>Raspberry</i> Pi 3 B	30
Figura 12.	Prototipo final implementado en laboratorio	31
Figura 13.	Estructura HTA para descomposición de tareas de usuario en interfaz	38
Figura 14.	Pantala principal de la interfaz de usuario	39
Figura 15.	Menús de interfaz gráfica	40
Figura 16.	Visualización para registro histórico de datos	41

Figura 19.	Configuración de sistema para gestión de información de medidas	54
Figura 20.	Consola de comandos	56
Figura 21.	Asignación IP fija	57
Figura 22.	Verificación instalación <i>Apache</i>	58
Figura 23.	Creación <i>infophp</i>	60
Figura 24.	Verificación instalación <i>php</i>	61
Figura 25.	Configuración <i>phpMyAdmin</i>	62
Figura 26.	Verificación instalación de <i>phpMyAdmin</i>	63
Figura 27.	Secuencia de pasos para crear una base de datos	64
Figura 28.	Secuencia de pasos para crear tabla en base de datos	65
Figura 29.	Tablas creadas para sistema fotovoltaico	65
Figura 30.	Tabla tipo para medidor DC	66
Figura 31.	Tabla tipo para medidor AC	66

Lista de Tablas

Tabla 1.	Especificaciones técnicas del módulo de generación fotovoltaico	17
Tabla 2.	Características técnicas medidor <i>PWRcheck</i>	21
Tabla 3.	Características técnicas medidor <i>EASTRON</i>	22
Tabla 4.	Características técnicas <i>Raspberry</i> Pi 3 modelo B	27
Tabla 5.	Tabla de costos para instrumentación de prototipo	32

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Configuración de servidor web	53
Apéndice B. Registros históricos de captura	67

Resumen

TÍTULO: Instrumentación y Monitoreo en Tiempo Real para un Módulo Solar Fotovoltaico en el laboratorio de control e instrumentación E3T-UIS ¹

AUTOR: Johan Enrique Herrera Celis²

PALABRAS CLAVE: Interfaz Web, Monitoreo Remoto, Sistema de Generación Fotovoltaico, Transferencia Automática.

DESCRIPCIÓN:

El presente proyecto de grado presenta la configuración de un sistema de medición remota, con actualización en línea, para las variables eléctricas de un sistema de generación fotovoltaico de baja potencia. Inicialmente, se presenta la instrumentación de un prototipo de sistema instalado en el Laboratorio de Control e Instrumentación de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander, para proveer la demanda de un sistema de iluminación de 512 W, correspondiente con la instalación de medidores de magnitudes eléctricas en corriente directa y corriente alterna para dos paneles fotovoltaicos, un banco de baterías y la salida del inversor de potencia del sistema. También se presentan detalles del diseño y la construcción para un sistema de transferencia automática que permite conmutar entre el sistema fotovoltaico y la red de distribución, la fuente de alimentación para las cargas del sistema. Posteriormente, la información obtenida de los elementos de medición es gestionada a través de una arquitectura cliente-servidor constituida en un sistema de desarrollo para *Raspberry Pi*, para acceso de registros de medida a través de la web mediante una interfaz de usuario. A partir de dicha información fue posible analizar la operación del sistema, verificando incrementos de generación en horas cercanas al medio día y constituyendo una autonomía aproximada de siete horas que representa un ahorro significativo de facturación a partir de la energía generada.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

Abstract

TITLE: Instrumentation and Real-Time Monitoring of a Photovoltaic Module at the Instrumentation and control laboratory of the E3T-UIS³

AUTHOR: Johan Enrique Herrera Celis⁴

KEYWORDS: Automatic Transfer Switch, Photovoltaic Generation System, Remote Monitoring, Web Interface.

DESCRIPTION:

In this work the configuration of a remote sensing system, with online updating, for the electrical variables of a low-power photovoltaic generation unit, is presented. Initially, the instrumentation of an existing prototype of photovoltaic unit installed at the Instrumentation and Control Laboratory of the Electrical Engineering School of the Universidad Industrial de Santander, providing the power demand of a 512 W lighting system, is performed by including measurement devices for direct and alternating current of two photovoltaic panels, a battery bank and the output of a power inverter. Also, the design and construction for an automated transfer switch is addressed in order to select among the photovoltaic system and the main power grid, the source feeding the system loads. Then, the information provided by the measurements was managed by a client-server structure programmed in a *Raspberry Pi* device, allowing to access the information via web by an user interface. Registers from the measurement system unveils features of the generation patters showing an increasing power closer to the noon time. Also it was possible to verify a relevant amount of energy savings by the long autonomy experienced by the system to feed the load consumption during stand-alone operation.

³ Bachelor Thesis

⁴ Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

Introducción

El impacto ambiental de combustibles fósiles cada vez más escasos y de precio especulable, ha incrementado el interés por desarrollar fuentes de energía no convencional, principalmente de tipo renovable, adicional a un uso racional y eficiente de la misma. En Colombia, se ha comenzado a incursionar en legislación que posibilite la inclusión para este tipo de “nuevas energías” (Ley N° 697, 2001) (Prias Caicedo, 2009) a pesar de no ser una tarea simple debido a cambios culturales y a tendencias tradicionales del mercado (UMPE, 2015), principalmente debido a la baja potencia de generación que puede obtenerse en unidades residenciales, lo cual implica una gestión particular de los recursos energéticos.

De esta manera, el seguimiento del estado de variables eléctricas en un sistema de generación de energía, permite realizar una gestión más apropiada de los recursos incorporando análisis de la demanda y comportamiento de las cargas, como información a priori que facilita el estudio de los flujos de potencia en el sistema (Grainger et al., 1996). Sistemas fotovoltaicos han sido instrumentados y analizados experimentalmente a partir del monitoreo de sus variables, como en el caso documentado en (Bagnasco et al., 2012)(Nunes Pereira, 2014). De manera similar, en (Polanía Puentes et al., 2012)(Castro Segura and Posso García, 2015)(Narvaéz Lopez and Méndez Pardo, 2015) se emplean herramientas de telemetría para acceder de manera remota a la información de las variables eléctricas de una planta de microgeneración fotovoltaica a través de internet. Por su parte Correia et al. (2016); Manzano et al. (2014) propone además de lo anterior, la creación de

un sitio web para mantener un registro permanente de datos en la nube para acceso de cualquier usuario debidamente registrado.

Ahora bien, no interesa si la fuente primaria es convencional o renovable, lo importante para un sistema de generación energética es que tenga la capacidad de garantizar un suministro constante (y permanente) de energía a sus cargas. Al respecto, se verifican aplicaciones donde lo anterior es crítico, como es el caso de hospitales, instalaciones de sanidad, unidades de almacenamiento de productos perecederos, instituciones de seguridad y de operación nocturna (Acosta, 2017) (Hernández Fher, 2010).

Como opción en sistemas de respaldo energético, se tienen transferencias automáticas como unidades de conmutación entre la fuente primaria de energía y una fuente de emergencia que garantiza un suministro constante de potencia hacia las cargas cuando la primera presenta cortes inesperados. Al respecto, en (Villacís Galarza and Quituña Caiza, 2012) se realiza el diseño y construcción de un tablero para transferencia automática con monitoreo SCADA y en (Amariles Gomez and Herrera Torres, 2010) se ilustra una aplicación de sistema de respaldo para un centro comercial.

De otro lado, actualmente el *Laboratorio de Control e Instrumentación* de la E3T-UIS (LAT 209) cuenta con un módulo de microgeneración fotovoltaica para suplir el consumo eléctrico de su sistema de iluminación. Este módulo fue dimensionado y construido como parte de un plan de trabajo para semilleros de investigación financiado por COLCIENCIAS (Ribero and Suárez, 2015).

En la Fig. 1 se muestra un esquema de las etapas más importantes del módulo mencionado, conteniendo: paneles fotovoltaicos encargados de captar la radiación solar y transformarla en electricidad (generación); reguladores o controladores de carga encargados de administrar la carga de las baterías desde los paneles generadores así como la descarga hacia el circuito de alimentación (regulación); baterías que se encargan de acumular la energía eléctrica producida para ser utilizada en la noche o durante periodos prolongados con poca radiación solar (acumulación); convertidor DC-AC generalmente conocido como inversor, tiene la función de convertir la corriente continua (DC) proveniente de los generadores fotovoltaicos en corriente alterna (AC) para el consumo de las cargas (adaptación).

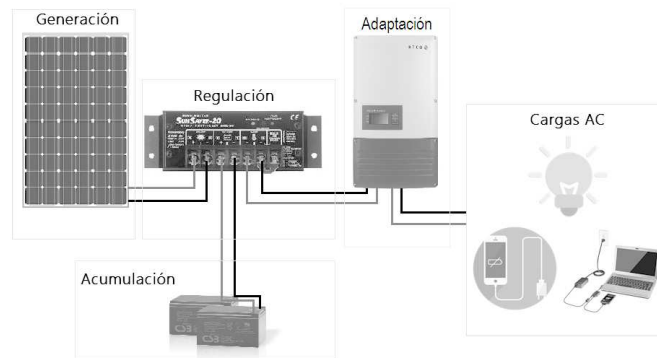


Figura 1. Esquema de las etapas del módulo fotovoltaico

Asimismo, se presenta en la Fig. 2 una fotografía del módulo de generación fotovoltaico construido en el laboratorio y en la Tabla 1 sus principales especificaciones técnicas.

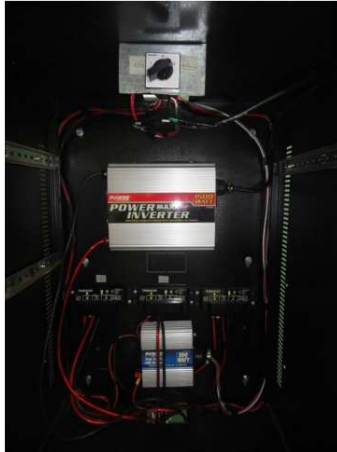


Figura 2. Sistema fotovoltaico instalado en el laboratorio de Control e Instrumentación de la E3T-UIS

En la Universidad Industrial de Santander recientemente se han realizado estudios orientados a determinar la eficiencia energética de edificaciones. Entre ellos se destacan los trabajos: (Osma Pinto, 2011) en sostenibilidad energética del Edificio Eléctrica II; (Santander Crisanchó, 2014) estructura la segunda fase del programa de uso racional y eficiente de la energía (URE) en el edificio de investigaciones del Parque Tecnológico de Guatiguará, dando continuidad al programa de monitorización y actividades de seguimiento de consumo energético en los diferentes laboratorios del edificio; (Rueda Vásquez, 2017) presenta la implementación de un sistema de gestión que permite modificar la conexión entre diferentes fuentes de energía y los circuitos ramales de un hogar inteligente por medio de un conmutador inteligente de potencia; (Arévalo Espinel et al., 2014) da seguimiento mediante documentación, operación técnica y visualización de información a la instalación del sistema de automatización del nuevo edificio de la E3T.

Por tanto, se verifica un enorme potencial en la posibilidad de cuantificar la energía gene-

Tabla 1

Especificaciones técnicas del módulo de generación fotovoltaico

Potencia [W]	Voltaje [VAC]	Corriente [A]	Frecuencia [Hz]	Tiempo de uso [h]
512	120	4,3	60	8

rada por el sistema descrito en la Fig. 1 al igual que realizar los estudios de consumo en la carga y garantizar un suministro constante a partir de una conmutación apropiada entre la red de distribución y el sistema fotovoltaico, dependiendo de las condiciones de carga acumulada en las baterías de este último. El presente proyecto complementará y mejorará el prototipo existente a partir de la selección y el montaje de instrumentos para el monitoreo y análisis de las variables del sistema, como preámbulo a una futura gestión energética de sus recursos.

La creciente necesidad de la humanidad por administrar de manera eficiente los recursos energéticos, conlleva una integración permanente de recursos tecnológicos para mantener en valores apropiados los rangos de operación de los sistemas encargados de generar y distribuir los flujos de potencia hacia las cargas. El problema de generación energética ha pasado de ser centralizado a gran escala, para dividirse en unidades microgeneradoras a nivel urbano e incluso residencial, de una manera progresiva que cada vez más se apropia y convierte en tendencia.

La Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander no es ajena a este nuevo paradigma y por tanto propende por desarrollar aplicaciones que faciliten un uso racional y eficiente de recursos soportado en herramientas tecno-

lógicas. Para ello dispone de unidades microgeneradoras, principalmente de tipo fotovoltaico, que constituyen un objeto interesante de estudio en este contexto.

A partir de lo anterior surgen interrogantes como los siguientes: ¿Es posible cuantificar la potencia generada por un sistema de microgeneración eléctrica de tipo fotovoltaico empleando herramientas de bajo costo? ¿Puede monitorearse remotamente el estado de las variables del sistema a través de un aplicativo web? ¿Es posible diseñar e implementar un dispositivo de transferencia automática para dicho sistema de manera tal que garantice un flujo permanente de potencia hacia sus cargas?

El presente trabajo de grado realizará esfuerzos orientados a resolver las anteriores inquietudes buscando fortalecer la línea de investigación en operación, control e instalación de sistemas de energía eléctrica del grupo de investigación GISEL de la E3T-UIS.

1. Objetivos

Objetivo general

Instrumentar un prototipo de sistema solar fotovoltaico para microgeneración en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS y analizar el comportamiento de sus flujos de potencia.

Objetivos específicos

Acondicionar elementos de medida comerciales para cuantificar la energía generada por un sistema de microgeneración fotovoltaico en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS;

Diseñar e implementar un sistema para el registro de los datos suministrados por los medidores a partir de una herramienta embebida;

Diseñar e implementar una herramienta que permita transferir y acceder en línea a información actualizada de variables relevantes del sistema via web;

Diseñar e implementar un sistema de transferencia automática para garantizar un flujo de potencia permanente hacia las cargas del sistema de microgeneración mencionado;

Valorar el desempeño del sistema instrumentado a partir de un análisis del comportamiento de sus variables en el tiempo.

2. Instrumentación del módulo fotovoltaico

El presente *Capítulo*, realiza una descripción de los elementos configurados para realizar captura de información de la operación del sistema fotovoltaico actualmente instalado en el *Laboratorio de Control e Instrumentación* de la E3T. Inicialmente, se abordarán los dispositivos de medición en corriente continua y alterna, para dar paso al diseño y construcción de un sistema de transferencia automática monofásico y a la configuración de una arquitectura computacional para captura de datos y gestión de la información.

2.1. Elementos de medición

El sistema fotovoltaico analizado, posee como base fundamental la carga de un banco de baterías. Posteriormente el potencial energético almacenado se transforma en corriente alterna de tipo monofásico a través del dispositivo inversor. A partir de ello, la operación del sistema de generación queda determinada por el estado de sus variables eléctricas tanto en corriente continua (fuente de entrada) como en corriente alterna (salida en carga).

2.1.1. Medición en DC. El dispositivo empleado para medir las variables eléctricas en corriente directa (DC), corresponde con un analizador de potencia marca *West Mountain Radio* y modelo *PWRcheck* (ver Fig. 3). Las especificaciones técnicas del dispositivo se listan en la Tabla 2, siendo quizás la más importante su interconectividad a través de una interfaz USB que permite acceder de manera remota al estado de sus variables, ofreciendo las siguientes posibilidades: *voltaje, corriente, potencia, amperios/hora, amperios/hora hacia la carga, amperios/hora hacia la fuente, voltaje máximo, voltaje mínimo, corriente máxima, y corriente mínima.*

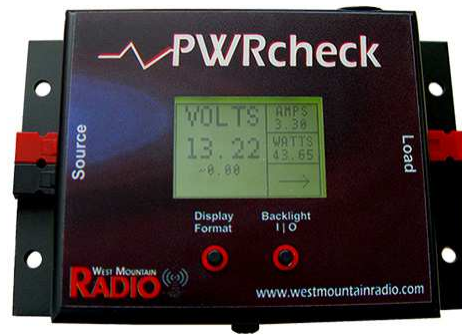


Figura 3. Medidor de potencia DC PWRcheck

Tabla 2

Características técnicas medidor PWRcheck

Parámetro	Valor
Voltaje de entrada	8 (0 con USB) - 60 [VDC]
Corriente de entrada	0.120 (0.025 con USB) - 40 [A]
Consumo corriente	0.060 - 0.120 [A]

2.1.2. Medición en AC. La monitorización de la energía suministrada a las cargas del sistema fue realizada a través del medidor de potencia monofásico marca *EASTRON* y modelo *SDM-230-Modbus* (ver Fig. 4). Las especificaciones técnicas del dispositivo se listan en la Tabla 3, siendo representativa su capacidad de comunicación mediante un puerto RS485 y protocolo MODBUS RTU, lo cual permite acceso remoto a variables para medida de: voltaje, corriente, potencia instantánea, potencia activa total/exportada/importada, potencia reactiva total/ exportada/importada, potencia aparente, frecuencia, y factor de potencia, entre otros.

2.2. Sistema de transferencia automática

Una transferencia automática es un sistema que permite conmutar una fuente de poder entre múltiples opciones disponibles, a partir de un criterio de selección. Para el caso de sistemas



Figura 4. Medidor de potencia AC EASTRON

Tabla 3

Características técnicas medidor EASTRON

Parámetro	Valor
Voltaje de entrada	120 [VAC]
Corriente de base	0.5 - 100 [A]
Corriente de entrada	0.5 - 100 [A]
Frecuencia	50 - 60 [Hz]
Consumo	<2 [W] / 10 [VA]
Temperatura de operación	-25 - 55 [°C]

de respaldo, la transferencia automática selecciona entre la red de distribución y un generador independiente (e.g. grupo electrógeno, o banco de baterías) dependiendo de si existe o no fluido eléctrico en el sistema de alimentación principal.

Comercialmente, existen soluciones principalmente para niveles de potencia altos y del tipo trifásico. Por ejemplo, la Fig. 5 ilustra el modelo OTM de ABB el cual reúne bajo el acrónimo ATS (Automatic Transfer Switch) una gama de productos para valores nominales de entre 40 y 2500 [A], con precios que inician en 500 USD y que pueden alcanzar los 7000 USD. Ahora bien,



Figura 5. Tranferencia automática ABB modelo OTM C21D

tomando en cuenta las necesidades del sistema de respaldo analizado, no se justifica realizar una inversión de tal valor para solucionar el problema de conmutación entre fuentes y por tanto, se procede a diseñar e implementar un sistema de transferencia automática a medida.

2.2.1. Análisis de requerimientos. El sistema de microgeneración fotovoltaica descrito en el *Capítulo* , posee los parámetros nominales presentados en la Tabla 1. A partir de ello, es claro que la conmutación a ser realizada por la transferencia automática deberá soportar

como mínimo 5 [A].

Debido a esto, se seleccionó un contactor tipo relé de marca VCP ELECTRIC y modelo VRPL08 (ver Fig. 6) con capacidad nominal de 10 [A] y bobina energizable a 110 [VAC].

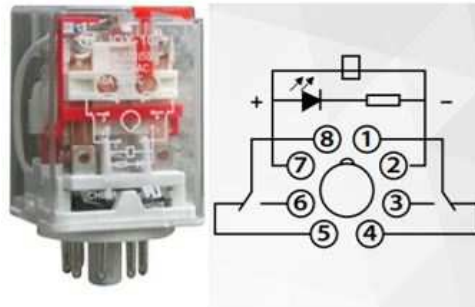


Figura 6. Relé de potencia VRPL08

Así entonces, la fase de la red (monofásica) de distribución y la fase del inversor de potencia (proveniente del panel), pueden conmutarse hacia la carga conectada a un neutro común.

Con el ánimo de evitar cortocircuitar las fases y causar la destrucción indeseada del inversor, se propone un esquema de doble conmutación que asegura la extinción del arco eléctrico antes de realizar la conexión de la carga.

Finalmente, es importante resaltar las características particulares de operación del sistema, tomando en cuenta que se desea utilizar al sistema fotovoltaico como la *fuentes principal* y a la red de distribución como el *sistema de respaldo*. Para ello, la conmutación se realizará dependiendo

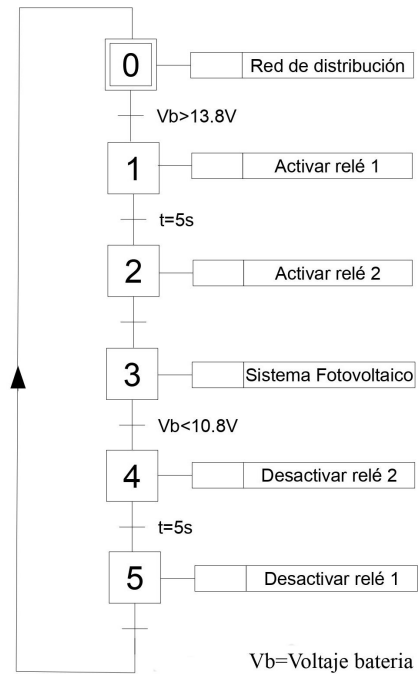
del estado de carga de las baterías definiendo un umbral de 13.8 [VDC] para conectar el sistema fotovoltaico y de 10.8 [VDC] para conectar la red de distribución.

2.2.2. Implementación del esquema. La Fig. 7(a) presenta el diagrama *GRAF-CET* para el autómata que realiza la transferencia automática en los términos descritos. Como se observa de dicho diagrama, el sistema se configura para iniciar siempre en la red de distribución, activando su transición al sistema fotovoltaico posterior a la condición $V_b > 13.8$ [VDC] (siendo V_b el voltaje medido en el banco de baterías) en una serie de dos pasos temporizados 5 [s] para activación de dos relés en cascada. Posteriormente, el sistema regresa a la red de distribución en un modo similar cuando se verifica la condición $V_b < 10.8$ [VDC]. Es interesante notar que a pesar de la simplicidad del autómata, no existe conflicto cuando $V_b \in [10.8, 13.8]$ [VDC] debido a que dicho intervalo representa el rango de uso de las baterías como fuente de suministro.

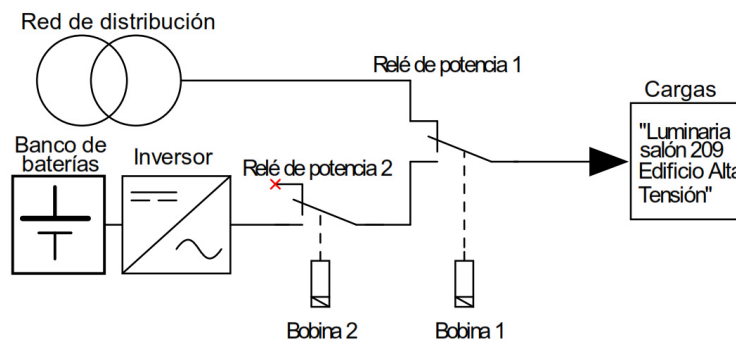
Asimismo, la Fig. 7(b) ilustra el esquema de potencia para la realización circuital del autómata, del cual es posible observar la configuración de doble relé para asegurar la eliminación de eventos de corto circuito entre fases debidos al fenómeno de arco eléctrico.

2.3. Sistema para registro de datos

El esquema general para el sistema implementado se presenta en la Fig. 8. A partir de ello, se observa la manera en la cual las señales de los dispositivos de medición (tanto en corriente directa como en corriente alterna) se concentran en un dispositivo de acopio de información correspondiente con el sistema de desarrollo para *Raspberry Pi 3* modelo B.



(a)



(b)

Figura 7. Implementación para transferencia automática: (a) Esquema de mando; (b) Esquema de potencia

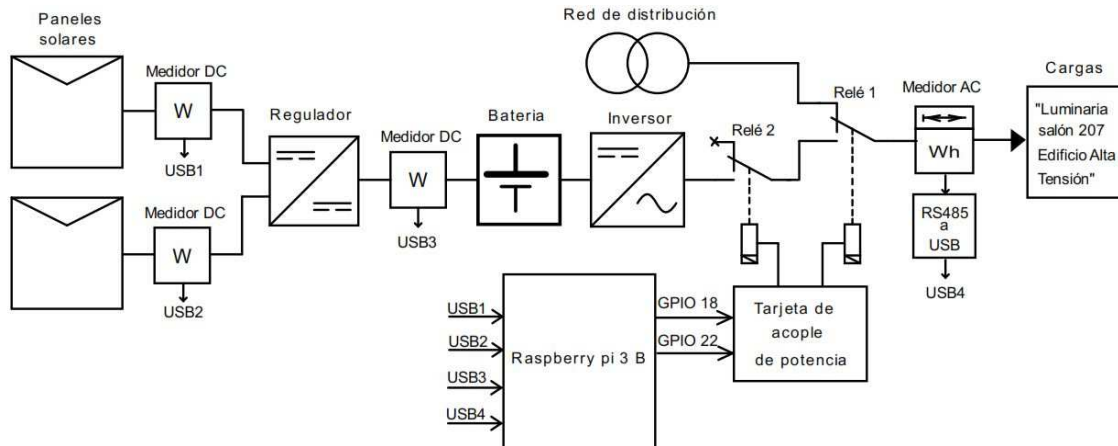


Figura 8. Diagrama esquemático para sistema implementado

Las características generales para el dispositivo se resumen en la Tabla 4, mientras que su apariencia física se ilustra en la Fig. 9.

Tabla 4

Características técnicas Raspberry Pi 3 modelo B

Parámetro	Valor
Procesador	ARMv8 quad core Cortex A53 processor @ 1.2GHz
Memoria RAM	1GB LPDDR2
Conectividad	Ethernet 10/100; WiFi 802.11; Bluetooth 4.1
Puertos	4 x USB 2.0; GPIO de 40 pines
Alimentación	micro USB 5 V / 2.4[A]
Almacenamiento	micro SD

Por tanto, la comunicación entre los tres medidores DC y el dispositivo de proceso se realiza de manera directa a través de 3 de sus puertos USB. Asimismo, para conectar el medidor AC se hace uso de un convertidor RS485/USB genérico para luego enviarlo hacia el puerto USB restante.

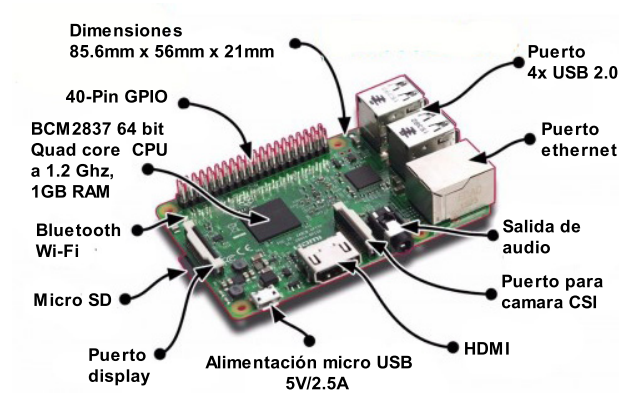


Figura 9. Sistema de desarrollo para *Raspberry* modelo Pi 3 B

Más aún, empleando dos pines del puerto GPIO (General Purpose Input/Output) se activa un pulso binario a través de una tarjeta de acople de referencia HCMODU0115, para accionar los relé de potencia.

2.3.1. Subsistema para gestión de información. En palabras simples, se puede definir al sistema de desarrollo para *Raspberry* Pi 3 B como un computador ejecutado a través del sistema operativo *Raspbian*, como versión de *Linux-Debian* para esta clase de dispositivos.

Tomando en cuenta lo anterior, se constituye un sistema de gestión de información hacia la nube empleando un esquema cliente-servidor como el ilustrado en la Fig. 10, donde claramente el *Raspberry* Pi 3 B se configura como *Servidor* y, por consiguiente, un PC convencional puede accederle como *Cliente* a través de la web.

De esta manera, los registros de información almacenados por el *Raspberry* Pi 3 B pueden ser accedidos remotamente a través de una base de datos que es actualizada periódicamente en el

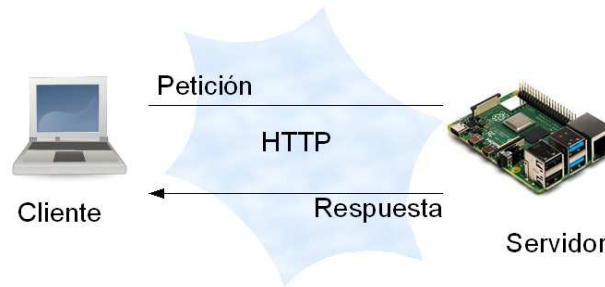


Figura 10. Configuración cliente-servidor para *Raspberry Pi 3 B*

servidor web y gestionada por el cliente a través de una interfaz de usuario. Dicho procedimiento es ilustrado en el algoritmo presentado en la Fig. 11, el cual realiza la gestión de información capturada por los medidores de potencia en DC y en AC, y además almacena los eventos correspondientes con la activación y desactivación del sistema de transferencia automática, como indicadores del estado de operación histórica para el sistema de generación fotovoltaico.

El *Anexo 1* ilustra de manera detallada la configuración del servidor web en Raspberry y las características de la base de datos constituida.

2.4. Prototipo final implementado

La realización física para el esquema ilustrado previamente en la Fig. 8, se muestra en la Fig. 12 para el prototipo final implementado en el *Laboratorio de Control e Instrumentación* de la E3T-UIS.

En concordancia con lo anterior, las etiquetas de la imagen corresponden con: 1) *Medidor*

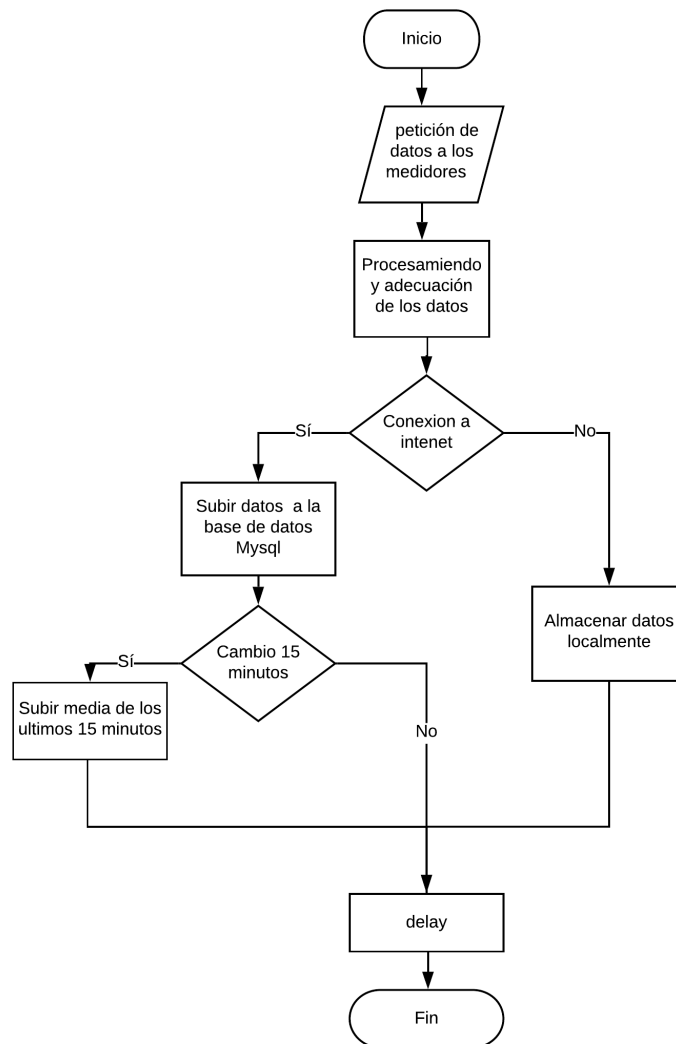


Figura 11. Algoritmo para gestión de información programado en *Raspberry Pi 3 B*

DC USB1; 2) Medidor DC USB2; 3) Inversor; 4) Regulador; 5) Batería; 6) Medidor AC USB4; 7) Relé 1; 8) Relé 2; 9) Tarjeta de acople de potencia; 10) Raspberry pi 3 B y 11) Medidor DC USB3.

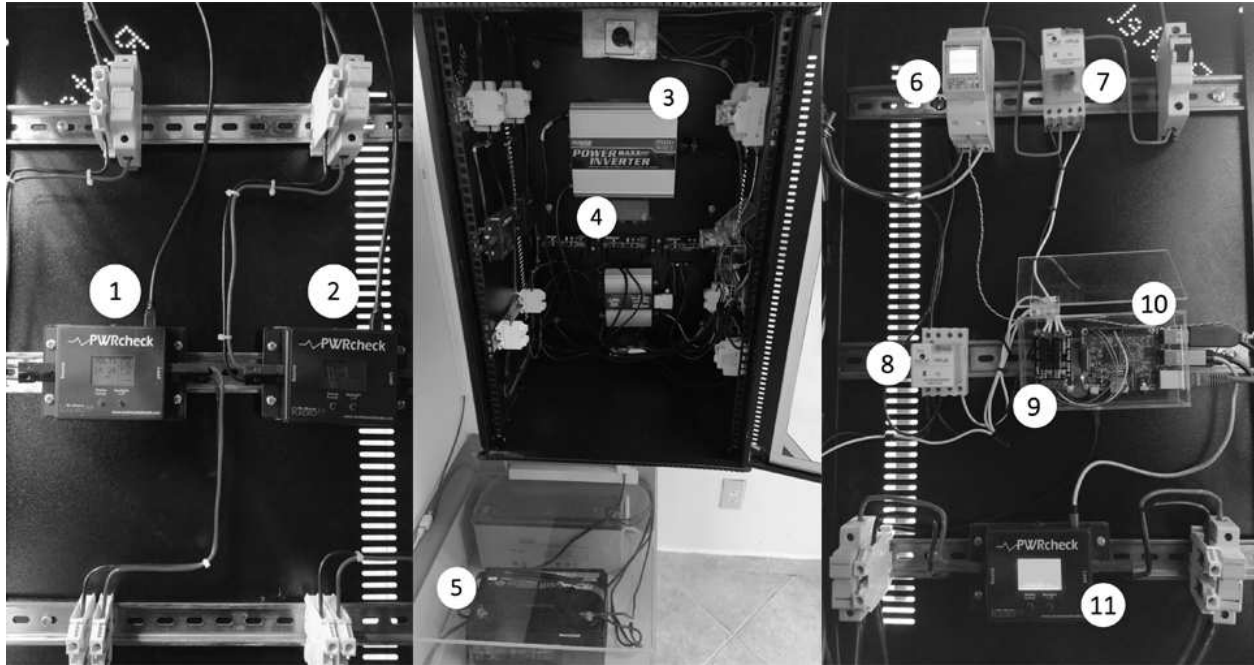


Figura 12. Prototipo final implementado en laboratorio

Asimismo, la Tabla 5 relaciona el costo comercial para los elementos utilizados en la instrumentación del prototipo, parte de los cuales fueron cubiertos con elementos disponibles en el inventario de equipos de la E3T-UIS y otros a través de compras soportadas con recursos del grupo de investigación *GISEL*.

Tabla 5

Tabla de costos para instrumentación de prototipo

Elemento	Cantidad	Vr. unitario (\$COP)	Vr. total (\$COP)
Raspberry PI 3	1	150.000	150.000
Analizador de potencia DC	3	648.517	1.945.551
Medidor Eastron SDM230M	1	130.000	130.000
Adaptador USB-RS485	1	9.000	9.000
Relé de estado sólido	1	19.000	19.000
Rele de potencia VRPI08	2	32.000	64.000
Total	9		2.317.551

3. Interfaz para gestión de datos

Con el prototipo de microgeneración fotovoltaica debidamente instrumentado, es posible analizar el comportamiento de sus variables eléctricas a partir de los registros históricos almacenados en el servidor web previamente descrito. El presente *Capítulo* se ocupa del diseño e implementación de una interfaz de usuario que facilite el acceso remoto de los datos del sistema a través de un apropiado manejo de recursos visuales y estéticos, para satisfacer requerimientos técnicos y operativos (ingeniería de software) en esta clase de desarrollos.

3.1. Análisis de requerimientos

Para abordar el diseño de la interfaz de usuario que permita visualizar los datos del *sistema de generación fotovoltaica*, se seguirán algunas pautas sugeridas por *I. Sommerville* en el *Capítulo 16* de (Sommerville, 2005).

Inicialmente, se toman como base los siguientes *principios de diseño de interfaces*:

- *Familiaridad del usuario*. La interfaz debe utilizar términos y conceptos obtenidos de la experiencia de las personas que más utilizan el sistema;
- *Uniformidad*. Siempre que sea posible, la interfaz debe ser uniforme en el sentido que las operaciones comparables se activen de la misma forma;
- *Mínima sorpresa*. El comportamiento del sistema no debe provocar sorpresa a los usuarios;
- *Recuperabilidad*. La interfaz debe incluir mecanismos para permitir a los usuarios recuperarse

de los errores;

- *Guía de usuario.* Cuando ocurran errores, la interfaz debe proporcionar retroalimentación significativa y características de ayuda sensible al contexto;
- *Diversidad de usuarios.* La interfaz debe proporcionar características de interacción apropiadas para los diferentes tipos de usuarios del sistema.

Dichos *principios de diseño* se formulan para tomar en cuenta capacidades (limitaciones) *físicas y mentales* de los usuarios.

3.1.1. Interacción del usuario. Uno de los aspectos fundamentales al momento de proponer el diseño de una interfaz, es la manera en la cual el usuario accederá a la información.

Dentro de las opciones disponibles aparecen: *manipulación directa* (a objetos de pantalla en entornos gráficos, mediante punteros, mouse o recursos táctiles), *selección de menús*, *rellenado de formularios*, instrucciones en *lenguaje de comandos* y uso de texto en *lenguaje natural*.

Evidentemente, la opción más viable para usuarios genéricos (expertos o no) se constituye a través de la interacción mediante una *selección de menús*, en la cual el usuario pueda acceder a un conjunto limitado de opciones para escoger el tipo de dato a ser visualizado y la manera en la cual el mismo podrá ser desplegado en la pantalla o almacenado en algún tipo de archivo para descarga.

Adicionalmente, los *menús* eliminan drásticamente la posibilidad de incurrir en fallos o errores por parte de usuarios inexpertos, y por ende, evitan la necesidad de diseñar mensajes de advertencias y errores en la manipulación del sistema.

3.1.2. Presentación de la información. Otro elemento fundamental que requiere ser definido es la manera particular en la cual se presentarán los datos al usuario. Entre las opciones disponibles se tienen: texto en *lenguaje máquina*, texto en caracteres *ASCII* o *alfanuméricos*, texto en *lenguaje natural*, *tablas de valores*, *gráficos simples* o representaciones *gráficas elaboradas* (e.g. diagramas en 3D con opciones para detallar áreas y rotar pantallas), *animaciones* y *datos dinámicos* con actualización en *tiempo real*.

Dadas las características del sistema de generación fotovoltaica, se selecciona la visualización de gráficas que permitan acceder a la información de las variables eléctricas medidas como función del tiempo (series de tiempo).

3.1.3. Selección de herramientas de software. Para la elaboración de la interfaz se seleccionó el lenguaje PHP (Hypertext preprocessor), debido a su versatilidad para desarrollar interfaces a través de la red, con la posibilidad de realizar manipulación de información dinámica (como lo es la variación temporal de las magnitudes eléctricas capturadas en el sistema fotovoltaico).

El PHP realiza interacción directa con la base de datos desarrollada en MySQL (ver *Anexo 1*)

y por ende, accede a la información histórica proveniente de los dispositivos de medición.

Los registros históricos (series de tiempo) fueron graficados empleando la herramienta Highcharts, la cual es una biblioteca gratuita desarrollada en JavaScript.

Adicionalmente y con el ánimo de dar un carácter dinámico a la visualización de los datos, se empleó la tecnología AJAX (Asynchronous Javascript + XML) para realizar la actualización de información en tiempo real. En complemento a lo anterior, se utilizaron librerías gratuitas del tipo Google Chart para realizar la visualización dinámica correspondiente.

3.1.4. Análisis de actividades de usuario. Finalmente, dentro de las especificaciones de requerimiento de la interfaz se hace importante definir la estructura a nivel de tareas y subtareas que debe realizar el sistema a partir de las necesidades del usuario, y que por ende deberán ser satisfechas a través de un diseño acorde.

En este sentido, herramientas como los diagramas de secuencias de UML (*Unified Modeling Language*) suelen brindar soluciones importantes, aunque requieren de un conocimiento técnico importante que puede resultar engorroso para personas poco familiarizadas con dicha técnica (sobretodo como en el presente caso, para un primer diseño).

Por tanto, como alternativa se proponen soluciones más simples para el análisis de tareas de usuario como lo son el HTA (*Hierarchical Task Analysis*), que descompone las actividades en

niveles jerárquicos, interrelacionados a manera de un esquema de bloques y flujos de información.

Para el caso del sistema de generación fotovoltaico, se presenta en la Fig.13 el HTA correspondiente, ilustrando las principales tareas y subtareas a ser ejecutadas por el usuario, y su respectiva interrelación a manera de estructura jerarquizada.

3.2. Distribución de elementos en la interfaz

A partir de las consideraciones de diseño presentadas se realiza la distribución de elementos en la interfaz de usuario según se presenta en la Fig. 14. En la misma se destacan los campos de: *A) encabezados, B) menús de navegación, C) área de contenidos y D) pié de página.*

3.2.1. Encabezado y pié de página. En esta zona aparece el nombre del proyecto: *“Instrumentación y monitoreo en tiempo real para un módulo solar fotovoltaico en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS”*. Adicionalmente, se ubica en esta área de la interfaz el logo de la Universidad Industrial de Santander y los datos de contacto del autor del trabajo de grado (desarrollador del proyecto).

3.2.2. Menús. En esta zona de la interfaz se brindan al usuario las siguientes opciones de navegación: Inicio e Historial (ver Fig. 15). Para el caso de Inicio, se realiza monitoreo de todas las variables medidas en tiempo real. Por el contrario, el menú Historial permite acceder a información histórica de los medidores instalados en el sistema fotovoltaico, específicamente a valores de corriente y potencia en el panel solar 1, el panel solar 2, el banco de baterías y las cargas del sistema (iluminación del laboratorio).

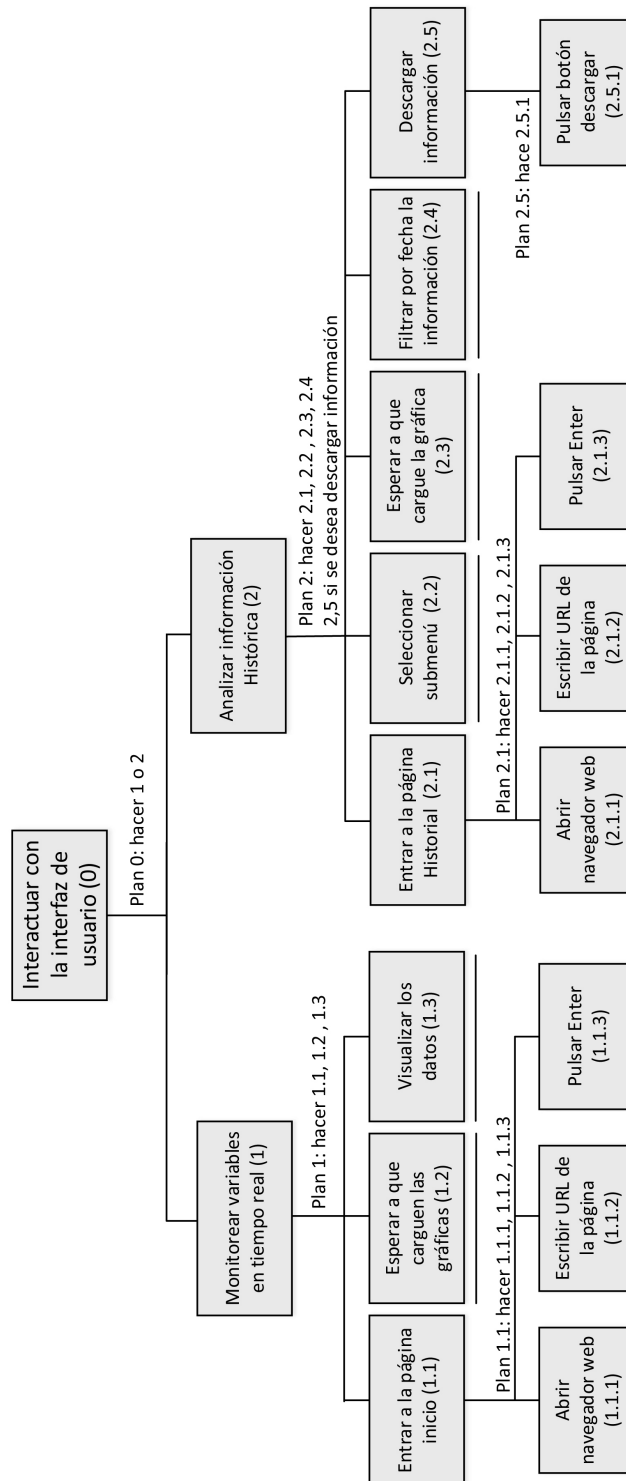


Figura 13. Estructura HTA para descomposición de tareas de usuario en interfaz

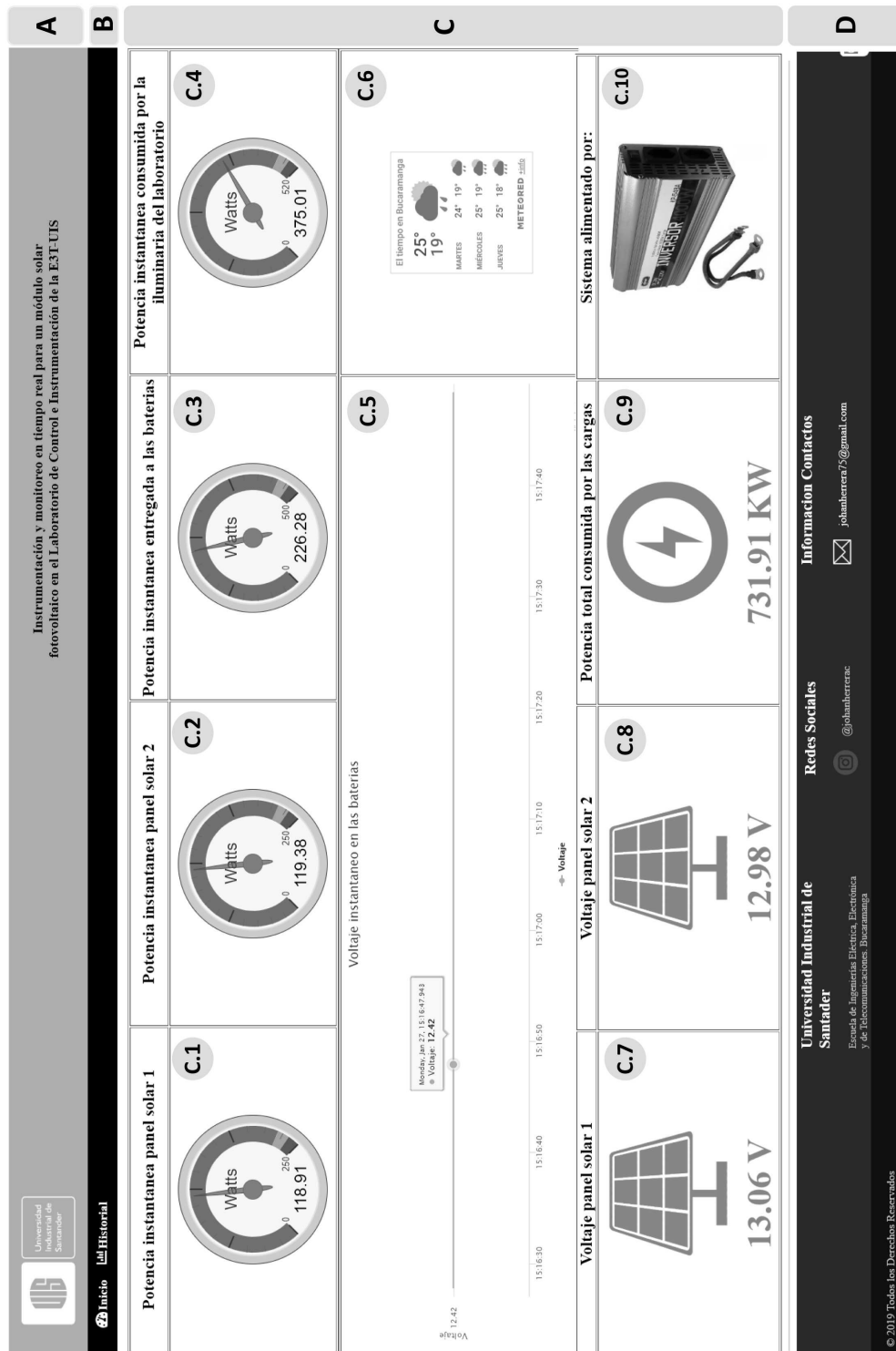


Figura 14. Pantalla principal de la interfaz de usuario



Figura 15. Menús de interfaz gráfica

A manera de ilustración se presenta en la Fig. 16 la visualización del registro histórico para el panel solar 1, incluyendo a su vez los siguientes campos: 1) indicador de última actualización, 2) área para graficación de hasta tres series de tiempo, 3) selección de detalle de visualización y 4) habilitación para descarga de datos.

Cabe resaltar que la visualización histórica para los demás medidores se realiza empleando los mismos recursos gráficos.

3.2.3. Contenido. En esta zona de la interfaz se alojan indicadores y gráficos para el monitoreo en tiempo real de las variables del sistema, incluyendo: C1) la potencia del panel solar 1, C2) la potencia del panel solar 2, C.3) la potencia de los reguladores de carga de baterías, C.4) la potencia consumida por las cargas, C.5) el voltaje del banco de baterías C.6) la información meteorológica de Bucaramanga, C.7) el voltaje del panel solar 1, C.8) el voltaje del panel solar 2, C.9) el consumo total de potencia por las cargas registrado en el medidor y C.10) la fuente de alimentación seleccionada por la transferencia automática.

3.3. Análisis de operación del sistema

Con el sistema fotovoltaico debidamente instrumentado y teniendo acceso a la información de las mediciones de sus variables relevantes, es posible analizar su operación a partir de los registros históricos de las magnitudes eléctricas involucradas en el proceso de generación.

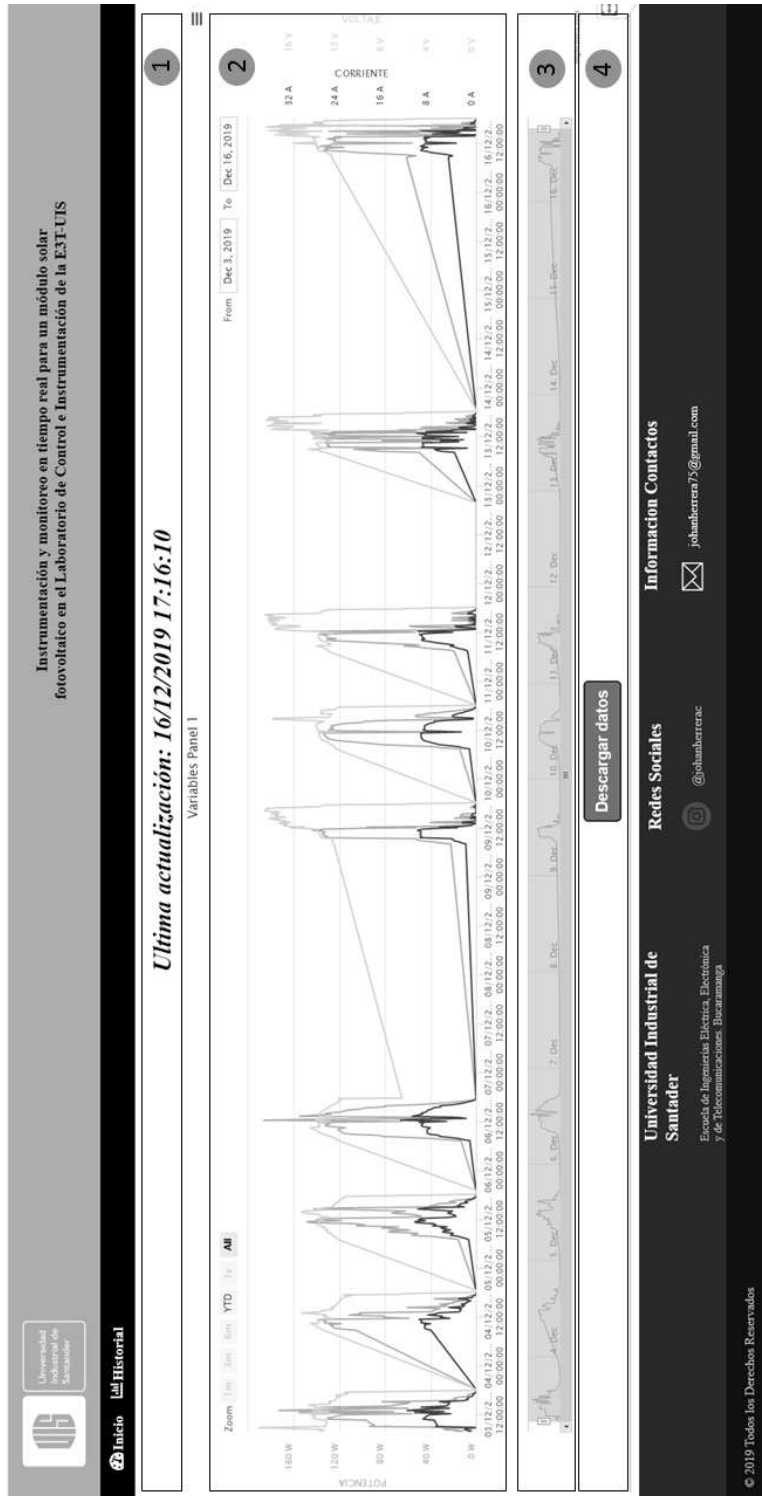


Figura 16. Visualización para registro histórico de datos

De esta manera se realizó la captura de datos durante el periodo comprendido entre el 03-12-2019 y el 06-12-2019, en el intervalo 9 am - 6 pm correspondiente con la luz del día. A partir de ello, pudo observarse un incremento en la potencia generada por los paneles fotovoltaicos en horas del mediodía (ver captura de diciembre 04 2019 en Figs. 17(a)-17(b)) con algunas caídas momentáneas de generación debidas a posibles efectos de sombreado parcial por nubes y otras condiciones meteorológicas.

Un efecto similar se percibe en el comportamiento de la energía almacenada por el banco de baterías (ver captura de diciembre 04 2019 en Fig. 18(a)), duplicando el valor de las magnitudes reportadas para los paneles fotovoltaicos y permitiendo la activación del suministro hacia la carga por parte de la transferencia automática mediante las condiciones de voltaje en las baterías, según fue definido previamente en la *Subsección 2.2.2* y visualizado por la condición binaria en la parte inferior del gráfico.

Finalmente, se evidencia el abastecimiento de la carga (accionada al 50%; es decir en alrededor de 250 W) por un periodo prolongado de horas consistente con las características de autonomía calculadas para el sistema (ver Fig. 18(b), captura diciembre 04 2019). A partir de ello, es posible cuantificar una reducción de consumo energético (disminución de facturación) correspondiente con:

$$250 W \times 5.5 h = 1.375 kWh.$$

Lo anterior representa un ahorro en COP de \$745.05 por operación diaria del sistema a media carga, tomando como base un costo de kWh = \$541.86 para febrero de 2020 (fuente ESSA). Conclusiones similares pueden obtenerse a partir del estudio de otros registros mostrados en el *Anexo 2*.

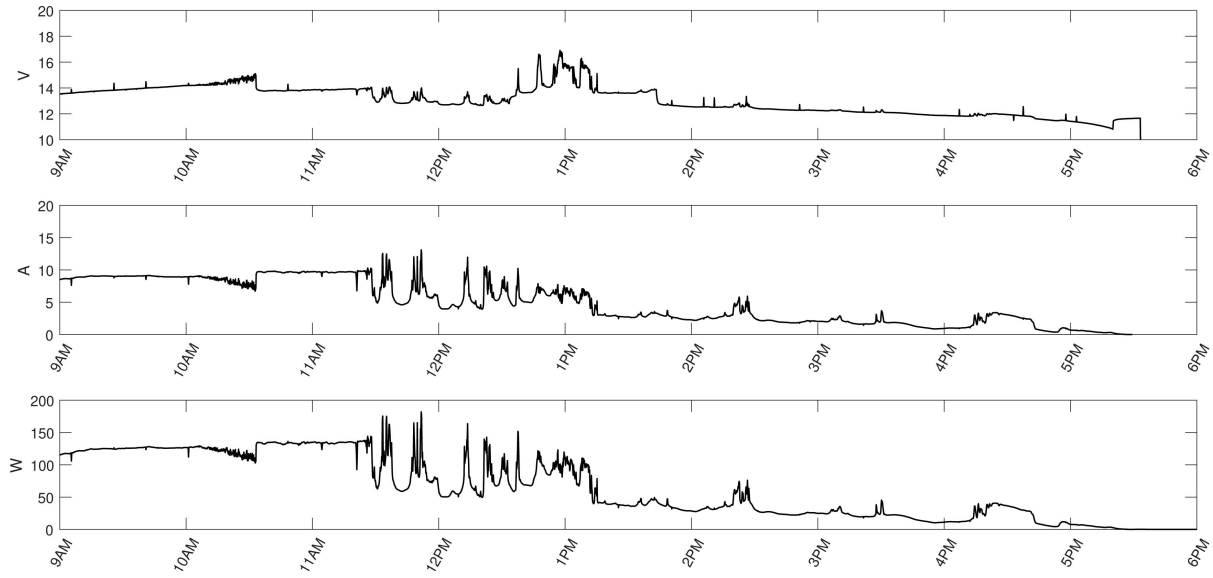
4. Recomendaciones

El fenómeno de arco eléctrico es un problema técnico de gran relevancia en sistemas prácticos. Durante las pruebas inicialmente realizadas al sistema de transferencia automática se pasó por alto esta situación, provocando consecuencias que afectaron la operación del circuito inversor de potencia hasta el punto de generar un cortocircuito en su puente de transistores.

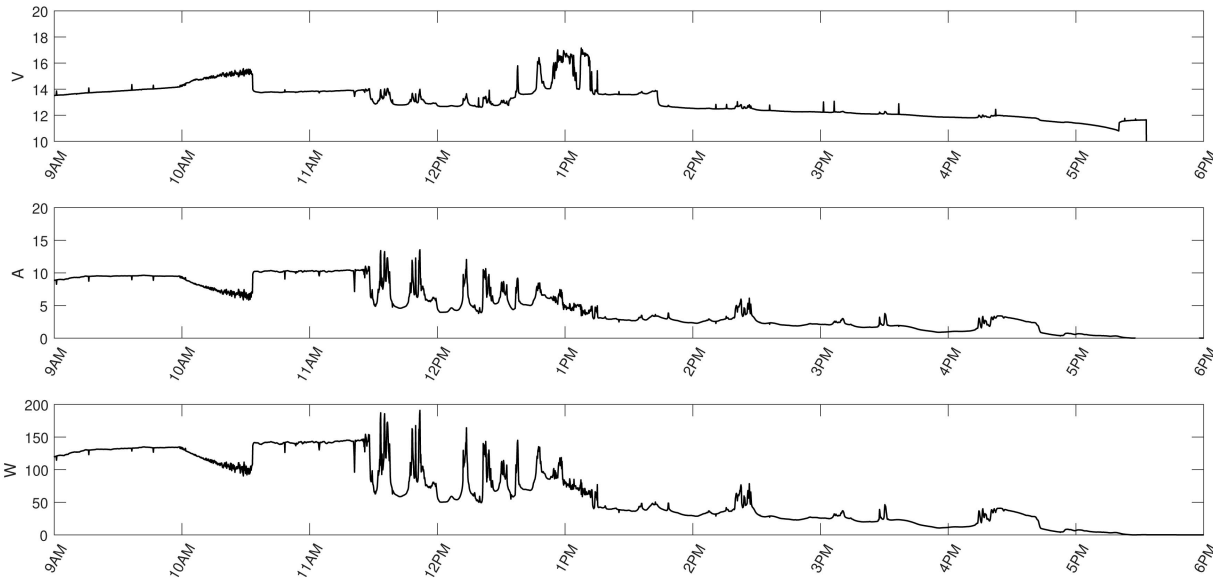
Como consecuencia de lo anterior, fue necesario implementar un esquema de conmutación correspondiente con la secuencia de activación de dos pasos separados por un diferencial de tiempo (suficiente para asegurar la extinción de arco). Por tanto, se recomienda tomar precaución con este tipo de fenómenos para futuras implementaciones y/o modificaciones en la estructura del sistema, por motivos de seguridad e integridad tanto de los equipos como del personal involucrado en calidad de usuario u operario.

5. Trabajo futuro

Actividades complementarias al presente trabajo de grado pueden orientarse hacia la exploración de alternativas para integrar otro tipo de recurso renovable al esquema de generación constituido en el laboratorio, pudiendo así estudiar estrategias de gestión basadas en criterios de optimalidad

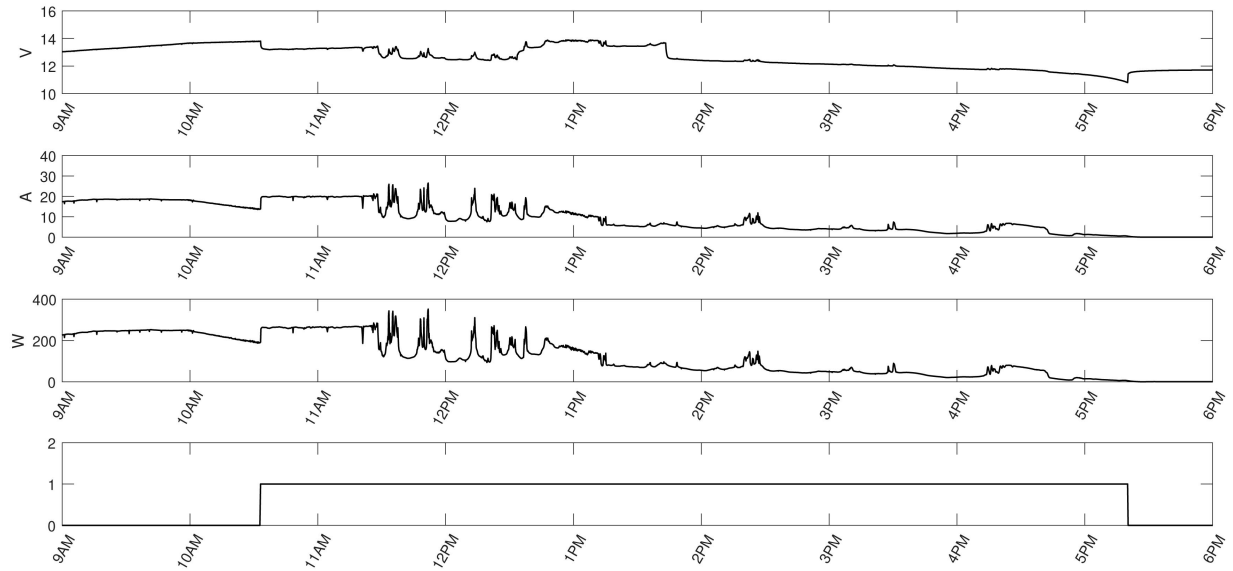


(a)

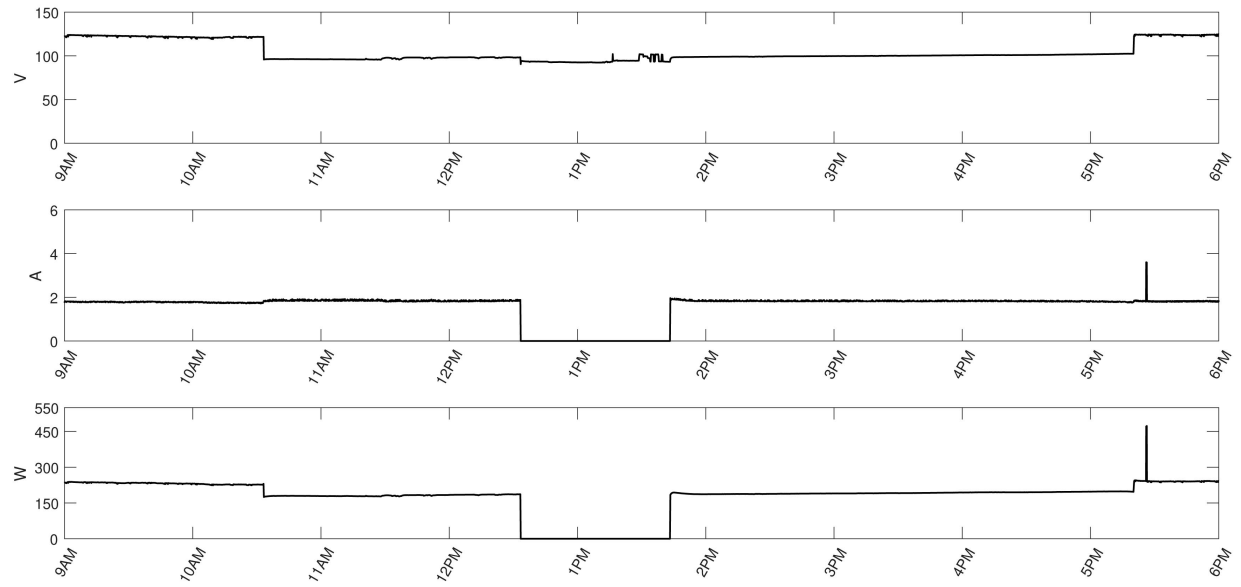


(b)

Figura 17. Registro histórico captura diciembre 04 2019: (a) panel 1, (b) panel 2



(a)



(b)

Figura 18. Registro histórico captura diciembre 04 2019: (a) batería, (b) carga AC

desde una perspectiva experimental.

6. Conclusiones

A partir de los desarrollos presentados y los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado, es posible enunciar la siguiente conclusión general:

Se instrumentó un prototipo de sistema solar fotovoltaico para microgeneración en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS y se analizó el comportamiento de sus flujos de potencia a partir de la utilización de equipos de medición tanto en corriente alterna como en corriente continua y la gestión de su información a partir de una interfaz hardware embebida (*Raspberry Pi*) actuando como centro de acopio de información, complementada por una interfaz software constituida a través de un servidor web para el acceso remoto de variables eléctricas del sistema por parte de un usuario. Como parte de las adecuaciones del sistema se construyó una transferencia automática de tipo monofásico para realizar conexión controlada del generador fotovoltaico a las cargas. Todo lo anterior permitió capturar los patrones de generación y cuantificar el ahorro de energía obtenido tras emplear el sistema de microgeneración fotovoltaico.

De manera más puntual:

Se acondicionaron elementos de medida comerciales para cuantificar la energía generada por

un sistema de microgeneración fotovoltaico en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS. Tal y como fue abordado en la *Sección 2.1*, se instalaron tres medidores de corriente continua (analizadores de potencia) de marca *West Mountain Radio* y modelo *PWRcheck* para capturar información de cada panel fotovoltaico y del banco de baterías, respectivamente. Asimismo, se utilizó un medidor de potencia monofásico marca *EASTRON* y modelo *SDM-230-Modbus* a la salida del circuito inversor de potencia para monitorear el estado de la energía suministrada en las cargas.

Se diseñó e implementó un sistema para el registro de los datos suministrados por los medidores a partir de una herramienta embebida. En particular, la *Sección 2.3* realizó una descripción para la arquitectura de gestión de información constituida a partir de un sistema de desarrollo para *Raspberry Pi 3* modelo B, empleando un esquema cliente-servidor mediante el cual los registros de información se accedieron remotamente a través de una base de datos que fue actualizada periódicamente en el servidor web y gestionada por el cliente a través de una interfaz de usuario. La Fig. 11 ilustró el algoritmo correspondiente implementado en el dispositivo embebido.

Se diseñó e implementó una herramienta que permitió transferir y acceder en línea a información actualizada de variables relevantes del sistema via web. A partir del sistema de captura de información constituido en el *Raspberry Pi*, se configuraron bases de datos para acceso remoto vía web a través de la interfaz diseñada e implementada según descrito en las *Secciones 3.1* y *3.2*. Detalles particulares respecto a la configuración del servidor web y a la

creación de las bases de datos pueden consultarse en el *Anexo 1*.

Se diseñó e implementó un sistema de transferencia automática para garantizar un flujo de potencia permanente hacia las cargas del sistema de microgeneración mencionado. Según ilustrado en la *Sección 2.2* y particularmente en el diagrama GRAFCET de la Fig. 7(a), se realizó la configuración de un esquema automatizado para conmutar la fuente de alimentación a las cargas, a partir de un criterio basado en el monitoreo permanente del estado de carga del banco de baterías. A partir de ello, el sistema fotovoltaico fue considerado como la fuente principal, mientras la red de distribución constituyó un sistema de respaldo.

Se valoró el desempeño del sistema instrumentado a partir de un análisis del comportamiento de sus variables en el tiempo. Más precisamente, los registros almacenados para cuatro días de captura fueron presentados y analizados en la *Sección 3.3* y el *Anexo 2*, permitiendo evidenciar la tendencia incremental de los perfiles de generación en horas del mediodía y la afectación presentada por perturbaciones del clima en términos de caídas momentáneas de potencia. A partir de ello fue posible cuantificar el ahorro energético proporcionado por el sistema fotovoltaico en términos de facturación, para abastecer la demanda de las cargas del sistema.

Referencias Bibliográficas

- Acosta, J. A. (2017). Estudio de diseño de las instalaciones eléctricas del hospital San Rafael de Leticia mediante la aplicación del RETIE. Trabajo de grado (ingeniero electricista), Universidad de La Salle, Bogotá - Colombia.
- Amariles Gomez, J. W. and Herrera Torres, C. A. (2010). Control automático para el cambio de transferencia local. Trabajo de grado (tecnólogo en mecatrónica), Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira - Colombia.
- Arévalo Espinel, D. F., Mantilla Cancino, E. J., and SÁCHICA PÉREZ, A. M. (2014). Monitoreo, soporte operativo y documental del sistema de automatización del nuevo edificio de la E3T. Trabajo de grado (ingeniero electrónico), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga - Colombia.
- Bagnasco, A., Allasia, G., Giannettoni, M., Pinceti, P., and Parodi, G. (2012). Innovative solutions for photovoltaic plants remote monitoring. *9th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), Bilbao, Spain*, pages 1–5.
- Castro Segura, J. E. and Posso García, R. (2015). Diseño e implementación de un sistema de telemetría para el monitoreo de un sistema de generación de energía solar fotovoltaica. Trabajo de grado (ingeniero mecatrónico), Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira - Colombia.
- Correia, D., Tomé, P., Costa, P. M., and Marques, L. (2016). Monitoring system for small sized

photovoltaic power plants. *11th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, Las Palmas, Spain, pages 1–6.

Grainger, J., Stevenson, W., and Sousa, C. (1996). *Análisis de sistemas de potencia*. McGraw-Hill.

Hernández Fher, R. J. (2010). Análisis técnico-económico del sistema de respaldo de energía eléctrica de entidades bancarias. Trabajo de grado (ingeniero electricista), Universidad Simón Bolívar, Sartenejas - Venezuela.

Ley N° 697 (2001). Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía. Ley de la república, Bogotá - Colombia.

Manzano, S., Peña Ortiz, R., Guevara, D., and Ríos, A. (Ecuador, 2014). Plataforma cloud para monitoreo remoto de sistemas fotovoltaicos aislados en el Ecuador. *Revista científica Maskana, Conference: I+D+ingeniería*.

Narvaéz Lopez, L. E. and Méndez Pardo, J. F. (2015). Instalaciones solares fotovoltaicas monitoreadas a través de un sistema de telemetría. Trabajo de grado (ingeniero electrónico), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá - Colombia.

Nunes Pereira, A. P. (2014). Plataforma gráfica de monitorização de produção FV para sistemas móveis Android. Tesis de maestría (Magister en Ingeniería Eléctrica), Instituto politécnico de Viseu, Portugal.

Osma Pinto, G. A. (2011). Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles

en el edificio de eléctrica II de la universidad industrial de santander. Tesis de maestría (magister en ingeniería eléctrica), Universidad Industrial de Santander, Colombia.

Polanía Puentes, E., Losada medina, A., and Sánchez, F. A. (2012). Diseño de instrumentación para el monitoreo de instalaciones solares fotovoltaicas. *Revista Ingeniería y Región - Facultad de Ingeniería Universidad Surcolombiana*, 9.

Prias Caicedo, O. F. (2009). Programa de uso racional y eficiente de la energía y fuentes no convencionales. Memoria de trabajos de difusión científica y técnica 9, PROURE. República de Colombia, Ministerio de minas y energía, Bogotá - Colombia.

Ribero, X. and Suárez, J. S. (Bucaramanga, 2015). Introducción al control de fuentes alternativas de energía. *Informe del plan de trabajo para semilleros de investigación de COLCIENCIAS*, page 66.

Rueda Vásquez, L. F. (2017). Integracion del conmutador inteligente de potencia y la sub-medición por circuito en la red de área domestica del sistema de gestión del hogar inteligente. Tesis de maestría (magister en ingeniería eléctrica), Universidad Industrial de Santander, Colombia.

Santander Cristancho, L. F. (2014). Implementación de la segunda fase del programa de uso racional y eficiente de la energía eléctrica URE para el edificio de investigaciones de parque tecnológico de guatiguará. Trabajo de grado (ingeniero electricista), Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga - Colombia.

Sommerville, I. (2005). *Ingeniería del software*. Pearson Educación S.A., Madrid, 7 edition.

UMPE (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Memoria de trabajos de difusión científica y técnica Cap 3, REPÚBLICA DE COLOMBIA, Ministerio de Minas y Energía; Unidad de Planeación Minero Energética, Bogotá - Colombia.

Villacís Galarza, W. R. and Quituña Caiza, E. R. (2012). Diseño y construcción de un tablero de transferencia automática de generadores de emergencia y monitoreos con sistema SCADA. Trabajo de grado (ingeniero de mantenimiento), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba - Ecuador.

Apéndices

Apéndice A. Configuración de servidor web

El Servidor Web, es el encargado de almacenar la interfaz (página) que utilizarán los usuarios para acceder a los datos de medición del sistema fotovoltaico. Asimismo, deberá contener la lógica de programación necesaria para procesar las peticiones requeridas para la gestión de dicha información.

La infraestructura de red utilizada para configurar el Servidor Web en el *Raspberry Pi 3 B*, corresponde con la de tipo LAMP (Linux+Apache+MySQL+Python/php/phpMyAdmin), siendo un acrónimo que resume los siguientes elementos:

- Raspbian: es un sistema operativo ligero para *Raspberry Pi 3 B*, basado en Linux-Debian;
- Apache: otorga la capacidad de compartir la base de datos de *Raspberry Pi 3 B* a internet de forma segura (servidor web) mediante archivos HTML a través HTTP;
- MySQL: ofrece almacenamiento y control de tablas para datos recolectados de los medidores de energía (gestor de base de datos);
- Python: lenguaje de programación de alto nivel en el cual se desarrolló la rutina para recolección, procesamiento y almacenamiento de datos;
- HyperText Preprocessor: o *php*, es un lenguaje de programación de código abierto para

desarrollo de páginas web dinámicas, permitiendo manejo de información en tiempo real;

- phpMyAdmin: herramienta escrita en *php* para realizar a través de una interfaz gráfica, modificación y consulta de la base de datos MySQL.

Esquema general

La Fig. 19 ilustra el flujo de datos requerido para gestionar la información desde los medidores hasta un cliente, a través del Servidor Web.

En particular, *Python* se encarga de leer (vía puerto *USB*) cada medidor y posteriormente almace-

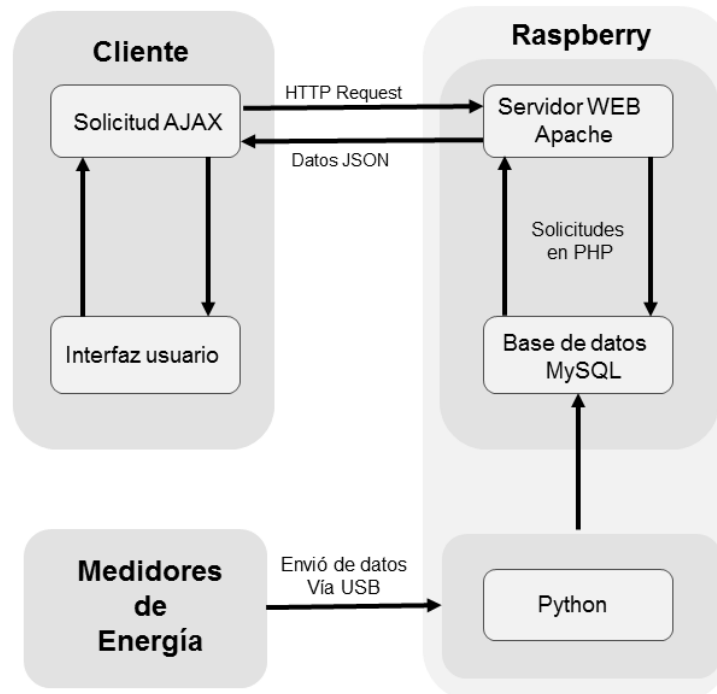


Figura 19. Configuración de sistema para gestión de información de medidas

nar los datos en *MySQL*. A su vez, la conexión entre *Python* y *MySQL* se realiza empleando una librería específica en *Python* (*MySQLdb*).

Una vez las variables eléctricas se encuentran almacenadas, el Servidor Web accede a la base de datos mediante peticiones hechas en *php*. A partir de ello, el Servidor Web convierte los datos a formato *JSON* (JavaScript Object Notation) para facilitar su transmisión hacia el cliente.

La actualización de dichos datos se realiza en tiempo real (i.e. sin necesidad de refrescar la página) mediante peticiones *AJAX* (Asynchronous JavaScript And XML), siendo visualizados por el cliente en modo interactivo a partir de un entorno gráfico constituido en *JavaScript* (a través de la librería *Highcharts*).

Configuración Servidor Web en Raspberry

Para configurar el *Raspberry Pi 3 B* como Servidor Web, el SO *Raspbian* debe estar instalado en una tarjeta SD mayor a 4GB y seguirse los pasos indicados a continuación.

Configuración IP y actualización de programas. Inicialmente, se deberá asignar una dirección IP fija para facilitar el acceso remoto. Para ello se utiliza la consola de comandos (terminal) mostrada en la Fig. 20, ejecutando el siguiente comando:

```
-sudo nano /etc/network/interfaces
```

Posteriormente se debe editar el archivo generado según se ilustra en la Fig. 21, siendo:

- *address* la dirección IP del *Raspberry Pi 3 B*;
- *netmask* la máscara de red, y;



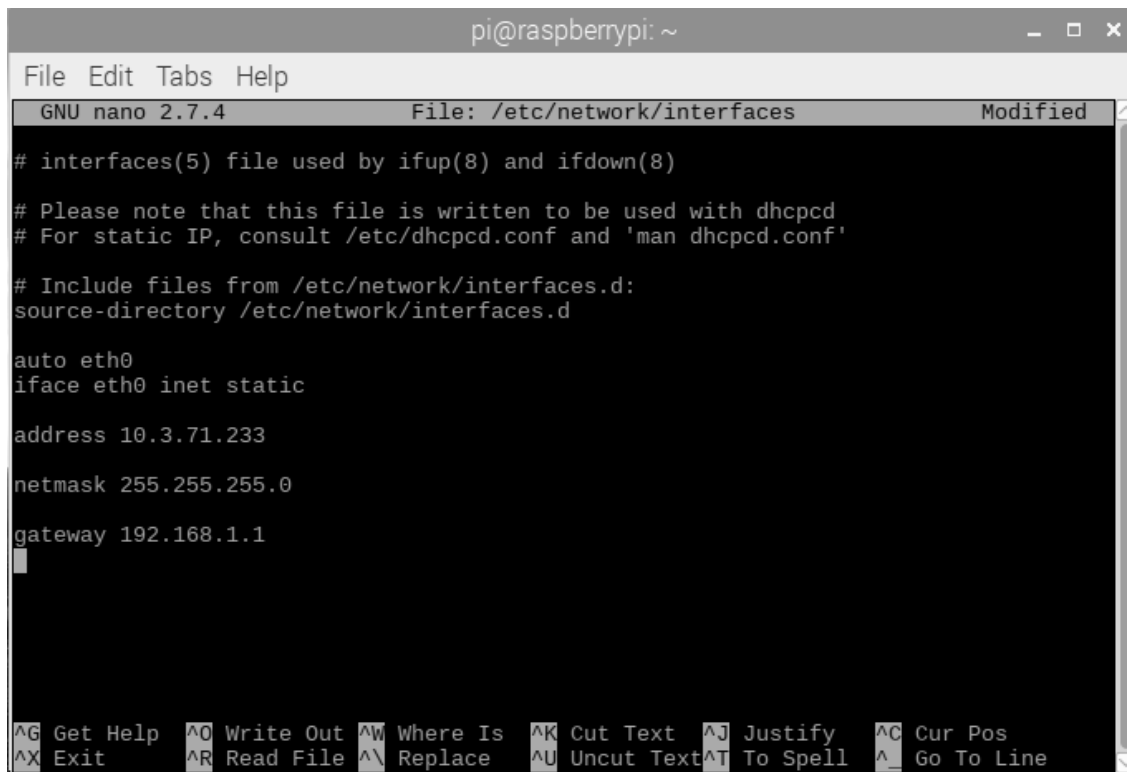
Figura 20. Consola de comandos

- *gateway* la IP de puerta de enlace del enrutador.

El siguiente paso de configuración corresponde con la actualización a la última versión, para los programas que trae instalados por defecto el *Raspberry Pi 3 B* (e.g. *Phyton* asociado a la instalación de *Raspbian*) ejecutando los siguientes comandos (uno a uno) en el terminal:

```
-sudo apt-get update
```

```
-sudo apt-get upgrade
```



```
pi@raspberrypi: ~  
File Edit Tabs Help  
GNU nano 2.7.4 File: /etc/network/interfaces Modified  
# interfaces(5) file used by ifup(8) and ifdown(8)  
# Please note that this file is written to be used with dhcpd  
# For static IP, consult /etc/dhcpd.conf and 'man dhcpd.conf'  
# Include files from /etc/network/interfaces.d:  
source-directory /etc/network/interfaces.d  
auto eth0  
iface eth0 inet static  
address 10.3.71.233  
netmask 255.255.255.0  
gateway 192.168.1.1  
^G Get Help ^O Write Out ^W Where Is ^K Cut Text ^J Justify ^C Cur Pos  
^X Exit ^R Read File ^\ Replace ^U Uncut Text ^T To Spell ^_ Go To Line
```

Figura 21. Asignación IP fija

Instalación LAMP. Para instalar *Apache*, se ejecuta el siguiente comando en el terminal:

```
-sudo apt-get install apache2
```

Una vez hecho esto se debe verificar su correcta instalación escribiendo la IP asignada en el navegador, obteniendo un resultado similar al visualizado en la Fig. 22.

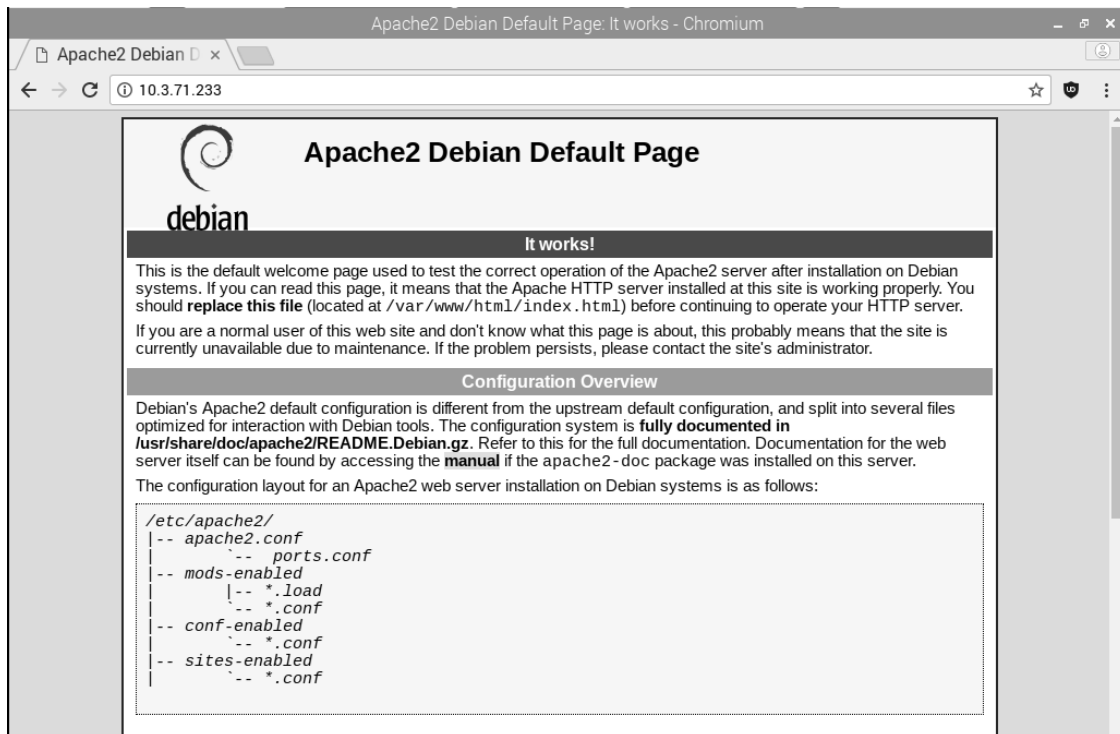


Figura 22. Verificación instalación *Apache*

Para instalar *php*, se ejecuta el siguiente comando en el terminal:

```
-sudo apt-get install php7.0 libapache2-mod-php7.0
```

Para verificar su correcta instalación se debe reiniciar el *Raspberry Pi 3 B* a través del comando:

```
-sudo reboot
```

y posterior al reinicio, ejecutar:

```
sudo nano /var/www/html/info.php
```

para crear un archivo que deberá ser editado conforme a la ilustración de la Fig. 23.

Luego, se escribe en el navegador la IP asignada seguida de `/info.php` para obtener un resultado similar al visualizado en la Fig. 24.

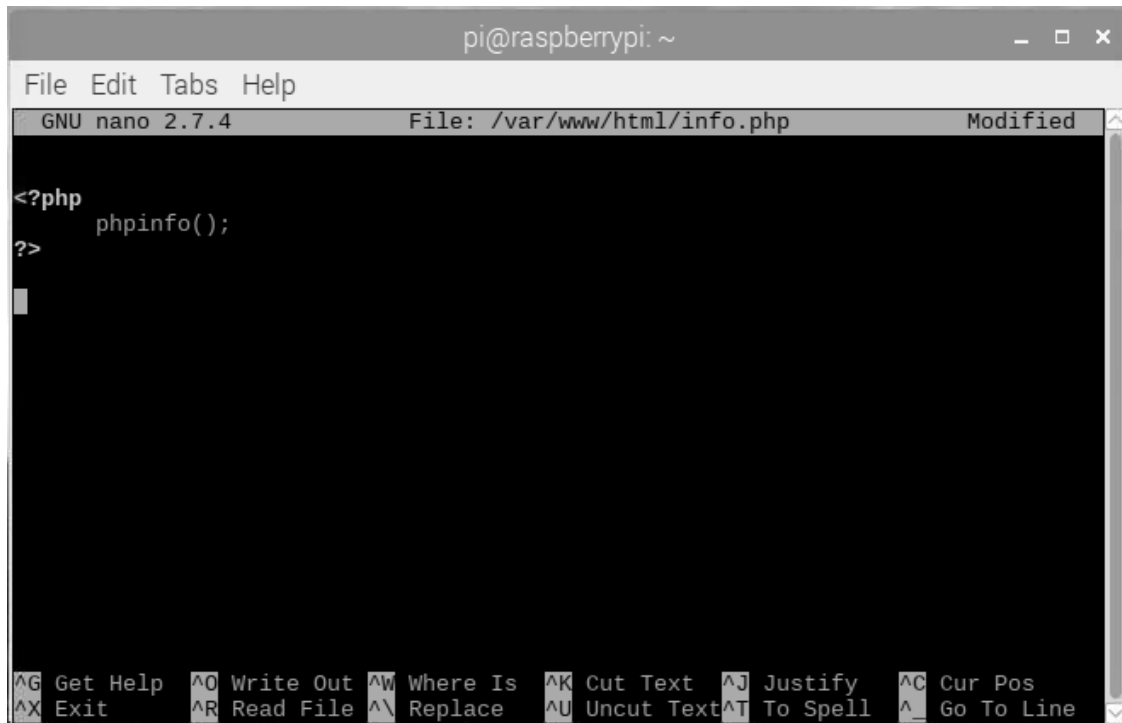
Para instalar *MySQL*, se ejecuta el siguiente comando en el terminal:

```
-sudo apt-get install mysql-server mysql-client php5-mysql
```

requiriendo crear una contraseña para el manejo de la base de datos.

Para instalar *phpMyAdmin* se debe reiniciar el *Raspberry Pi 3 B* y posterior a ello ejecutar el comando:

```
-sudo apt-get install php5-mysql phpmyadmin
```



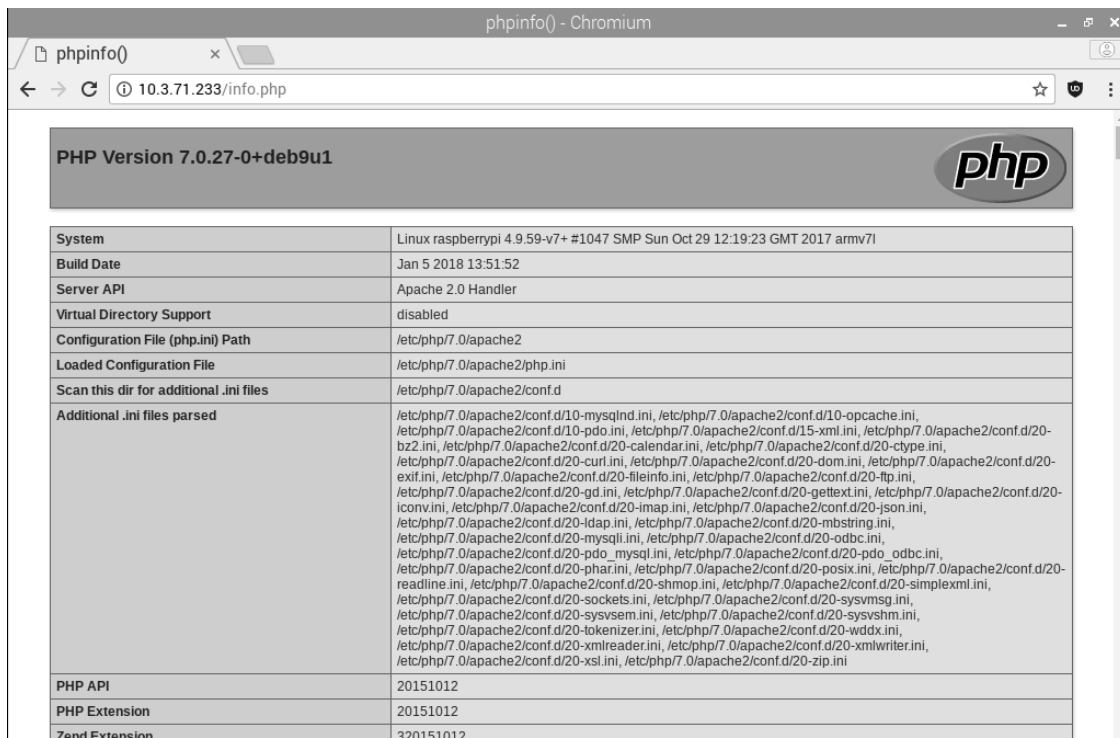
```
pi@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
GNU nano 2.7.4 File: /var/www/html/info.php Modified
<?php
phpinfo();
?>
^G Get Help ^O Write Out ^W Where Is ^K Cut Text ^J Justify ^C Cur Pos
^X Exit ^R Read File ^\ Replace ^U Uncut Text ^T To Spell ^_ Go To Line
```

Figura 23. Creación *info.php*

siguiendo la secuencia de configuración mostrada en la Fig. 25, para la cual se selecciona *apache2* como Servidor Web, *Sí* en la opción para configurar la base de datos con *dbconfig-common* y se proporciona una contraseña para *phpMyAdmin*.

En la parte final de la instalación, se debe editar el archivo

```
sudo nano /etc/apache2/apache2.conf
```



System	Linux raspberrypi 4.9.59-v7+ #1047 SMP Sun Oct 29 12:19:23 GMT 2017 armv7l
Build Date	Jan 5 2018 13:51:52
Server API	Apache 2.0 Handler
Virtual Directory Support	disabled
Configuration File (php.ini) Path	/etc/php/7.0/apache2
Loaded Configuration File	/etc/php/7.0/apache2/php.ini
Scan this dir for additional .ini files	/etc/php/7.0/apache2/conf.d
Additional .ini files parsed	/etc/php/7.0/apache2/conf.d/10-mysqlnd.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/10-opcache.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/10-pdo.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/15-xml.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-bz2.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-calendar.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-ctype.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-curl.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-dom.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-exif.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-fileinfo.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-ftp.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-gd.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-gettext.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-iconv.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-imap.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-json.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-ldap.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-mbstring.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-mysqli.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-odbc.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-pdo_mysql.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-pdo_odbc.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-phar.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-posix.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-readline.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-shmop.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-simplexml.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-sockets.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-sysmsg.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-syssem.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-sysvshm.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-tokenizer.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-wddx.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-xmlreader.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-xmlwriter.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-xsl.ini, /etc/php/7.0/apache2/conf.d/20-zip.ini
PHP API	20151012
PHP Extension	20151012
Zend Extension	320151012

Figura 24. Verificación instalación *php*

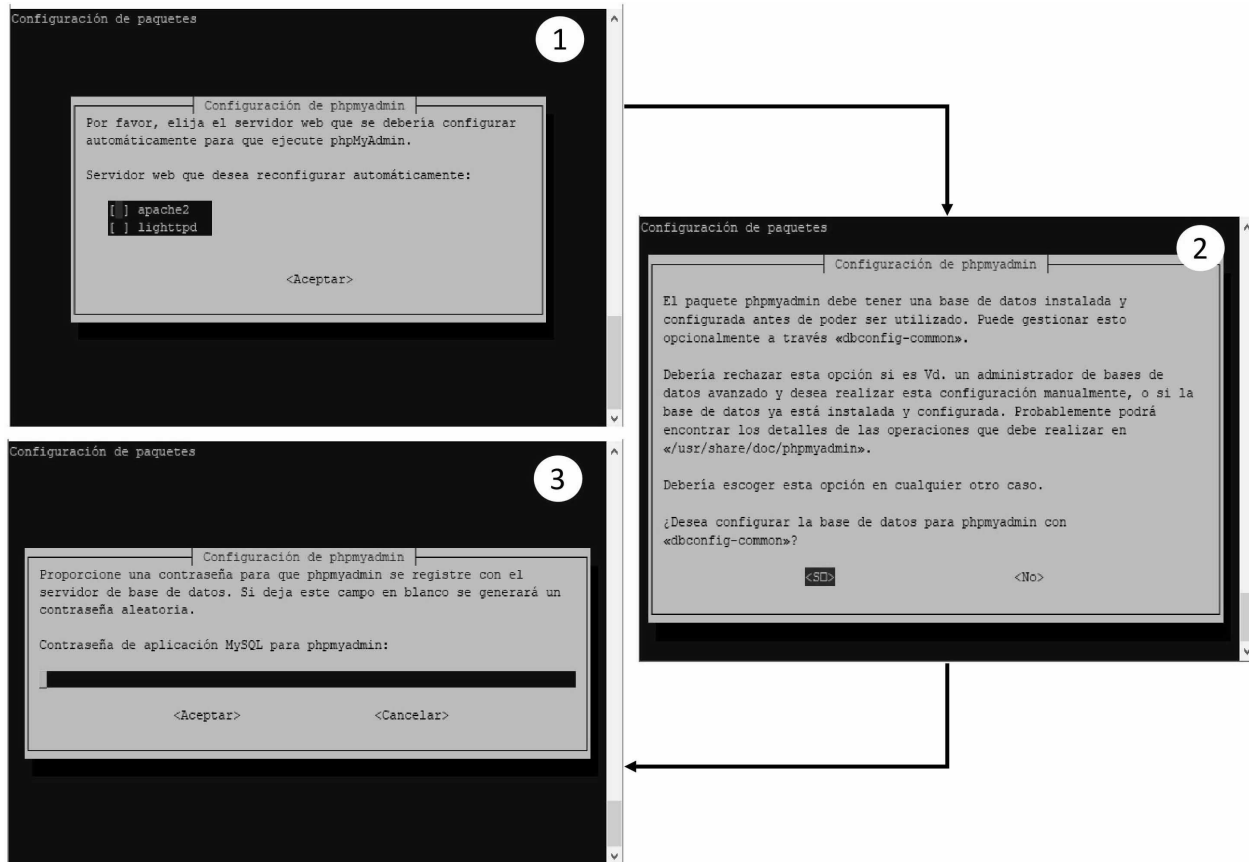


Figura 25. Configuración *phpMyAdmin*

añadiendo la instrucción final:

```
Include /etc/phpmyadmin/apache.conf
```

Para verificar la correcta instalación de *MySQL* y *phpMyAdmin* se escribe la dirección IP en el navegador, seguida de `/phpmyadmin` para obtener un resultado similar al visualizado en la Fig. 26, donde el *usuario* es `phpmyadmin` y la *contraseña* es aquella definida previamente.

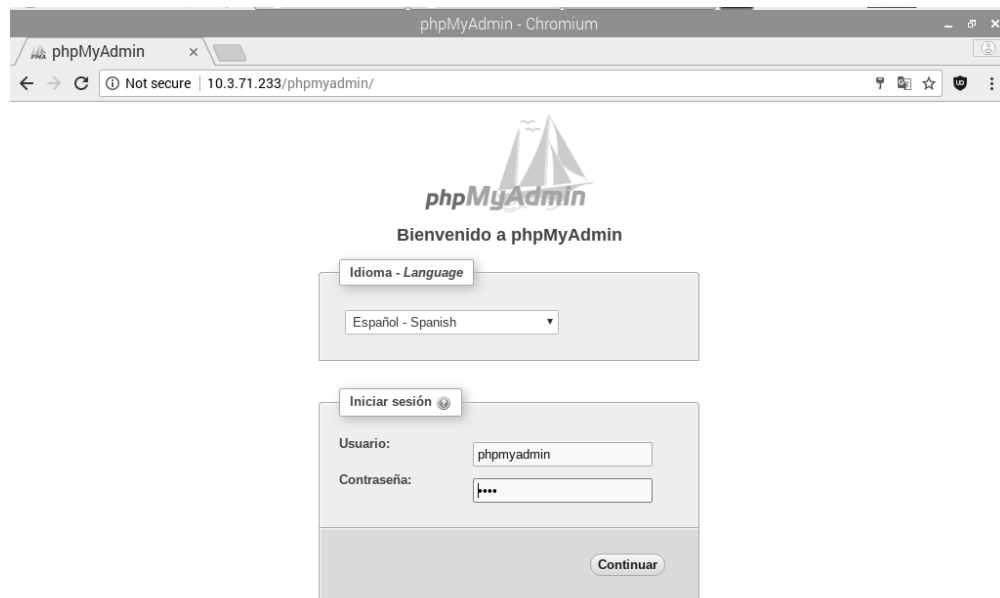


Figura 26. Verificación instalación de *phpMyAdmin*

Creación de base de datos

Para crear una base de datos en *MySQL* se debe iniciar sesión en *phpMyAdmin* desde un navegador y proceder a seguir la secuencia de pasos indicados en la Fig. 27, específicamente: 1) *Nueva* -> 2) *Nombre de la base de datos* -> 3) *Crear*.

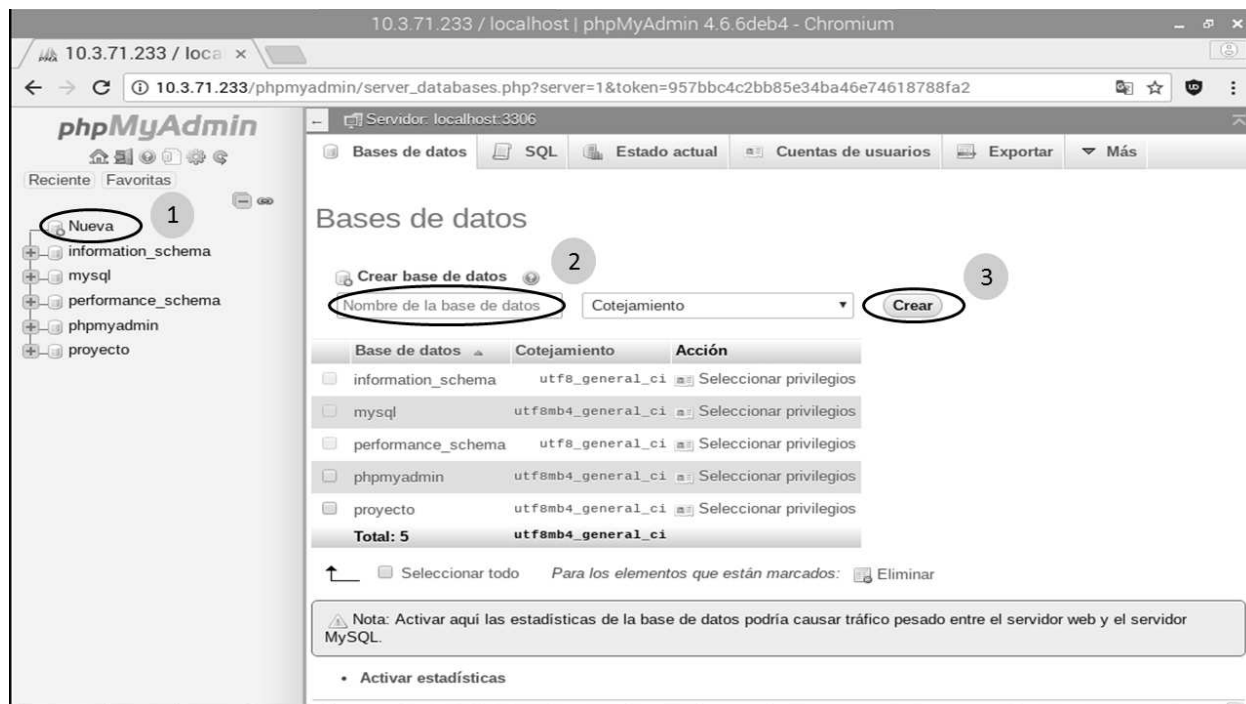


Figura 27. Secuencia de pasos para crear una base de datos

Posteriormente, es posible crear las tablas de la base de datos siguiendo la secuencia de pasos indicados en la Fig. 28, específicamente: 1) *Selección base de datos* -> 2) *Nombre tabla* -> 3) *Selección cantidad columnas* -> 4) *Continuar*.

En el presente trabajo de grado se crearon 8 tablas (*dos* para cada medidor, siendo una para variables en tiempo real y otra para el promedio de 15 minutos de medida), según ilustrado en la Fig. 29. Más aún, para el caso de medición en DC (ver Fig. 30) las tablas se constituyen de 6 columnas: *id*, *voltaje*, *corriente*, *potencia*, *amperios-hora* y *fecha*; mientras que para las mediciones en AC (ver Fig. 31) las tablas poseen 9 columnas: *id*, *voltaje*, *corriente*, *potencia instantanea*,

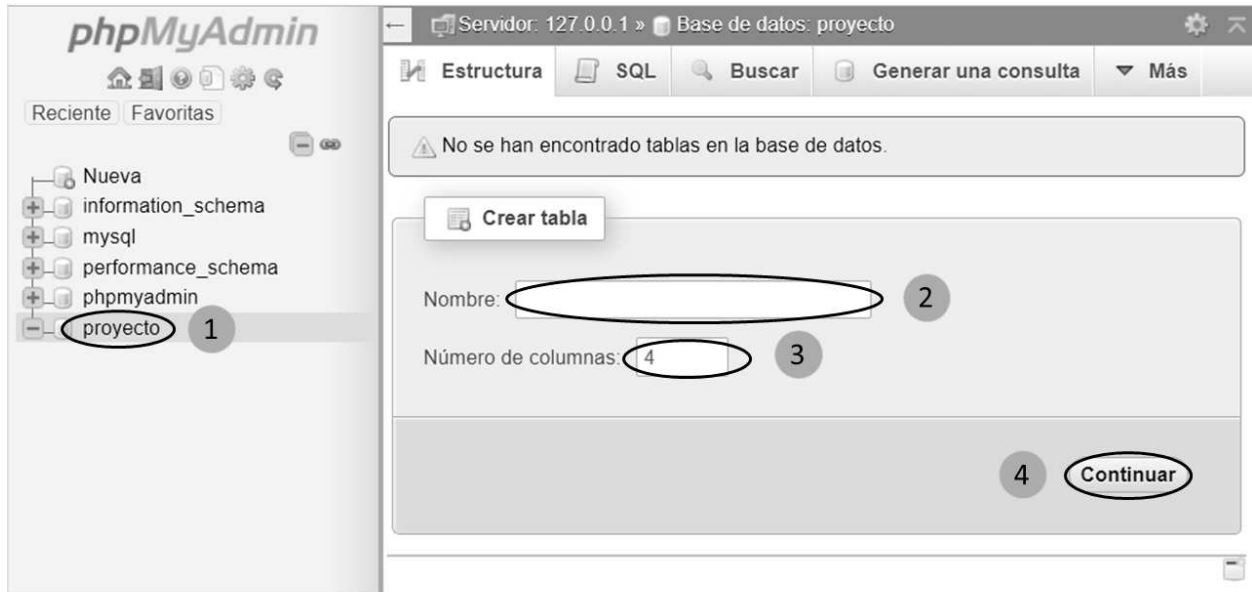


Figura 28. Secuencia de pasos para crear tabla en base de datos

potencia total consumida, frecuencia, ángulo de fase, factor de potencia y fecha.

Estructura	SQL	Buscar	Generar una consulta	Exportar	Importar	Operaciones	Privilegios	Más
bateria	Examinar	Estructura	Buscar	Insertar	Vaciar	Eliminar	9,635 InnoDB utf8mb4_general_ci 496 KB	-
consumo_ac	Examinar	Estructura	Buscar	Insertar	Vaciar	Eliminar	9,635 InnoDB utf8mb4_general_ci 496 KB	-
historial_ac	Examinar	Estructura	Buscar	Insertar	Vaciar	Eliminar	41 InnoDB utf8mb4_general_ci 16 KB	-
historial_bateria	Examinar	Estructura	Buscar	Insertar	Vaciar	Eliminar	41 InnoDB utf8mb4_general_ci 16 KB	-
historial_panel1	Examinar	Estructura	Buscar	Insertar	Vaciar	Eliminar	41 InnoDB utf8mb4_general_ci 16 KB	-
historial_panel2	Examinar	Estructura	Buscar	Insertar	Vaciar	Eliminar	41 InnoDB utf8mb4_general_ci 16 KB	-
panel1	Examinar	Estructura	Buscar	Insertar	Vaciar	Eliminar	9,635 InnoDB utf8mb4_general_ci 448 KB	-
panel2	Examinar	Estructura	Buscar	Insertar	Vaciar	Eliminar	9,635 InnoDB utf8mb4_general_ci 448 KB	-
8 tablas	Número de filas						38,704 InnoDB utf8mb4_general_ci 1.9 MB	0 B

Figura 29. Tablas creadas para sistema fotovoltaico

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	id	voltaje	corriente	potencia	amph	date_input
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10327	28.15	0.38	4.90	13.04	1575306749032
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10328	28.15	0.37	4.82	13.03	1575306759104
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10329	28.15	0.36	4.76	13.03	1575306769162
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10330	28.15	0.36	4.69	13.03	1575306779223
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10331	28.15	0.35	4.62	13.03	1575306789293
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10332	28.15	0.35	4.57	13.02	1575306799356
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10333	28.15	0.34	4.47	13.02	1575306809414
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10334	28.15	0.34	4.43	13.02	1575306819473
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10335	28.15	0.33	4.35	13.02	1575306829548
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10336	28.16	0.33	4.27	13.02	1575306839606
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10337	28.16	0.32	4.22	13.01	1575306849668
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10338	28.16	0.32	4.14	13.01	1575306859739
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10339	28.16	0.31	4.03	13.01	1575306869798
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10340	28.16	0.30	3.97	13.01	1575306879874
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10341	28.16	0.30	3.86	13.00	1575306889931

Figura 30. Tabla tipo para medidor DC

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
					id	voltaje	corriente	potencia	p_total	frecuencia	angulo	factor	date_input
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	26	96.41	1.86	179.86	685.27	59.47	42.24	0.74	1575027775867
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	27	96.78	1.84	179.88	685.38	59.40	27.37	0.89	1575030037794
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	28	98.31	1.81	182.95	685.49	59.40	32.56	0.84	1575032301683
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	29	96.42	1.84	179.74	685.61	59.47	27.78	0.88	1575034608055
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30	97.67	1.82	181.54	685.66	59.40	34.47	0.82	1575035613725
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	31	97.89	1.81	181.64	685.71	59.40	26.54	0.89	1575036619409
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	32	98.11	1.81	182.40	685.76	59.40	34.27	0.83	1575037624825
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	33	98.70	1.81	184.42	685.81	59.47	24.17	0.91	1575038630594
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	34	99.10	1.82	186.28	685.86	59.40	23.31	0.92	1575039636776
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	35	99.31	1.82	187.57	685.92	59.40	22.10	0.93	1575040648835
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	36	99.49	1.83	188.79	685.97	59.40	21.39	0.93	1575041655202
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	37	99.66	1.83	189.65	686.02	59.40	20.16	0.94	1575042661355
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	38	99.96	1.82	190.70	686.08	59.47	19.10	0.94	1575043667959
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	39	100.26	1.82	191.85	686.13	59.47	17.79	0.95	1575044674588
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	40	100.55	1.82	193.16	686.18	59.40	16.52	0.96	1575045684127

Figura 31. Tabla tipo para medidor AC

Apéndice B. Registros históricos de captura

Como complemento a los registros presentados en las Figs. 17 y 18 para mediciones realizadas el día 04 de diciembre de 2019, se visualizan en el presente apartado las capturas correspondientes a los días: 03 de diciembre (Figs. 32-33), 05 de diciembre (Figs. 34-35) y 06 de diciembre de 2019 (Figs. 36-37).

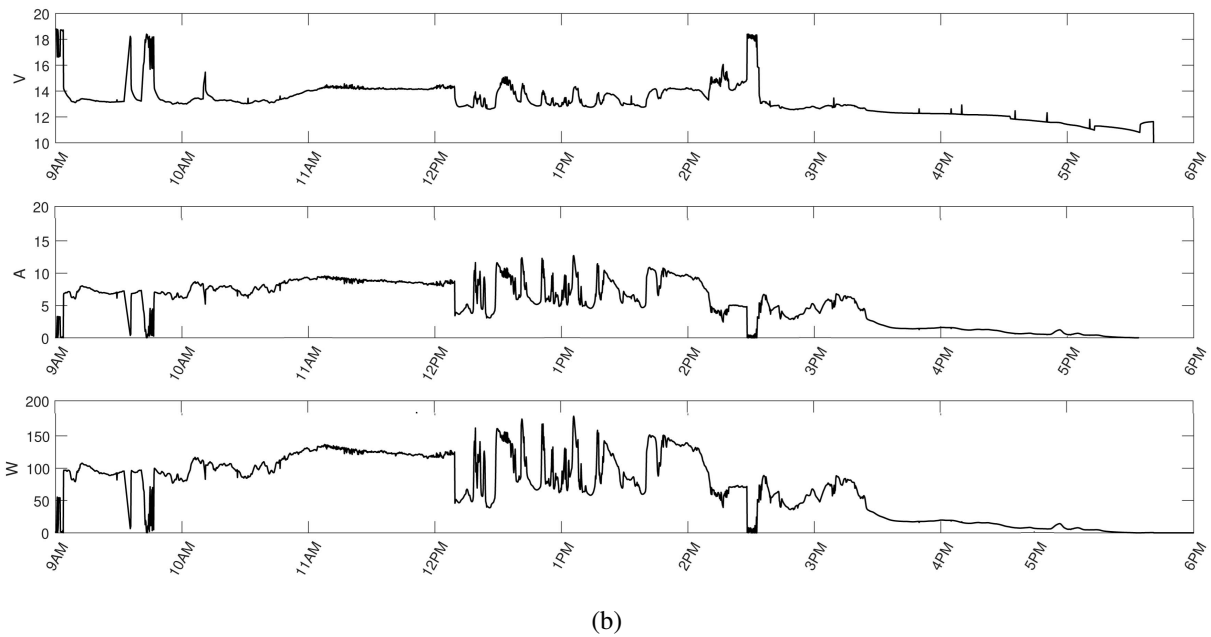
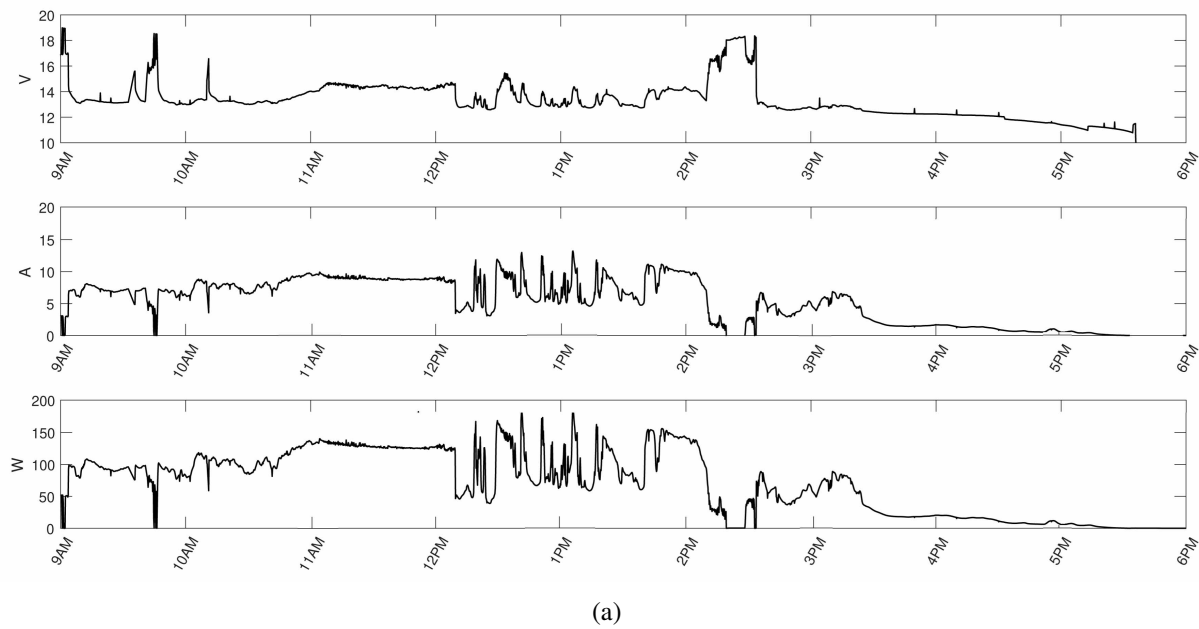
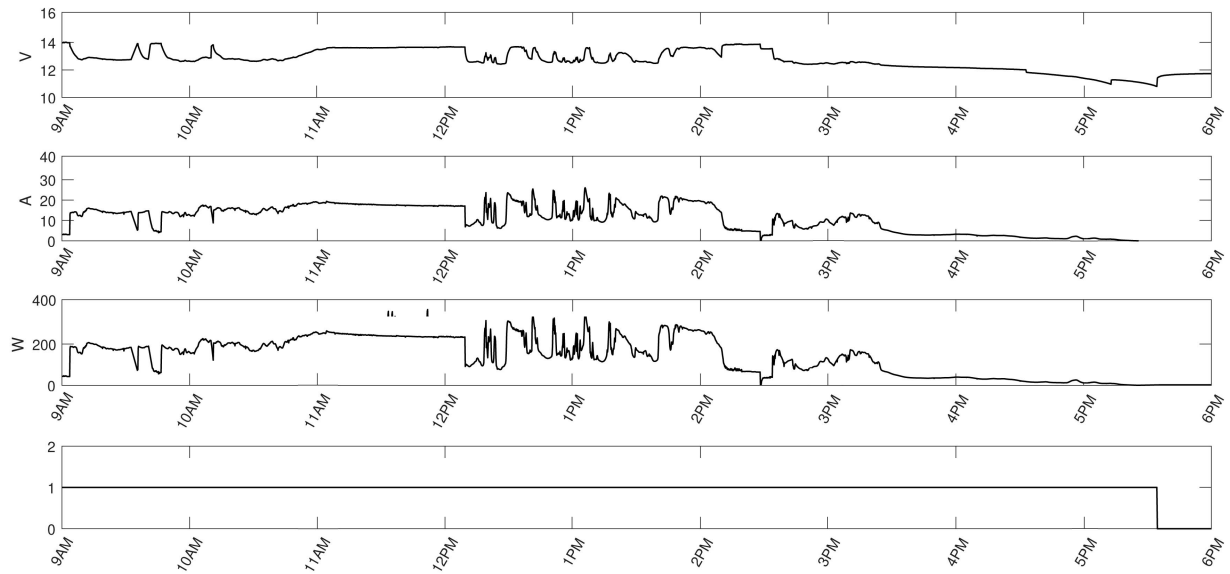
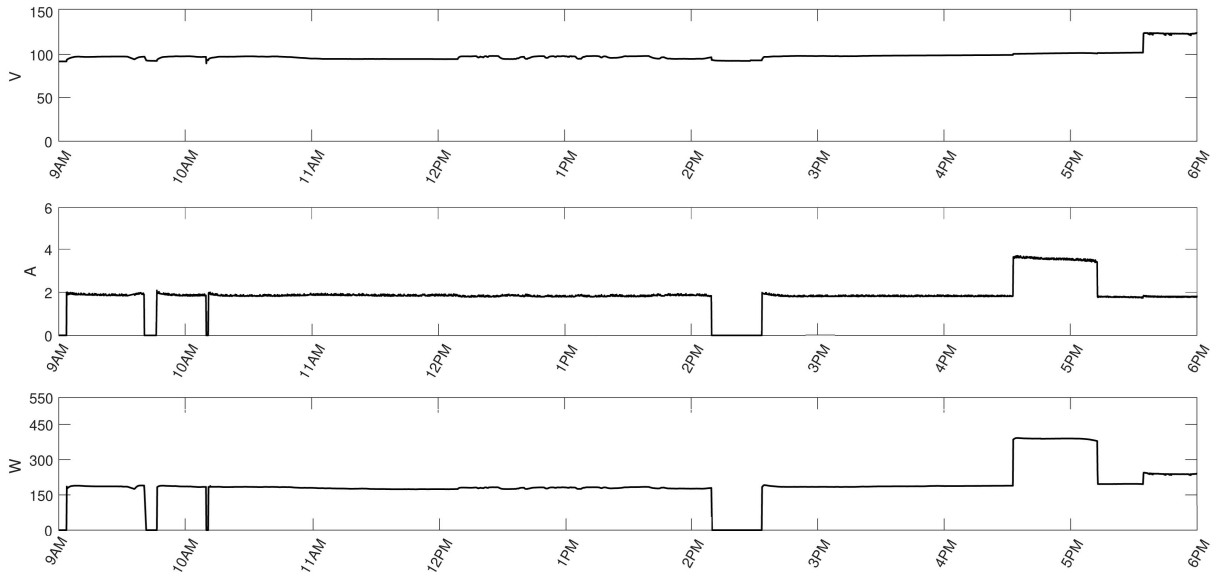


Figura 32. Registro histórico captura diciembre 03 2019: (a) panel 1, (b) panel 2

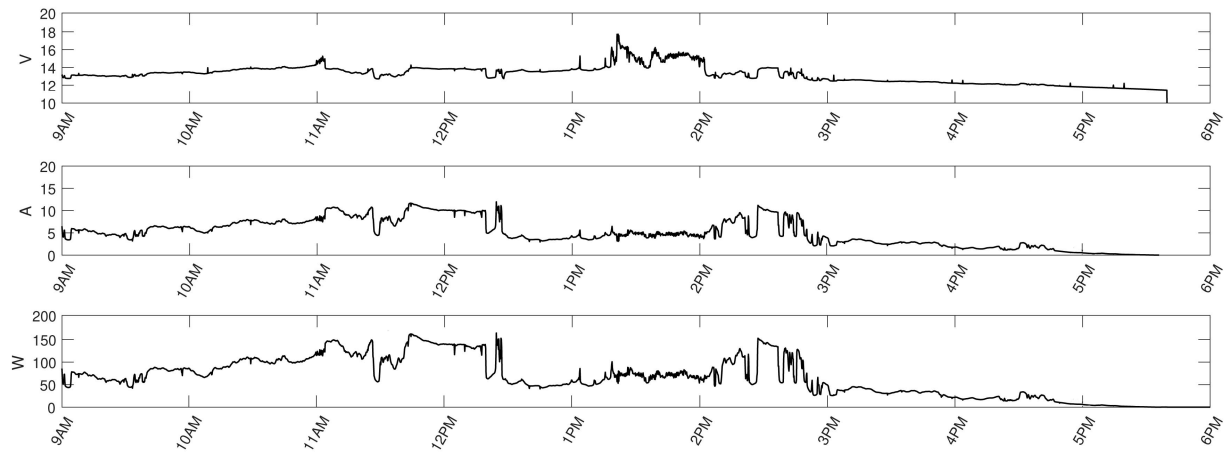


(a)

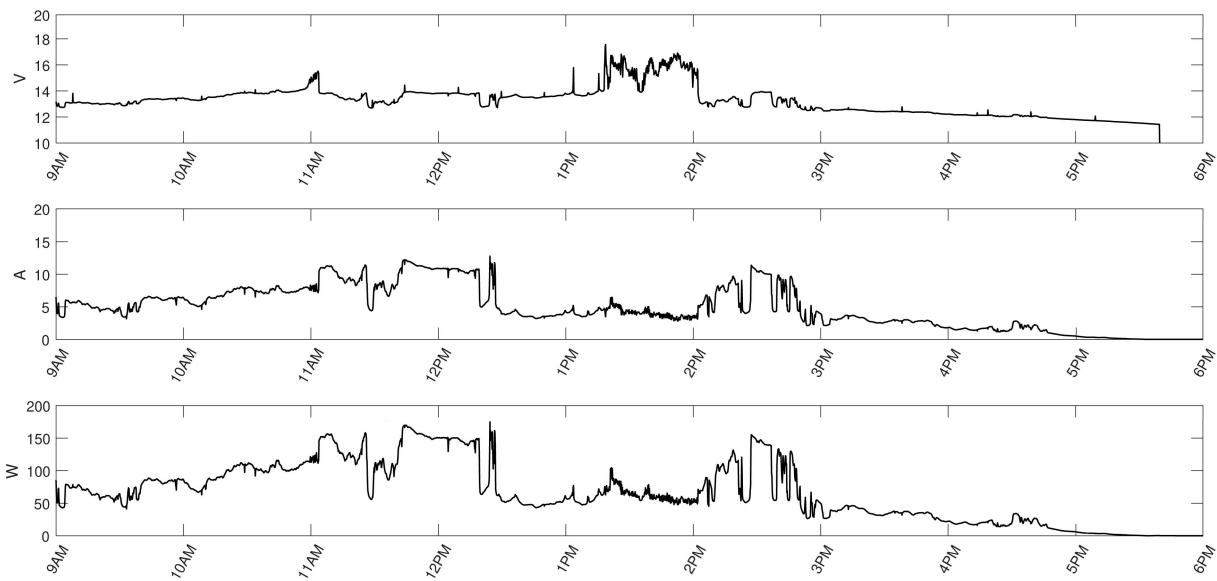


(b)

Figura 33. Registro histórico captura diciembre 03 2019: (a) batería, (b) carga AC

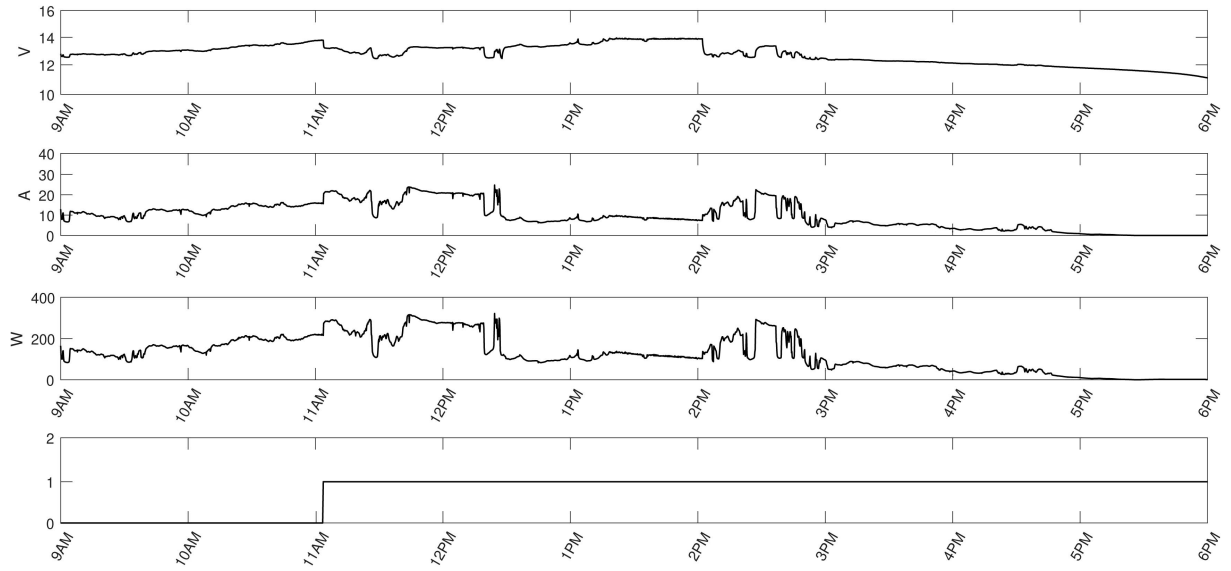


(a)

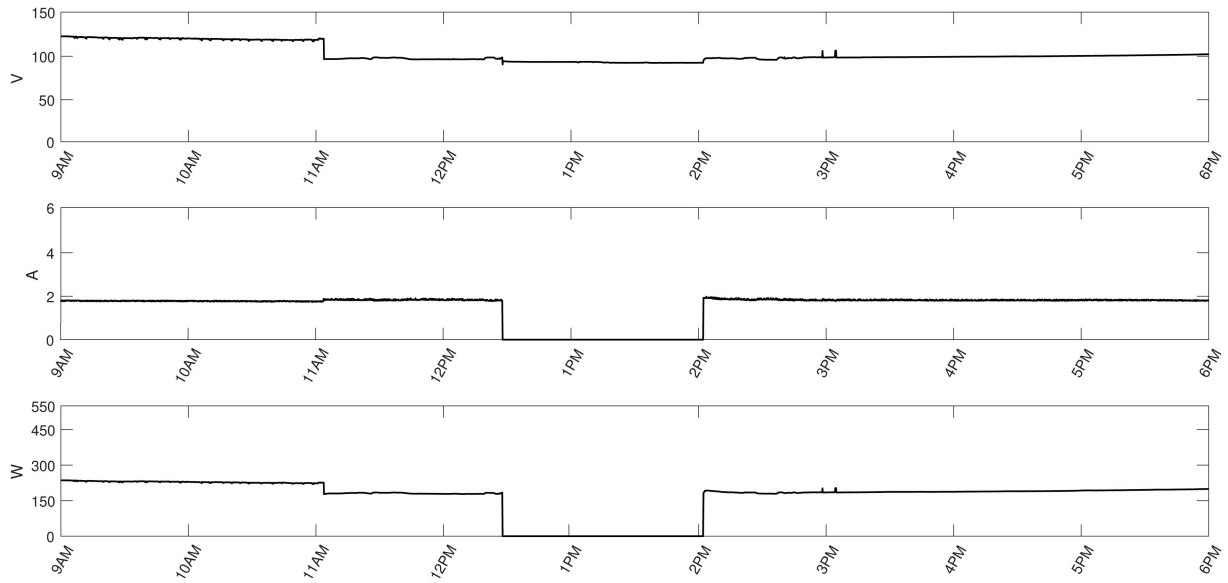


(b)

Figura 34. Registro histórico captura diciembre 05 2019: (a) panel 1, (b) panel 2



(a)



(b)

Figura 35. Registro histórico captura diciembre 05 2019: (a) batería, (b) carga AC

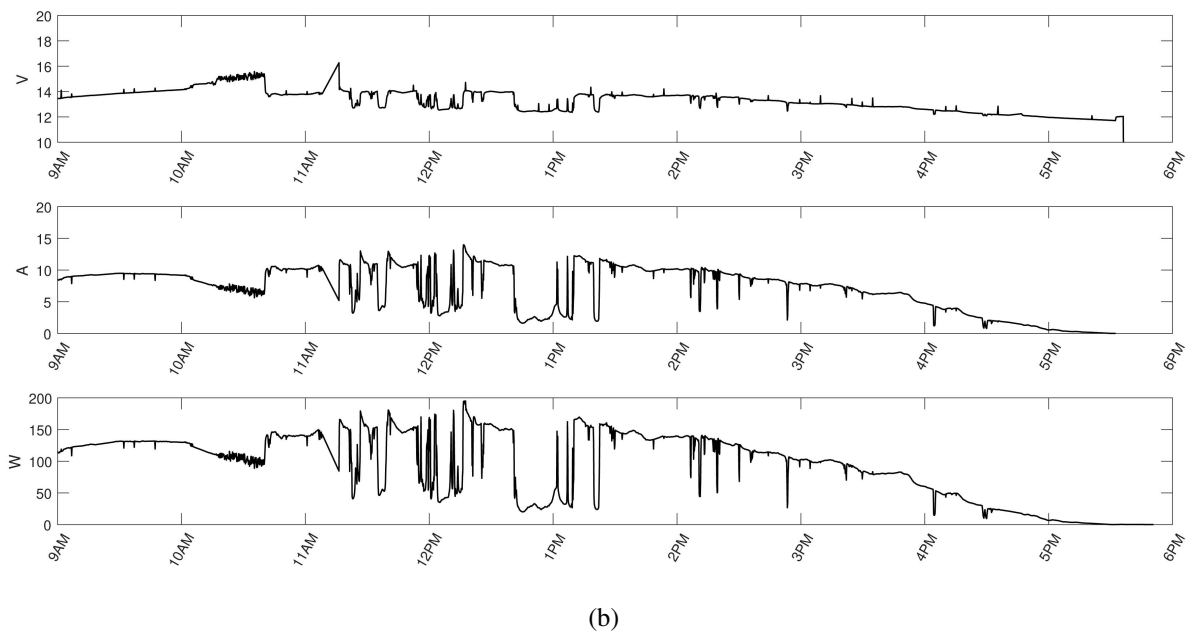
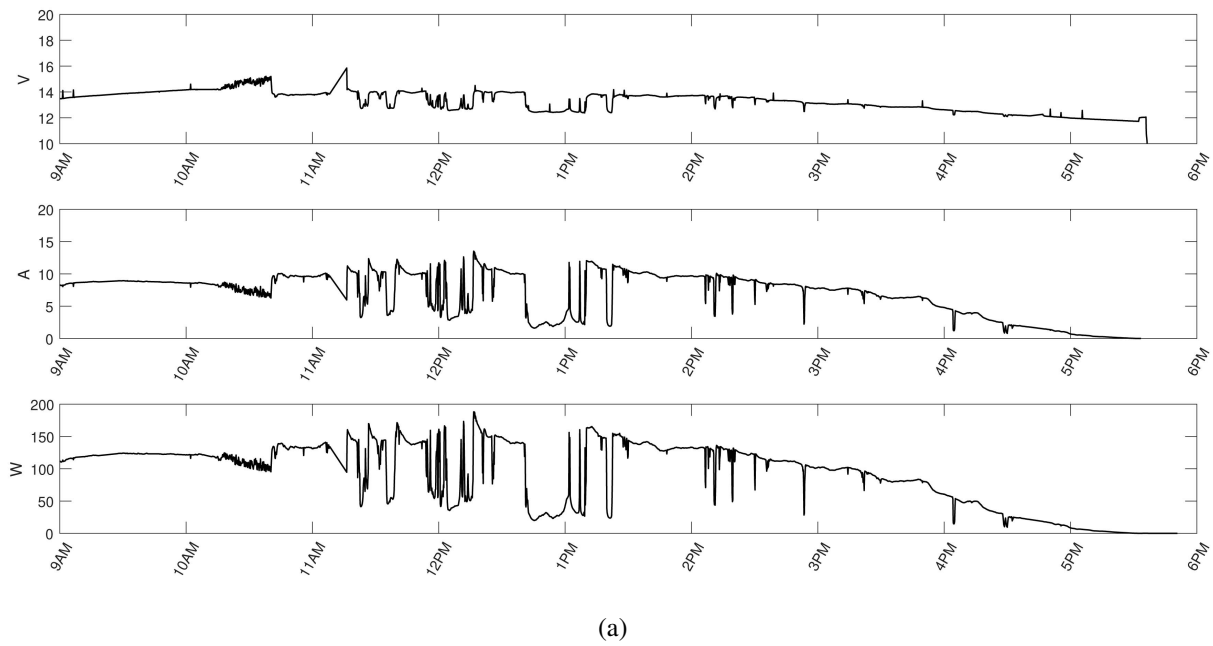
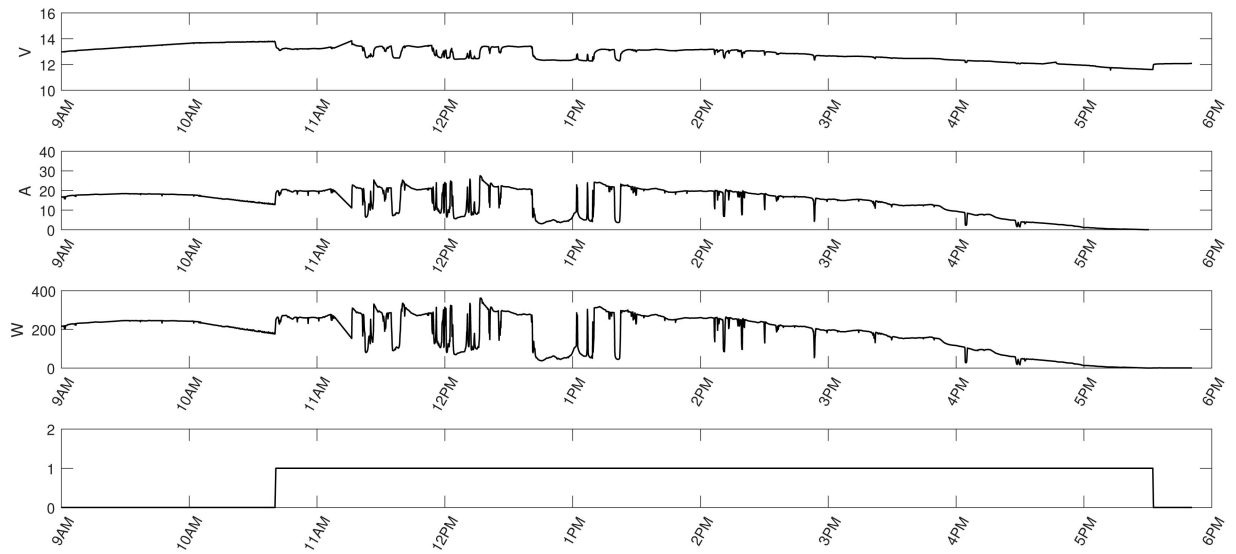
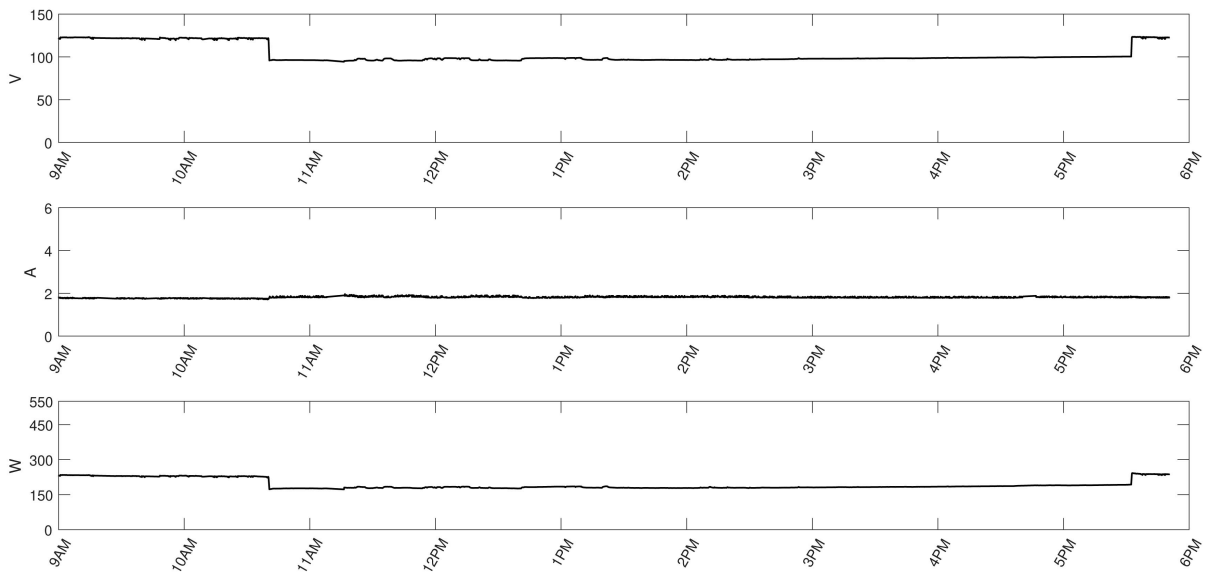


Figura 36. Registro histórico captura diciembre 06 2019: (a) panel 1, (b) panel 2



(a)



(b)

Figura 37. Registro histórico captura diciembre 06 2019: (a) batería, (b) carga AC