

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
CENTRO DE ESTUDIOS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES



MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

***Desarrollo de un sistema de monitoreo y control de la
demanda eléctrica de una microred híbrida aislada***

TESIS
PARA OBTENER EL GRADO:
MAESTRÍA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
EDGAR GONZÁLEZ SAN PEDRO

DIRECTOR DE TESIS:
DR. NICOLÁS VELÁZQUEZ LIMÓN

CO-DIRECTOR DE TESIS:
DR. ADOLFO HERIBERTO RUELAS PUENTE

MEXICALI, B.C., MÉXICO ENERO 2016

Dedicatoria

A mis padres, Homero González Olguín e Isabel San Pedro Macías, que con tanto esfuerzo se han preocupado por educarme y formarme como un hombre de bien.

A mis hermanos Noé e Iván, por siempre apoyarme en mis objetivos profesionales y de vida.

A mis familiares y amigos por compartir momentos difíciles y de alegría en esta etapa de mi vida profesional.

Agradecimientos

Dr. Nicolás Velázquez Limón

Jefe del Centro de Estudios de las Energías Renovables e Investigador del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California: por compartir sus conocimientos, guiarme en mi formación, brindarme su amistad y permitirme pertenecer a tan prestigioso equipo de trabajo.

Dr. Adolfo Ruelas

Profesor de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Autónoma de Baja California, por impulsarme siempre a buscar mi desarrollo profesional.

A mis sinodales

Dr. Rogelio Ramos, Dr. Carlos Villa y Dr. Pedro Rosales, por su tiempo dedicado y observaciones durante la redacción de mi tesis.

A Investigadores y Catedráticos

Por el tiempo y disponibilidad que brindaron en mi formación.

A mis amigos y compañeros del Instituto de Ingeniería

Mydory Nakasima, Luis González, Rodrigo Cota, Martín Elías, Federico Mendoza, Gabriel Pando, Manuel Cervantes Astorga, Francisco Armendáriz.

Al Centro de Estudios de las Energías Renovables y el Instituto de Ingeniería UABC

Por permitirme realizar mis estudios de Maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Por la beca otorgada para realizar mis estudios de Maestría.

Desarrollo de un sistema de monitoreo y control de la demanda eléctrica de una micro red híbrida aislada

Resumen

En este documento se presenta el desarrollo, implementación y validación de un sistema de monitoreo y control de la demanda eléctrica para micro redes aisladas. Que consiste en la construcción de la micro red experimental y su estudio teórico, para determinar las dinámicas operativas e implementar y probar la el sistema de monitoreo y control propuesto.

El estudio teórico se realizó a través del simulador Trnsys en el cual se modelo la micro red experimental para analizar su comportamiento operativo e implementar el algoritmo de estimación de máxima capacidad de generación. A su vez, se detectaron las variables críticas que se deben monitorear para lograr dicha estimación.

En el diseño del sistema de monitoreo de la micro red, se implementó un software de monitoreo y control que cuenta con una base de datos para el registro y procesamiento de información en tiempo real. La construcción del hardware de monitoreo y control consistió en la selección de la instrumentación, componentes para el acondicionamiento de señales, fabricación de circuitos impresos e implementación en hardware de los algoritmos de control. Por último se desarrolló un protocolo de comunicación para enlazar el hardware de medición y control.

El controlador de las viviendas consiste en la implementación de 3 contactos que son monitoreados para controlar la demanda eléctrica a través de la conexión y desconexión de aparatos eléctricos mediante relevadores de estado sólido.

Como resultado se obtienen diferentes circuitos electrónicos capaces de automatizar, monitorear y controlar la demanda de una micro red aislada de forma continua. Para validar el funcionamiento del sistema de monitoreo y control, se realizó un análisis del comportamiento operativo de la micro red, buscando las variables críticas que se necesitan para controlar la demanda, probar el funcionamiento de los controladores provocando perturbaciones en el punto de consigna para ver el tiempo de respuesta con el que se adapta la demanda y una validación del modelo propuesto para el cálculo de la potencia máxima de generación.

La implementación en campo del control de la demanda, validó que los algoritmos implementados en los controladores de las viviendas son adecuados para un suministro continuo de energía. Cuando el sistema de control realiza una desconexión de cargas hasta que se cuente con la energía suficiente como para satisfacer la demanda eléctrica, se incrementa la vida útil de las baterías y de los aparatos eléctricos.

La implementación del sistema de monitoreo y el software en la micro red, permite revisar el funcionamiento general de una micro red en tiempo real, detectar fallas en los micro generadores, generar alarmas, bitácoras de mantenimiento y reportes que ayuden a la administración del sistema de manera local y remota.

Development of a hybrid micro grid monitor and demand control system

Abstract

This document describes the development, implementation and validation of a monitoring and control system for electricity demand in micro grid systems. Consisting of the construction of experimental micro grid and theoretical study to determine the operational dynamics, implement and test the proposed system for monitoring and control.

The theoretical study was performed using Trnsys Simulator, to analyze the micro grid test bed operating performance and implement an algorithm for maximum generating capacity estimation. In turn the critical variables to be monitored to achieve this estimate were detected.

In the design of the micro grid monitor system, was implemented a monitoring and control system that has a database for recording and processing information in real time. The construction of the hardware consisted in selecting instrumentation, components for signal conditioning, circuit board manufacturing and Hardware implementation of the control algorithm. Lastly a communication protocol was developed to link the measurement and control hardware.

The controller consists of housing in the implementation of 3 contacts that are monitored for control electrical demand through the connection and disconnection of loads with solid state relays.

As a result different electronic circuits that automate, monitor and control the demand for micro-grid continuously obtained. To validate the operation of the monitoring and control system, an analysis of the operating behavior of the micro grid was performed, searching the critical variables needed to control demand, test the operation of the drivers causing disturbances in the set point to see response time with demand and a validation of the proposed calculation of the maximum power generation model is adapted.

The field implementation for validated demand control, algorithms in the drivers of homes are suitable for a continuous supply of energy. When the control system performs a load shedding until it has enough energy to meet electricity demand, the life of batteries and electrical appliances increases.

The implementation of the monitoring system and software in the micro grid, allows to review the general functioning of a micro grid in real time, detect faults in the micro generators originate alarms, maintenance logs and reports that help management system locally and remotely.

Índice

Resumen	IV
Abstract	V
Índice	VI
Lista de Figuras	VIII
Lista de tablas	XI
Nomenclatura	XII
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Problemática y justificación	1
1.2 Antecedentes	1
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo general	6
1.3.1 Objetivos específicos	6
1.4 Metodología	6
Capítulo 2 Generalidades	7
2.1 Fundamentos de las micro redes	7
2.1.1 Micro generadores	7
2.1.2 Sistemas de almacenamiento	11
2.1.3 Controladores de carga	13
2.2 Instrumentación	13
2.2.1 Conceptos generales	13
2.2.2 Características dinámicas de los sistemas de medición	15
2.2.3 Acondicionadores de señal	16
2.3 Lazos de control	16
Para entrar en materia de lazos de control, es necesario conocer algunas definiciones: ..	16
Variable controlada y señal de control	16
2.3.1 Lazo abierto	16
2.3.2 Lazo cerrado	16
2.3 Sistemas de monitoreo	16
Capítulo 3 Descripción y estudio teórico de la micro red experimental	18
3.1 Micro red experimental	18
3.1.1 Descripción de la micro red experimental	18
3.1.2 Filosofía de operación de la micro red experimental	19
3.2 Simulación de la micro Red	19
3.2.1 Componentes de la simulación en TRNSYS	19
3.2.2 Comportamiento eléctrico de la micro red	21
3.2.3 Algoritmo de estimación para la potencia de la micro red en tiempo real	23
3.2.4 Simulación de algoritmo de estimación de potencia para la micro red	25
3.2.5 Detección de variables críticas para el control de la demanda eléctrica	25
Capítulo 4 Diseño y construcción del sistema de monitoreo y control para la	
demanda eléctrica	26
4.1 Descripción física y operativa del sistema de monitoreo y control	26
4.1.1 Software de monitoreo y control	26

4.1.2 Selección de instrumentación	27
4.1.3 Dispositivo de monitoreo.....	29
4.1.4 Controlador	31
4.1.5 Sistema de monitoreo y control de la demanda eléctrica	32
4.2 Desarrollo del software de monitoreo y control	33
4.2.1 Levantamiento de requerimientos y casos de uso para el software de monitoreo y control	33
4.2.2 Diseño de la arquitectura de los componentes en el software	35
4.2.3 Correcciones en la construcción del software	36
4.3 Diseño y construcción del sistema de monitoreo.....	36
4.3.1 Acondicionamiento de la señales	36
4.3.2 Circuitos impresos	37
4.5 Diseño y construcción del controlador de la demanda eléctrica.....	39
4.5.1 Sistema de control de la demanda eléctrica.....	39
4.5.3 Algoritmo de control.....	40
4.5.4 Semáforo	42
Capítulo 5 Implementación y estudio experimental	44
5.1 Implementación de sistema de monitoreo y control	44
5.1.1 Instalación del software	44
5.1.2 Construcción virtual de la Micro red experimental.....	44
5.1.3 Dispositivos de monitoreo.....	45
5.1.4 Controlador de la demanda eléctrica.....	46
5.2 Análisis del comportamiento operativo de la micro red	47
5.3 Pruebas del sistema de control de la demanda eléctrica	49
Capítulo 6 Conclusiones	54
6.1 Conclusiones	54
6.2 Trabajos futuros	55
Bibliografía.....	56
Apéndice A Diseño y construcción de la micro red.....	57
Apéndice B Configuración de la micro red	67
Apéndice C Pruebas preliminares del sistema:.....	70

Lista de Figuras

Figura 1, Diagrama de la micro red hibrida en Isla Santa Margarita.....	2
Figura 2, Responsabilidades del controlador central de la micro red	3
Figura 3, Control multi agentes.....	4
Figura 4, Modelo del flujo de energía domestico.....	5
Figura 5, Diagrama de relés para direccionar la energía en la distribución principal de Corriente alterna de SMA.....	5
Figura 6, Micro red Aislada.....	7
Figura 7, Espectro de la radiación solar (modificado de Bureau Veritas Formación, 2010).	8
Figura 8, Arquitectura de un aerogenerador	10
Figura 9, Generador eléctrico	10
Figura 10, Sistemas de almacenamiento de energía.....	11
Figura 11, SMA Sunny Home Manager.....	17
Figura 12, Monitoreo con SMA.....	17
Figura 13, Esquemático de la micro red.....	18
Figura 14, Micro red Experimental Construida.	19
Figura 15, Demanda de energía en una vivienda en Mexicali.....	20
Figura 16, Configuración de simulación de micro red experimental	20
Figura 17, Producción fotovoltaica	21
Figura 18, Recurso eólico y producción del aerogenerador.....	21
Figura 19, Fracción de carga del banco de baterías	22
Figura 20, Sistema de respaldo (Generador eléctrico a biogás).....	22
Figura 21, Comportamiento del Generador eléctrico con una demanda constante de 2 viviendas	23
Figura 22, Algoritmo para la estimación y generación de consigna a viviendas.....	24
Figura 23 Arquitectura de software de monitoreo y control para micro redes	26
Figura 24, Sensor no invasivo de efecto hall	27
Figura 25, Divisor de voltaje	27
Figura 26, Sensor de corriente CT	28
Figura 27, Piranómetro CMP Kipp&Zonen	28
Figura 28, Anemómetro	29
Figura 29, Sensor de temperatura	29
Figura 30, Arduino Mega 2560.....	30
Figura 31, Arduino Wifi Shield	30
Figura 32, Sistema Monitoreo energético en Corriente Alterna.....	30
Figura 33, Relevador de estado sólido para el control de cargas eléctricas.....	31
Figura 34, Tarjeta de comunicación Ethernet shield.....	31
Figura 35, Sensor de corriente alterna Hawkeye 922.....	31
Figura 36, Esquemático de instrumentación	32
Figura 37, Protocolo de comunicación entre los dispositivos y software.	36
Figura 38, Convertidor analógico digital de 16 bits ADS1115	37
Figura 39, Diseño electrónico de sistema de monitoreo solar-eólico	38
Figura 40, Diseño electrónico para sistema de monitoreo de datos climatológicos.....	38
Figura 41, Fabricación de circuitos impresos en CNC.....	38
Figura 42, Lazo de control para la de manda eléctrica en la vivienda	40

Figura 43, Algoritmo de control de cargas.....	41
Figura 44, Algoritmo para aumentar cargas conectadas	41
Figura 45, Algoritmo para disminuir cargas en vivienda	42
Figura 46, Semáforo en las viviendas.....	43
Figura 47, Administración de MRE.....	44
Figura 48, Resumen del estado de la Micro red en el Software	45
Figura 49, Instalación de los dispositivos de monitoreo de voltaje y corriente directa	45
Figura 50, Dispositivo de monitoreo instalado en la micro red.....	46
Figura 51, Monitoreo climatológico	46
Figura 52, Software de control y registro del controlador	47
Figura 53 Controlador instalado en el banco de cargas eléctricas	47
Figura 54, Comportamiento de la micro red 21 de Mayo, 2015	49
Figura 55, Comportamiento del control de la demanda bajo diferentes perturbaciones.	50
Figura 56, Variación de la potencia máxima estimada, consigna y generación con respecto al tiempo.....	51
Figura 57, Ubicación del sitio de instalación.....	57
Figura 58, Vista panorámica del sistema FV en la MR	58
Figura 59, Arreglo 2(vista frontal)	58
Figura 60, Acceso solar anual de la MR	59
Figura 61, Diagrama unifilar de la micro red.....	60
Figura 62, Construcción de cuarto de control.	61
Figura 63, Base para el generador eléctrico a biogás.....	61
Figura 64, Base para sistema de seguimiento en 2 ejes.	62
Figura 65, Construcción de Estructura de sistema de seguimiento en 1 eje.....	62
Figura 66, Construcción de estructura de aerogenerador	63
Figura 67, Instalación de motores para sistema de seguimiento.....	63
Figura 68, Instalación de paneles en sistema de seguimiento en 1 eje.	64
Figura 69, Instalación de Aerogenerador y Estación meteorológica a 16 metros de altura.....	64
Figura 70, Instalación en el cuarto de control de controladores de carga solares, eólico e inversor/gestor de energía.....	65
Figura 71, Instalación de baterías y desconectador en el cuarto de control.....	65
Figura 72, Instalación de cargas eléctricas variables	66
Figura 73, Micro red Experimental Construida.	66
Figura 74, Panel de control del sistema de energía xantrex xw (SCP por sus siglas en ingles)	67
Figura 75, Configuración del banco de baterías.	68
Figura 76, Etapas de carga para el banco de baterías.	68
Figura 77, Configuración de lo arreglos fotovoltaico a la entrada de los controladores de carga.....	69
Figura 78, Configuración de la salida del inversor XW6048.....	69
Figura 79, Configuración del AGS para los tiempos de encendido del generador eléctrico.	69
Figura 80, Controladores de carga activos.....	70

Figura 81, Cargando baterías	70
Figura 82, Cargas eléctricas activadas.	71
Figura 83, Energía de demanda mayor a la generación.	71
Figura 84, Lecturas de la energía a la entrada y salida de los controladores de carga.	71
Figura 85, Energía demandada proveniente del banco de baterías.....	72
Figura 86, Datos registrados del 21 de agosto del 2014.....	72
Figura 87, Aerogenerador en operación con velocidades de viento mayores 18 m/s.	73
Figura 88, Resistencia al rojo vivo derivando la carga, manteniendo la integridad del aerogenerador.	73

Lista de tablas

Tabla 1, Componentes de la Micro Red	18
Tabla 2, Simulación de estimación de potencia en arreglos fotovoltaicos de micro red experimental	25
Tabla 3, Requerimientos del software de monitoreo y control de Micro redes	33
Tabla 4, Casos de uso del SMRE	34
Tabla 5, Estados del semáforo	42
Tabla 6, Combinaciones de las potencia total en vivienda	49
Tabla 7, Comportamiento de la estimación en base a las variaciones de radiación y temperatura del panel	51

Nomenclatura

Rad	Radiación solar [W/m^2]
γ	Coeficiente de temperatura de potencia máxima en panel fotovoltaico [-]
β	Inclinación [Grados]
T	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
T_{amb}	Temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$]
T_{FV}	Temperatura del panel fotovoltaico [$^{\circ}\text{C}$]
η	Eficiencia [-]
P_{Cons}	Punto de consigna [W]
P_{max}	Potencia máxima [W]
SOC	Estado de carga [%]
MPPT	Seguimiento de punto de máxima potencia [-]
SCT	Condiciones de pruebas estándar [-]
NOCT	Condiciones de temperatura de operación nominal de la celda [-]
V_{oc}	Voltaje a circuito abierto [V]
R	Resistencia [Ohms]
Ah	Amperes hora [A]
G_{sc}	Constante solar [W/m^2]

Capítulo 1 Introducción

1.1 Problemática y justificación

En el mundo hay más de 1,200 millones de personas sin acceso a electricidad (Zomers, 2014), la mayoría de ella viven en zonas rurales. México cuenta con un 22% de comunidades rurales y cerca del 10% de esa población (más de 2 millones de mexicanos) no tienen acceso a la red eléctrica nacional, debido a la dificultad para acceder a dichas zonas; las condiciones de los terrenos donde se ubican o la inviabilidad de la inversión para incorporarse a la red centralizada como lo es Comisión Federal de Electricidad (CFE), o por la baja densidad de población (Becerra, 2011). En general, la energía eléctrica asume un papel de suma importancia, facilita el desarrollo socioeconómico de una comunidad y actúa como un agente para el bienestar de la población, es decir, la electrificación puede “ampliar las oportunidades” en el sentido de lo que ella posibilita; el uso de la iluminación residencial y pública prolonga las horas de trabajo, estudio y diversión, el uso de electrodomésticos, telecomunicaciones, electrificación de hospitales o centros de salud, escuelas y empresas para el desarrollo económico (Morante, 2002). Para tener una distribución de energía eléctrica en comunidades rurales, se ha recurrido a la instalación de Micro Redes Aisladas (MRA) o Híbridas Aisladas (MRHA); Sistemas autónomos de micro generadores como paneles fotovoltaicos (FV), aerogeneradores, plantas generadoras de combustible fósil y sistemas de almacenamiento de energía. Si se tiene un sistema eléctrico operando con combustibles fósiles resulta costoso, en términos monetarios y ambientales, pero si agregamos energías renovables como principal fuente de generación eléctrica y pasamos los combustibles fósiles como respaldo, tendremos una micro red eléctrica híbrida sustentable que nos permite tener una viabilidad económica para que comunidades aisladas puedan tener energía eléctrica. El funcionamiento y control de muchas de las fuentes de energía que la integran están basados en electrónica de potencia, con lo que poseen la flexibilidad necesaria para garantizar la operación de todo el sistema como único (Fossati, 2011). Para obtener el mejor aprovechamiento de una micro red y poder asegurar la estabilidad del sistema debemos contar con un sistema capaz de monitorear en tiempo real, tanto generadores, como consumidores. Tomando diferentes acciones de control en base al flujo de comunicación en un algoritmo de control. Cuando la demanda sobrepasa la generación se produce un colapso energético, lo que llevaría a un falta de suministro y su reinicio de operaciones dependerá de la automatización que tenga el sistema o, en su defecto, la capacidad laboral del personal de mantenimiento de operaciones. Para evitar estos problemas, la demanda nunca puede sobrepasar a la capacidad de generación y energía disponible en almacenamiento, por esto resulta crucial un sistema que permita controlar la demanda eléctrica en una micro red híbrida aislada.

1.2 Antecedentes

Durante mucho tiempo se han usado los generadores a diésel para proveer electricidad a lugares remotos o sin acceso a la red (“Off-grid,” 2012), por ejemplo bases militares, sin embargo este tipo de sistemas resultan muy costosos y económicamente no viables para lugares de recursos limitados.

En 2010 se alcanzó en México una capacidad FV instalada cercana a los 30 MW. Se considera que alrededor del 85% corresponden a sistemas FV fuera de red, más de 2,500 localidades con servicio eléctrico básico, cerca de 100,000 sistemas domiciliarios instalados, alrededor de 3,500 clínicas rurales, escuelas y edificios comunales más de 13,000 teléfonos fotovoltaicos. En 2012 se llegó a un potencial de 1100 MW eólicos, sin embargo gran parte de los recursos Solar-Eólico instalado durante el sexenio 2006-2012 fue conectado a la red y en menor parte en las zonas rurales.

Actualmente se encuentran funcionando alrededor de 12 micro redes híbridas (solar-eólico) en México, trabajando de manera aislada;

En 1992 en Xcalak, Quintana roo, inicio operaciones con 234 paneles de 48 W cada uno con un total de 11.2 KW en FV, seis generadores eólicos de 10 kW cada uno (60 kW) y un generador a base de combustible diésel con 125 kW. En 1995, en Villas Carrousel se instalaron 15 sistemas híbridos independientes solar-eólico, cada uno con 150-320 W FV, 500 W eólico y 570 AH en banco de baterías. En 1997 en Puerto de Alcatraz, Isla Santa Margarita (ver Figura 1), Baja California Sur se instaló un sistema híbrido Eólico-Solar-Diésel con una capacidad total de 62.3kW de los cuales son 2.3 KW de FV, 10 KW eólico y 50 KW diésel, para atender a una población de 200 personas aproximadamente. En 1999, en San Juanico, Baja California Sur, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en conjunto con el Gobierno del Estado, la Agencia Internacional para el Desarrollo de los E.U.A (USAID) y la empresa estadounidense APS instalaron un sistema híbrido eólico-fotovoltaico de 117 kW donde se instaló 17 KW de FV, 100 KW eólico, el sistema sirve para dotar de energía a la comunidad de poco más de 100 casas habitación. En el 2000 en Pachuca, Hidalgo, se instaló 2.7 kW FV, 2.5 kW eólico, 6.4 kW con Generador de gasolina y 1500 Ah en banco de baterías. En 2010, Pachuca, Hidalgo, se desarrolló un sistema Micro Híbrido de 2kW independiente de la red eléctrica convencional, integrado por 2 aerogeneradores de 500W, y un sistema fotovoltaico de 1kW, el sistema esta implementado bajo un proyecto de fondos mixtos del CONACYT FOMIX-Hidalgo, el cual fue liderado por el Centro de Estudios de Tecnología Avanzada.

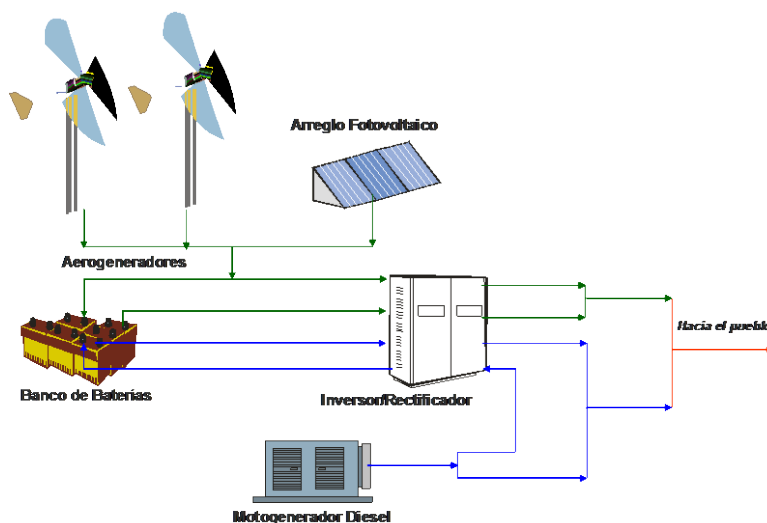


Figura 1, Diagrama de la micro red híbrida en Isla Santa Margarita

En 2010 SMA instaló y puso en operación en la isla de Reao, en la Polinesia Francesa una granja fotovoltaica con 140kWp y un banco de baterías con capacidad de almacenar 1730kWh. Con esto, la dependencia del generador a diésel se redujo en un 80% (Rasheduzzaman et al., 2012). Reduciendo sus emisiones de CO₂ y el costo de producción.

Para obtener eficiencia y sustentabilidad de una micro red se debe tomar en cuenta el monitoreo de sus componentes y definir acciones de control en tiempo real. Para ello se han propuesto diferentes arquitecturas de control:

Controlador central de la micro red

Este tipo de control puede maximizar el valor de la micro red, mediante la optimización de su funcionamiento y reducir al mínimo las facturas del servicio eléctrico[8]. Basados en la literatura, algunos objetivos clave de este tipo de arquitectura de control son definir puntos de consigna (set point en inglés) para la producción de energía en la distribución generada, supervisar la demanda con respecto a la producción, controlar las horas pico de las cargas eléctricas y minimizar las pérdidas, todo ello controlado desde una unidad central. Para lograr sus objetivos el controlador debe dividir responsabilidades (ver Figura 2), de acuerdo al tipo de red. El sistema debe ser monitoreado para tomar acciones de control, para ello debemos tomar en cuenta una buena plataforma de comunicación entre los componentes que forman la micro red (Fuentes de energía, cargas, componentes de eléctricos de potencia).



Figura 2, Responsabilidades del controlador central de la micro red

Sistemas de control basados en multi agentes para micro redes

Este tipo de arquitectura de control es más flexible y descentralizada, en la literatura se concluye que es uno de los más aceptados para micro redes (Colson and Nehrir, 2011; Digra and Pandey, 2013; Logenthiran et al., 2008; Ng and El-Shatshat, 2010; Zhi et al., 2011) el concepto principal es el agente, en el diagrama (ver Figura 3) se observa como se dividen las responsabilidades para mantener el sistema en operación. Cada agente se encarga de una parte del sistema, sin que necesariamente se esté comunicando con el controlador central para tomar acciones de control, esto permite un menor flujo de comunicación y proporciona mayor estabilidad, en caso de que uno falle, los otros agentes estabilizan el sistema. Mientras algunos agentes se encargan de controlar las fuentes de energía distribuidas (Aerogeneradores, generadores a diésel, paneles fotovoltaicos) otros se encargan de revisar la demanda y controlarla.

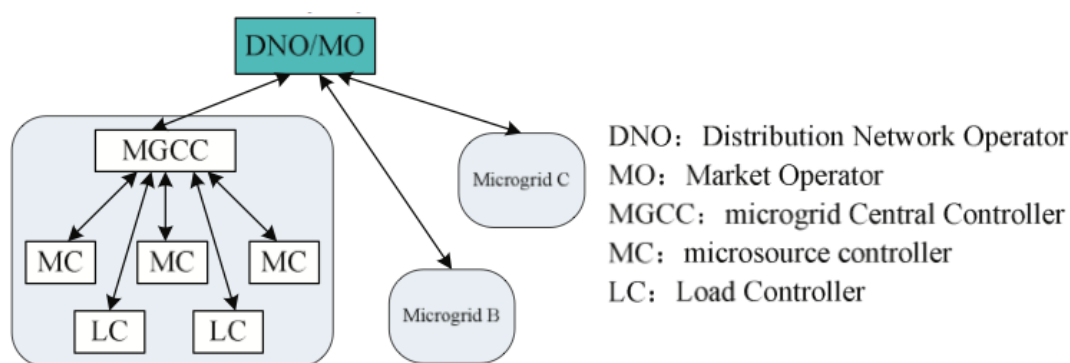


Figura 3, Control multi agentes

Gestión y control de la tecnología en el hogar en una micro red

Esta arquitectura plantea la gestión de la demanda mediante el control de los aparatos eléctricos[14]. Trata de aprovechar al máximo los recursos energéticos, que se pueden cumplir bajo diferentes escenarios; estando conectado a la red y vendiendo energía durante las horas pico y consumiendo de la red en horas no pico o Disminuyendo el confort en base a prioridades. En base a la literatura se propone una metodología de 3 pasos. Predicción, mediante el uso de redes neuronales (inteligencia artificial) tomar los datos de días pasados para poder plantear el escenario de demanda eléctrica para el día en curso. Planeación para el control de los aparatos eléctricos durante el día, en base a la predicción. Control en tiempo real, en la figura 4 podemos observar como un controlador tiene la capacidad para desconectar o conectar los aparatos de consumo y la casa a la red principal, un algoritmo ha sido diseñado en base a la planeación y predicción para tomar acciones de control frente a problemas que se presente con las mínimas pérdidas de confort para los usuarios.

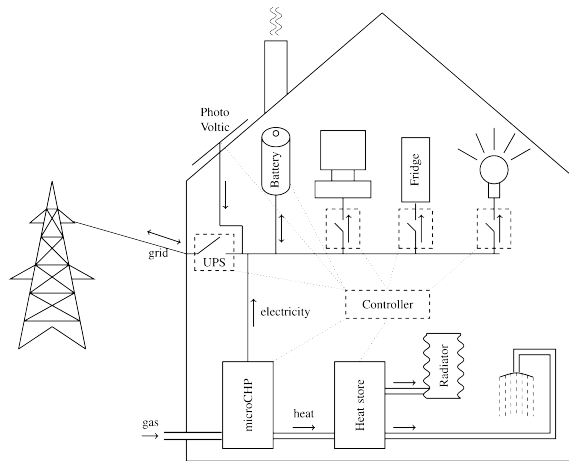


Figura 4, Modelo del flujo de energía doméstico

SMA es una empresa que cuenta con una gama de soluciones para la instalación de MRA, su producto estrella son los Inversores (Sunny boy, Windy boy), los cuales están diseñados para recibir corriente directa, controlar la frecuencia y voltaje de salida en corriente alterna. De acuerdo al tipo de inversor (fotovoltaico, eólico) poseen algoritmos que permiten hacer el uso eficiente de un banco de baterías y de los sistemas de respaldo (generadores). Cuando se requiere ampliar la capacidad se tiene el Multicluster box (ver Figura 5), el cual hace la gestión de los recursos y tener una conexión en paralelo de varios inversores, por ejemplo, si el banco de baterías estuviera vacío y no contáramos con recursos solar o eólico, el Multicluster activará el generador de acuerdo a la demanda, por lo que no gestiona la demanda de acuerdo a la capacidad de generación mediante ER y el almacenamiento, sino que intenta aumentar la capacidad activando generadores auxiliares.

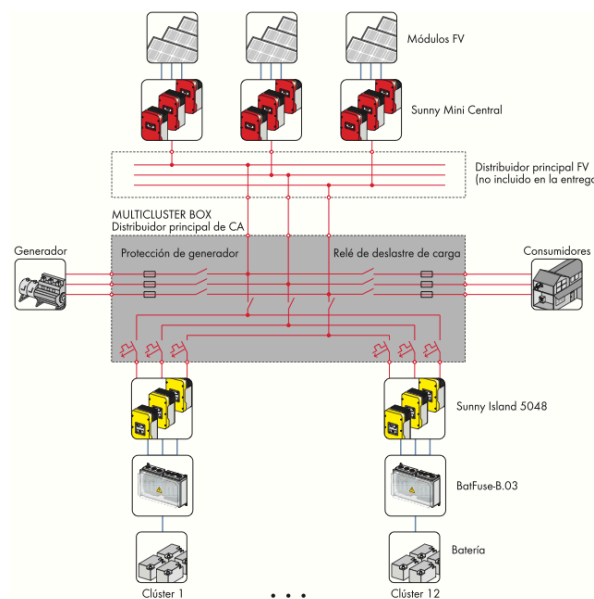


Figura 5, Diagrama de relés para direccionar la energía en la distribución principal de Corriente alterna de SMA

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar, implementar y validar un sistema de monitoreo y control de la demanda eléctrica en una micro red aislada.

1.3.1 Objetivos específicos

- Realizar un estudio del estado del arte en las estrategias de control y gestión de la demanda eléctrica.
- Estudio climatológico y disponibilidad del recurso solar y eólico.
- Simulación del comportamiento operativo en el estado dinámico de una micro red aislada y desarrollo de un algoritmo para la estimación de la generación.
- Especificación, construcción, instrumentación y puesta en marcha de un sistema de monitoreo y control para la demanda eléctrica en una micro red aislada.
- Estudio experimental de las estrategias de control y generación de una propuesta final del sistema de control de la demanda eléctrica.

1.4 Metodología

Para desarrollar el proyecto planteado, se siguió como base la metodología del Centro de Estudios de las Energías Renovables, para desarrollar proyectos de investigación y proyectos tecnológicos (tecnologías limpias). Las diferentes etapas de dicha metodología a tomar se muestran en la siguiente lista:

1. Detección de la problemática, necesidad u oportunidad.
2. Estudio del estado del arte de las estrategias de control en MRA.
3. Análisis teórico mediante la simulación de una MRA.
4. Especificación de componentes, selección de instrumentación y elementos finales de control.
5. Configuración de equipos de la MRA
6. Construcción del sistema de control y afinación de la planta piloto.
7. Instalación de componentes, instrumentación y elementos finales de control.
8. Pruebas experimentales de arranque, estabilización y paro de la planta piloto.
9. Estudio de sensibilidad y corridas de exploración.
10. Estudio experimental.
11. Procesamiento y análisis de la información experimental.
12. Validación de datos teóricos con los experimentales.

tradicionales, cuyo objetivo es proporcionar energía eléctrica a comunidades aisladas con deficiencias en el abastecimiento eléctrico convencional (electrificación de viviendas generalmente aisladas, bombeos, sistemas de señalización vial, sistemas de comunicaciones, etc.).

Una segunda aplicación es para la generación eléctrica en plantas centralizadas que transmiten energía a ciudades o regiones enteras.

La energía solar fotovoltaica aprovecha directamente los fotones de la radiación solar para producir electricidad. En la Figura 7 podemos ver el espectro solar que no es el mismo en todas las partes de la Tierra y ni siquiera es el mismo en un punto determinado ya que, por ejemplo, cambia con las horas del día.

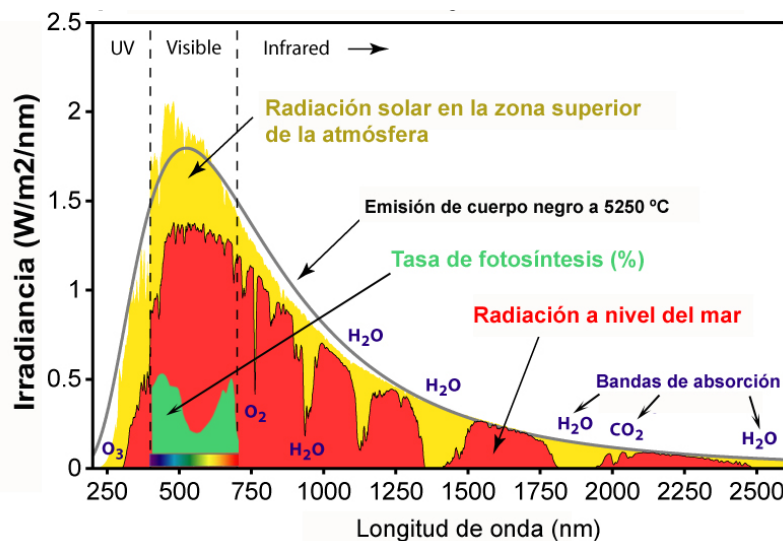


Figura 7, Espectro de la radiación solar (modificado de Bureau Veritas Formación, 2010).

La radiación emitida por el Sol en todas las direcciones es, en parte, interceptada por la Tierra, de forma que puede definirse una magnitud llamada **constante solar**, G_{SC} , como la energía por unidad de tiempo y unidad de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación, para la distancia media entre el Sol y la Tierra. El valor de la constante solar puede estimarse suponiendo el Sol como un cuerpo negro a una temperatura de 5,762 K; se obtiene así un valor de la constante solar de $1,359 \text{ W/m}^2$. La determinación experimental mediante el uso de satélites permite aceptar un valor de $1,353 \text{ W/m}^2$.

A causa de las pérdidas intrínsecas debidas a la propia naturaleza física del efecto de conversión fotovoltaica que tiene lugar en la célula solar, principalmente, y también por las diferentes pérdidas propias de las características constructivas y geométricas del módulo fotovoltaico, aproximadamente el 85% de la energía solar incidente sobre éste se pierde irremisiblemente en forma de calor, porcentaje que puede elevarse hasta el 90% o más en el caso de los módulos de silicio no cristalino o amorfo, de menor eficiencia. Así pues, actualmente y con carácter general puede afirmarse que en el mejor de los casos, únicamente el 15% de la energía solar será transformada en energía eléctrica en el módulo solar. Esto constituye una importante limitación para la utilización de paneles fotovoltaicos, puesto que la superficie que se precisa para

obtener una potencia eléctrica determinada es, como veremos, bastante grande. Aunque debe tenerse en cuenta que también es mucha la superficie disponible para hacerlo posible, por citar espacios hoy no utilizados: tejados de edificios y naves industriales, zonas de secano o desérticas, etc.

Así, en las horas centrales de un día despejado y de atmósfera limpia, y supuesto que el panel solar esté dispuesto con una inclinación y orientación adecuadas, la radiación incidente en el mismo puede ser del orden de 1 kW/m^2 , pero incluso en esas condiciones ideales no se puede esperar obtener más de 150 W de potencia eléctrica neta en un panel de 1 m^2 de superficie, cantidad que se reduce apreciablemente cuando las condiciones no son tan favorables ya que estas cifras que se reducen a las dos terceras partes si se refieren a un día despejado de invierno, debido a que entonces la trayectoria del sol es más corta y se eleva menos sobre el horizonte. En cualquier caso, la presencia de nubes haría disminuir muchísimo más la cantidad de electricidad que el panel podría generar, siendo prácticamente despreciable a efectos prácticos cuando el cielo está densamente cubierto, como por ejemplo los días lluviosos.

Aerogenerador

La energía eólica es la energía cinética del viento. Para el aprovechamiento de dicha energía se han desarrollado a lo largo de la historia diferentes sistemas tecnológicos. Durante siglos, la aplicación clásica de la energía capturada por las máquinas eólicas ha sido la molienda de grano y el bombeo de agua. Sin embargo, en la actualidad, la aplicación más generalizada de la energía contenida en el viento es la producción de electricidad mediante **aerogeneradores**.

El viento es una consecuencia de la radiación solar. Debido, fundamentalmente, a la redondez de la Tierra se originan diferencias de insolación entre distintos puntos del planeta. En los polos, los rayos solares inciden oblicuamente, por lo que calientan menos la superficie de la Tierra.

La velocidad del viento es un vector, por tanto, viene definida por el módulo, la dirección y el sentido. El módulo indica la intensidad del viento y se suele expresar en m/s, km/h o en nudos ($1 \text{ nudo} \approx 0,514 \text{ m/s}$). La dirección y el sentido se expresan en grados sexagesimales, es decir, según un círculo graduado en 360° para indicar de donde proviene el viento. Por ejemplo, si se señala que el viento es del noreste se está especificando que la dirección del viento se encuentra en la recta que une el noreste con el suroeste y que el sentido es de noreste a suroeste.

Aunque es posible inferir la velocidad y, algunas veces, la dirección de los vientos por los cambios de las propiedades de la atmósfera, con frecuencia se necesita obtener medidas más directas del movimiento atmosférico. Los instrumentos cuyos sensores miden el flujo del aire se llaman **anemómetros** y su salida es medida regularmente en m/s.

Los aerogeneradores están integrados por una serie de subsistemas que, de forma general, pueden señalarse los siguientes subsistemas componentes: Subsistema de captación, de transmisión mecánica, de generación eléctrica, de orientación, de regulación y de soporte.

El subsistema de captación se compone por los alabes que cuentan con un diseño aerodinámico con el objetivo de aprovechar al máximo la energía cinética del viento. De aquí la energía captada pasa al subsistema mecánico mediante una transmisión un eje acoplando al generador eléctrico. El sistema de orientación va depender de la capacidad del aerogenerador, cuando son de baja potencia no requieren de un sistema complejo, se puede usar un mecanismo que busque directamente el viento, como las veletas. El sistema de regulación va depender de las características eléctricas requeridas a la salida del sistema.

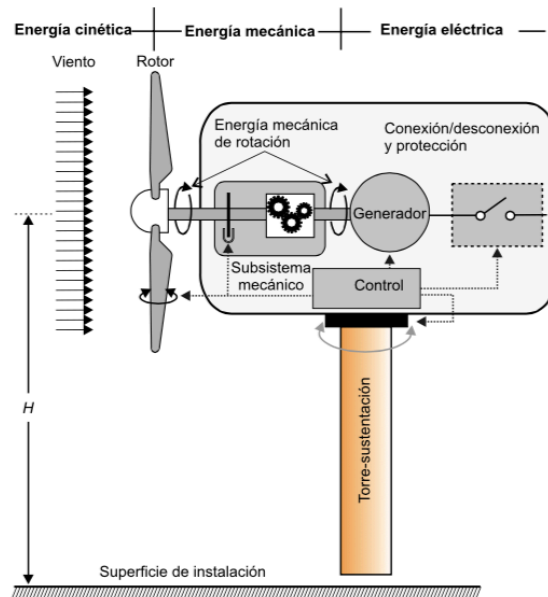


Figura 8, Arquitectura de un aerogenerador

Generador eléctrico a biogás

Conceptualmente, un generador eléctrico es un sistema que convierte la energía mecánica (rotación de un eje a una cierta velocidad y con un cierto par) en energía eléctrica (que se transmite por un circuito eléctrico) (ver Figura 9).

A su vez, un motor eléctrico puede transformar la energía eléctrica en energía mecánica.

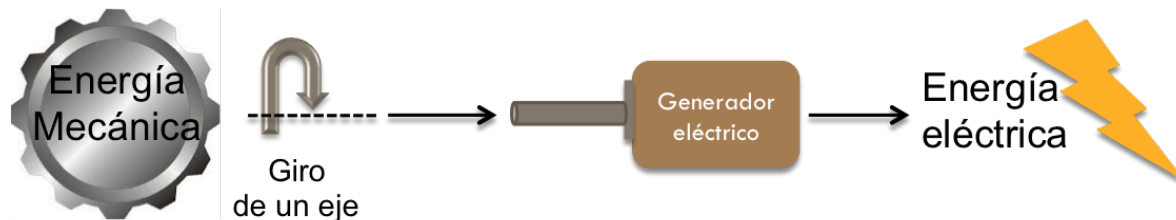


Figura 9, Generador eléctrico

Ambos sistemas son, desde un punto de vista conceptual e incluso práctico, idénticos, por lo que solo se hablará aquí de generadores eléctricos.

El generador eléctrico se basa en la experiencia constatada de que al mover un conductor en el seno de un campo magnético, sobre los electrones libres de estos

materiales actúa una fuerza que los hace moverse, a la que se denomina fuerza electromotriz.

Esta acción mecánica a una combustión derivada de distintos tipos de combustibles, pueden ser fósiles (gasolina, gas, diésel) o biocombustibles como el biogás que se produce a partir de un proceso de degradación de residuos orgánicos en un proceso anaeróbico, formando un gas con concentración entre 60-70 % de metano y 40-30 % de CO₂.

2.1.2 Sistemas de almacenamiento

Uno de los principales problemas en los sistemas eléctricos es la diferencia entre la capacidad de generación y el consumo, lo que implica necesidades de regulación de la potencia de generación que conduce, en definitiva, a menores rendimientos técnicos y económicos.

Esta situación podría mejorarse si se dispusiera de sistemas de acumulación de energía (ver Figura 10), de manera que estos se «cargarán» durante los períodos en que la demanda es inferior a la oferta, y se «descargarán» (cediendo la energía acumulada) en los períodos en que la demanda es superior a la oferta.

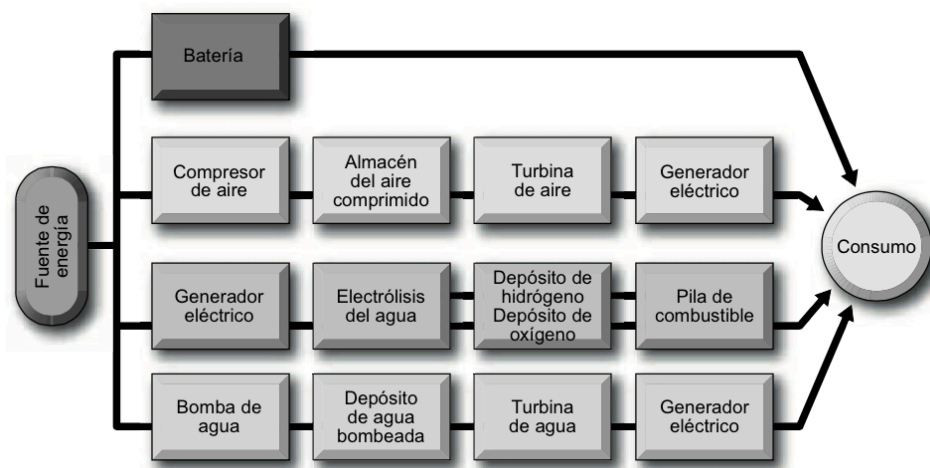


Figura 10, Sistemas de almacenamiento de energía

De este modo, los equipos de generación podrían trabajar en su punto óptimo.

En teoría, los sistemas de acumulación de energía pueden ser:

Almacenamiento en forma de energía mecánica:

- Bombeo hidráulico (energía potencial).
- Aire comprimido (energía potencial).
- Volantes de inercia (energía cinética).

Almacenamiento en forma de energía química:

- Producción de hidrógeno.
- Baterías de acumuladores (electroquímica).
- Entalpías de reacción.

Almacenamiento en forma de energía térmica:

- Calor sensible (incremento de temperatura).
- Calor latente (cambios de estado).

Almacenamiento eléctrico y magnético.

De todos estos sistemas, solo dos pueden emplearse para el almacenamiento de energía a gran escala (a nivel de medianos y grandes sistemas eléctricos), el bombeo de agua y la producción de hidrógeno. A una escala menor (por debajo de pocos miles de kWh), se emplean las baterías acumuladoras, el aire comprimido y los volantes de inercia.

Baterías de ciclo profundo

En las micro redes suele utilizarse bancos de baterías para almacenar la energía, dentro de las tecnologías más populares nos encontramos con las baterías de ciclo profundo que tienen la capacidad de entregar una determinada corriente de manera continua y por varias horas, inclusive días, en casos extremos.

Las baterías de gel de ciclo profundo utilizan un separador de material compuesto de una manta vidrio unido a un polietileno poroso o lámina de cloruro de polivinilo. Las baterías están llenas de un gel tixotrópico de sílice mezclada con ácido sulfúrico. Cuando esto se añade a la batería llena todo el espacio disponible y a continuación, se estabiliza para formar una matriz sólida. Debido a que todos los poros en el separador están llenos no hay canales de oxígeno y en las primeras etapas de su vida la batería se comporta de la misma manera como una tipo inundado con generación de gas y pérdida de agua. Esto hace que el gel se seque, encoja y desarrolle grietas que finalmente forman los canales para que el oxígeno migre a la placa negativa y sea recombinado (González et al., 2012).

Algunas de las ventajas de utilizar las baterías de gel de ciclo profundo son:

- Mejor desempeño que las baterías de ciclo profundo AGM para sistemas que requieren una descarga profunda regular. (es decir, 80% DOD (Depth of Discharge en inglés)).
- Se desempeñan mejor que las baterías de ciclo profundo AGM para aplicaciones de baja potencia.

Características de carga y descarga

Para conocer la capacidad de carga y descarga se tiene una medida conocida como C_{rate} , conocida como capacidad nominal que representa la cantidad de corriente que se puede cargar o descargar una batería en un número determinado de horas. Por ejemplo, si una batería tiene un C20 de 102 Ah, significa que durante un lapso de 20 horas se puede obtener un total de 102 Ah o visto de otra forma, puedo tener una corriente de 5.1 A por hora.

2.1.3 Controladores de carga

Controladores de carga solar

Los controladores de carga solar, son los encargados de ajustar la energía que proviene de un arreglo de paneles fotovoltaicos de acuerdo a las necesidades del sistema. Cuando el sistema cuenta con almacenamiento de energía, el controlador tiene la capacidad de ajustar el voltaje para su carga, por lo regular son de 24 o 48V. Existen distintos tipos de control para la carga de baterías y suministro de energía. Los principales son los tipo shunt y los MPPT (Maximum power point tracking en inglés). Los tipo shunt utilizan un control de dos posiciones, el cual solo permite cortar o suministrar toda la energía que generan los paneles fotovoltaicos. Los MPPT cuentan con algoritmo que permite modificar el punto de generación de acuerdo a la curva I-V de los paneles, de esta forma, si el sistema demanda mucha energía, los controladores buscan entregar la máxima energía posible de acuerdo a la radiación incidente en los paneles, pero si el sistema demanda menos de la que se puede producir, la tecnología MPPT lo mueve a un punto de generación óptimo para esas condiciones.

Controladores de carga eólico

Un controlador de carga eólico es un componente electrónico que regula la generación de salida de un aerogenerador, impide que la carga de las baterías sea demasiado elevada o demasiado baja, y garantiza la máxima duración de las mismas. A diferencia de los controladores solares, los aerogeneradores utilizan la derivación de la carga para el control de energía en la salida del sistema. Cuando se utilizan de esta forma, los equipos controlan una carga de derivación para redirigir el exceso de energía generado en lugar de dejar que pase a la batería. De esta forma se evitan daños en el generador de carga si se diera una situación de sobre marcha por fuertes ráfagas de vientos (arriba de los 18 m/s), que podría producirse si se desconectan repentinamente todas las cargas.

2.2 Instrumentación

2.2.1 Conceptos generales

Campo de medición

El *campo de medida (rango)* es el espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida, de recepción o de transmisión del instrumento. Viene expresado estableciendo los dos valores extremos (Cruz, 2010).

Ejemplo: un manómetro de intervalo de medida 0- 10 bar, un transmisor de presión electrónico de 0-25 bar con señal de salida 4-20 mA c.c. o un instrumento de temperatura de 100-300 °C.

Alcance

El *alcance* es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento. En los ejemplos anteriores es de 10 bar para el manómetro, de 25 bar para el transmisor de presión y de 200 °C para el instrumento de temperatura.

Error

El *error* de la medida es la desviación que presentan las medidas prácticas de una variable de proceso con relación a las medidas teóricas o ideales, como resultado de las imperfecciones de los aparatos y de las variables parásitas que afectan al proceso. Es decir:

Error = Valor leído en el instrumento - Valor ideal de la variable medida

El error absoluto es:

Error absoluto = Valor leído - Valor verdadero

El error relativo representa la calidad de la medida y es:

Error relativo = Error absoluto / Error verdadero

Exactitud

La *exactitud* (*accuracy en inglés*) es la cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al valor verdadero de la magnitud medida.

En otras palabras, es el grado de conformidad de un valor indicado a un valor estándar aceptado o valor ideal, considerando este valor ideal como si fuera el verdadero. El grado de conformidad independiente es la desviación máxima entre la curva de calibración de un instrumento y una curva característica especificada, posicionada de tal modo tal que se reduce al mínimo dicha desviación máxima.

La exactitud define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio durante un período determinado (normalmente 1 año). La exactitud se da en términos de inexactitud, es decir, un instrumento de temperatura de 0-100 °C con temperatura del proceso de 100 °C y que marca 99,98 °C se aproxima al valor real en 0,02 °C, o sea tiene una inexactitud de 0,02 °C.

Precisión

La precisión es la cualidad de un instrumento por la que tiende a dar lecturas muy próximas unas a otras, es decir, es el grado de dispersión de las mismas. Un instrumento puede tener una exactitud pobre, pero una gran precisión. Por ejemplo, un sensor de corriente con un intervalo de medida de 0 a 100 A, puede tener un error de cero considerable marcando 3 A sin corriente en el proceso y diversas lecturas de 10.049, 10.05, 10.051, 7.052 efectuadas a lo largo del tiempo y en las mismas condiciones de operación, para una corriente en el proceso de 7 A. Tendrá un error práctico de 3 A, pero los valores leídos estarán muy próximos entre sí con una muy pequeña dispersión máxima de $10.052 - 10.049 = 0,003$, es decir, el instrumento tendrá una gran precisión.

Por lo tanto, los instrumentos de medida estarán diseñados por los fabricantes para que sean precisos, y como periódicamente se descalibran, deben reajustarse para que sean exactos.

Sensibilidad

La *sensibilidad* es la razón entre el incremento de la señal de medida y el incremento de la variable que lo ocasiona, después de haberse alcanzado el estado de reposo. Por ejemplo, si en un transmisor electrónico de 0-100 A, la corriente pasa de 0.58 a 1.67 A y la señal de salida de 2.54 a 2.56 V c.c., la sensibilidad es el cociente:

$$\frac{\frac{2.56 - 2.54}{5 - 0}}{(1.67 - 0.57)} = \pm 0.363 \text{ V/A}$$

Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida.

Linealidad

Es La aproximación de una curva de calibración a una línea recta especificada, esto aplica cuando los sensores indican que tienen una salida lineal, por ejemplo. Un sensor de temperatura con un salida de 0-5 V, que representa 0-100 °C

2.2.2 Características dinámicas de los sistemas de medición

Sistema de medición de orden cero

Un sensor de orden cero es aquel cuya salida está relacionada con la entrada mediante una ecuación del tipo

$$y(t) = k x(t)$$

donde k queda caracterizado con una constante independientemente de la variación en la entrada. En consecuencia, su error dinámico y retardo son nulos.

Para que esta característica se cumpla es necesario que la relación entrada-salida no incluya elementos que almacenen energía.

Sistema de medición de primer orden

En un sensor de primer orden hay un elemento que almacena energía y otro que la disipa (Pallás, 2005). La relación entre la entrada $x(t)$ y la salida $y(t)$ viene dada por una ecuación diferencial de tipo

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = x(t)$$

La función de transferencia correspondiente es

$$\frac{y(s)}{x(s)} = \frac{K}{ts + 1}$$

donde $k=1/a_0$ es la sensibilidad estática y $t=a_1/a_0$ es la constante del tiempo del sistema. La frecuencia propia w_c viene dada por $1/t$. El sistema queda caracterizado por dos parámetros: k para la respuesta estática y w_c o t para la dinámica.

2.2.3 Acondicionadores de señal

Los acondicionadores de señal, en una perspectiva general, son los elementos de medida que ofrecen, a partir de una señal de salida de un sensor electrónico, una señal apta para ser manipulada en un procesamiento posterior en un equipo o instrumento estándar. Normalmente consiste en circuitos electrónicos que permiten amplificar, filtrar, adaptar impedancia, modular o demodular una señal.

2.3 Lazos de control

Para entrar en materia de lazos de control, es necesario conocer algunas definiciones:

Variable controlada y señal de control

Es la cantidad o condición que se mide y controla. Normalmente esta señal es la salida del sistema. Controlar significa medir el valor de la variable manipulada al sistema para corregir o limitar la desviación del valor medido respecto al deseado (Ogata, 2010).

Planta

Una planta puede ser parte de un equipo, tal vez un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular. A cualquier objeto físico que se desee controlar, se le puede llamar de esta manera (como un dispositivo mecánico, un horno de calefacción).

Sistemas

Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado y no está limitado a sistemas físicos.

2.3.1 Lazo abierto

Los sistemas en los cuales la salida no tiene efecto sobre la acción de control se denominan sistemas de control a lazo abierto. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada.

En cualquier sistema de control de este tipo, la salida no se compara con la entrada de referencia. Así, a cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija; como resultado de ello, la precisión del sistema depende de la calibración, por lo que se aconseja utilizar este tipo de control cuando no existan perturbaciones internas ni externas.

2.3.2 Lazo cerrado

En un sistema de lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la propia señal de salida o en de una ecuación en función de la salida). El termino control de lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.

2.3 Sistemas de monitoreo

En el mercado existen diferentes sistemas que permiten medir las variables que le afectan a un sistema y en algunos casos, aplicar control. En la Figura 11 observamos el

Sunny Home Manager, el cual es capaz de monitorear la generación entregada por un sistema fotovoltaico y el inversor (ver Figura 12). Esto se puede hacer de manera local o remota, por lo regular estos sistemas intentan acercar al usuario con lo que está pasando con el sistema, de esta forma se puede ser consciente de cuanto energía se consume y cuanta se genera.



Figura 11, SMA Sunny Home Manager

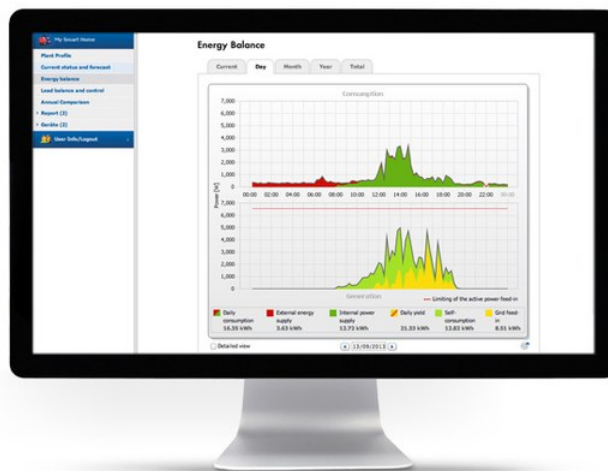


Figura 12, Monitoreo con SMA

Capítulo 3 Descripción y estudio teórico de la micro red experimental

3.1 Micro red experimental

3.1.1 Descripción de la micro red experimental

La MRA experimental está planteada para trabajar con diferentes fuentes de ER, tales como la energía solar fotovoltaica, eólica y biomasa (biogás), además de un banco de baterías como almacenamiento. La Tabla 1 enlista los componentes de la MRA y en la Figura 13 se observa un esquema general de conexiones, que se compone de 3 arreglos de 8 paneles c/u, con sistema de seguimiento en un eje, 2 de ellos con 2.61 kW de potencia pico con paneles SunPower y 1 de 2.4 kW con Solartec. Un sistema de seguimiento en 2 ejes con 1.3 kW de potencia y paneles SunPower. Un aerogenerador horizontal de 3 aspas instalado a 16 metros de altura con una capacidad nominal 0.550 kW de potencia pico a una velocidad de viento de 13 m/s. 5 kVA de generación eléctrica a biogás, 19.58 kWh de almacenamiento en baterías y 12 kW de carga eléctrica variable.

Tabla 1, Componentes de la Micro Red

Cantidad	Componente
20	Paneles fotovoltaicos SunPower de 327 watts
8	Paneles fotovoltaicos Solartec de 300 watts
1	Aerogenerador Apollo de 550 watts
1	Generador eléctrico de biogás TWBG5000
16	Baterías Trojan 31 Gel de 12V con C20@102Ah
8	Cargas eléctricas variables de 1.5 kW c/u
4	Controladores de carga solar
1	Controlador de carga eólico

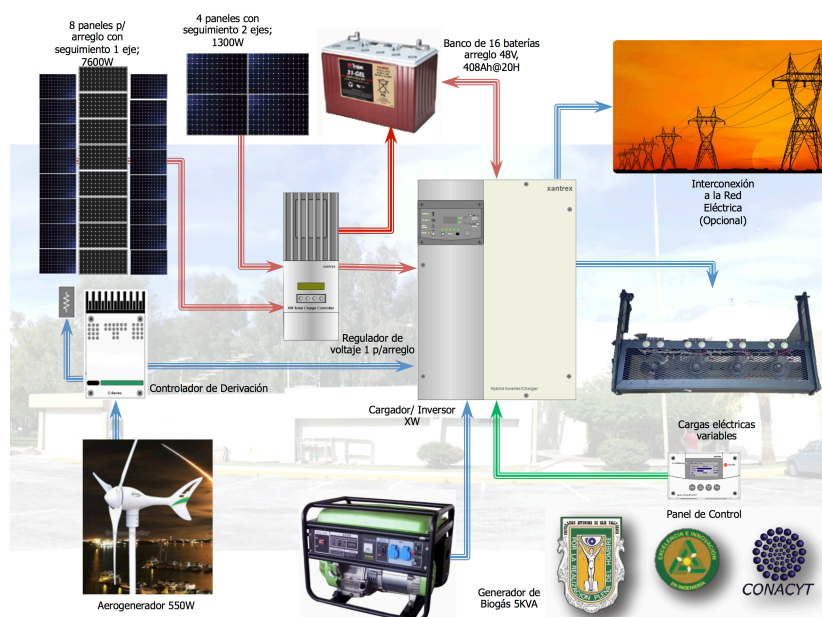


Figura 13, Esquemático de la micro red

La Figura 14 ilustra la micro red experimental construida, dentro de las instalaciones del instituto de ingeniería de la UABC.



Figura 14, Micro red Experimental Construida.

3.1.2 Filosofía de operación de la micro red experimental

La filosofía de operación contempla el uso prioritario de las ER disponibles durante el día, siempre que se pueda abastecer la demanda eléctrica, si se tiene un sobrante de energía las baterías serán cargadas, en el momento en que la demanda sea mayor que la generación eléctrica con ER, se hará uso complementario de la energía almacenada en las baterías. Al caer el sol, normalmente, sólo queda energía eólica capaz de satisfacer hasta 550W de demanda, por lo que las baterías seguirán suministrando energía hasta llegar a un 80% de profundidad de descarga, entonces entrará el generador eléctrico a biogás. Si la demanda es menor a la generación, se cargarán las baterías. Esto se hará hasta que se tengan disponibilidad del recurso solar al entrar el día o se tenga carga completa de las baterías.

3.2 Simulación de la micro Red

3.2.1 Componentes de la simulación en TRNSYS

Para obtener la disponibilidad del recurso solar y eólico de Mexicali, se utilizó el software Meteonorm 6.0 obteniendo un archivo meteorológico típico de Mexicali, en formato TMY2, dicho formato permite ingresar los datos meteorológicos en el software Trnsys 17.

Para definir el perfil de demanda horario anual, se utilizó los datos obtenidos del monitoreo de los consumos eléctricos de una vivienda de interés social en Villa del Roble, Mexicali, BC. El registro de las mediciones se realizó en intervalos de 10

minutos para los principales consumos: refrigerador, aire acondicionado y consumo total de la vivienda (Comisión Estatal de Energía de Baja California). Como muestra representativa de la demanda de energía en una casa. Se consideró los datos que se observan en la Figura 15.

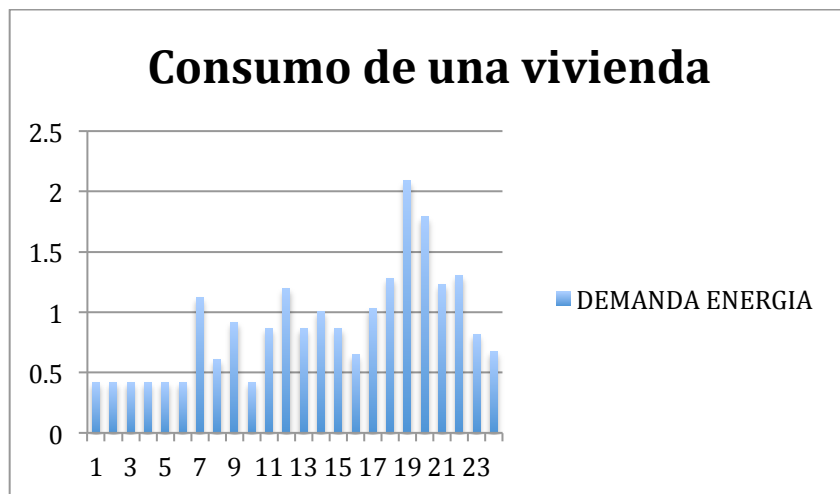


Figura 15, Demanda de energía en una vivienda en Mexicali

La Figura 16, visualiza el proyecto de la simulación en el entorno TRANSYS. Contiene en el lado izquierdo la sección de datos meteorológicos mediante el Type 109, que es un lector de archivos TMY, con el cual se extraen una serie de datos como: radiación solar, temperatura, velocidad y dirección de viento, entre otros. Que alimentan al aerogenerador y a los módulos fotovoltaicos. También se incluyen una serie de Types de diversos equipos de la micro red, así como accesorios para realizar conversiones de variables, ya que estas varían en cada componente.

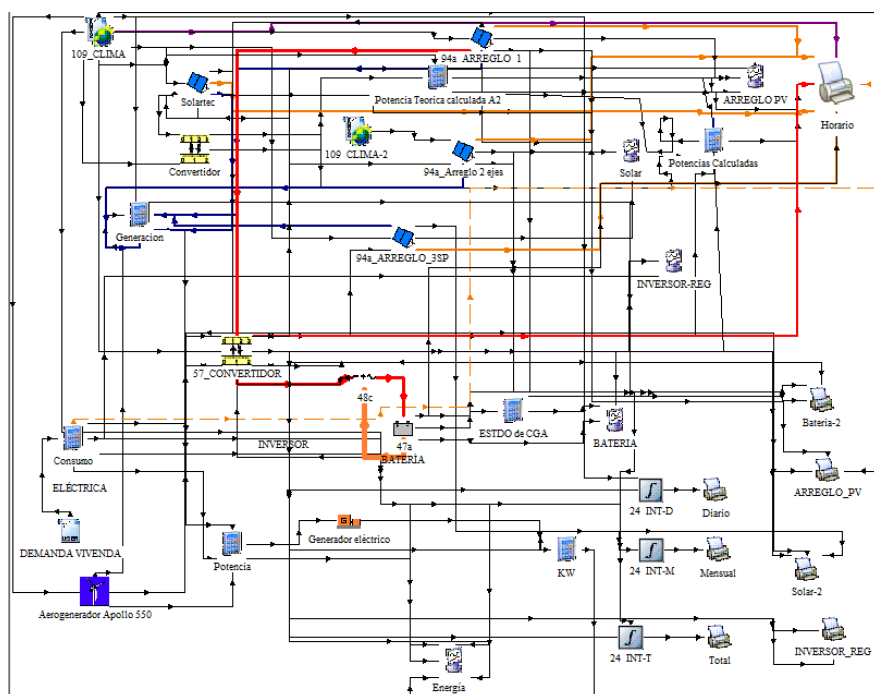


Figura 16, Configuración de simulación de micro red experimental

3.2.2 Comportamiento eléctrico de la micro red

En la Figura 17 se observa una producción eléctrica en los paneles FV entre 3.5 y 5.5 KW. Debido a que el inversor es de 6 kW y son la principal fuente de energía en la micro red, la generación se encuentra en el límite de la salida del inversor.

La producción del aerogenerador (ver Figura 18) es un poco pobre, 300 watts en los picos, debido a que los vientos no alcanzan la velocidad nominal. Sin embargo, logra aportar un poco por las noches, cuando no se cuenta con recurso solar.

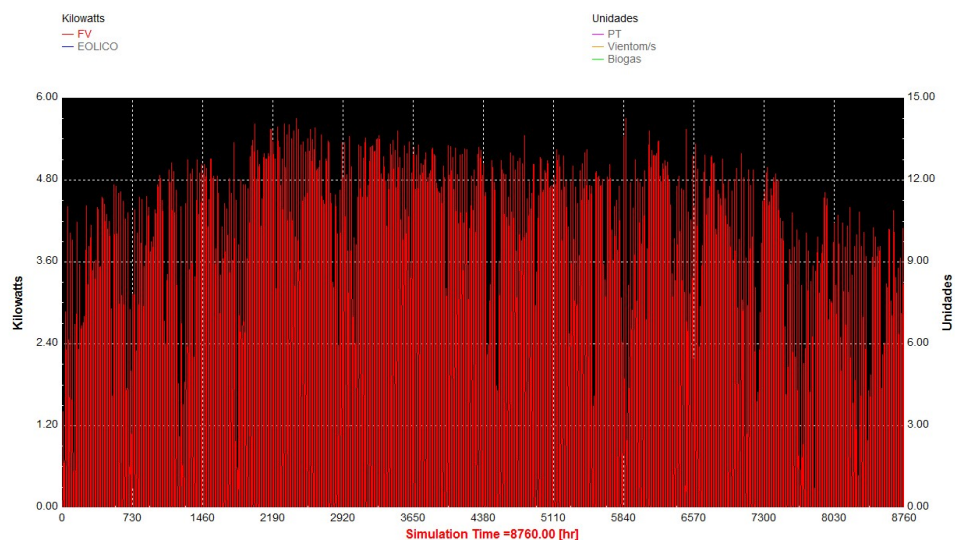


Figura 17, Producción fotovoltaica

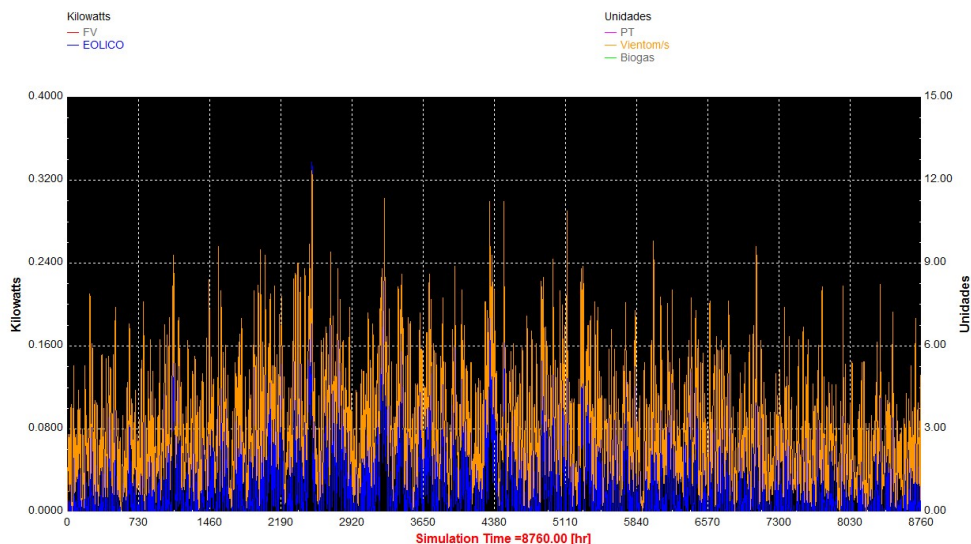


Figura 18, Recurso eólico y producción del aerogenerador

Por ser un sistema aislado, se requiere de un sistema de almacenamiento de energía y/o sistema de respaldo. En el sistema se cuenta con los 2; En Figura 19 se observa el comportamiento de la fracción de carga de las baterías, esta no puede sobrepasar el 80% de descarga, ya que la vida útil se disminuye considerablemente para la demanda de una vivienda. Al final del año vemos que no alcanza a cubrir la demanda esto se

debe a que la disponibilidad del recurso solar en Mexicali. Por ello es necesario que entre el sistema de respaldo (generador eléctrico a biogás), la Figura 20 muestra que esto solo ocurre en Diciembre, por lo que parte de enero también entrará, para poder recuperar su carga total. Y tener 19.58 kWh de energía, como empezó en esta corrida (100% de carga).

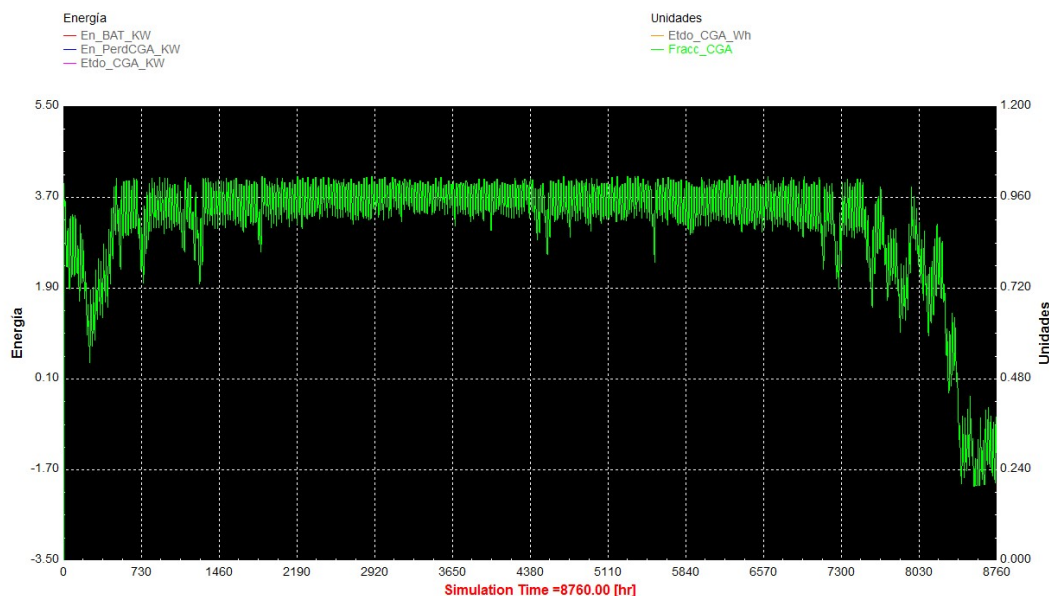


Figura 19, Fracción de carga del banco de baterías

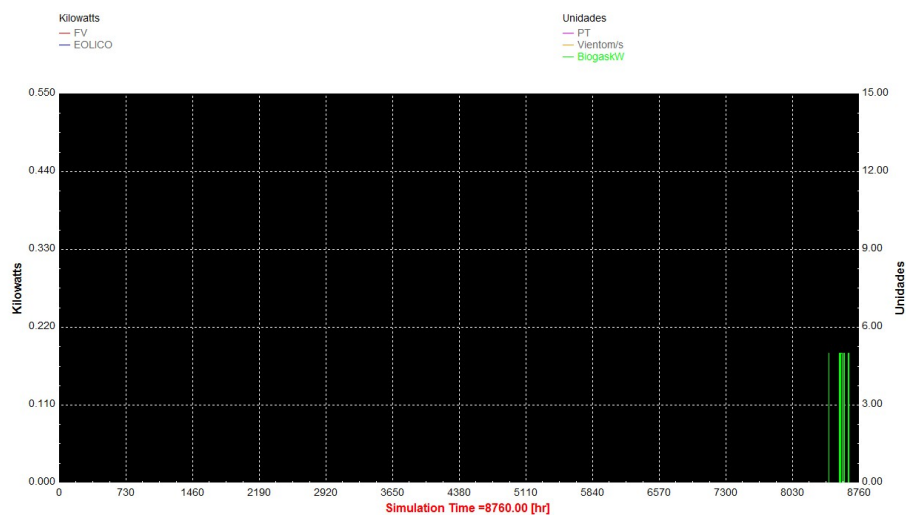


Figura 20, Sistema de respaldo (Generador eléctrico a biogás)

Bajo en un escenario de un consumo para 2 viviendas, el banco de baterías sufriría mucho, pues no tiene la capacidad para cubrir esa demanda, en la Figura 21 se observa como el generador de biogás está en constante actividad para poder cubrir la demanda.

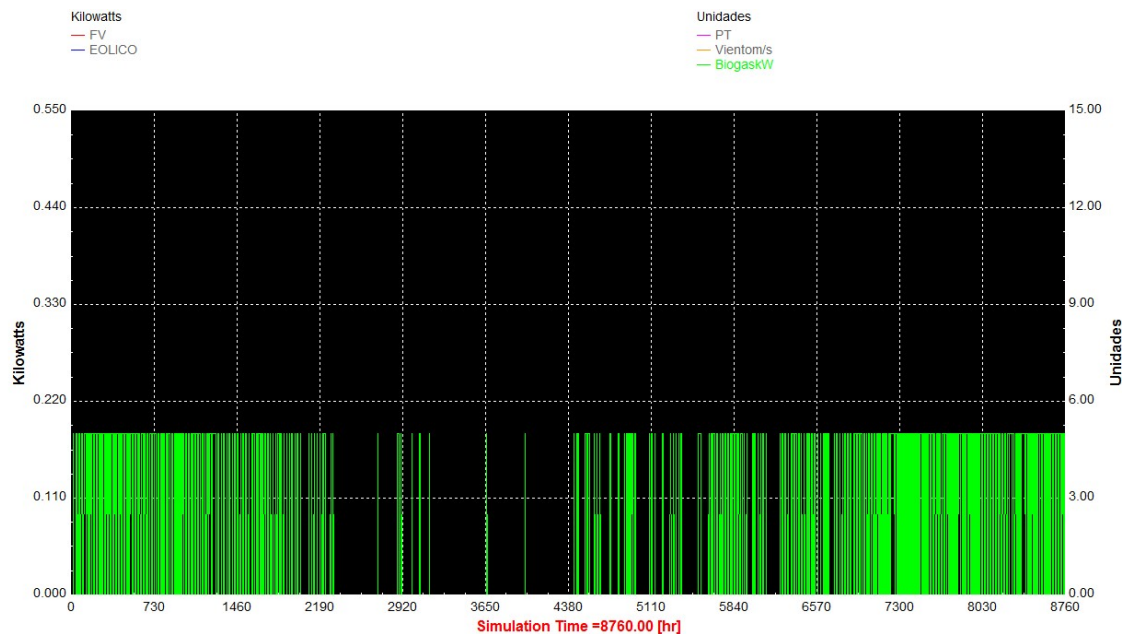


Figura 21, Comportamiento del Generador eléctrico con una demanda constante de 2 viviendas

El sistema tiene la capacidad para operar de manera autónoma con un consumo promedio de una vivienda, también puede cubrir la demanda de hasta 4 casas, pero esto representa costo de operación más elevados. Por otro lado, el objetivo de esta micro red es para fines experimentales, por lo que se considerará el aumento de baterías no es necesario. El regular la carga del generador eléctrico ayuda a disminuir los costos de operación.

3.2.3 Algoritmo de estimación para la potencia de la micro red en tiempo real

A partir del análisis operativo de la micro red, se genera una propuesta para tener una referencia de la capacidad de entrega en potencia de la micro red, tomando en cuenta la disponibilidad de los micro generadores en base al recurso solar y eólico disponible, así como la energía almacenada en baterías. Por ello la potencia de referencia es la sumatoria de la potencias fotovoltaica, eólica y baterías.

Para determinar la capacidad de entrega en fotovoltaico se propuso los siguientes pasos:

1. Medir la radiación en el plano inclinado de los paneles.
2. Medir la temperatura de un panel representativo del arreglo fotovoltaico.
3. Tomar las especificaciones del panel: Área, coeficiente de temperatura, eficiencia, Potencia.
4. Calcular el delta de temperatura del panel:
Delta=Temperatura del panel - 25 (grados Celsius).
5. Calcular la potencia fotovoltaica:
Potencia = (Radiación*Eficiencia*Área)-(Delta*CoefTemp*Potencia panel).

Para determinar la capacidad de baterías se propuso los siguientes pasos:

1. Medir voltaje de baterías.
2. Tomar el parámetro de descarga de batería $C20 = n \text{ AH}$.
3. Calcular la corriente de descarga ideal de baterías.
 $A = n \text{ Amps} / 20 \text{ Horas}$.
4. Calcular la potencia de entrega de baterías:
 $\text{Potencia} = A * \text{Voltaje de baterías}$.

En base a la estimación de generación y la disponible se genera una consigna que es enviada a los controladores de cada vivienda (ver Figura 22). El sistema monitoreo realiza las mediciones climatológicas para obtener los cálculos de la potencia estimada de la MRA en tiempo real (Kroposki et al., 1994; Weber et al., 2014), luego se realizan las mediciones de la generación que puede variar dependiendo de la demanda, ya que son capaces de ajustarse a una generación optima (referencia de la tecnología mppt). Por ello se hace una comparación entre la potencia estimada y la de generación, si la estimada es mayor, podemos aumentar el punto de consigna de las viviendas para que los controladores de carga permitan utilizar más energía dentro de las viviendas. De lo contrario, el sistema verifica si debe disminuir o mantener las cargas eléctricas de cada vivienda.

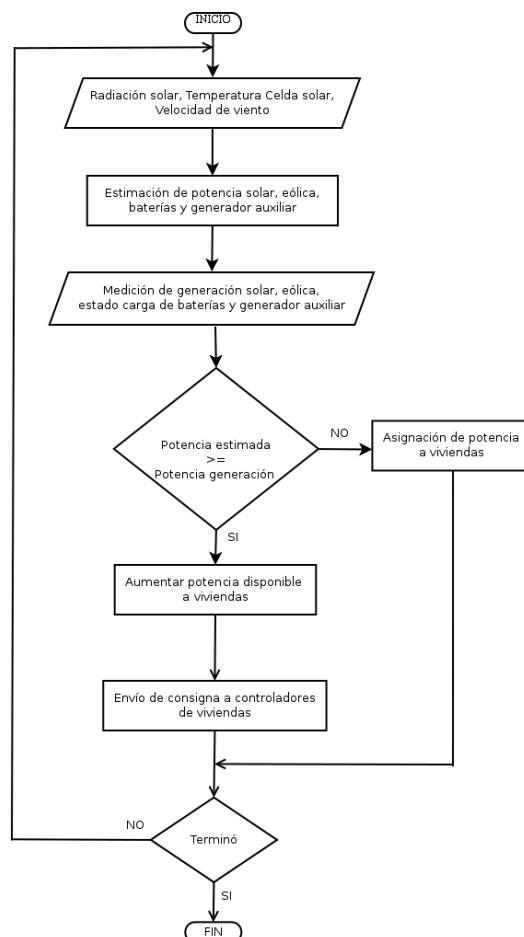


Figura 22, Algoritmo para la estimación y generación de consigna a viviendas

3.2.4 Simulación de algoritmo de estimación de potencia para la micro red

Para simular el algoritmo de potencia se utilizó el type de la calculadora, como datos de entrada se tiene la temperatura del panel, radiación directa sobre el panel, cantidad de paneles por arreglo y las especificaciones de los paneles. Como salida se tiene la potencia estimada por arreglo. La Tabla 2 muestra el error porcentual obtenido de +-9.5, entre la potencia calculada por el simulador TRNSYS y estimada en base al algoritmo propuesto.

Tabla 2, Simulación de estimación de potencia en arreglos fotovoltaicos de micro red experimental

Hora	Radiación (W/m ²)	Temp FV (°C)	A1 (W)	A2 (W)	A3 (W)	EstA1 (W)	EstA2 (W)	EstA3 (W)	Error A1 %	Error A2 %	Error A3 %
9	497	19.61	1307	1213	1307	1355	1255	1355	3.6	3.5	3.6
10	668	26.14	1780	1609	1780	1737	1591	1737	-2.4	-1.1	-2.4
11	778	31.48	2086	1848	2086	1970	1793	1970	-5.6	-3.0	-5.6
12	820	35.13	2210	1932	2210	2045	1855	2045	-7.5	-4.0	-7.5
13	806	37.06	2176	1890	2176	1988	1798	1988	-8.6	-4.8	-8.6
14	732	37.03	1978	1718	1978	1795	1621	1795	-9.3	-5.7	-9.3
15	595	35.09	1605	1404	1605	1457	1315	1457	-9.3	-6.4	-9.3
16	329	29.74	874	780	874	815	737	815	-6.8	-5.5	-6.8

3.2.5 Detección de variables críticas para el control de la demanda eléctrica

En base a la estudio de la simulación se determinó las variables a medir en la micro red para obtener una estimación de generación, la capacidad de generación en tiempo real y el control de la demanda eléctrica en las viviendas:

- Corriente y voltaje de cada arreglo fotovoltaico.
- Corriente y voltaje del aerogenerador.
- Corriente de la energía disipada por la resistencia del aerogenerador.
- Voltaje, corriente y temperatura de las baterías.
- Radiación solar en el plano inclinado de los paneles fotovoltaicos.
- Temperatura de la celda fotovoltaica representativa en cada arreglo fotovoltaico.

Capítulo 4 Diseño y construcción del sistema de monitoreo y control para la demanda eléctrica

4.1 Descripción física y operativa del sistema de monitoreo y control

4.1.1 Software de monitoreo y control

El software de monitoreo y control para micro redes tiene una arquitectura (ver Figura 23) que consta de:

1. Una aplicación web para el despliegue de información en entre el usuario y la información generada a partir de los elementos monitoreados de una MR. Estos pueden ser variables adquiridas de la disponibilidad de las fuentes renovables de energía, el consumo en viviendas, fallas en el sistema, acciones de control, bitácoras de mantenimiento y reportes.
2. Un software de monitoreo que permite el flujo de comunicación entre los dispositivos de monitoreo, la base de datos y la aplicación web mediante una red de área local o en la nube. Siempre que se cuente con acceso a internet este software de monitoreo puede estar en la micro red monitoreada y la aplicación web y base de datos en otro lugar de manera remota.
3. Una base datos en MySQL que permite la gestión de la información recibida por los dispositivos de monitoreo, la generada a partir del procesamiento de los datos de entrada, parámetros, imágenes, hojas de datos y configuración para el funcionamiento del software.
4. Dispositivos de monitoreo que permiten hacer mediciones de acuerdo a las necesidades de micro red, estas pueden variar de acuerdo a los micro generadores, tipo de almacenamiento de energía, sistema de generación auxiliar, datos meteorológicos, consumo de energía por usuario o sección, entre otros.

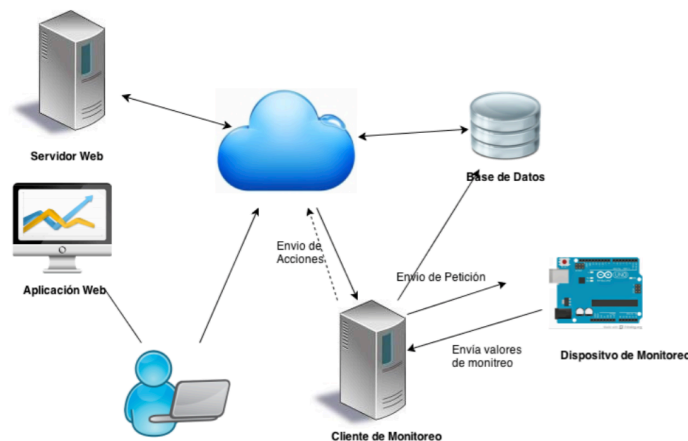


Figura 23 Arquitectura de software de monitoreo y control para micro redes

4.1.2 Selección de instrumentación

En base a la simulación se detectaron que variables son críticas y deben ser monitoreadas para obtener una estimación de la potencia entregada por los micro generadores y aplicar el control de la demanda eléctrica en las viviendas. Esto se tomó en cuenta para seleccionar la instrumentación y que cumplieran en cuanto al rango de medición, precisión y exactitud requeridas.

Sensores de corriente directa

El Sensor de corriente de efecto hall no invasivo (ver Figura 24) tiene revestimiento de aislamiento clase F, con una apertura de 1.25 cm para el paso de cable donde se desea medir la corriente, de requiere de fuente de alimentación de 5 volts(v) y tiene una salida de 2.5-5.0 V para ser interpolado de 0-100 A en corriente directa(CD). Utilizando la Ecuación 1 se determina la corriente que se desea medir. Donde V1 es el voltaje de salida del sensor cuando no hay corriente, V2 es el voltaje de salida de la corriente medida y CF es una constante lineal.

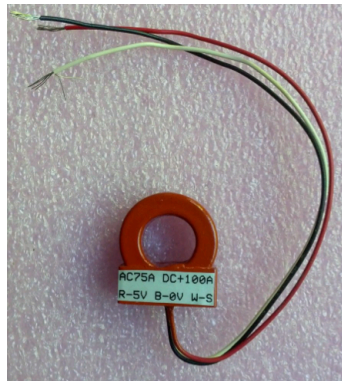


Figura 24, Sensor no invasivo de efecto hall

$$Corriente (A) = \frac{V1 - V2}{CF}$$

Ecuación 1 Corriente en el sensor de efecto hall

Divisor de voltaje

Debido a que el voltaje de medición se encuentra entre 60 y 130 V para los paneles FV y 40-60 V para el aerogenerador, se optó por utilizar la técnica de división de voltaje (ver Figura 25), donde el voltaje de entrada se obtiene de una lectura en paralelo a los paneles FV y aerogenerador. Al pasar por las resistencias 1 y 2 no se afecta su voltaje ya que se lee. Se hace el cálculo para obtener una señal de salida (V2) de 0-5 V a través de la Ecuación 2.

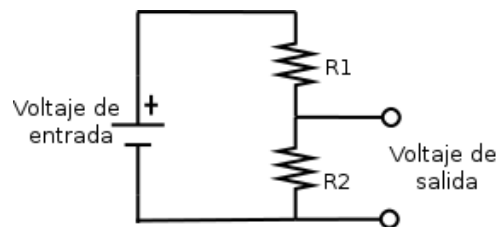


Figura 25, Divisor de voltaje

$$V_{salida} = \frac{R2}{(R1 + R2)} * V_{entrada}$$

Ecuación 2, Voltaje de salida del divisor de voltaje

Sensores de Corriente Alterna

La mediciones de corriente alterna se obtiene a partir de sensores tipo CT (Current transformers en inglés, ver Figura 26) con un rango de 40 A.



Figura 26, Sensor de corriente CT

Sensor de radiación

Para obtener la radiación sobre el plano inclinado de los paneles fotovoltaicos, se utilizó un Piranómetro Kipp&Zonen modelo CMP11 (ver Figura 27) con peso de 600 gramos, para conocer la radiación se utiliza la Ecuación 3, donde E_{Solar} es la radiación solar medida en W/m^2 , U_{emf} es el voltaje de salida en $\mu Volts$ y S es la sensibilidad del piranómetro expresada en $[\mu Volts / W/m^2]$, la cual es proporcionada por el fabricante y para este caso es de 8.83.



Figura 27, Piranómetro CMP Kipp&Zonen

$$E_{Solar} = \frac{U_{emf}}{S}$$

Ecuación 3, Radiación solar

Sensor de velocidad de viento

Las mediciones de la velocidad de viento se realizaron con un anemómetro (ver Figura 28) que requiere de una fuente de alimentación de 7 V a 24 V, entregando así un salida analógica lineal de 0.4 V a 0 m/s hasta 2.0 V a 32.2 m/s. Para obtener la velocidad del viento se aplicó la Ecuación 4 donde Y es la velocidad de viento en m/s, X es la salida analógica del anemómetro en V, X_1 (0.4 V) y X_2 (2.0 V) es el voltaje de salida en sus puntos extremos y Y_1 (0 m/s) y Y_2 (32.2m/s) los puntos extremos de velocidad de viento que puede medir el anemómetro.



Figura 28, Anemómetro

$$Y = \frac{(X - X_1) * (Y_2 - Y_1)}{X_2 - X_1} + Y_1$$

Ecuación 4, Velocidad de viento

Sensor de temperatura

Para tomar mediciones de temperatura en los paneles fotovoltaicos, se utilizó un sensor de temperatura encapsulado en un circuito integrado, modelo LM35 (ver Figura 29), que requiere de una alimentación de 4 V a 20 V, para entregar un voltaje de salida lineal, equivalente 10 mV por cada grado centígrado con un rango de 2 hasta 150 °C.

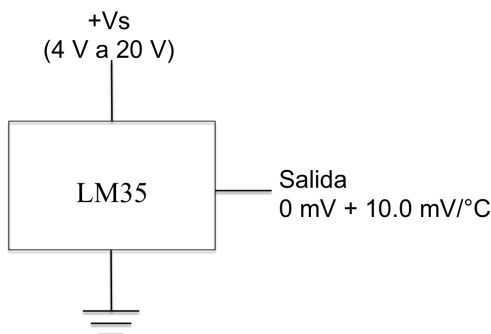


Figura 29, Sensor de temperatura

4.1.3 Dispositivo de monitoreo

Para crear los dispositivos de monitoreo, se utilizaron micro controladores Atmel en la plataforma Arduino, Modelo Mega 2560 (ver Figura 30). Este cuenta con 16

entradas para leer señales analógicas, como las que se obtienen en los sensores, y pasarlas a digitales para su procesamiento.

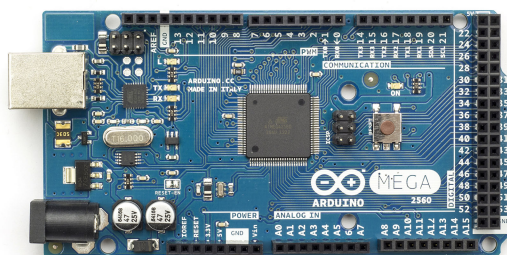


Figura 30, Arduino Mega 2560

Para la comunicación entre los dispositivos de monitoreo y el software, es necesario tener comunicación en una red de área local o de internet, para tal motivo se seleccionó el Arduino wifi shield (ver Figura 31), el cual se integra al Arduino Mega 2560.

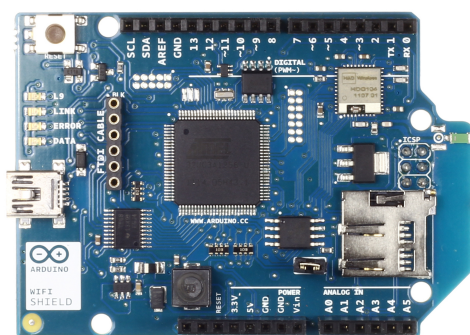


Figura 31, Arduino Wifi Shield

Para el sistema de adquisición de datos de CA se utiliza el Home Energy Monitor (ver Figura 32), modelo ECM-1240 el cual integra el sistema de comunicación de datos en red para esta parte del monitoreo.

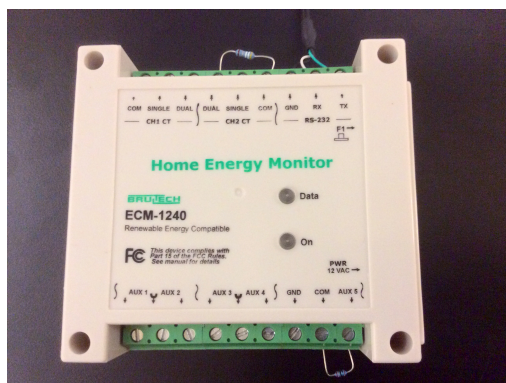


Figura 32, Sistema Monitoreo energético en Corriente Alterna

4.1.4 Controlador

Para realizar acciones de control automático sobre las cargas, se implementaron relevadores de estado sólido (ver Figura 33) en las cargas eléctricas, dando la capacidad de conectar o desconectar cargas de 24-380 VAC, activadas con un señal digital de 0-5 v en CD. La señal de control proviene del software de monitoreo y control a través del controlador de cargas, que como unidad de procesamiento tiene un Micro controlador Atmel 2560. Para la comunicación con el software se utilizó una tarjeta de comunicación Ethernet (ver Figura 34). Para medir la potencia se utiliza un divisor de voltaje y un sensor de corriente alterna (ver Figura 35), con una salida lineal de 0-5 V en CD y un selector de rango de 30, 60 y 90 Amperes.



Figura 33, Relevador de estado sólido para el control de cargas eléctricas

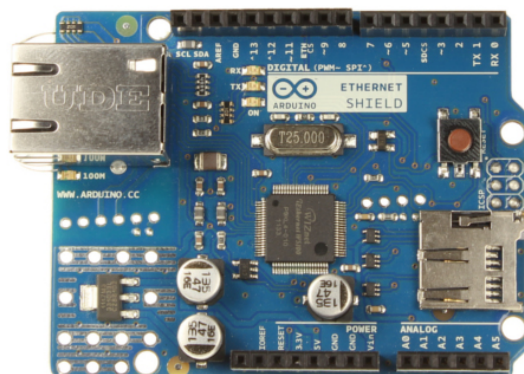


Figura 34, Tarjeta de comunicación Ethernet shield



Figura 35, Sensor de corriente alterna Hawkeye 922

4.1.5 Sistema de monitoreo y control de la demanda eléctrica

El sistema de monitoreo y control de la demanda que se ilustra en la Figura 36 contempla el control de las cargas eléctricas a través de relevadores de estado sólido en la salida del inversor y las mediciones que son enviadas al software de monitoreo:

Generadores:

- Se mide voltaje y corriente en CD utilizando el divisor de voltaje y el sensor de corriente de efecto hall.
- Se calcula la potencia y la cantidad de energía generada.
- En el caso del generador eléctrico a biogás se miden los 2 puntos anteriores en CA.
- Medición de condiciones climáticas para estimar la capacidad de generación en el plano de los paneles del arreglo 2:
Radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa, temperatura de celda fotovoltaica.

Baterías:

- Se mide voltaje, corriente en CD y temperatura utilizando el divisor de voltaje, sensor de corriente no invasivo y un CI LM35.
- Se calcula la cantidad de energía almacenada.

Consumo:

- Se mide voltaje y corriente en CA con divisor de voltaje y sensor de corriente analógico hawkeye 922.
- Se mide potencia real y cantidad de energía.

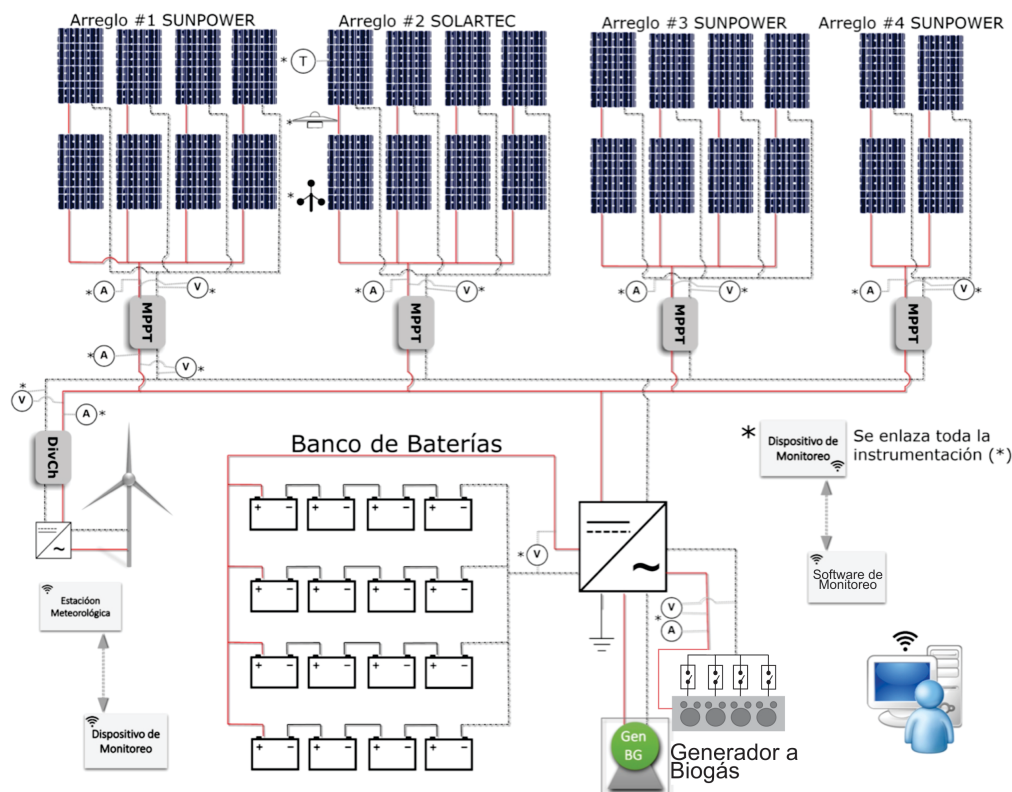


Figura 36, Esquemático de instrumentación

4.2 Desarrollo del software de monitoreo y control

4.2.1 Levantamiento de requerimientos y casos de uso para el software de monitoreo y control

Para poder obtener un software de monitoreo y control, se hizo un levantamiento de requerimientos (ver Tabla 3), donde se especifica de manera general que características debe tener el software, divididos en 3 elementos principales: micro generadores (Paneles fotovoltaicos, aerogeneradores, baterías, etc.), Viviendas y usuarios (administrador, invitado o técnico). Cada elemento cuenta con atributos como nombre del elemento, fecha de creación, etc., comunicación basada en el protocolo TCP/IP donde se debe especificar la IP del elemento y el puerto donde se comunica. Los parámetros o características del elemento, entradas o mediciones de los elementos a monitorear, cálculos entre las variables medidas y/o calculadas a partir de las ya adquiridas. Así como acciones de control en los elementos.

Tabla 3, Requerimientos del software de monitoreo y control de Micro redes

Fuente de Energía	Atributos	Comunicación	Parametros	Entradas (Mediciones)	calculadas	Control
Diesel	Nombre	Ip y puerto Componente Electrónico	Capacidad	Corriente	Potencia	Modo de operación
	Fecha de creación	**Contraseña		Voltaje		
	usuario que lo creo		Tiempo de muestreo (s)	Nivel de combustible		
			Tiempo de guardado (s)	RPM		Proporcional
Aerogenerador			Hoja de datos PDF		Eficiencia	
	Nombre	Ip y puerto Componente Electrónico		Corriente	Potencia	
	Fecha de creación	**Contraseña	Curva o ecuación de eficiencia	Voltaje		
	usuario que lo creo		Hoja de datos	Velocidad del viento	Eficiencia	
Fotovoltaico				Densidad		
	Nombre	Ip y puerto Componente Electrónico	Area	Corriente	Potencia	
	Fecha de creación	**Contraseña	inclinación	Voltaje	eficiencia	Seguimiento
	usuario que lo creo		Hoja de datos	Radiación		
Baterías			Eficiencia	Temperatura		Abrir serie
	Nombre	Ip y puerto Componente Electrónico			Potencia	
	Fecha de creación	**Contraseña				
	usuario que lo creo		Hoja de datos	Corriente	Eficiencia	
Vivienda				Voltaje		
	Nombre	Ip y puerto Componente Electrónico		Temperatura	Nivel de carga	
	Fecha de creación	**Contraseña		Corriente	Potencia	ON/OFF
	usuario que lo creo		Hoja de datos	Voltaje		
Administrador				Consumo (kW/hrs)	Semaforo	
	Nombre	Comunicación interna del software				Control de todos los modulos
	Fecha de creación		Hoja de datos	Todos los modulos	Todos los modulos	
	usuario que lo creo					

En base a ellas se iniciaron pláticas para el desarrollo del SMRE con apoyo de la empresa local CERTUIT Consultores. Lo que resultó que en la revisión a detalle para agrupar las necesidades por casos de uso (ver Tabla 4), donde se determina que acciones se van a llevar a cabo en el software, y quienes lo solicitan (actores), que pueden ser un usuario que interactúe con el software: Registrar, administrar, consultar y/o enviar valores. O acciones que se realizan de manera automática dentro del software como almacenar datos, verificar alarmas, hacer cálculos, etc.

Tabla 4, Casos de uso del SMRE

ID	Caso de Uso	Actores
CU-1	Autenticar usuario	Administrador
CU-2	Administrar MREI	Administrador
CU-3	Registrar elemento	Administrador
CU-3.1	Registrar MREI	Administrador
CU-3.2	Registrar campo	Administrador
CU-3.3	Registrar arreglo	Administrador
CU-3.4	Registrar componente	Administrador
CU-4	Administrar catálogo	Administrador
CU-4.1	Administrar catálogo de unidades	Administrador
CU-4.2	Administrar catálogo de tarifa mensual	Administrador
CU-4.3	Administrar catálogo de sensores	Administrador
CU-4.4	Administrar catálogo de plantilla de elementos	Administrador
CU-5	Registrar detalle de elemento	Administrador
CU-5.1	Registrar parámetro	Administrador
CU-5.2	Registrar variable de adquisición	Administrador
CU-5.3	Registrar variable a calcular	Administrador
CU-5.4	Registrar acción	Administrador
CU-5.5	Registrar alarma	Administrador
CU-5.6	Registrar propiedad	Administrador
CU-5.7	Registrar documento	Administrador
CU-6	Monitoreo y control de MREI	Administrador, Técnico, Visitante
CU-6.1	Consultar resumen de MRE	Administrador, Técnico, Visitante
CU-6.2	Consultar detalle de campo	Administrador, Técnico, Visitante
CU-6.3	Consultar detalle de arreglo	Administrador, Técnico, Visitante
CU-6.4	Consultar componente	Administrador, Técnico, Visitante
CU-6.5	Enviar comando de acción	Administrador, Técnico
CU-6.6	Consultar vivienda	Administrador, Técnico, Visitante
CU-6.6.1	Consultar resumen de consumo y costo	Administrador, Técnico, Visitante

CU-6.7	Consultar detalle de estación meteorológica	Administrador, Técnico, Visitante
CU-6.8	Consultar gráfica	Administrador, Técnico, Visitante
CU-6.9	Consultar resumen de generación y consumo	Administrador, Técnico, Visitante
CU-7	Consultar Eventos	Administrador, Técnico, Visitante
CU-7.1	Consultar acciones	Administrador, Técnico, Visitante
CU-7.2	Administrar mantenimiento	Administrador, Técnico
CU-7.3	Consultar alarmas	Administrador, Técnico, Visitante
CU-8	Ejecutar proceso de monitoreo de MREI	SMRE
CU-8.1	Adquirir datos	SMRE
CU-8.2	Verificar Alarmas	SMRE
CU-8.2.1	Accionar alarma	SMRE
CU-8.3	Calcular variable	SMRE
CU-8.4	Almacenar datos	SMRE
CU-9	Administrar reportes	Administrador, Técnico
CU-9.1	Administrar acceso a reportes	Administrador, Técnico
CU-9.2	Consultar reportes	Administrador, Técnico, Visitante
CU-10	Administrar usuarios	Administrador

4.2.2 Diseño de la arquitectura de los componentes en el software

La arquitectura del SMRE, está compuesta por la vista de casos de uso, lógica, de procesos, implementación y de despliegue. En la parte de la implementación se desarrolló un protocolo de comunicación entre el software y el sistema de monitoreo (ver Figura 37). Para enviar o recibir información, se utilizar una cadena de caracteres, esta se lee separando sus valores por un carácter especial (":"): El primer campo es un acrónimo que se le asigna a cada elemento de la MRA con el SMRE, en el segundo campo, cuando el valor es 1, es una petición que envía el software para requerir una serie de datos al dispositivo de monitoreo y cuando es 2, es un comando que da una orden del software para que sea ejecutada por un controlador. El tercer campo es el valor que se desea enviar y puede ser una cadena de caracteres, valor entero o flotante con 2 decimales, si se desea enviar 2 o más valores, se debe incluir el carácter especial "|" entre cada valor.

Acrónimo del Elemento		1: Petición	2: Comando	Actuador	Valor
Cadena	Acción				
ACRONIMO:1:1	Petición del valor de todos los sensores.				
ACRONIMO:1:100	Petición de Disponibilidad				
ACRONIMO:2:5:[0-1]	Encendido o apagado del sensor 5				
ACRONIMO:2:6:[0-1]	Encendido o apagado del sensor 6				
ACRONIMO:2:7:[valor]	Enviar cadena o valor a sensor 7				
ACRONIMO:1:[Valor] 2:[Valor] ... n:[Valor]	Envío de valores del componente a el sistema de monitoreo				

Figura 37, Protocolo de comunicación entre los dispositivos y software.

4.2.3 Correcciones en la construcción del software

Durante 4 semanas se estuvieron presentando los avances en el sistema de despliegue del SMRE, el cual se fue modificando con el enfoque de tener un software que muestre los datos de manera gráfica y puntal, de forma jerárquica y rápida, capaz de generar reportes con gráficas y tablas.

Para llevar a cabo el estudio de las dinámicas de operación en Micro Redes Aisladas y probar estrategias de control para la demanda eléctrica es necesario monitorear los diferentes puntos de consumo y generación eléctrica. En base al diagrama unifilar se obtiene los puntos de medición en parte de la generación eléctrica de la MRA experimental.

Para el arreglo de paneles fotovoltaicos (FV) #1 se tomaron 2 puntos de medición, en la entrada y salida del controlador de carga solar XW-MPPT60, con el objetivo de calcular la eficiencia real del equipo y la energía que entra al inversor y/o baterías. Los arreglos 2, 3 y 4 se miden antes del XW-MPPT60 para ver las variaciones de voltaje y corriente que tienen los paneles FV. En el caso del aerogenerador se mide antes del divisor de carga para obtener la potencia total generada. Después de seleccionar los puntos de medición se buscaron sensores que trabajen en el mismo rango de operación.

4.3 Diseño y construcción del sistema de monitoreo

4.3.1 Acondicionamiento de la señales

En la industria se pueden encontrar diferentes estándares en cuanto a la fuente de alimentación y la salida de las señales a medir. Por los principales en salidas analógicas son de 0-5 V, 0-10 V, 2-10 V y 4-20 mA. De acuerdo a nuestras entradas analógicas de los dispositivos de monitoreo y control, se requiere acondicionar las señales de los sensores en un rango de 0 a 5 V.

Sensor de corriente no invasivo de efecto hall

El sensor de corriente tiene una resolución en la salida lineal que varía de 16 a 20 mV por Ampere, por lo que se buscó un convertidor analógico con una resolución menor a

los 5 mV por bit, como es el caso del ADC ADS1115 (ver Figura 38) que cuenta con una resolución de 0.244 mV por bit.

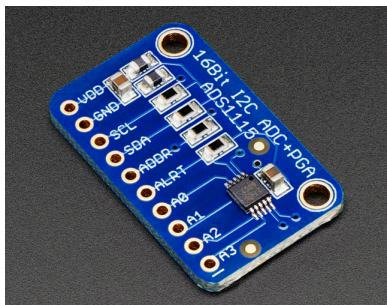


Figura 38, Convertidor analógico digital de 16 bits ADS1115

Sensor de radiación

Considerando que la sensibilidad del piranómetro es de 8.83 μ Volts y el rango de medición es de 400 a 1100 W/m², se espera que la salida tenga un voltaje de 3.5 mV a 9.7 mV. Por lo que se utiliza un ADS1115 para su lectura adecuada.

Sensor de velocidad de viento

Se optó por amplificar la señal de salida del anemómetro en un 100%, pasando de 0.4 a 2.0 Volts a 0.80-4 Volts, para una mejor lectura mediante el convertidor analógico digital de 10 bits del Arduino Mega 2560. Para ello se utilizó un amplificador de instrumentación AD623AN y una resistencia de 100 K Ohms para seleccionar la ganancia en 2.

Sensor de temperatura

El rango de lectura del LM35 se encuentra entre 0.1 a 0.7 V (10 a 70 °C), por ello se utilizó el ADC de 10 bits que tiene integrado el Arduino Mega.

4.3.2 Circuitos impresos

Se realizaron los diseños de los circuitos impresos para el acondicionamiento de las señales mediante el Software CAD Eagle, la Figura 39 muestra el diseño para el sistema monitoreo de generación solar-eólico y banco de baterías. Para leer el voltaje se aplicó un divisor de voltaje con una resistencia de 10 M Ohms y un potencímetro de 500 K Ohms para poder ajustar la relación entrada-salida del voltaje. Para las conexiones de la lectura de voltaje y corriente en los paneles FV, aerogenerador y baterías, se utilizaron conectores de 2 entradas. Para el caso de los sensores de corriente, los cables de alimentación vcc se mandaron a un nodo común del Arduino Mega. Una vez seleccionados los componentes del circuito, se diseñaron las rutas de las pistas de conexión entre los componentes y los pines de entrada al micro controlador.

La Figura 40 y Figura 41 se ilustran el diseño y fabricación del circuito impreso para las mediciones climatológicas: radiación en el plano inclinado de los paneles, temperatura de celda y velocidad del viento sobre el plano de los paneles.

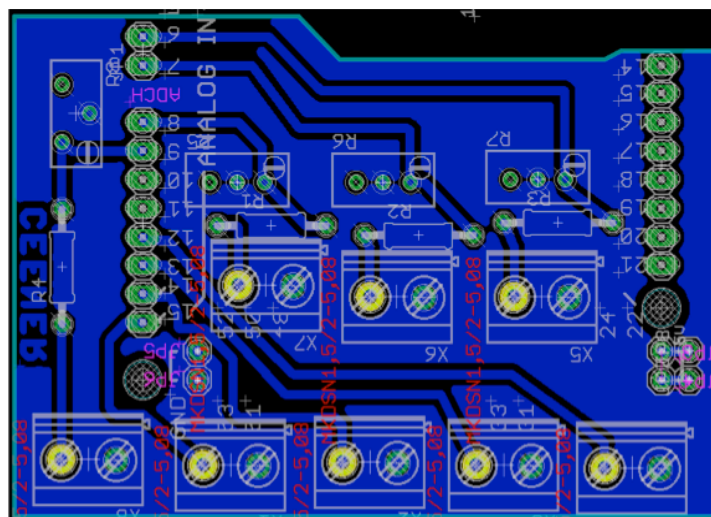


Figura 39, Diseño electrónico de sistema de monitoreo solar-eólico

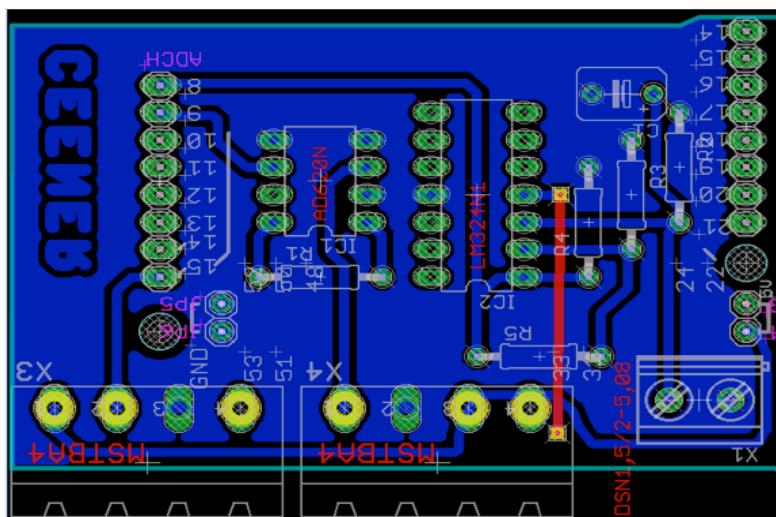


Figura 40, Diseño electrónico para sistema de monitoreo de datos climatológicos

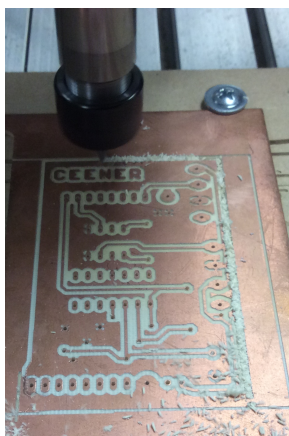


Figura 41, Fabricación de circuitos impresos en CNC

4.5 Diseño y construcción del controlador de la demanda eléctrica

4.5.1 Sistema de control de la demanda eléctrica

El sistema de control de la demanda eléctrica se compone de un controlador, capaz de medir y controlar la potencia que se consume en la vivienda, con las siguientes características:

- Potencia asignada a cada vivienda
- Relevadores de estado sólido para conectar y desconectar cargas de acuerdo a la potencia disponible en la MR.
- Medir la potencia que se consume en la vivienda.
- De acuerdo a la potencia actual de la vivienda y la asignada se determina si se deben desconectar cargas y cuantas de ellas.

Para el control de la demanda se propone un control de las cargas eléctricas mediante su conexión/desconexión con diferentes criterios:

Limitadores de corriente:

- Con este dispositivo se buscaría limitar la potencia que puede consumir cada hogar, independientemente de la energía que se consume en un tiempo (s) determinado.

Coordinación de cargas:

- Conexión y desconexión de cargas de manera coordinada.
- Por Grupo de cargas o viviendas.
- Control de carga de acuerdo a la tarifa actual para toma de decisiones.

Carga no controlada:

- Potencia total de la instalación no sujeta al sistema control.
- Cargas prioritarias que no se pueden o deberían desconectar.

Salidas de desconexión de cargas:

- 4 Salidas a relé para conexión y desconexión de cargas.
- Control de cargas manual, programado o en base al algoritmo de control.
- Control de cargas según las prioridades programadas.
- Desconexión total de una vivienda o un grupo de viviendas.

Factor de seguridad sobre la consigna%:

Sobre la consigna, al final de un periodo. Por ejemplo, si configuramos 10% en el margen de consigna y la potencia máxima es 20 kW, la consigna real será: $20 - 10\% = 18 \text{ kW}$

Tiempo de respuesta (segundos)

Tiempo entre actuaciones:

Es el tiempo que se establece entre actuaciones. Un valor de 60 segundos, significa que una vez que se ha conectado o desconectado una carga, el controlador esperará 60 segundos para volver a hacer cualquier otra maniobra.

4.5.3 Algoritmo de control

Para el lazo de control cerrado (ver Figura 42) es primordial medir la capacidad de generación y el consumo, estableciendo una base para tomar acciones de control, que repercuten en la conexión y/o desconexión de cargas en las viviendas. Se propone un sistema de control discreto, procesar la información en el servidor, implementando el algoritmo de control dentro el software de monitoreo y control.

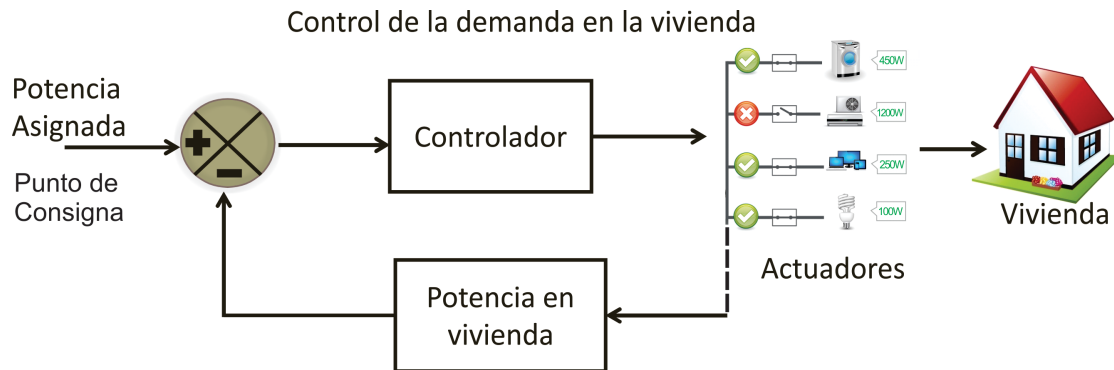


Figura 42, Lazo de control para la de manda eléctrica en la vivienda

Mediante una red de área local, el software de monitoreo envía la consigna al controlador, asignando una cantidad de potencia que puede consumir la vivienda, el controlador realiza las mediciones de las cargas (ver Figura 43). Cuando la consigna es mayor a las cargas, el sistema aumenta la potencia disponible. De ser menor la consigna, el controlador revisa si debe mantener o disminuir la potencia disponible en las viviendas. Al entrar en el modo de aumentar cargas (ver Figura 44), el sistema revisa cuanta potencia se está consumiendo y que cargas están desconectadas de manera individual, dando prioridad entrar a la carga 1 hasta llegar a la carga 3 y para que cada carga pueda ser conectada primero se verifica si al ser conectada, el consumo de la vivienda no va ser mayor al asignado, en caso de que este sea superado debido a que el usuario incremento la carga, el controlador la desconecta por un periodo de 60 segundos como mínimo. Cuando el controlador funciona en modo de disminuir cargas (ver Figura 45) da prioridad de desconexión a la carga 3, donde se verifica si dicho punto tiene carga de consumo, si la carga de la vivienda sigue siendo mayor, se hace la desconexión. Esto en un proceso iterativo hasta llegar a la carga 1.

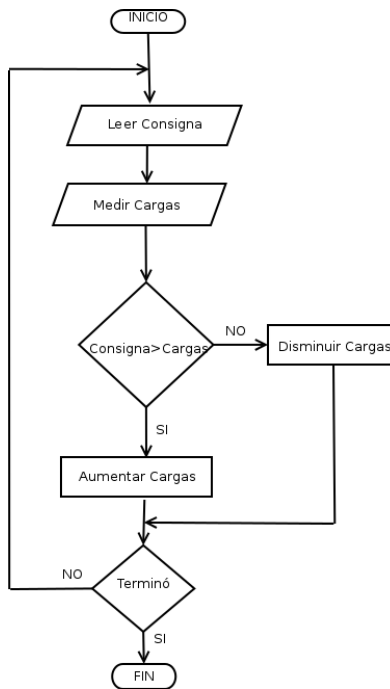


Figura 43, Algoritmo de control de cargas

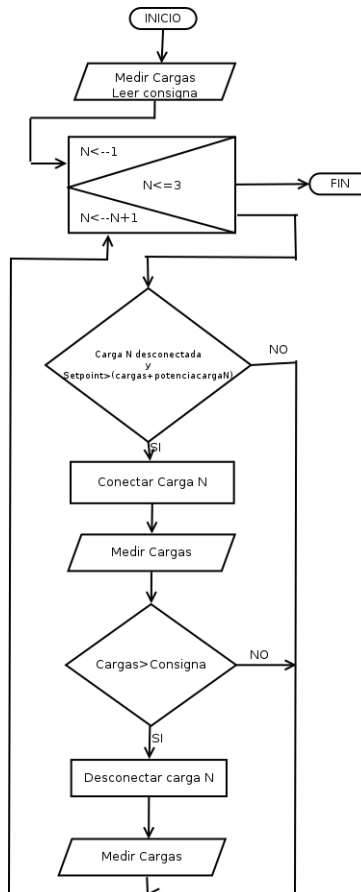


Figura 44, Algoritmo para aumentar cargas conectadas



El semáforo es un sistema que permite de manera visual, brindar información del estado de la micro red a los usuarios en cada vivienda. En consecuencia, el usuario tiene la capacidad de tomar decisiones sobre que cargas utilizar en la vivienda de acuerdo a la disponibilidad.

En la Tabla 5 se muestra la información que brinda al usuario, donde el tipo de consumo depende del gradiente que se encuentre entre la potencia asignada y la consumida, este va de los 1000 Watts en el consumo disponible a los 200 Watts en el crítico. La Figura 46 muestra un esquemático del semáforo, que integra comunicación con un software que envía el estado de la MR.

Estado MRA	Color LED	Estado LED
Consumo disponible	Verde	2 destellos por s
Consumo moderado	amarillo	2 destellos por s
Consumo crítico	Rojo	4 destellos por s
Consumiendo de baterías	Blanco	2 destellos por s
Consumiendo diésel	Blanco	4 destellos por s



Figura 46, Semáforo en las viviendas

Alarmas:

Las alarmas del sistema nos permiten ver los fallos en el sistema y así reducir los tiempos de corrección en su defecto.

Alarmas de comunicación:

- Indican si algún de los dispositivos de control o monitoreo no se encuentran en comunicación con el sistema de control.

Alarmas de potencia: bajo, medio y crítico

- En base a la generación actual y la cantidad de energía almacena se determina en que estado se puede encontrar los niveles de consumo para que los usuarios puedan tomar decisiones de desconexión manual de cargas antes que entre el sistema de control automático.

Capítulo 5 Implementación y estudio experimental

5.1 Implementación de sistema de monitoreo y control

5.1.1 Instalación del software

Para la instalación del software se requiere de una computadora con sistema operativo Windows o Linux, Procesador Intel Core I7 o similar, 4GB de memoria RAM, 200 GB de disco duro, Tarjeta de comunicación en red de 1GB. Antes de poder instalar el SMRE se requiere instalar Java 6 para el sistema de monitoreo, Mysql 5.1 para la persistencia de los datos y Apache Tomcat 7 para desplegar el SMRE y el sistema de reportes ART, todos deben ser instalados en un mismo CPU.

Los pasos generales para la instalación son:

1. Instalar software de pre-requisito
2. Crear Base de Datos ART
3. Crear Base de Datos SMREI
4. Desplegar war ART
5. Configurar ART
6. Desplegar war SMREI
7. Configurar SMREI
8. Desplegar jar Cliente Monitoreo
9. Configurar Cliente Monitoreo

5.1.2 Construcción virtual de la Micro red experimental

El SMRE ha sido probado en sus diferentes casos de uso, después de agregar plantillas de diferentes elementos para configurar MRA (ver Figura 47). En cada una se agregaron campos de generación solar, eólico, biogás, baterías, gestión de energía y meteorológico. Después de vaciar la información en cada elemento, arreglo y campo en cada Red. En la Figura 48 se muestra el resumen de una Micro Red, los elementos, alarmas y panel de acción se muestran de manera predeterminada, las variables, parámetros de generación y consumo se pueden definir para ser mostradas en cada elemento.



Figura 47, Administración de MRE

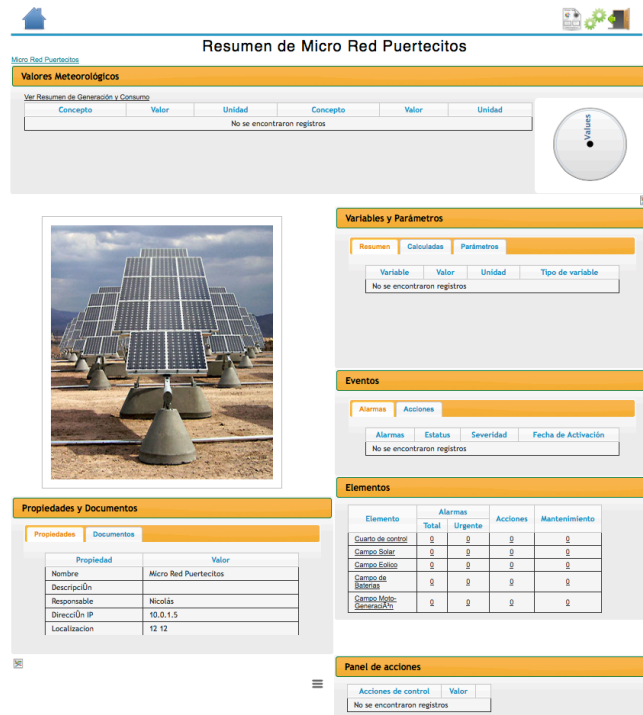


Figura 48, Resumen del estado de la Micro red en el Software

5.1.3 Dispositivos de monitoreo

Los dispositivos de monitoreo se conectaron en los puntos de medición seleccionados para obtener la generación de arreglo fotovoltaico, el aerogenerador, estado de carga de baterías (ver Figura 49), consumo de cargas eléctricas (ver Figura 50) y monitoreo climatológico (ver Figura 51).



Figura 49, Instalación de los dispositivos de monitoreo de voltaje y corriente directa

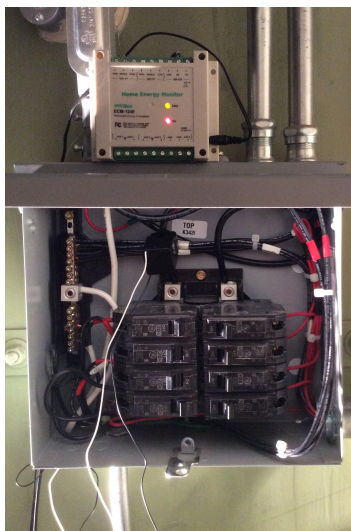


Figura 50, Dispositivo de monitoreo instalado en la micro red



Figura 51, Monitoreo climatológico

5.1.4 Controlador de la demanda eléctrica

La Figura 52 ilustra la implementación del control de cargas mediante el software de monitoreo y control. El cual puede controlar la conexión y desconexión de cargas, mediante algoritmo de control automático o un operador a modo manual mediante el panel de acciones configurado para cada vivienda. En la parte izquierda de la misma figura se muestra un registro en tiempo real del controlador al recibir la cadena de caracteres, que es decodificada en base al protocolo de comunicación y poder ejecutar la acción de control que el usuario envíe.

El controlador se instaló en una caja eléctrica para protegerla del medio ambiente (ver Figura 53) y de ahí hacer las conexiones hacia los relevadores de estado sólido y el cable de comunicación Ethernet.

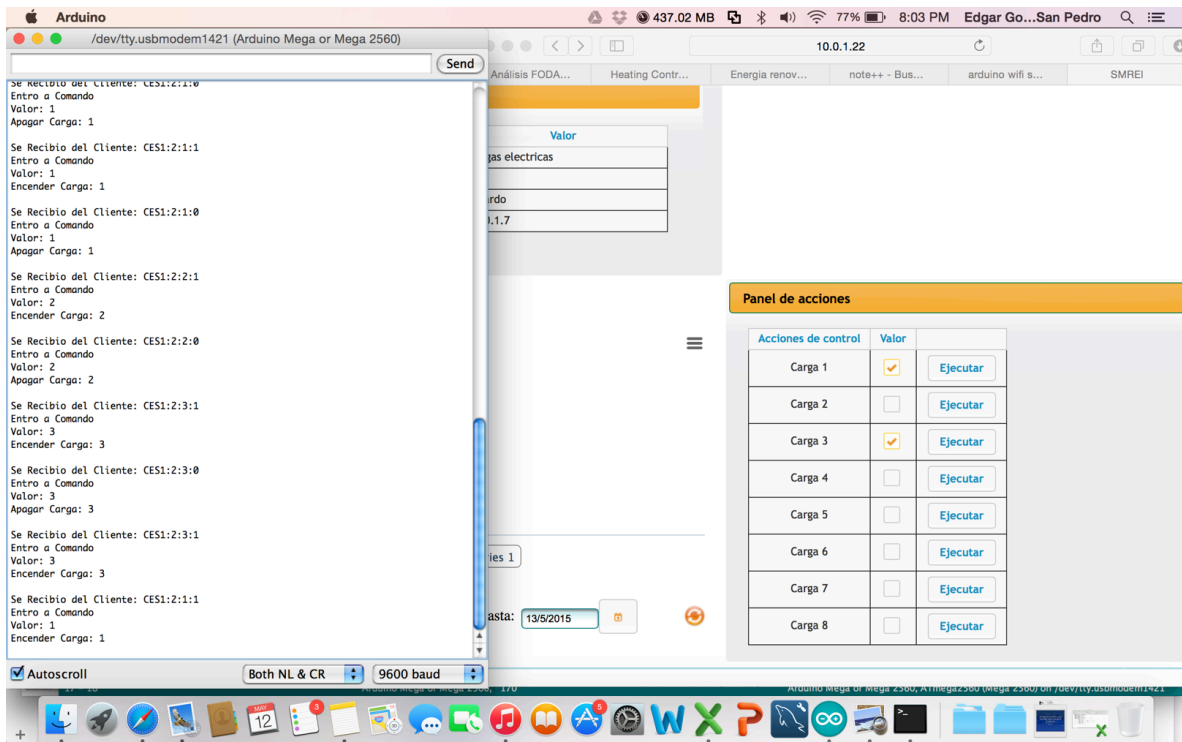


Figura 52, Software de control y registro del controlador

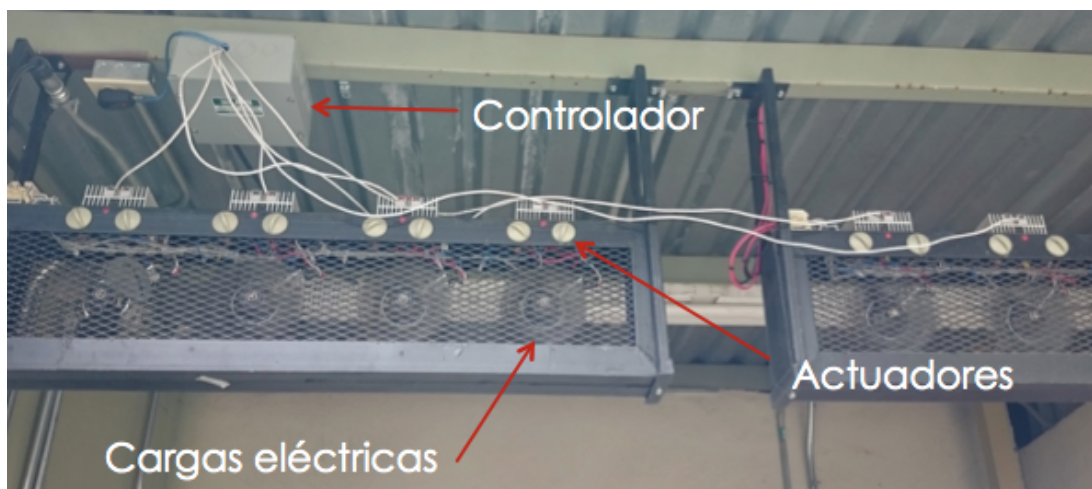


Figura 53 Controlador instalado en el banco de cargas eléctricas

5.2 Análisis del comportamiento operativo de la micro red

Para obtener datos puntuales representativos y con fines de investigación, el tiempo de muestreo es de 8 segundos. El software de monitoreo y control cuenta con una base de datos para almacenar la información obtenida de los dispositivos de monitoreo, estos se descargan en un archivo de hoja de cálculo, seleccionando de donde se quiere obtener información: Micro red, elemento, variable, día, mes y año.

El 21 de Mayo del 2015 se hicieron pruebas para ver el comportamiento del almacenamiento y la generación (ver Figura 54), dejando una carga constante de 1.16 kW de potencia, casi las 24 horas:

El día comienza (0:00 horas) con una descarga de las baterías, por falta de recurso solar y eólico, los micro generadores se encuentran inactivos. Esto se mantiene hasta llegar al punto de corte de baterías; a las 3:29 horas con un voltaje de 40.33 el sistema corta el suministro a las cargas hasta las 3:40 horas, cuando el voltaje de baterías llega a 44.36 V(a las 4:04 horas), el sistema reactiva las cargas en 1160 Watts, manteniéndose hasta las 4:07 horas cuando el sistema vuelve a desconectar el suministro de energía. De manera manual se desconectan las cargas hasta que se tenga recurso disponible.

A las 5:30 horas el sistema fotovoltaico empieza producir una pequeña cantidad de energía con una potencia de 200 W y al no tener carga en la salida del inversor, la energía se va a cargar las baterías. A las 6:40, con una radiación 180 W/m² y un cielo despejado, se tiene una potencia de generación de 1117 W, la cual sigue aumentando con respecto a la radiación en el plano de los paneles. Se observa como las baterías empieza con la 1ra etapa de carga, la carga rápida donde la corriente es constante y el voltaje aumenta hasta los 56.9 con una generación de 6 kWh a las 11:00 horas. En este momento la generación disminuye debido a que las baterías entran a la 2da etapa de carga, donde el voltaje se mantiene constante y la corriente de carga disminuye, lo que provoca que los controladores de carga solar dejen de buscar el punto de máxima potencia para pasar al punto de generación optima, esto sucede hasta las 12:10, cuando las baterías se encuentran en su máximo estado de carga configurado, pasando a un estado de flotación con un voltaje de 54.8, en este punto se observa como al requerir una menor energía, la generación cae a los 1700 Wh.

A las 14:52 horas, con el objetivo de mostrar como los controladores de carga mueven el punto de generación, se aumentó la carga de 1170 a 2049 W lo que provocó que la generación aumentara a una potencia de 2495 W. Hasta las 15:22 se fueron aumentaron las cargas de manera manual hasta llegar a 5000 W y 5300 W la generación. Después de este punto la generación fue disminuyendo junto con la radiación incidente en los paneles. A las 15:30 se abrió el arreglo 3 disminuyendo la generación, entonces el gestor toma energía de las baterías para seguir con un suministro sin interrupciones en la salida del inversor. Para las 15:33 se volvió a conectar el arreglo 3, satisfaciendo las cargas eléctricas y cargando baterías. Conforme la radiación disminuye la generación también, por lo que se van desconectando cargas para que disminuyan a la par y dejando un gradiente para que se carguen las baterías. Para las 17:00 horas la generación ya no es suficiente para satisfacer las cargas por lo que se complementa con la energía almacenada. A las 18:55 la generación cae a 0 por falta de recurso solar, de esta forma el sistema sigue funcionando con la energía almacena, llegando hasta el punto de corte para esperar la disponibilidad de energías renovables y repetirse el ciclo de carga y descarga de las baterías de acuerdo a la capacidad de generación y el consumo que se tenga. De acuerdo con el comportamiento de generación, cuando la demanda es menor a ella, el sólo utilizar las mediciones de generación para determinar la capacidad de la MR, resultan insuficientes. Por eso la importancia de un algoritmo de estimación de la potencia entregada por la MR y tener un control óptimo de la demanda eléctrica.

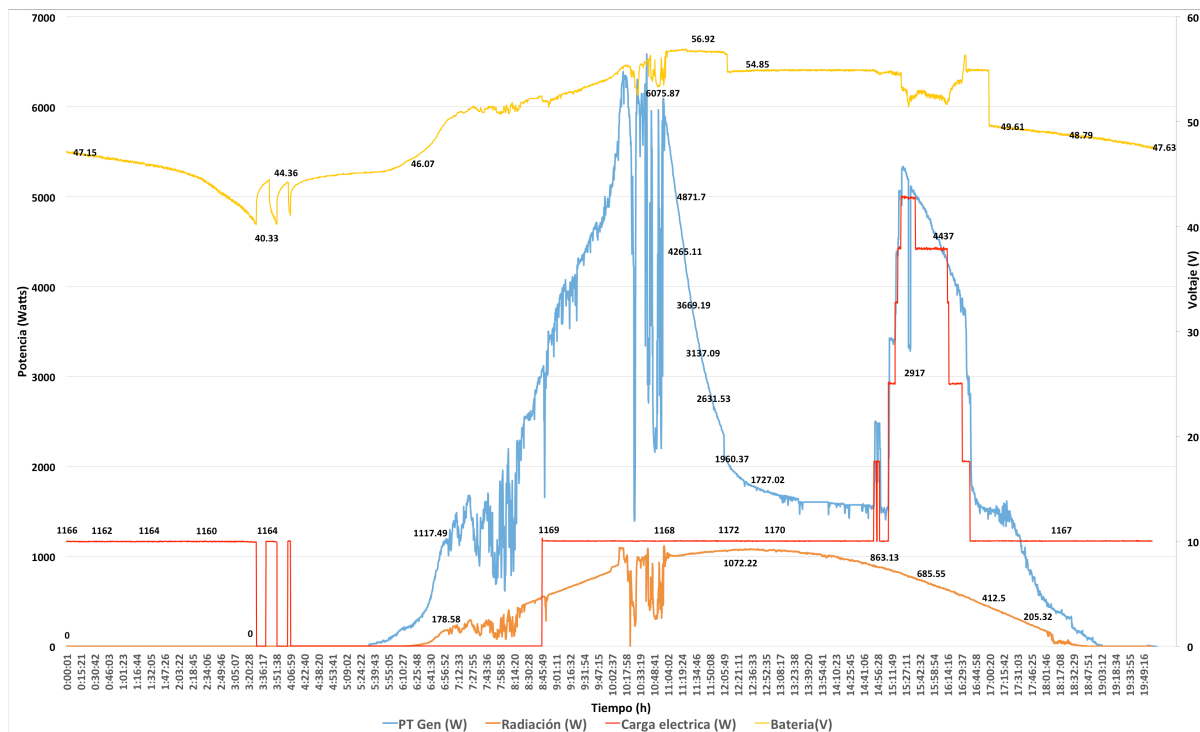


Figura 54, Comportamiento de la micro red 21 de Mayo, 2015

5.3 Pruebas del sistema de control de la demanda eléctrica

Para las pruebas del sistema de control, se consideran 3 cargas resistivas: la carga 1 con una potencia de 600 Watts, la carga 2 de 900 Watts y 3 de 1390 Watts. Dando las combinaciones de la Tabla 6 para la potencia que consume una vivienda.

Tabla 6, Combinaciones de las potencia total en vivienda

Carga1 (W)	Carga2 (W)	Carga3 (W)	Pot Total (W)
600	0	0	600
600	900	0	1500
600	900	1390	2890

En la figura 56 se puede observar el comportamiento del control de la demanda bajo diferentes perturbaciones, las cuales fueron provocadas para observar si el control propuesto cumple con requerimientos establecidos. Las perturbaciones consisten en realizar diferentes estimaciones de la capacidad máxima de generación y por medio de ella calcular el punto de consigna, para observar como el controlador ajusta la demanda a la disponibilidad de la generación. Observando los resultados del control se aprecia que la generación no coincide con la demanda de energía, dado que por las características del banco de cargas variables, la demanda no es continua, sino discreta en sus valores de 590, 900 y 1300 W, teniendo diferentes grados de aproximación entre el punto de consigna y la demanda, pero sin presentarse el colapso energético donde la demanda supera a la generación. El controlador en su algoritmo tiene implementado una lógica que busca aprovechar al máximo la capacidad de generación y proteger la vida útil de los equipos. El tiempo de respuesta del sistema oscila entre los 3 y 10 segundos, por lo que durante las pruebas no se presentó ningún tipo de

problemas y en la gráfica se aprecia que cuando se provoca una perturbación en el punto de consigna inmediatamente se ajusta la demanda de energía. En la implementación de la estrategia de control se maneja un factor de seguridad en el punto de consigna, lo cual nos permite amortiguar las posibles variaciones en la demanda e imprecisiones en la estimación de la capacidad máxima de generación. Con lo anteriormente expuesto las pruebas realizadas al controlador todo-nada de la demanda, demostraron que es posible ajustar las necesidades energéticas de la vivienda sin sobrepasar la capacidad de generación de la micro red.

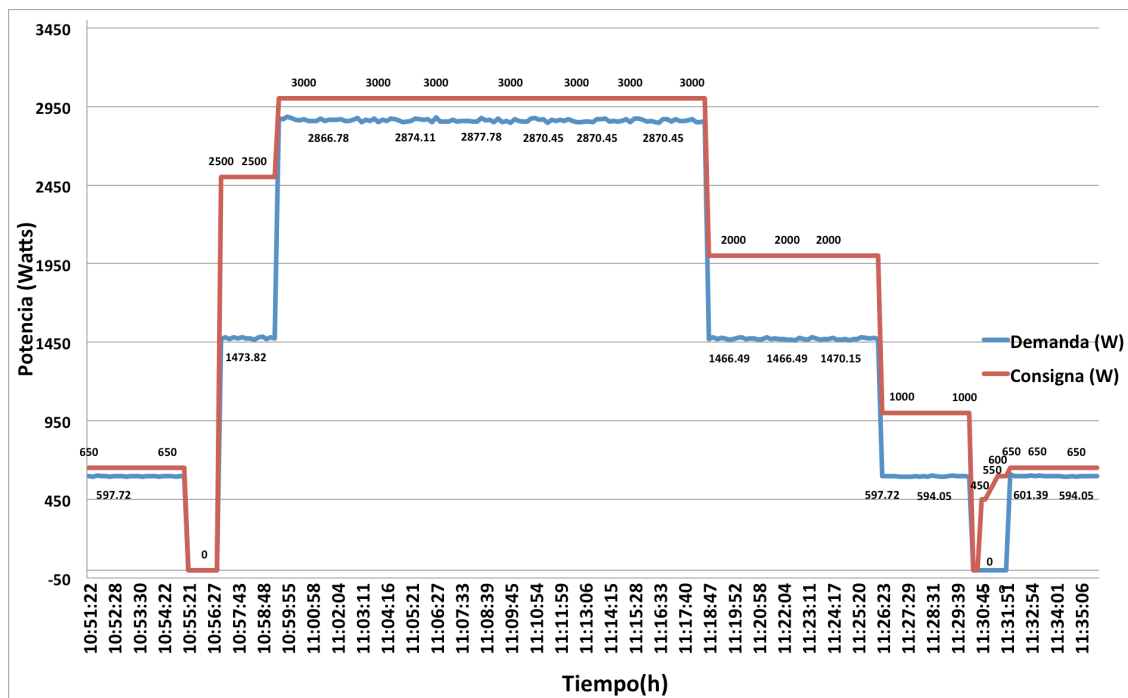


Figura 55, Comportamiento del control de la demanda bajo diferentes perturbaciones.

La variación de la potencia estimada, generación de punto de consigna de la demanda y producción de energía con respecto el tiempo se puede observar en la Figura 56. En dicha gráfica se muestra la temperatura de la celda fotovoltaica y radiación solar, que son utilizadas en el modelo propuesto para calcular la potencia máxima estimada de generación. Se realizó una validación del modelo propuesto para el cálculo de la potencia máxima de generación y arrojó que bajo una operación de la micro red donde el seguidor de punto de máxima potencia opera en su máxima capacidad, como se muestra la Figura 56 y la Tabla 7, la diferencia entre la potencia estimada y generación real tiene un error porcentual que varía en $\pm 6.5 \%$ y un error promedio de 0.91% . Por lo que con un factor de seguridad del 10% permite mitigar las variaciones en las estimaciones de generación.

El equilibrio entre generación y demanda es la premisa para la operación sostenible del sistema, es por ello que la implementación de una estimación de capacidad de generación, almacenamiento, junto con el control de la demanda permite un suministro de energía sin intermitencias en la MR.

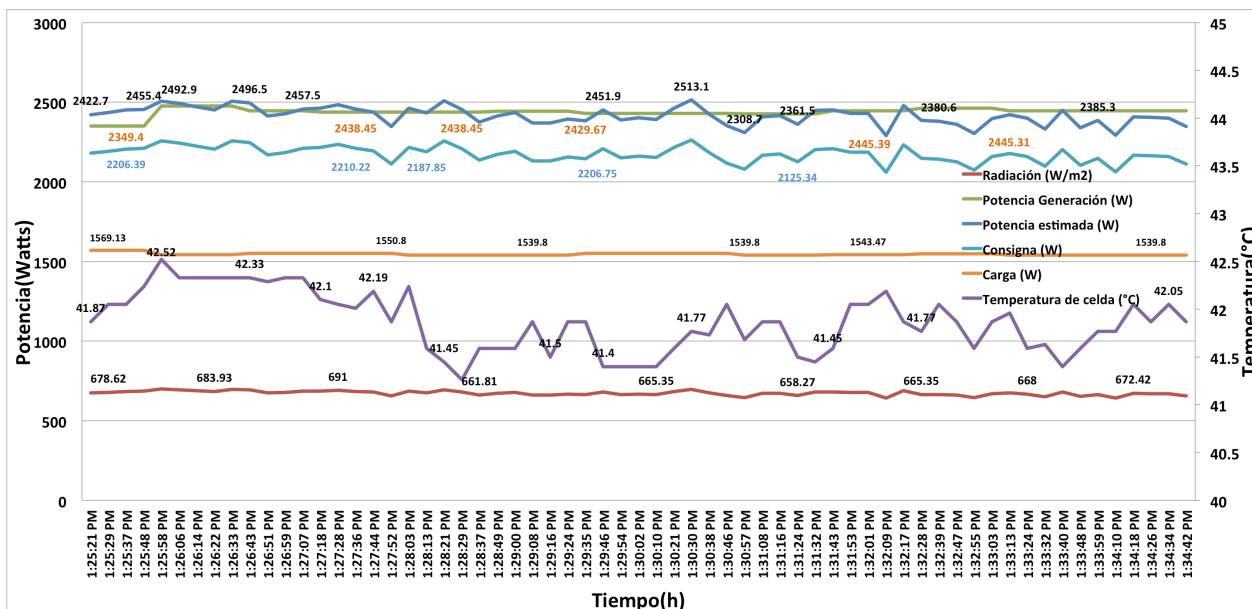


Figura 56, Variación de la potencia máxima estimada, consigna y generación con respecto al tiempo

Tabla 7, Comportamiento de la estimación en base a las variaciones de radiación y temperatura del panel

Radiación (W/m²)	T de celda (°C)	P estimada (W)	Generación (W)	Consigna (W)	Carga (W)	Error %	Hora
675	41.87	2423	2349	2180	1569	-3.12	1:25:21 PM
679	42.05	2434	2349	2190	1569	-3.59	1:25:29 PM
683	42.05	2452	2349	2206	1569	-4.35	1:25:37 PM
685	42.24	2455	2349	2210	1569	-4.51	1:25:48 PM
699	42.52	2507	2475	2257	1543	-1.30	1:25:58 PM
695	42.33	2493	2475	2244	1543	-0.72	1:26:06 PM
689	42.33	2472	2475	2224	1543	0.15	1:26:14 PM
684	42.33	2450	2475	2205	1543	1.00	1:26:22 PM
698	42.33	2507	2475	2256	1543	-1.29	1:26:33 PM
695	42.33	2497	2446	2247	1551	-2.07	1:26:43 PM
674	42.29	2412	2446	2171	1551	1.39	1:26:51 PM
678	42.33	2425	2446	2183	1551	0.83	1:26:59 PM
686	42.33	2457	2446	2212	1551	-0.47	1:27:07 PM
686	42.1	2461	2438	2215	1551	-0.94	1:27:18 PM
691	42.05	2483	2438	2235	1551	-1.85	1:27:28 PM

							PM
684	42.01	2456	2438	2210	1551	-0.71	1:27:36 PM
680	42.19	2439	2438	2195	1551	0.00	1:27:44 PM
657	41.87	2348	2438	2113	1551	3.71	1:27:52 PM
687	42.24	2463	2438	2216	1540	-0.99	1:28:03 PM
676	41.59	2431	2438	2188	1540	0.31	1:28:13 PM
695	41.45	2508	2438	2257	1540	-2.85	1:28:21 PM
680	41.26	2454	2438	2209	1540	-0.65	1:28:29 PM
662	41.59	2374	2438	2137	1540	2.64	1:28:37 PM
672	41.59	2413	2444	2172	1540	1.27	1:28:49 PM
677	41.59	2435	2444	2191	1540	0.40	1:29:00 PM
662	41.87	2369	2444	2132	1540	3.06	1:29:08 PM
660	41.5	2369	2444	2132	1540	3.10	1:29:16 PM
668	41.87	2394	2444	2155	1540	2.05	1:29:24 PM
665	41.87	2384	2430	2145	1551	1.90	1:29:35 PM
680	41.4	2452	2430	2207	1551	-0.92	1:29:46 PM
664	41.4	2388	2430	2149	1551	1.71	1:29:54 PM
668	41.4	2402	2430	2162	1551	1.13	1:30:02 PM
665	41.4	2392	2430	2152	1551	1.57	1:30:10 PM
684	41.59	2463	2430	2217	1551	-1.37	1:30:21 PM
697	41.77	2513	2430	2262	1551	-3.43	1:30:30 PM
675	41.73	2425	2430	2183	1551	0.19	1:30:38 PM
658	42.05	2352	2430	2117	1551	3.19	1:30:46 PM
646	41.68	2309	2428	2078	1540	4.90	1:30:57 PM
672	41.87	2408	2428	2168	1540	0.80	1:31:08 PM
673	41.87	2416	2428	2174	1540	0.50	1:31:16 PM
658	41.5	2361	2428	2125	1540	2.73	1:31:24 PM
680	41.45	2448	2428	2203	1540	-0.81	1:31:32 PM

681	41.59	2452	2445	2207	1543	-0.28	1:31:43 PM
678	42.05	2430	2445	2187	1543	0.62	1:31:53 PM
678	42.05	2430	2445	2187	1543	0.62	1:32:01 PM
643	42.19	2289	2445	2060	1543	6.38	1:32:09 PM
689	41.87	2479	2445	2231	1543	-1.39	1:32:17 PM
665	41.77	2385	2462	2147	1547	3.12	1:32:28 PM
665	42.05	2381	2462	2143	1547	3.31	1:32:39 PM
660	41.87	2362	2462	2126	1547	4.06	1:32:47 PM
644	41.59	2303	2462	2073	1547	6.46	1:32:55 PM
669	41.87	2398	2462	2158	1547	2.61	1:33:03 PM
675	41.96	2421	2445	2179	1540	0.99	1:33:13 PM
668	41.59	2399	2445	2159	1540	1.89	1:33:24 PM
651	41.63	2331	2445	2098	1540	4.68	1:33:32 PM
680	41.4	2448	2445	2204	1540	-0.13	1:33:40 PM
653	41.59	2339	2445	2105	1540	4.36	1:33:48 PM
665	41.77	2385	2445	2147	1540	2.45	1:33:59 PM
642	41.77	2293	2445	2064	1540	6.23	1:34:10 PM
672	42.05	2409	2445	2168	1540	1.49	1:34:18 PM
671	41.87	2405	2445	2164	1540	1.65	1:34:26 PM
670	42.05	2398	2445	2158	1540	1.92	1:34:34 PM
657	41.87	2348	2445	2113	1540	3.98	1:34:42 PM

Capítulo 6 Conclusiones

6.1 Conclusiones

La micro red experimental desarrollada y la implementación del sistema de monitoreo y control propuesto, así como su experimentación permitió obtener las siguientes conclusiones:

- La arquitectura, protocolo de comunicación y dispositivos de medición del sistema de monitoreo propuesto, permite adaptarse a cualquier tipo de micro red para automatizar y controlar la demanda en tiempo real.
- Cuando el seguidor de punto de máxima potencia disminuye la capacidad de generación para ajustarse a la demanda, el algoritmo propuesto para la estimación de la capacidad máxima de generación, permite establecer un punto de referencia e incrementar la demanda al máximo sin caer en el colapso energético.
- Las pruebas realizadas al controlador todo-nada de la demanda, demostraron que es posible ajustar las necesidades energéticas de la vivienda sin sobrepasar la capacidad de generación de la micro red.
- En el caso donde el suministro de energía se obtiene únicamente de la energía almacenada, el sistema produce una oscilación en la conexión y desconexión de las cargas eléctricas en el punto de corte. Cuando el sistema de control realiza una desconexión de cargas hasta que se cuente con la energía suficiente como para la satisfacer la demanda, se incrementa la vida útil de las baterías y de los aparatos eléctricos.
- El equilibrio entre generación y demanda es la premisa para la operación sostenible del sistema, es por ello que la implementación de una estimación de capacidad de generación, almacenamiento, junto con el control de la demanda permite un suministro de energía sin intermitencias en la MR.
- La implementación del sistema de monitoreo y el software en la micro red, permite revisar el funcionamiento general de una micro red en tiempo real, detectar fallas en los micro generadores, generar alarmas, bitácoras de mantenimiento y reportes que ayuden a la administración del sistema de manera local y remota.

6.2 Trabajos futuros

- En trabajos futuros se puede estudiar el fusionar datos históricos para entrenar un algoritmo de lógica difusa y tener perfiles promedios diarios, mensuales y anuales.
- La extensión de la comunicación mediante sistemas de radiofrecuencia (Zigbee), redes celulares 3G/GSM.
- El desarrollo de una plataforma de facturación, debido a que el sistema ya es capaz de conocer los consumos en cada vivienda, se puede integrar un sistema de facturación automático y práctico, reduciendo el trabajo administrativo.
- Diseño electrónico a medida, de esta forma se busca reducir la cantidad de componentes y solo utilizar lo principal: Micro controlador Atmel ATmega2560, regulador de voltaje y oscilador. Las salidas periféricas la de entrada y salida de señales analógicas y digitales serán a medida, buscando un diseño de montaje superficial, comercial y robusto, para su fabricación en serie.
- Implementar el sistema de monitoreo y control en la Micro red de puertecitos.
- Siguiendo en la línea de investigación de sistemas de control para micro redes, se plantea la integración de los trabajos presentados para el desarrollo de un sistema de administración de la energía en micro redes aisladas.

Bibliografía

- Carta González, J.A., Calero, R., Colmenar, S., 2009. Centrales de energías renovables. Pearson Educación, S.A., Madrid.
- Colson, C.M., Nehrir, M.H., 2011. Agent-based power management of microgrids including renewable energy power generation, in: 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Presented at the 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1–3. doi:10.1109/PES.2011.6039390
- Cruz, A., 2010. Instrumentación industrial, 8va Edición. ed. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México, México.
- Digra, R.K., Pandey, R.K., 2013. Multi-agent control coordination of Microgrid, in: 2013 Students Conference on Engineering and Systems (SCES). Presented at the 2013 Students Conference on Engineering and Systems (SCES), pp. 1–5. doi:10.1109/SCES.2013.6547573
- González, I., Ramiro, A., Calderón, M., Calderón, A.J., González, J.F., 2012. Estimation of the state-of-charge of gel lead-acid batteries and application to the control of a stand-alone wind-solar test-bed with hydrogen support. *Int. J. Hydrog. Energy* 37, 11090–11103. doi:10.1016/j.ijhydene.2012.05.001
- IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems, 2011. . IEEE Std 15474-2011 1–54. doi:10.1109/IEEESTD.2011.5960751
- Kroposki, B., Emery, K., Myers, D., Mrig, L., 1994. A comparison of photovoltaic module performance evaluation methodologies for energy ratings, in: IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1994, 1994 IEEE First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 1994., Conference Record of the Twenty Fourth. Presented at the IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1994, 1994 IEEE First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 1994., Conference Record of the Twenty Fourth, pp. 858–862 vol.1. doi:10.1109/WCPEC.1994.520096
- Logenthiran, T., Srinivasan, D., Wong, D., 2008. Multi-agent coordination for DER in MicroGrid, in: IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008. Presented at the IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008, pp. 77–82. doi:10.1109/ICSET.2008.4746976
- Ng, E.J., El-Shatshat, R.A., 2010. Multi-microgrid control systems (MMCS), in: 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Presented at the 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1–6. doi:10.1109/PES.2010.5589720
- Off-grid: an end to diesel dependency?, 2012. . *Renew. Energy Focus* 13, 14–15. doi:10.1016/S1755-0084(12)70127-8
- Ogata, K., 2010. Ingeniería de control moderna, 5ta Edición. ed. Pearson.
- Pallás, R., 2005. Sensores y acondicionares de señal, 4ta Edición. ed. Marcombo, S.A.
- Rasheduzzaman, M., Bhaskara, S.N., Chowdhury, B.H., 2012. Implementation of a microgrid central controller in a laboratory microgrid network, in: North American Power Symposium (NAPS), 2012. Presented at the North American Power Symposium (NAPS), 2012, pp. 1–6. doi:10.1109/NAPS.2012.6336332
- Weber, B., Quiñones, A., Almanza, R., Duran, M.D., 2014. Performance Reduction of PV Systems by Dust Deposition. *Energy Procedia*, 2013 ISES Solar World Congress 57, 99–108. doi:10.1016/j.egypro.2014.10.013
- Zhi, N., Zhang, H., Liu, J., 2011. Overview of microgrid management and control, in: 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE). Presented at the 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE), pp. 4598–4601. doi:10.1109/ICECENG.2011.6057101
- Zomers, A., 2014. Remote Access: Context, Challenges, and Obstacles in Rural Electrification. *IEEE Power Energy Mag.* 12, 26–34. doi:10.1109/MPE.2014.2315916

Apéndice A Diseño y construcción de la micro red

Disponibilidad de las energías renovables y estudio de sombras

Para obtener la disponibilidad del recurso solar y eólico de Mexicali, se utilizó el software Meteonorm 6.0 obteniendo un archivo meteorológico típico de Mexicali, en formato TMY2, dicho formato permite ingresar los datos meteorológicos en el software Trnsys 17. Una vez cuantificado el recurso solar y eólico horario anual, se procede a determinar la orientación y el ángulo de inclinación óptimo para los paneles fotovoltaicos con seguimiento en un eje.

Para el estudio de sombras en la zona seleccionada, se utiliza la herramienta SunEye de Solmetric. La distribución de los paneles se determina analizando la proyección de sombras de edificios, árboles y otras estructuras que limitan el paso de la radiación en las diferentes épocas del año.

Como se muestra en la Figura 57, lo primero es ubicar el sitio. Con ayuda del software de Solmetric, se tiene la latitud y longitud en el mapa de la planta piloto e incluso determinar un azimut aproximado. También un análisis rápido en base a geometría solar, se estima cuáles serán los edificios o árboles que darán sombreados en determinadas épocas del año. Con ello se identifica los puntos de medición más adecuados para hacer el estudio de sombras. Esto llevó a 9 puntos principales de medición, empezando en la parte central de cada arreglo de FV con 3 puntos por arreglo (enfrente, en medio y atrás). En la Figura 58 se ilustra un plano de cómo se instalan los 3 arreglos FV, como referencia para los puntos de medición. Y se nombran de izquierda a derecha como arreglo 1, 2 y 3.

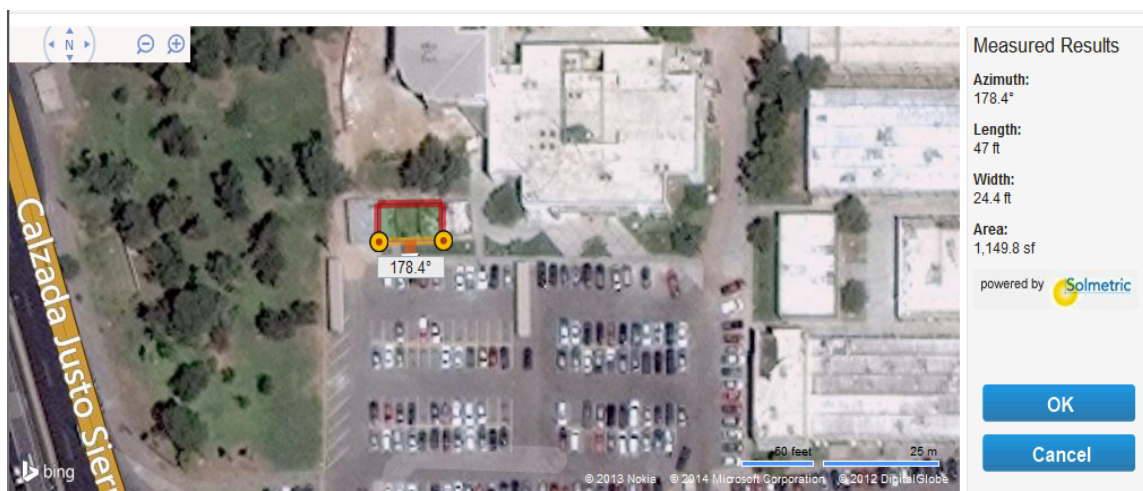


Figura 57, Ubicación del sitio de instalación

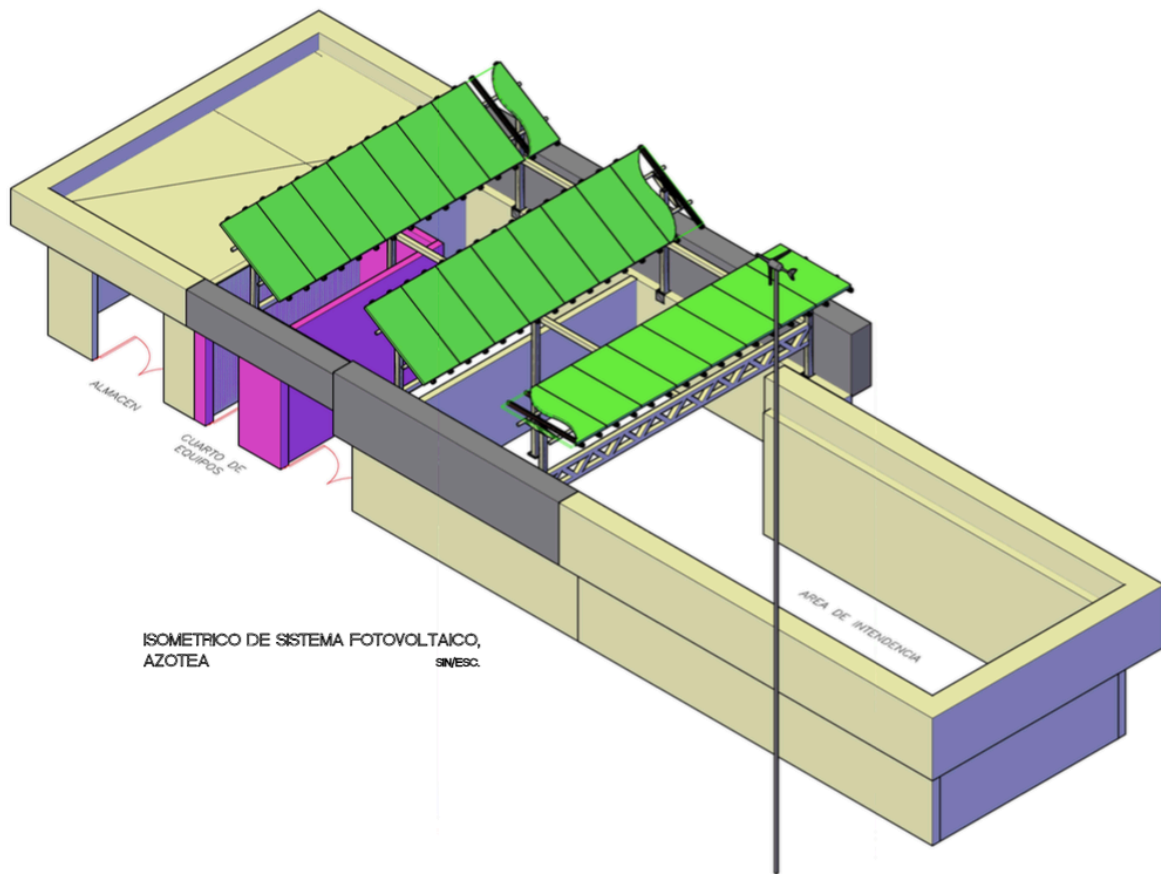


Figura 58, Vista panorámica del sistema FV en la MR

Al configurar Sun Eye se toman mediciones (ver Figura 59), arrojando los siguientes datos:

Orientación del panel: 1 eje -- Incl.=16° -- Acimut=180° -- Límite de seguimiento=45° -
 - Señal de la línea del horizonte=180° Acceso solar: Anual: 92% -- Verano (May-Oct): 92% -- Invierno (Nov-Abr): 91%

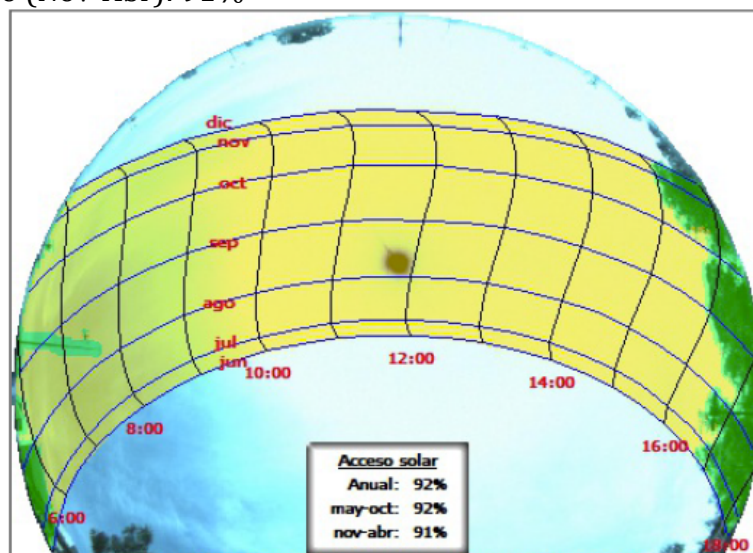


Figura 59, Arreglo 2(vista frontal)

Una vez que se tienen las mediciones de los 9 horizontes, se ingresan al software de Solmetric para procesar los datos. Observando la Figura 60, se mira un promedio anual del 89% y como en los meses de Mayo a Agosto se ven afectados. Esto se debe a la ubicación geográfica, ya que en verano el sol entra y sale del noroeste al noreste. Provocando mayores sombras debido a que el sol viene por la parte de atrás de la MR. Caso contrario en los demás meses, cuando el sol sale por el sureste y se mete por el suroeste, resultando menos afectado, ya que el sol sale por enfrente de la MR. Durante todo el año se puede concluir que las horas sin sombreado y por lo tanto, las mejores para hacer pruebas son entre las 9:00 y 15:00 horas.

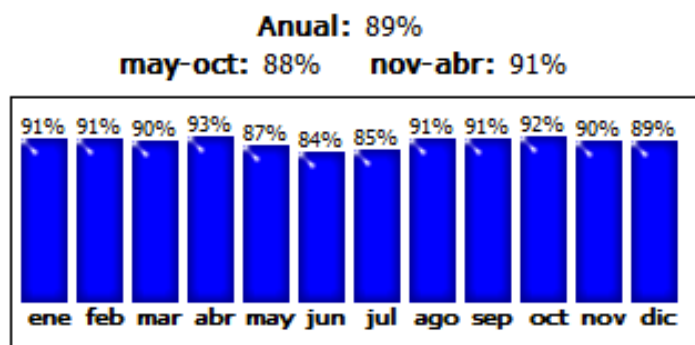


Figura 60, Acceso solar anual de la MR

Perfil de demanda horario anual

Para definir el perfil de demanda horario anual, se utilizó los datos obtenidos del monitoreo de los consumos eléctricos de una vivienda de interés social en Villa del Roble, Mexicali, BC. El registro de las mediciones se realizó en intervalos de 10 minutos para los principales consumos: refrigerador, aire acondicionado y consumo total de la vivienda (Comisión Estatal de Energía de Baja California).

Obra civil e instalación eléctrica

Previo y durante la construcción de la MRA experimental, se contactó y supervisó con los contratistas la ingeniería civil y eléctrica para la instalación e interconexión de los componentes en la MRA. En el diagrama unifilar (ver Figura 61) se especifica la ingeniería de detalle: protecciones, tuberías, cajas de conexión, diodos de bloqueo, calibre del cable, entre otros. En la parte civil se construyó el cuarto de control con aislamiento térmico para proteger el banco de baterías, inversor y controladores de carga de la intemperie. Se dimensionó las zapatas para soportar los esfuerzos en las estructuras de los paneles con seguimiento en uno y dos ejes y el aerogenerador, considerando peso, altura y fuerza del viento conforme a las normas vigentes.

Las principales etapas para llevar a cabo la construcción del sistema son:

1. Construcción del cuarto de control y base para el generador eléctrico a biogás (ver Figura 62 y Figura 63).
2. Construcción de las zapatas para las estructuras de los paneles y aerogenerador (ver Figura 64).

3. Construcción e instalación de estructuras para los paneles fotovoltaicos y aerogenerador (ver Figura 65 y Figura 66).
4. Instalación de mecanismos y motores para los sistemas de seguimiento solar (ver Figura 67).
5. Instalación de tubería, cajas de conexiones (tablillas), diodos de bloqueo, cableado e interruptores eléctricos para los paneles, aerogenerador, baterías y generador eléctrico.
6. Instalación de paneles y aerogenerador (ver Figura 68y Figura 69).
7. Instalación del inversor, controladores de carga, baterías y generador eléctrico (ver Figura 70 y Figura 71).
8. Instalación del centro de carga para el bus de corriente alterna y banco de cargas variables (ver Figura 72).
9. Instalación y puesta en marcha del sistema de monitoreo y control

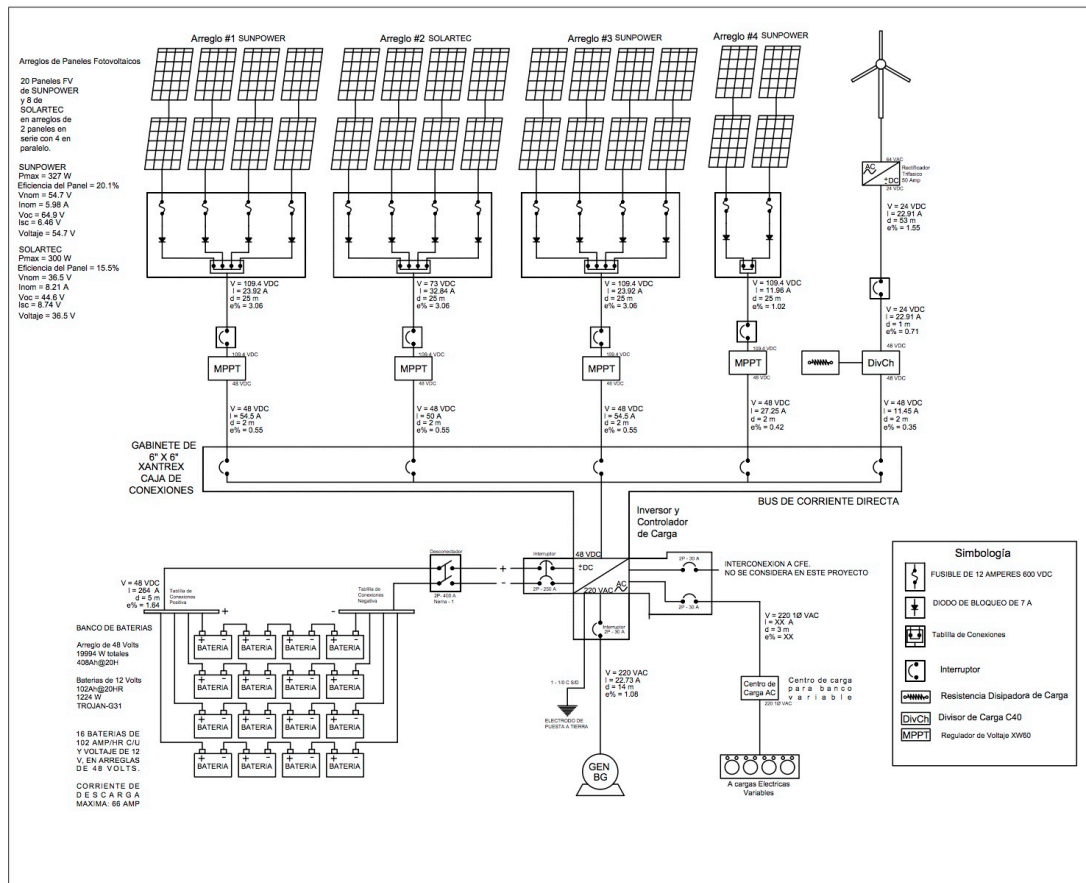


Figura 61, Diagrama unifilar de la micro red



Figura 62, Construcción de cuarto de control.



Figura 63, Base para el generador eléctrico a biogás.



Figura 64, Base para sistema de seguimiento en 2 ejes.



Figura 65, Construcción de Estructura de sistema de seguimiento en 1 eje.



Figura 66, Construcción de estructura de aerogenerador



Figura 67, Instalación de motores para sistema de seguimiento



Figura 68, Instalación de paneles en sistema de seguimiento en 1 eje.



Figura 69, Instalación de Aerogenerador y Estación meteorológica a 16 metros de altura.



Figura 70, Instalación en el cuarto de control de controladores de carga solares, eólico e inversor/gestor de energía.



Figura 71, Instalación de baterías y desconectador en el cuarto de control



Figura 72, Instalación de cargas eléctricas variables

En la Figura 73 se observa como queda la MR experimental construida, dentro de la instalación del instituto de ingeniería de la UABC.



Figura 73, Micro red Experimental Construida.

Apéndice B Configuración de la micro red

Mediante el sistema de comunicación Xanbus, los componentes de la micro red se pueden configurar con el Panel de control (ver Figura 74, XW SCP).

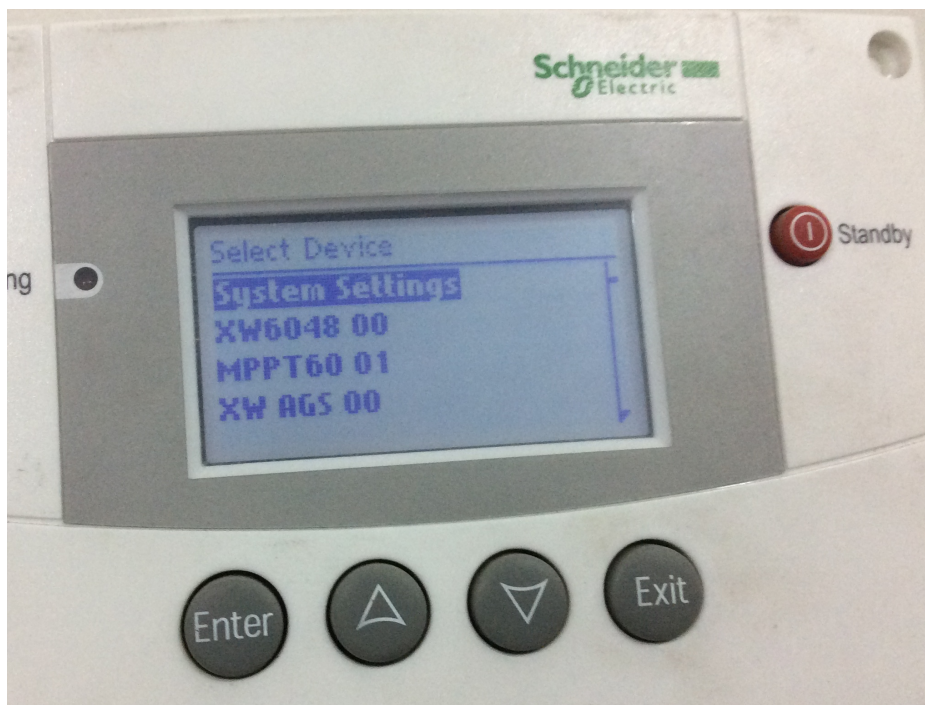


Figura 74, Panel de control del sistema de energía xantrex xw (SCP por sus siglas en ingles)

Primero se configuró el banco de baterías(ver Figura 75), definiendo el tipo de batería (Acido-plomo, AGM o Gel), la capacidad de almacenamiento en base a las dimensiones del banco de baterías, el porcentaje máximo de carga que para las baterías de gel se ha establecido el 80%, prolongando sus ciclos de vida y se establece la forma de los ciclos de carga; se establecen en 3 etapas de carga (ver Figura 76), donde la primera etapa consiste en mantener un voltaje constante e incrementar la corriente, en la segunda etapa la corriente se mantiene constante se llegar casi al límite del % máximo de carga fijado y en la última etapa se reduce la corriente para mantenerse un voltaje que va flotar entre 2 límites establecidos de acuerdo al voltaje de operación del sistema en el bus de CD.

Para los controladores de carga, tanto solar como eólico, se definió el banco de baterías con el que van a operar y las características del voltaje de operación (48 V). El voltaje de operación de la entrada de los paneles se habilitada el modo de operación "MPPT auto tracking" (ver Figura 77), donde el sistema se adaptará al punto óptimo de generación de acuerdo a la demanda. Una vez configurado un controlador de carga, el panel control permite copiar la información a los demás controladores.

Para el inversor se estableció los límites de voltaje y frecuencia de salida en corriente alterna (ver Figura 78), de esa forma el sistema de control de inversor buscara trabajar en ese rango.



Figura 75, Configuración del banco de baterías.

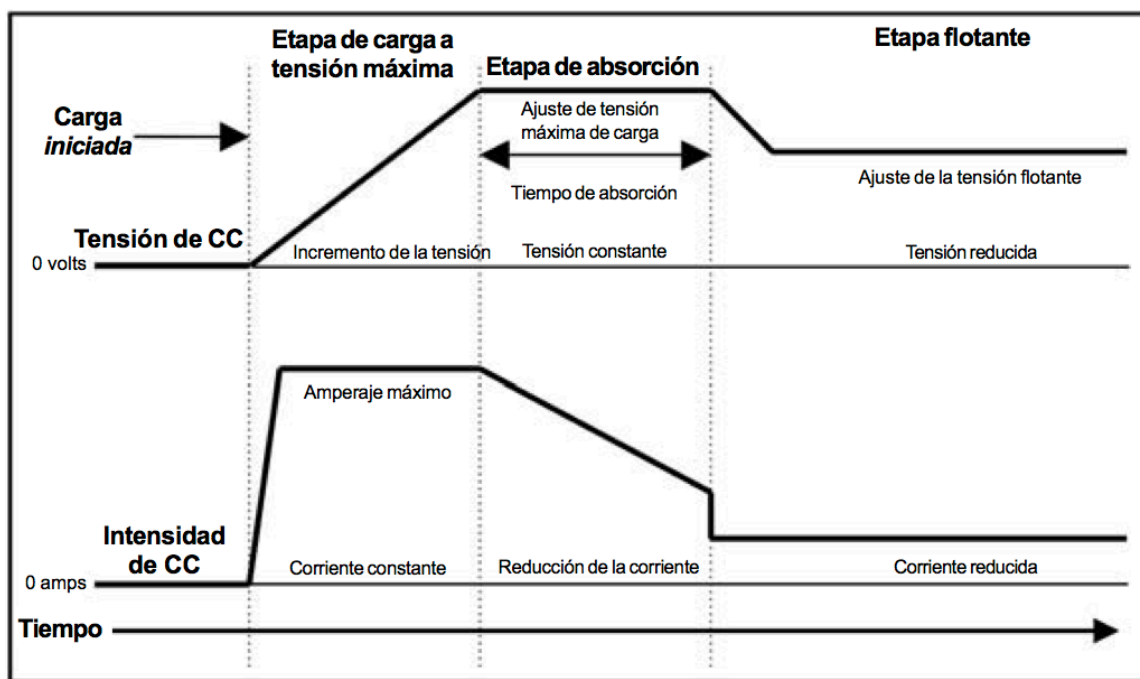


Figura 76, Etapas de carga para el banco de baterías.

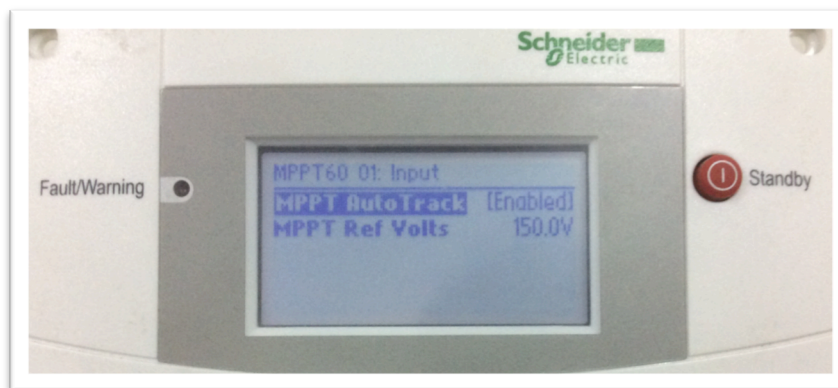


Figura 77, Configuración de lo arreglos fotovoltaico a la entrada de los controladores de carga.

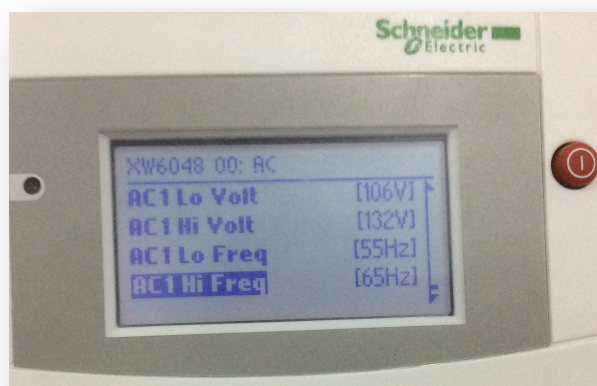


Figura 78, Configuración de la salida del inversor XW6048.

Para poder controlar de manera automática el generador eléctrico activado con biogás se configuro el XW AGS (Automatic Generator Starter en inglés, ver Figura 79), el sistema envía una señal de encender/apagar y el generador envía una señal para indicarle sus estado al sistema.

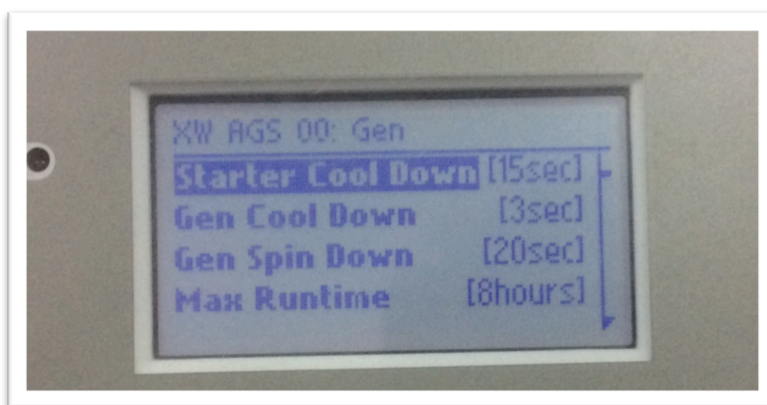


Figura 79, Configuración del AGS para los tiempos de encendido del generador eléctrico.

Apéndice C Pruebas preliminares del sistema:

Para comprobar el correcto funcionamiento se probó cada componente de la micro red, al cerrar los interruptores se da paso al flujo de energía eléctrica generada por los sistemas solar-eólico, entrando a los controladores de carga, donde el sistema muestra la potencia, voltaje y corriente entregada a la salida del bus de CD (ver Figura 80).

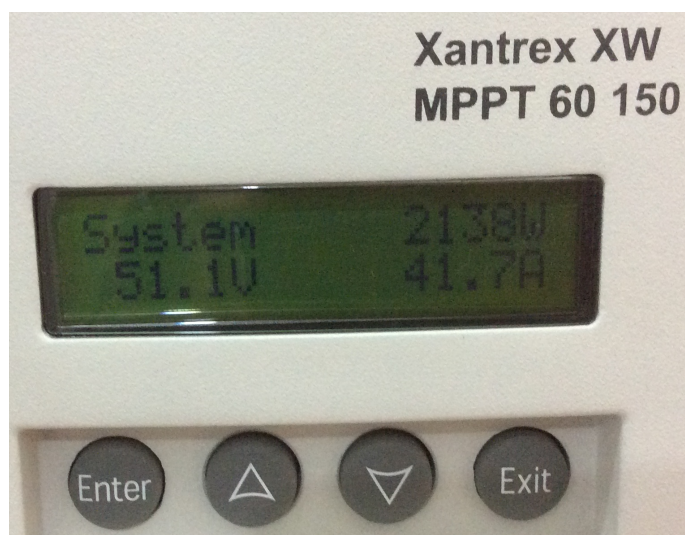


Figura 80, Controladores de carga activos.

Bajo las consideración de un día con cielo despejado, radiación mayor a los 600 W/m^2 a medio día solar sobre el plano inclinado de los paneles y sin cargas eléctricas en la salida del inversor, el sistema manda la energía a las baterías (ver Figura 81).

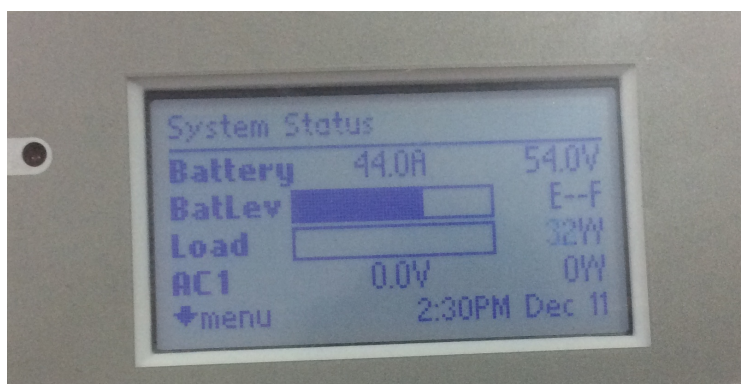


Figura 81, Cargando baterías .

Cuando el banco de cargas eléctricas (ver Figura 82) demanda energía, los controladores satisface la necesidad y la restante la envían a baterías o si la demanda es mayor que la generación, puede usar una parte de la energía almacenada (ver Figura 83).



Figura 82, Cargas eléctricas activadas.

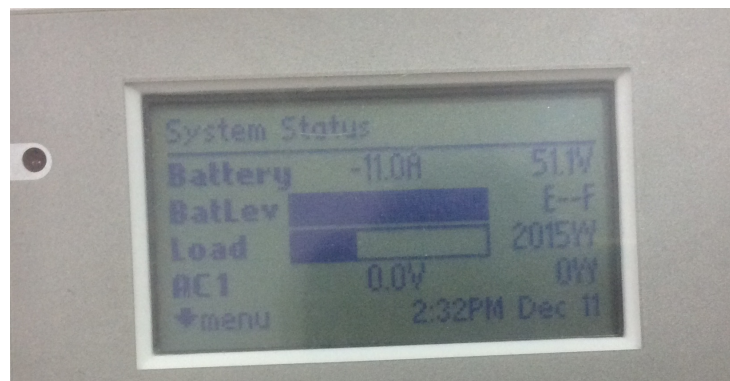


Figura 83, Energía de demanda mayor a la generación.

Mediante el panel de control se puede leer la energía entregada por cada controlador de carga (ver Figura 84), observando una caída en el voltaje y una elevación de corriente. Bajo esta configuración permite tener distintos voltajes de entrada debido a las diferentes características de fabricación en paneles fotovoltaicos. Tal es el caso que contamos paneles con características en cuanto a la voltaje y corriente que entregan.

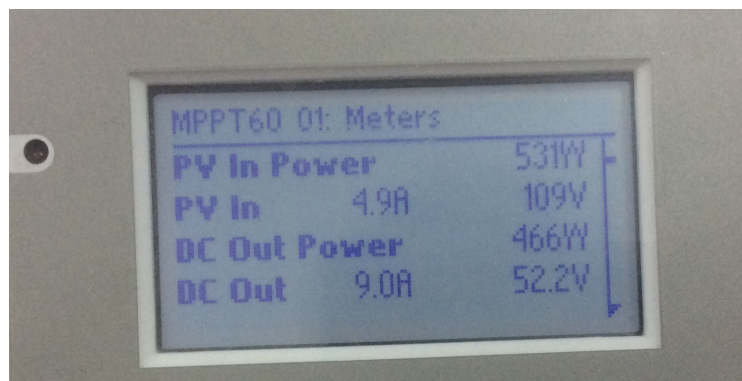


Figura 84, Lecturas de la energía a la entrada y salida de los controladores de carga.

Cuando no se encuentran disponibles los recursos solar y eólico, es necesario satisfacer la demanda con el banco de baterías (ver Figura 85).

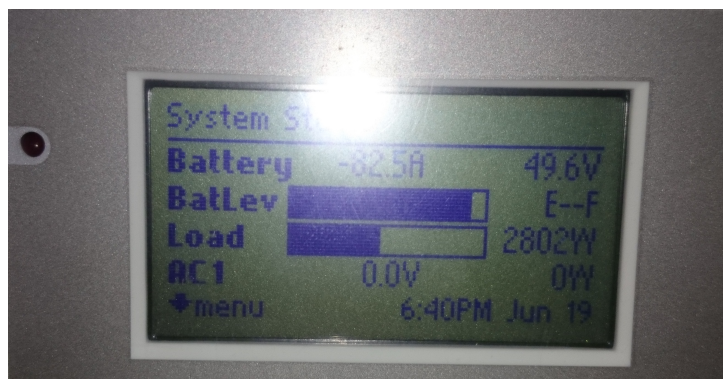


Figura 85, Energía demandada proveniente del banco de baterías.

En la Figura 86 se muestran los datos registrados de un día con picos superiores a la velocidad nominal del aerogenerador, las mediciones fueron tomadas con la estación meteorológica que tenemos a la misma altura del aerogenerador.



Figura 86, Datos registrados del 21 de agosto del 2014.

Para ese día el banco de baterías se encontraba próximo a su máxima capacidad de carga. Y al no satisfacer ninguna carga, la energía proveniente del aerogenerador (ver Figura 87) resultaba excesiva para las condiciones dadas, por lo que el controlador como lazo de control de seguridad, optó por derivar la carga (ver Figura 88). De esta forma se busca hacer un freno mecánico para bajar la velocidad del aerogenerador y no se vea afectado por los fuertes vientos.



Figura 87, Aerogenerador en operación con velocidades de viento mayores 18 m/s.

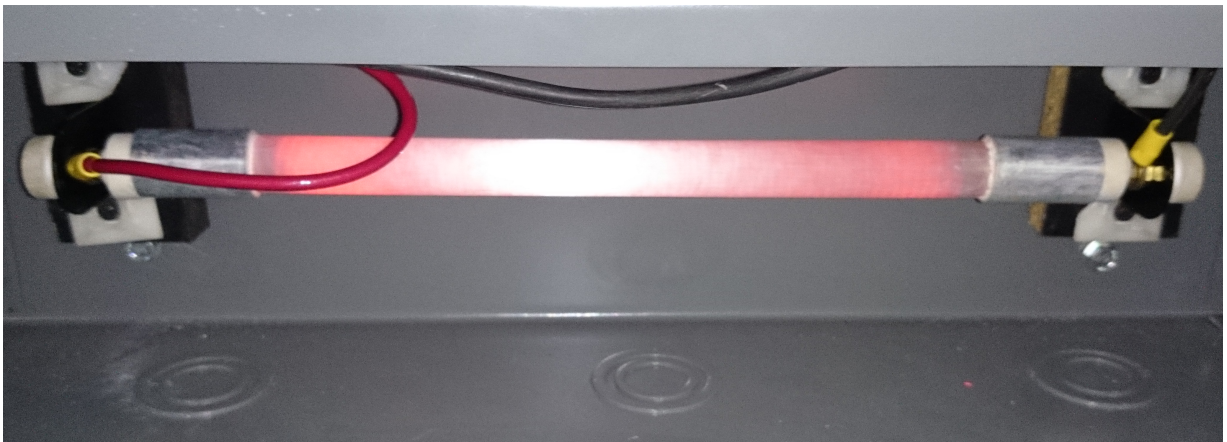


Figura 88, Resistencia al rojo vivo derivando la carga, manteniendo la integridad del aerogenerador.