

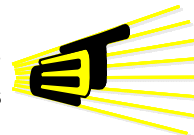
Selección, simulación y caracterización de un sistema de energía solar fotovoltaica para alimentación de nodos Wi-Fi en áreas rurales.

**PRESENTADO ANTE:
Comité Asesor de Pregrado E³T**

**Por:
LEONARDO MEZA MEZA
JORGE DIEGO MORENO DÍAZ**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES**



Bucaramanga, junio de 2010

Selección, simulación y caracterización de un sistema de energía solar fotovoltaica para alimentación de nodos Wi-Fi en áreas rurales.

LEONARDO MEZA MEZA

**Trabajo para optar el título de
INGENIERO ELECTRICISTA**

JORGE DIEGO MORENO DÍAZ

**Trabajo para optar el título de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

Director

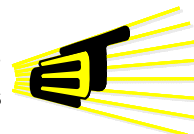
Mie. Alfredo Rafael Acevedo Picón

Co-director

Ing. Ricardo Andrés Díaz Suárez



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES**



Bucaramanga, junio de 2010

*A mis padres, a través de quienes Dios ha
manifestado toda la bondad del Universo.*

Jorge Diego

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 16 |
| Capítulo 1 PRELIMINARES..... | 19 |
| 1.1 Introducción..... | 19 |
| 1.2 Distribución de la intensidad de la radiación solar en Colombia..... | 20 |
| 1.3 Descripción del sistema solar fotovoltaico..... | 20 |
| 1.4 Descripción del nodo Wi-Fi | 22 |
| 1.4.1 Configuración de los nodos..... | 22 |
| 1.5 Descripción de la etapa de adquisición de datos | 23 |
| 1.5.1 Circuito sensor de tensión..... | 24 |
| 1.5.2 Circuito sensor de corriente | 25 |
| Capítulo 2 PRUEBAS AL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO..... | 27 |
| 2.1 Introducción..... | 27 |
| 2.2 Descarga de la batería | 27 |
| 2.3 Carga de la batería..... | 28 |
| 2.4 Medida del consumo de <i>routerboards</i> y radios | 29 |
| 2.5 Prueba del sistema completo funcionando..... | 30 |
| 2.5.1 Prueba del sistema en reposo | 31 |
| Capítulo 3 MODELADO | 35 |
| 3.1 Introducción..... | 35 |
| 3.2 Modelado de los elementos del sistema solar fotovoltaico..... | 35 |
| 3.2.1 Módulo solar | 35 |
| 3.2.2 Batería de plomo-ácido | 43 |
| 3.2.3 Regulador | 49 |
| 3.2.4 Modelo de la carga | 51 |
| 3.2.5 Sistema fotovoltaico completo | 52 |

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 4 SIMULACIÓN | 55 |
| 4.1 Introducción..... | 55 |
| 4.2 Caracterización de los elementos del sistema solar..... | 56 |
| 4.2.1 Módulos solares..... | 56 |
| 4.2.2 Bateria | 61 |
| 4.2.3 Regulador | 62 |
| 4.3 Simulación del sistema fotovoltaico..... | 63 |
| 4.3.1 Sistema en reposo 57 horas | 63 |
| 4.3.2 Sistema transmitiendo 30 horas..... | 65 |
| 4.4 Sistema operando bajo condiciones reales | 66 |
| | |
| Capítulo 5 DIMENSIONADO..... | 72 |
| 5.1 Introducción..... | 72 |
| 5.2 Horas Solares Pico (PSH)..... | 72 |
| 5.3 Balance de energía en un sistema fotovoltaico | 73 |
| 5.3.1 Criterio del mes peor..... | 74 |
| 5.3.2 Criterio del mes promedio | 74 |
| 5.4 Balance energético diario en un sistema fotovoltaico..... | 77 |
| 5.4.1 Carga funcionando las 24 horas del día | 77 |
| 5.4.2 Carga operando en la noche..... | 82 |
| 5.4.3 Carga operando en horas centrales del día | 83 |
| 5.5 Balance energético mensual | 84 |
| 5.5.1 Cálculos | 85 |
| 5.6 Procedimiento simplificado para dimensionar la batería | 86 |
| 5.6.1 Cálculos | 87 |
| 5.7 Dimensionado para varios escenarios de carga..... | 88 |
| 5.8 Costos..... | 91 |
| | |
| CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES..... | 92 |
| | |
| RECOMENDACIONES..... | 97 |

BIBLIOGRAFÍA 101

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Instalación y ubicación del nodo de pruebas..... | 19 |
| Figura 1.2 Diagrama de bloques del sistema solar fotovoltaico..... | 21 |
| Figura 1.3 Ubicación del <i>datalogger</i> dentro del nodo de pruebas. | 23 |
| Figura 1.4 Configuración del LT6107 como circuito sensor de corriente..... | 25 |
| Figura 1.5 PCB de los circuitos acondicionadores de señal. | 26 |
| | |
| Figura 2.1 Tensión de descarga de la batería. | 28 |
| Figura 2.2 Corriente de descarga de la batería | 29 |
| Figura 2.3 Consumo de potencia para el nodo estación en reposo..... | 31 |
| Figura 2.4 Potencia que entrega la batería..... | 32 |
| Figura 2.5 Potencia que entrega el módulo solar. | 33 |
| Figura 2.6 Corriente y tensión en el módulo solar. | 33 |
| | |
| Figura 3.1 Modelo ideal del módulo solar..... | 36 |
| Figura 3.2 Modelo de segundo nivel del módulo solar | 38 |
| Figura 3.3 Modelo comportamental del módulo solar y subcircuito equivalente... | 40 |
| Figura 3.4 Modelo eléctrico para la batería. | 43 |
| Figura 3.5 Modos de operación de la batería. | 43 |
| Figura 3.6 Esquemático equivalente del modelo. | 46 |
| Figura 3.7 Esquemático de los nodos de acceso del modelo de la batería..... | 47 |
| Figura 3.8 Modelo simplificado para la batería. | 48 |
| Figura 3.9 Lugar del regulador dentro del sistema solar fotovoltaico. | 49 |
| Figura 3.10 Comparador tipo ventana | 50 |
| Figura 3.11 Modelo para la corriente de carga. | 52 |
| Figura 3.12 Descripción del sistema fotovoltaico completo. | 52 |
| Figura 3.13 Circuito para simulaciones de corto término..... | 53 |
| Figura 3.14 Circuito para simulaciones de largo término..... | 54 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Figura 4.1 | Característica I(V) y potencia de salida para el módulo policristalino.. | 57 |
| Figura 4.2 | Característica I(V) y potencia de versus irradiancia. | 58 |
| Figura 4.3 | Característica I(V) en un rango de temperatura ambiente..... | 59 |
| Figura 4.4 | Corriente de máxima potencia y corriente de salida..... | 59 |
| Figura 4.5 | Tensión a máxima potencia y tensión a temperatura ambiente. | 60 |
| Figura 4.6 | Verificación del modelo del módulo solar. | 60 |
| Figura 4.7 | Verificación del modelo de la batería..... | 62 |
| Figura 4.8 | Verificación del modelo del regulador de carga..... | 63 |
| Figura 4.9 | Simulación del sistema completo. | 65 |
| Figura 4.10 | Comparación de los resultados simulados con los experimentales .. | 66 |
| Figura 4.11 | Perfil de carga, radiación y temperatura anuales | 67 |
| Figura 4.12 | Simulación de largo término: SOC y tensión en la batería. | 68 |
| Figura 4.13 | Simulación de largo término: SOC y corriente de desbordamiento. ... | 69 |
| Figura 4.14 | Detalle de la evolución del SOC y la corriente de desbordamiento... | 70 |
| Figura 4.15 | Mejoramiento a la configuración inicial..... | 71 |
| Figura 5.1 | <i>Mismatch</i> para el nodo estación transmitiendo 24 horas..... | 80 |
| Figura 5.2 | Sistema configurado con panel de 65 W y 85W..... | 81 |
| Figura 5.3 | <i>Mismatch</i> de energía para el nodo estación en reposo todo el día. ... | 82 |
| Figura 5.4 | Nodo transmitiendo en horas de la noche. | 83 |
| Figura 5.5 | Nodo transmitiendo 8 horas durante el día..... | 84 |
| Figura 5.6 | Balance energético mensual para diferentes horas de transmisión | 85 |
| Figura 5.7 | Simulación del nodo repetidor transmitiendo 12 horas al día. | 90 |
| Figura 5.8 | Costos para la instalación. | 91 |

LISTA DE TABLAS

| | | |
|------------------|--|----|
| Tabla 1.1 | Rango anual de disponibilidad de energía solar por regiones | 20 |
| Tabla 1.2 | Descripción de los elementos de la instalación fotovoltaica..... | 21 |
| Tabla 1.3 | Descripción de los elementos que conforman un nodo Wi-Fi. | 22 |
| Tabla 1.4 | Configuración de los nodos Wi-Fi. | 23 |
| Tabla 1.5 | Características del <i>datalogger</i> | 24 |
| | | |
| Tabla 2.1 | Consumo para diferentes configuraciones del nodo. | 30 |
| Tabla 2.2 | Medidas para el consumo del nodo | 30 |
| | | |
| Tabla 4.1 | Parámetros del módulo solar bajo condiciones estándar..... | 56 |
| Tabla 4.2 | Parámetros de la batería..... | 61 |
| Tabla 4.3 | Parámetros del regulador..... | 62 |
| | | |
| Tabla 5.1 | Radiación promedio mensual para Bucaramanga. | 75 |
| Tabla 5.2 | Radiación promedio diaria y \overline{PSH} | 76 |
| Tabla 5.3 | Configuraciones para el nodo estación transmitiendo 13 horas..... | 88 |
| Tabla 5.4 | Dimensionado para el nodo estación en diferentes escenarios. | 90 |
| Tabla 5.5 | Dimensionado para el nodo repetidor en diferentes escenarios. | 90 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|---|-----|
| Anexo 1 Mapa de radiación solar global para Colombia | 102 |
| Anexo 2 Datos y resultados de las pruebas | 103 |
| Anexo 3 Modelos en <i>Orcad Pspice</i> del Sistema Solar | 114 |
| Anexo 4 Archivos en <i>Orcad Pspice</i> de simulación | 117 |
| Anexo 5 Datos y resultados del dimensionado | 125 |

TITULO: SELECCIÓN, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA ALIMENTACIÓN DE NODOS WI-FI EN ÁREAS RURALES

Leonardo Meza Meza, Jorge Diego Moreno Díaz*

Palabras clave: energía solar fotovoltaica, dimensionado, modelado y simulación de sistemas solares fotovoltaicos, consumo y caracterización de un nodo Wi-Fi, adquisición de datos mediante datalogger, circuitos acondicionadores de señal, sensor de corriente

RESUMEN

En este trabajo se presenta una propuesta metodológica para realizar el dimensionado de un sistema de energía solar fotovoltaico (SESF) aislado específicamente para la alimentación de un nodo de comunicaciones Wi-Fi implementado en áreas rurales. Esta propuesta involucra la utilización de un modelo que representa el comportamiento del SESF, el cual incluye como entrada la estimación del recurso solar en la zona de ubicación, a partir de lo encontrado en las fuentes de información disponibles. Además, se muestran los resultados de las pruebas de campo hechas con un prototipo de nodo Wi-Fi autónomo, con lo que se validó el desempeño individual de cada uno de los elementos, y posteriormente de todo el SESF alimentando la carga. Esto permitió su caracterización, es decir, la determinación del comportamiento en el tiempo de las principales variables eléctricas: tensión, corriente, potencia y energía. Para realizar las pruebas de campo fue necesario utilizar un sistema de adquisición de datos, integrado principalmente por un *datalogger*, y la construcción de circuitos acondicionadores de señal, y así monitorear la dinámica energética que ocurre en todo momento dentro del sistema. En la simulación con *Orcad Pspice* se aprovecharon tanto los resultados de las pruebas y el modelado, como la estimación del recurso solar. A su vez, con los resultados de la simulación se llevó a cabo la etapa final de dimensionado, que tiene en cuenta las distintas configuraciones del nodo Wi-Fi, sus modos de operación y tiempos de funcionamiento, según lo requerido por el proyecto UIS-Colciencias *Diseño construcción y caracterización de un enlace autónomo de comunicación Wi-Fi para áreas rurales alimentado con energía solar*. Un dimensionado para un número finito de escenarios, incluyendo la autonomía y los costos, es presentado como resultado.

* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: MIE. Alfredo Acevedo, Co-director: Ing. Ricardo Díaz Suárez

TITLE: SELECTION, CHARACTERIZATION AND SIMULATION OF A PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY SYSTEM TO SUPPLY WI-FI NODES IN RURAL AREAS

Leonardo Meza Meza, Jorge Diego Moreno Díaz*

Keywords: photovoltaic solar energy, sizing, modeling and simulation of photovoltaic systems, characterization of a Wi-Fi node, datalogger data acquisition, signal conditioning circuits, current sensor

ABSTRACT

This paper proposes a method for sizing an off-grid photovoltaic solar energy system (PSES) specifically for powering a communications Wi-Fi node deployed in rural areas. This proposal involves the use of a model representing the behavior of PSES, which include as input data the estimate solar resource in the area of location, from what was found in the sources of information. In addition, we present the results of field tests made with an autonomous Wi-Fi node prototype, which validated the individual performance of each of the elements, and then around the PSES feeding the load. This allowed characterization, i.e., determining the temporal behavior of the main electrical variables: voltage, current, power and energy. For field testing was necessary to use a data acquisition system, composed mainly of a datalogger, and the construction of signal conditioning circuits, to monitor the energy dynamics and that occurs at any time within the system. In the simulation with *Orcad Pspice* took advantage both test results and modeling, and the estimation of solar resources. In turn, the results of the simulation was carried out sizing the final stage, which takes into account the different configurations of the Wi-Fi node, its operation modes and operating times, as required by the UIS-Colciencias project *Design, construction and characterization of an autonomous communication link Wi-Fi for rural areas powered by solar energy*. A sizing for a finite number of scenarios, including autonomy and costs, is presented as a result.

* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Mie. Alfredo Acevedo, Co-director Ing. Ricardo Díaz Suárez

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de la vasta energía que el sol provee constantemente se constituye en una alternativa importante para cubrir la demanda energética mundial; un caso específico son las poblaciones que no tienen un servicio eléctrico constante, o simplemente carecen de él a razón de su ubicación geográfica apartada, o su bajo índice demográfico, por lo cual resultan privándose indirectamente de acceder también a otros servicios, como es el caso de la conectividad.

En países con un panorama similar en materia de comunicaciones al nuestro, se han realizado algunas investigaciones importantes para resolver el problema de conectividad en regiones apartadas en donde el suministro de energía eléctrica es escaso o nulo. La experiencia de estos países en el empleo de tecnologías Wi-Fi como alternativa de comunicación, indica que es posible establecer conexiones punto a punto del orden de kilómetros, usando alimentación con energía solar a un costo considerablemente bajo en comparación con las soluciones cableadas tradicionales.

Aplicar los avances logrados en los últimos años en materia de energía solar fotovoltaica, específicamente el aumento de la eficiencia en las celdas solares, y aumento en la capacidad de almacenamiento de energía en cuanto a baterías se refiere, en virtud de la tendencia a la baja de su costo, según muestran recientes indicadores, dan señales alentadoras para resolver el problema de alimentación de sistemas de comunicación inalámbrica, como los que se pretenden implementar para el suministro de conectividad en zonas rurales y de baja población.

En Colombia, la disponibilidad del recurso solar no es un problema, ya que se goza de una ubicación geográfica privilegiada debido a la cercanía al Ecuador, en donde la radiación solar incidente es mayor que en los trópicos; hablar de implementar este tipo de soluciones resulta pertinente desde todo punto de vista.

El reto consistió, entonces, en caracterizar el comportamiento eléctrico del sistema de generación fotovoltaica alimentador de un nodo WiFi, dándole soporte teórico a la solución con la selección de un modelo circuital, y la correspondiente simulación, además de la ejecución de un conjunto de pruebas establecidas.

Al esbozarse el problema de la caracterización eléctrica del sistema de generación fotovoltaico y de la carga, surgieron otros problemas que cabe mencionar, como la no-linealidad de la carga, así como de los modelos circuitales básicos de los elementos del sistema. La problemática también consistió en relacionar la potencia consumida, generada y almacenada a partir de diversos escenarios de carga, radiación solar y temperatura, en busca del óptimo desempeño y un costo razonable.

En efecto, el presente trabajo de grado plantea una metodología para caracterizar el suministro de energía eléctrica para nodos Wi-Fi en zonas rurales a partir de módulos fotovoltaicos, simular el funcionamiento para periodos prolongados de tiempo, y finalmente hacer el dimensionado, dentro de lo estipulado en el proyecto de investigación UIS-Colciencias *Diseño construcción y caracterización de un enlace autónomo de comunicación Wi-Fi para áreas rurales alimentado con energía solar.*

El presente trabajo está estructurado de la siguiente manera: inicialmente, en el capítulo 1, se hace un bosquejo de cada uno de los sistemas involucrados, mostrando las características más importantes de sus elementos constitutivos, para luego ilustrar cómo se conectan interna y externamente. Se comienza por el sistema solar fotovoltaico, después se describe el nodo Wi-Fi y por último, el

sistema de adquisición de datos con sus circuitos acondicionadores de señal. En el capítulo 2 se muestran los resultados y los análisis de cada una de las pruebas al sistema de alimentación fotovoltaica alimentando al nodo Wi-Fi descrito en el capítulo 1, así como las pruebas hechas individualmente a cada uno de los elementos (del sistema solar), para posteriormente cotejar dichos resultados y análisis con lo presupuestado en el marco teórico y sacar algunas conclusiones. En el capítulo 3 se sientan las bases de la simulación mediante la explicación de los modelos en *Orcad PSpice* para cada uno de los elementos del sistema solar fotovoltaico, así como del sistema completo. Igualmente, se presenta el modelo adoptado para representar la carga (el nodo Wi-Fi). El capítulo 4 corresponde a la simulación. En él, se hace una comparación de los resultados de la teoría y la práctica a medida que se presentan los resultados, los análisis, y las conclusiones más preponderantes de la simulación. Finalmente, en el capítulo 6, se describe el método de dimensionado empleado, y con el que se obtuvieron las configuraciones del sistema fotovoltaico para varios casos de carga específicos. En la parte de conclusiones, recomendaciones y observaciones se hace una síntesis de los resultados y objetivos alcanzados con la realización del presente trabajo.

Capítulo 1 PRELIMINARES

1.1 Introducción

Con el objetivo de contextualizar los capítulos subsiguientes (Pruebas, Modelado, Simulación y Dimensionado), en este se hace una breve descripción de un nodo Wi-Fi autónomo, objeto de estudio del presente trabajo de grado, enmarcado en el proyecto UIS-Colciencias *Diseño construcción y caracterización de un enlace autónomo de comunicación Wi-Fi para áreas rurales alimentado con energía solar*. De igual manera, se presentan los dispositivos de adquisición de datos con los que se obtuvo el comportamiento de las diferentes variables que caracterizan un sistema de alimentación autónoma, así como una síntesis de la distribución de radiación solar en Colombia.

En la figura 1.1 se muestra la instalación del nodo Wi-Fi. En él se integran el sistema solar fotovoltaico, el de comunicaciones y el de adquisición de datos. A continuación se describe brevemente cada uno ellos.



Figura 1.1 Instalación y ubicación del nodo de pruebas dentro de la Universidad Industrial de Santander.

1.2 Distribución de la intensidad de la radiación solar en Colombia

Según datos del Atlas de Radiación Solar publicado por la UPME¹ en el año 2005, Colombia, en general, presenta un buen promedio diario de radiación solar, siendo La Guajira la zona con la cifra más alta (entre 5.0 y 6.0 KWh/m²) de la costa Atlántica, región que posee los niveles más altos dentro del territorio nacional. Estos valores van decreciendo gradualmente desde el nor-orienté (costa Atlántica) hasta el sur-occidente del país (costa Pacífica), región cuyo valor promedio es el más bajo, 3.5 KWh/m², aunque posee una zona con valores entre 4.0 y 4.5 KWh/m². En la zona Andina, se destacan los Valles del Cauca y Magdalena, que poseen el mayor potencial de la región, en la que también se encuentran puntos intermedios en los altiplanos. En las regiones Amazónica y de la Orinoquía se registran valores equiparables a los de La Guajira (Puerto Carreño). La tabla 1.1 muestra el promedio multianual para cada región.

| Región | KWh/m ² /año |
|-----------------|-------------------------|
| La Guajira | 1980 – 2340 |
| Costa Atlántica | 1260 – 2340 |
| Orinoquía | 1440 – 2160 |
| Amazonía | 1440 – 1800 |
| Andina | 1080 – 1620 |
| Costa Pacífica | 1080 – 1440 |

Tabla 1.1 Rango anual de disponibilidad de energía solar por regiones. Promedio multianual.
Fuente: Atlas de Radiación Solar, 2005. UPME

En el Anexo 1 se encuentra el mapa de radiación diaria promedio multianual de la UPME.

1.3 Descripción del sistema solar fotovoltaico

El sistema de alimentación configurado constó de un panel o módulo solar, encargado de convertir la radiación solar en energía eléctrica; un regulador de carga, cuya principal función es administrar la energía que proviene del módulo solar, la energía que suministra la batería y el consumo de potencia de la carga. Otro elemento básico es la batería, encargada de suministrar potencia a la carga

¹ Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia

en ausencia de radiación solar, o cuando la energía proveniente del módulo fotovoltaico es insuficiente para mantener el suministro de potencia que necesita la carga. En la figura 1.1 se ilustra la interconexión de los diferentes elementos dentro del sistema solar fotovoltaico.

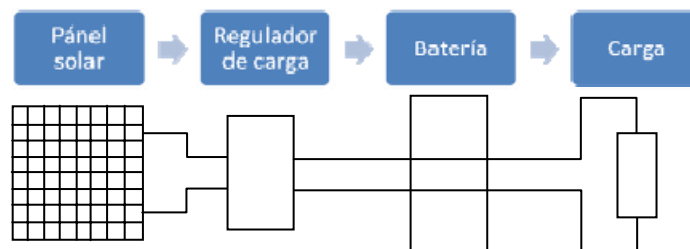


Figura 1.2 Diagrama de bloques para la conexión del sistema solar fotovoltaico.

La tabla 1.2 resume las características eléctricas más importantes de los elementos del sistema fotovoltaico.

En nuestro caso, se trata de un sistema fotovoltaico aislado, cuyo fin no es introducir energía a la red de distribución eléctrica sino alimentar el nodo de comunicaciones Wi-Fi, el cual trabaja con corriente continua, por lo que no se requirió el uso de inversor.




| Elemento | Descripción | Principales parámetros |
|---|--|--|
|  | Módulo solar policristalino KYOCERA KS-20 | Potencia pico: 20 W Corriente de cortocircuito: 1.24 A Tensión de circuito abierto: 21.5 V |
|  | Batería de plomo ácido MTK 12 V 33 Ah | Tensión nominal: 12V Capacidad: 33 Ah Peso: 11.3 Kg |
|  | Regulador de carga STECA PR1010 | Regulación por SOC o tensión Capacidad de carga: 10 A Consumo: 12 mA |

Tabla 1.2 Descripción de los principales elementos que conforman la instalación fotovoltaica configurada para pruebas. Los parámetros son los que el fabricante suministra.

1.4 Descripción del nodo Wi-Fi

Un nodo de comunicaciones Wi-Fi está conformado por una *routerboard*, encargada de interconectar y enrutar todas la interfaces de red (cableadas e inalámbricas); uno o dos radios que permiten operar con los estándares IEEE80211b/g/e, ya sea si es nodo *estación* o *repetidor*, respectivamente, y una antena direccional de alta ganancia que permite enlazar remotamente a grandes distancias varios nodos entre si. En la tabla 1.3 se encuentran las especificaciones más relevantes de los diferentes elementos de comunicaciones utilizados

1.4.1 Configuración de los nodos

Para ejecutar las pruebas se configuraron dos estaciones denominadas nodo 1 y nodo 2, las cuales disponen de una *routerboard* conectada a una antena, y de uno o dos radios XR2-2, según la configuración: *punto de acceso*, *estación* o *repetidor*, de tal manera que se asemeje a los requerimientos definidos en el proyecto UIS-Colciencias. La tabla 1.4 muestra el presupuesto de potencia para los cálculos preliminares de autonomía en las pruebas de campo, documentadas más adelante. Los datos corresponden a los encontrados en la hoja de especificaciones que suministra el fabricante.




| Elemento | Descripción | Tensión de Alimentación | Consumo máximo |
|--|---|-------------------------|----------------|
|  Alix 2.D2 | <i>Routerboard</i> de enrutamiento y seguridad en redes | 7 – 18 V DC | 5 W |
|  Soekris Net 4801.48 | <i>Routerboard</i> de enrutamiento y seguridad en redes | 6 – 20 V DC | 5 W |
|  Mini PCI XR2-2 | Módulo basado en 802.11b/g 2.4 GHz para redes mesh | 3,3 V DC | 4,29 W |

Tabla 1.3 Descripción de los principales elementos que conforman un nodo Wi-Fi de comunicaciones. Los parámetros son los que el fabricante suministra.

| Nodo 1 | |
|--------------------------------------|----------------|
| 2 radios XR2-2 Transmitiendo | 8.58 W |
| 1 <i>routerboard</i> Alix 2.2 | 5 W |
| Potencia máximo Total | 13.58 W |
| Nodo 2 | |
| 1 radio XR2-2 transmitiendo | 4.29 W |
| 1 <i>routerboard</i> Soekris 4801.48 | 5 W |
| Potencia máxima total | 9.29 W |

Tabla 1.4 Configuración de los nodos de prueba.

1.5 Descripción de la etapa de adquisición de datos

Para obtener información de la energía recolectada por el sistema fotovoltaico y la consumida por el nodo Wi-Fi, de manera continua durante el tiempo de las pruebas, se utilizó un *datalogger*, que es un dispositivo de adquisición de datos que permite sensar señales de tensión dentro del rango de 0 a 2.5 Volts DC. No obstante, las señales de nuestro interés están muy por encima de este rango, razón por la cual fue necesario construir los circuitos acondicionadores de señal para reducir los niveles de tensión y operar el *datalogger* dentro de los límites recomendados. Específicamente, se requirió un circuito acondicionador para medir cada una de las variables eléctricas fundamentales: corriente y tensión, tanto en el panel solar como en la batería y la carga (nodo Wi-Fi).

En la figura 1.3 se muestra la ubicación del *datalogger* dentro del sistema de pruebas.

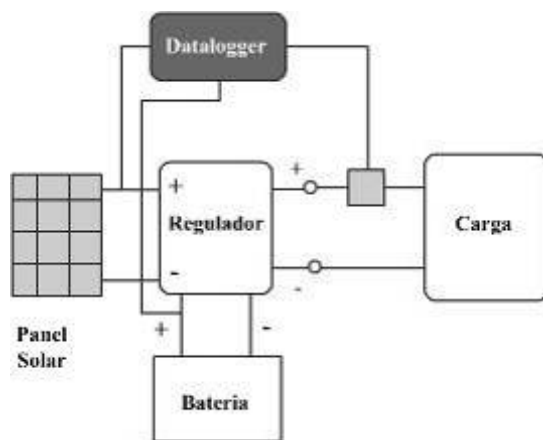


Figura 1.3 Ubicación del *datalogger* dentro del sistema de pruebas.

En la tabla 1.5 se presentan las características más relevantes del *datalogger* seleccionado.


| | |
|---|--|
|  | HOBO 4-Channel External Input Data Logger |
| Memoria | 32 K, 8 bits resolución, 32.520 lecturas |
| No. de canales | 4 canales compatibles con sensores externos y cables de entrada para temperatura, corriente AC, 4-20 [mA], 0-5 [Vdc] |
| Frecuencia de muestreo | De 0.5 segundos a 9 horas |
| Rangos de funcionamiento | Temperatura: -20°C a 70°C (-4°F a 158°F) Humedad: 0 a 95% de humedad relativa sin condensación, sin nubosidad |
| Peso | 29 gramos |

Tabla 1.5 Características del *datalogger* utilizado.

Una vez que dichos circuitos son implementados, los datos tomados estarán reducidos en un factor de escala conocido, que se tendrá en cuenta a la hora de extraerlos del dispositivo para procesar la información y hacer los estimativos necesarios de energía captada, energía consumida, días de autonomía, etc.

1.5.1 Circuito sensor de tensión

La manera más sencilla de reducir una tensión es mediante un divisor de tensión. Además, posee la virtud de introducir un error bajo en la medición, y su consumo es mínimo siempre y cuando los resistores seleccionados sean bajos. Para el diseño, se tuvieron en cuenta los valores máximos y mínimos de las tensiones a medir, que son la tensión de circuito abierto en el panel solar, y la tensión de circuito abierto en la batería. Con base en estas tensiones, se escogieron los valores de las resistencias de precisión para implementar los circuitos.

1.5.2 Circuito sensor de corriente

Uno de los circuitos más eficientes y prácticos para sensar corrientes del orden de los mA, es el que utiliza una resistencia *shunt* a la entrada diferencial de un amplificador operacional. En él, la corriente de interés circula por la resistencia *shunt* (del orden de los m Ω) y produce una tensión proporcional de valor muy pequeño. Para elevar esta tensión a niveles detectables por el *datalogger*, se hace necesario un OPAM con características de amplificador de instrumentación, tales como bajo *offset* a la entrada, alto CMRR, bajo ruido, entre otras.

Dentro del universo de OPAMs disponibles en el mercado, el LT6107 de Linear Technology es uno de los que ofrece la configuración más sencilla para implementar dicho circuito sensor. En la nota de aplicación, el fabricante sugiere la topología que aparece en la figura 1.4.

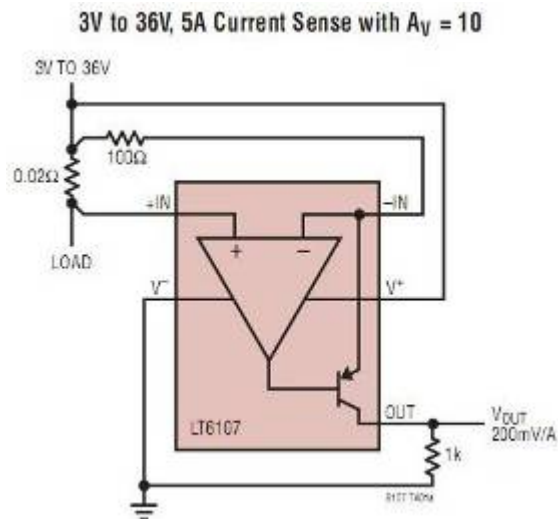


Figura 1.4 Configuración del LT6107 como circuito sensor de corriente, según la nota de aplicación del *datasheet*.

Fuente: Linear Technology

Además, el LT6107 ofrece linealidad en el rango de la tensión de entrada a nivel de mV, rango dinámico de salida dentro de 2.5 V, buen ancho de banda, 200 KHz, baja tensión de *offset* a la entrada, 150 μ V, y bajo costo, características deseables tanto en instrumentación electrónica como en aplicaciones de telefonía celular.

La selección de los valores de resistencias tuvo como criterio brindar una mayor sensibilidad a tensiones bajas de entrada, un menor error en la medición (debido a la tensión de *offset* de 150 uV del OPAM), un mayor ancho de banda (según la teoría de la realimentación negativa, a costa de un mayor consumo de potencia, del orden del 1% en comparación con el consumo de la carga), básicamente.

En la figura 1.5 se aprecia el PCB final donde se integraron los circuitos sensores para tensión y de corriente del sistema de alimentación fotovoltaica, junto con el nodo Wi-Fi.



Figura 1.5 PCB final de los circuitos acondicionadores de señal implementados.

Capítulo 2 PRUEBAS AL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

2.1 Introducción

Las pruebas al sistema de alimentación solar fotovoltaico fueron planteadas de tal manera que los distintos componentes se probaron independientemente y en conjunto. Las pruebas de cada componente por separado permitieron comprobar y analizar las distintas variables relacionadas con la teoría de funcionamiento de los elementos y compararlas con los valores suministrados por el fabricante. Además, junto a las del sistema completo, nos permitieron recopilar datos para validar los modelos de los elementos mediante la simulación y la comparación. El conjunto de pruebas que se plantearon se describe a continuación.

NOTA: Cada una de las siguientes pruebas se realizó más de una vez, pero sólo se presenta un resultado por prueba. El lugar de ejecución de las pruebas fue las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander, en Bucaramanga, COL, durante los meses de agosto, septiembre y octubre del año 2009.

2.2 Descarga de la batería

Tuvo como objetivo comprobar los datos de profundidad de descarga en la batería, y el tiempo de descarga en la batería a través de una carga resistiva. La batería se descargó por medio de una resistencia, cuyo valor se ajustó para obtener la corriente nominal de la batería. La conexión entre la batería y la resistencia se realizó por medio del regulador de carga. La función del regulador en esta prueba es desconectar la carga en el momento en el que su detector de SOC dicte que la batería está descargada cerca del límite permitido, y así compararlo con el estado real de carga de la batería.

Como resultado de la prueba, se obtuvo la curva de tensión en el tiempo a una carga constante, que al ser contrastada con la suministrada por el fabricante se observó que es prácticamente idéntica. En la figura 2.1 se muestran ambas curvas. En la gráfica experimental el indicador de desconexión -en este caso el SOC- está muy cercano al especificado en la hoja de datos de la batería y el regulador. El tiempo de descarga es el mismo al especificado para la batería.

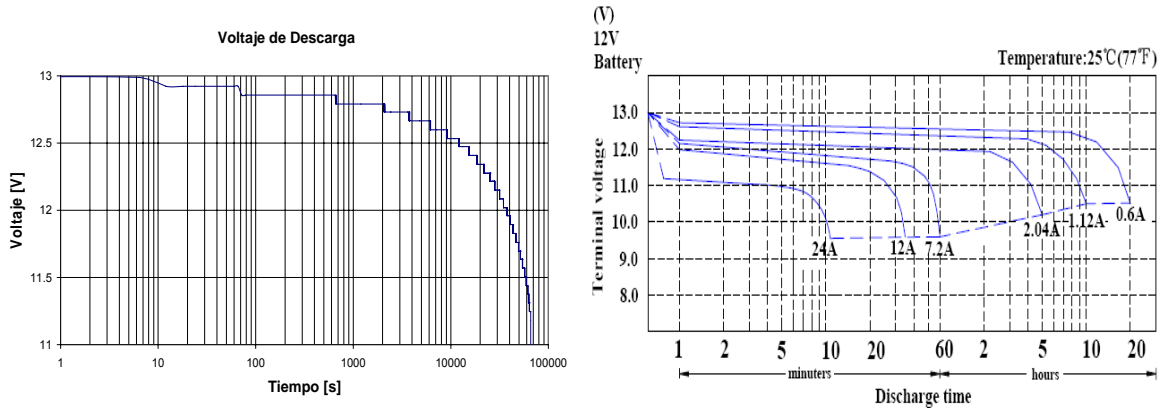


Figura 2.1 Tensión de descarga de la batería. *Izquierda.* Curva obtenida experimentalmente. *Derecha.* Curva que suministra el fabricante.

2.3 Carga de la batería

El objetivo de la prueba fue comprobar el tiempo de carga en la batería a una tensión constante. La conexión entre batería y fuente se realizó por medio del regulador de carga. La función de éste en la prueba es desconectar la carga en el momento en el que su circuito sensor de SOC detecte que la batería está cargada por encima del límite permitido, y así compararlo con el SOC real. En la figura 2.2 se muestra el resultado de la prueba hecha a una de las baterías.

Como resultado se obtuvo la curva de corriente de carga de la batería, la cual indica que su comportamiento y el tiempo de carga están dentro de lo presupuestado, teniendo en cuenta la tensión aplicada y las especificaciones del fabricante.

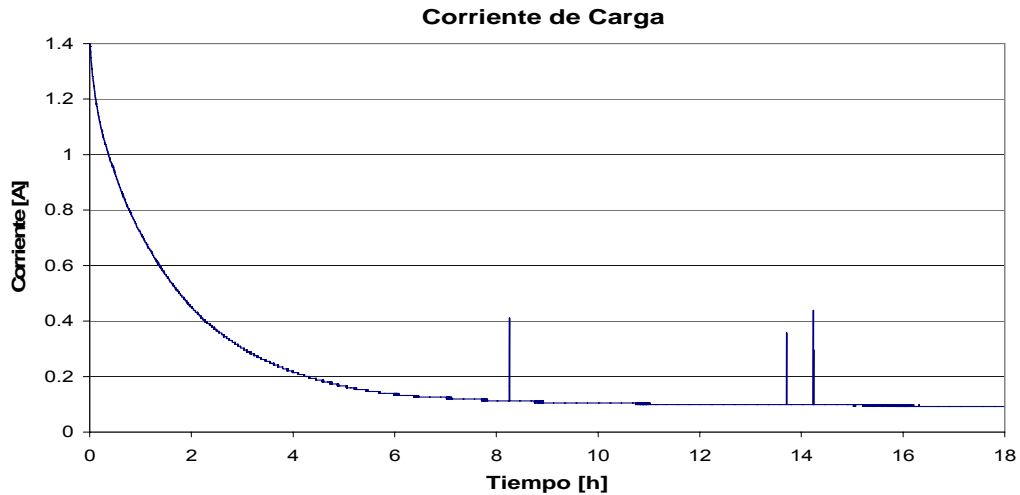


Figura 2.2 Corriente de descarga de la batería obtenida luego de la prueba

2.4 Medida del consumo de *routerboards* y radios

Mediante esta prueba se conoció el consumo de potencia en reposo y transmisión de las configuraciones para los nodos Wi-Fi (*estación* y *repetidor*), para contrastar los datos obtenidos en campo y poder evaluar el error de los instrumentos de medida utilizados.

En esta prueba se conectó el nodo Wi-Fi en cada una de las configuraciones, y se observó el comportamiento en transmisión y recepción, separadamente. A través del osciloscopio se pudo verificar la forma de onda de la corriente. Estos datos se tomaron como referencia para tasar el error en las pruebas de campo realizadas con el sistema de adquisición de datos descrito en la sección 1.5 del capítulo anterior.

La señal de corriente fue sensada a través de la caída de tensión en una resistencia de precisión de valor 1.5Ω . La tabla 2.1 sintetiza los resultados.

| Configuración de la carga | Tensión de alimentación = 12.50 V | | | | |
|---------------------------|-----------------------------------|-----------------|--------|--------|--------|
| | En reposo | Transmitiendo a | | | |
| | | 10 dBm | 15 dBm | 20 dBm | 28 dBm |
| Alix 2.D2 | 237 mA | - | - | - | - |
| Alix 2.D2 + radio XR2-2 | 309 mA | 432 mA | 464 mA | 491 mA | 528 mA |
| Soekris 2148 | 221 mA | - | - | - | - |

Tabla 2.1. Consumo para diferentes configuraciones del nodo Wi-Fi

En la tabla 2.2 se observa que las medidas de campo están dentro de un rango de error permisible (entre el 1% y el 5%) si se comparan con las realizadas en laboratorio, lo cual nos permite asumir que dichos datos son confiables. Estos valores se tomaron como referencia en cálculos posteriores de dimensionado y simulación, ya que tienen un *error por exceso* que nos permite evaluar la situación más desfavorable.

| Configuración de la carga | Potencia consumida | | | |
|---------------------------|--------------------|---------|------------|---------|
| | Osciloscopio | | Datalogger | |
| | Reposo | Transm. | Reposo | Transm. |
| Alix 2.D2 | 2.96 W | - | - | - |
| Alix 2.D2 + radio XR2-2 | 3.86 W | 6.6 W | 3.92 W | 6.95 W |
| Soekris 2148 | 2.76 W | - | - | - |
| Error | 1% | | 5% | |

Tabla 2.2 Medidas con osciloscopio y *datalogger* para el consumo del nodo en diferentes configuraciones.

2.5 Prueba del sistema completo funcionando

Para esta prueba se trazó como objetivo determinar el funcionamiento y características del sistema completo funcionando, específicamente, la potencia de entrada del sistema fotovoltaico, la potencia almacenada y entregada por la batería, la potencia consumida por la carga, las pérdidas de potencia y la eficiencia del sistema.

En esta prueba se integraron las tres pruebas descritas anteriormente, a diferencia que ésta se centró en observar la dinámica general del sistema mediante el sensado de las distintas variables que intervienen en la dinámica energética, tales

como tensión y corriente de salida en la batería, potencia que suministra el panel y potencia en la carga.

Se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- ✚ Se lograron las condiciones normales de operación para un sistema solar fotovoltaico.
- ✚ Se hizo una verificación previa del correcto funcionamiento de los equipos.
- ✚ Se partió de un dimensionado preliminar
- ✚ Se hicieron debidamente las conexiones entre elementos, esto es, tal y como recomienda el fabricante del regulador de carga empleado, y el sistema adquisidor de datos.

En esta prueba se tuvieron en cuenta las tres condiciones de operación: reposo, transmisión y recepción.

2.5.1 Prueba del sistema en reposo

De las medidas realizadas se estableció que el consumo promedio del *nodo estación* en reposo es de 3.92 W. En la figura 2.3 se muestra el resultado de una de las pruebas. La curva se originó a partir de la multiplicación para cada instante de tiempo de los datos obtenidos individualmente para tensión y corriente, para luego calcular su valor promedio.

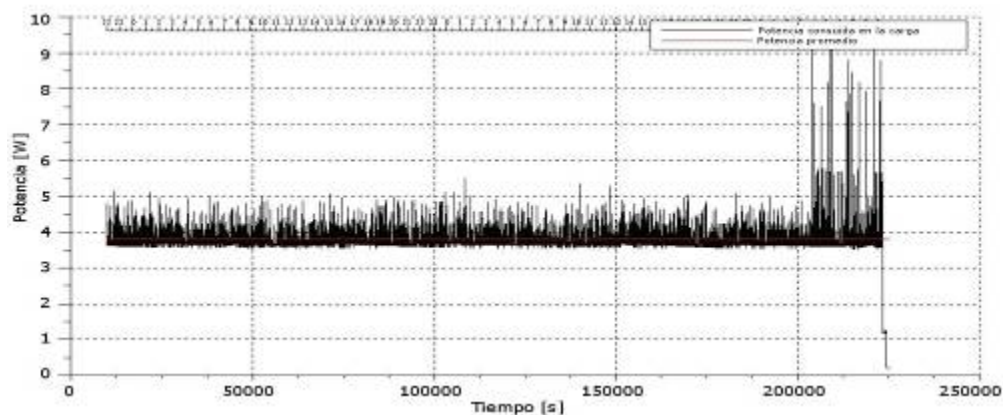


Figura 2.3 Consumo de potencia para el nodo estación en reposo.

En la figura 2.4, se muestra el ciclo de carga y descarga de la batería, así como el incremento del nivel de tensión durante el día, y decaimiento durante la noche; el almacenamiento de energía durante el día, que se refleja en un aumento del SOC y la disminución en la noche, momento en que entrega energía a la carga. Igualmente, se observa la variación en la magnitud de la tensión y corriente para los distintos escenarios de pruebas (ver numerales 4 y 5 del Anexo 2). Cuando el valor de la carga está cercano al límite inferior de la potencia que entrega el panel durante el día, el SOC oscila alrededor de un valor durante los ciclos día-noche o carga/descarga. Por el contrario, cuando la carga se mantiene sobre la potencia generada por el panel, el SOC comienza a disminuir paulatinamente de uno a otro ciclo de carga/descarga.

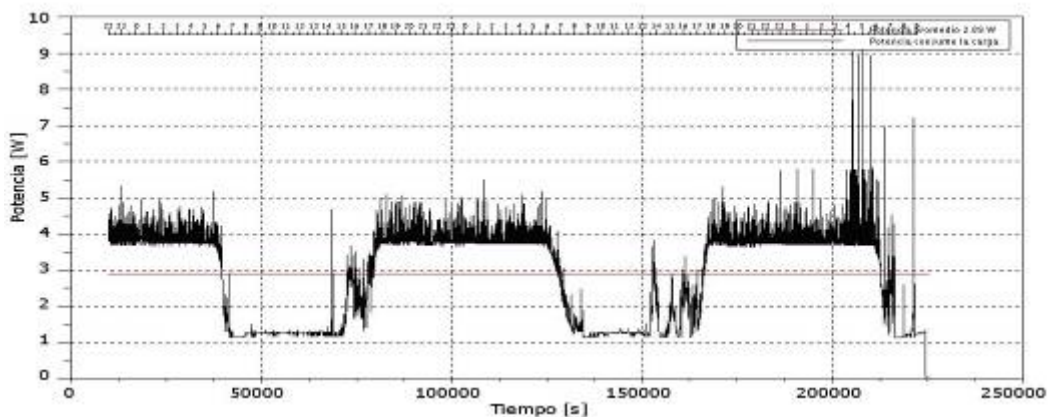


Figura 2.4 Potencia que entrega la batería. La línea roja demarca la potencia promedio igual a 2.89 W.

A través del análisis de las curvas de potencia de salida del panel (figura 2.5), se corroboraron los datos de radiación de las distintas fuentes consultadas. Los datos de potencia generada obtenidos con el panel SUNWIZE OEM20 de 20 W están entre los 70 y 80 Wh·día, en promedio, los cuales equivalen de 3.5 a 4.0 PSH².

Se concluye también que existe una fuerte dependencia entre la radiación incidente y la corriente de salida del panel, como se aprecia en la figura 2.6; la corriente es altamente sensible al paso de nubes, ya que experimenta una caída

² Sigla de *Peak Solar Hours* (horas solares pico). Como se explica más adelante, son las horas equivalentes al día con un radiación de 1000 W/m² a una temperatura de 25°C.

considerable cuando este fenómeno ocurre. Análogamente, es evidente la variación de la tensión a los cambios de radiación solar. Esto se ve reflejado en la rapidez con que se alcanza la tensión nominal a pocos minutos del amanecer, y al no disminuir su valor con el pasar de las nubes.

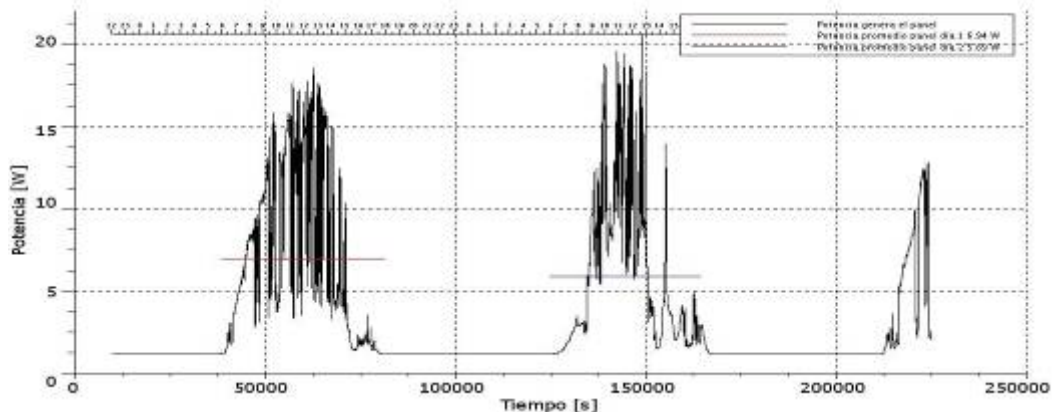


Figura 2.5 Potencia que entrega el módulo solar. La línea roja y azul indican la potencia promedio del primero y segundo día, respectivamente.

De la curva de corriente en el módulo solar (figura 2.6) se dedujo que el valor incremental por hora es de 140 mA para las primeras horas del día, si no se presentan nubosidades en las proximidades de la instalación. Simultáneamente, la tensión en los bornes del panel muestra un cambio brusco con las primeras incidencias de radiación solar; pasó de una tensión de 5.3 V a una de 12.5 V.

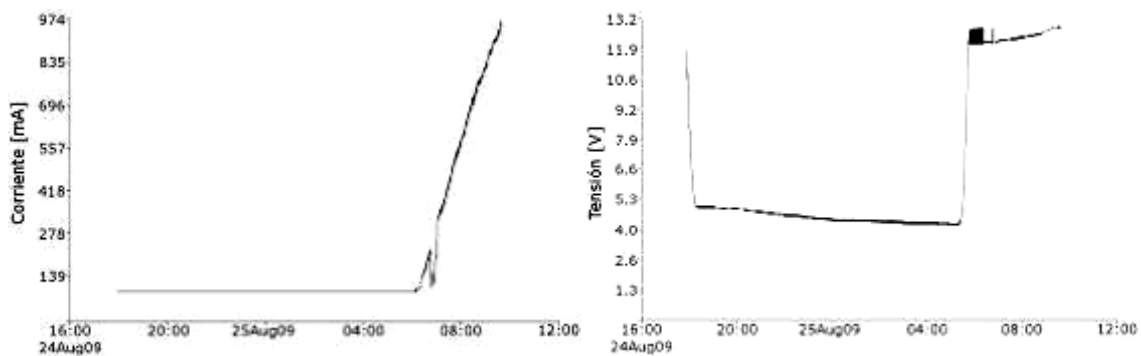


Figura 2.6 Corriente (izquierda) y tensión (derecha) en el módulo solar.

A partir del balance de energía que arrojó cada una de las pruebas, se dedujo que el regulador de carga y los circuitos acondicionadores de señal consumen sólo

unos cuantos mW (alrededor de 50), algo despreciable si se compara con el consumo de los demás equipos, que está por el orden de los Watts.

A manera de conclusión se puede decir que, mediante estas pruebas, se logró verificar la teoría de funcionamiento de los distintos elementos de un sistema solar fotovoltaico y la dinámica del sistema completo funcionando; son la base para validar los modelos por medio de la simulación y así extrapolarlos para otros escenarios de funcionamiento. Únicamente cuando se tiene todo el sistema funcionando se puede ver cómo es la dinámica entre la energía generada por el panel y la almacenada en la batería para alimentar la carga. Además, sirvieron para tener la experiencia de trabajar con un sistema real y conocer los problemas que acarrea el montaje y la puesta a punto para que funcione correctamente.

Capítulo 3 MODELADO

3.1 Introducción

Al realizar este modelado enfocado a la simulación de los elementos que componen el sistema solar fotovoltaico, así como de la carga (nodo Wi-Fi), no se pretende explicar detalladamente la operación desde un punto de vista físico, o de las geometrías de fabricación, o de la teoría de los semiconductores, para el caso del modulo solar, o químico, para el caso de la batería, pues está más allá de los alcances del presente trabajo de grado (para más información consultar las referencias [1] y [2]), sino más bien obtener un enfoque práctico desde el punto de vista de los circuitos eléctricos y de la ingeniería solar, y con eso darle sustento analítico a la solución propuesta.

Nota: los modelos de los elementos del sistema solar fotovoltaico aquí empleados fueron tomados en su totalidad de la referencia [1].

3.2 Modelado de los elementos del sistema solar fotovoltaico

A continuación se describen tanto los modelos eléctricos como su equivalente en *Orcad PSpice*, desde el más elemental, pasando por el más complejo, hasta presentar el simplificado para cada uno de los elementos que componen el sistema solar fotovoltaico. El modelo utilizado para la carga se presenta en la sección 3.2.4.

3.2.1 Módulo solar

Mediante la utilización de circuitos en *Orcad PSpice* se puede emular el comportamiento de un panel cuando es expuesto a la luz solar, con lo cual tres importantes magnitudes y sus relaciones permiten caracterizarlo:

- ✚ Corriente de cortocircuito, I_{sc} .
- ✚ Tensión de circuito abierto, V_{oc} .
- ✚ Punto de transferencia de máxima potencia, P_{max}

3.2.1.1 Modelo ideal

El circuito más simple para representar el funcionamiento de un módulo solar está basado en una fuente de corriente controlada por tensión en paralelo con un diodo ideal, dado que, al ser excitado por la luz del sol, su respuesta se puede modelar matemáticamente como

$$I = I_{sc} - I_o \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

para una tensión e irradiancia dada, siendo esta la primera aproximación a un modelo más completo, donde I_{sc} es la corriente de cortocircuito del módulo, I_o es la corriente de sombra, V es la tensión de excitación, V_T es el potencial térmico de la celda.

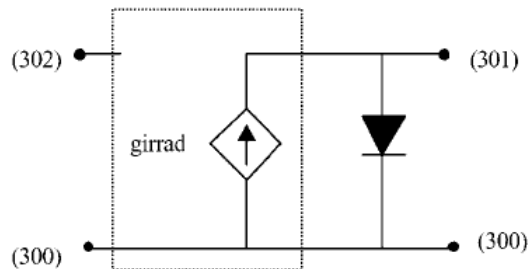


Figura 3.1 Modelo ideal del módulo solar

Fuente: Castaner, L., y Silvestre S., *Modelling photovoltaic systems using Pspice*, John Wiley & Sons, 2002

El circuito que representa la ecuación (3.1) se muestra en la figura 3.1. Como se observa, una fuente de corriente controlada por tensión implementa la corriente de cortocircuito, I_{sc} , que es proporcional a un valor de irradiancia dado.

El valor de la fuente *girrad* está dado por:

$$girrad = \frac{I_{sc}}{1000} G \quad (3.2)$$

donde G es el valor de la irradiancia en W/m^2 , e I_{sc} el valor de la corriente de cortocircuito para las condiciones estándar de AM1.5G, $1000 W/m^2$, $T_{cell}=25^{\circ}C$.

La ecuación (3.2) retorna la corriente de cortocircuito para cualquier valor de irradiancia G . Esto en *Orcad PSpice* es fácilmente implementado con una fuente de tensión independiente cuyo valor está dado por la expresión matemática en cuestión.

Este modelo de nivel 1 es el más utilizado para describir el comportamiento eléctrico del panel solar en *Orcad PSpice*. A pesar de las bondades que ofrece, algunas consideraciones elementales han sido obviadas, tales como las pérdidas causadas por la resistividad intrínseca del semiconductor, del contacto de los mecanismos de conducciones en la capa del emisor de las celdas, y las pérdidas causadas por los cortocircuitos en las uniones parciales.

3.2.1.2 Modelo generalizado

La introducción de un modelo generalizado necesariamente debe tener en cuenta los efectos de recombinación, las pérdidas a través del material semiconductor, inherentes a los procesos químicos de dopado, fabricación y manufactura, así como la no-idealidad del diodo de difusión.

Entre las principales pérdidas se destacan pérdidas en serie y pérdidas en paralelo. Las pérdidas en serie se relacionan con la resistencia del semiconductor que se opone al flujo de la corriente que viaja a través del material entre emisor y base de la celda solar y los contactos metálicos. Estas pérdidas están muy ligadas a las propiedades del material. En el modelo eléctrico se agrupan bajo una resistencia llamada R_s , o resistencia serie del panel.

Las pérdidas en paralelo se asocian con la tecnología de fabricación de las obleas o películas delgadas del material semiconductor. Estas pérdidas están localizadas en la capa del emisor o en el perímetro de celdas en paralelo, y para efectos de

representación circuital se reúnen bajo un resistor R_{sh} en paralelo con el diodo difusor.

La recombinación hace referencia a la región de carga espacial dentro de la celda solar y los campos en paralelo de corriente no-ohmica con la celda solar intrínseca. Juega un papel importante a un voltaje de polarización bajo y se representa en el circuito equivalente mediante un segundo diodo con una densidad de corriente de saturación J_{o2} distinta a la del modulo ideal, puesto que tiene un factor de diodo igual a 2 ($n=2$).

La no-idealidad del diodo de difusión se tiene en cuenta al atribuir una corriente de diodo diferente a la unidad, como se venía haciendo.

De las consideraciones anteriores se deduce un nuevo modelo que representa con más precisión el comportamiento de un módulo solar, aún cuando continúa siendo impráctico. El circuito equivalente se aprecia en la figura 3.2, del cual se obtiene una expresión para la corriente de salida I :

$$I = I_L - I_o \left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right) - I_{o2} \left(e^{\frac{V+IR_s}{2V_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3.3)$$

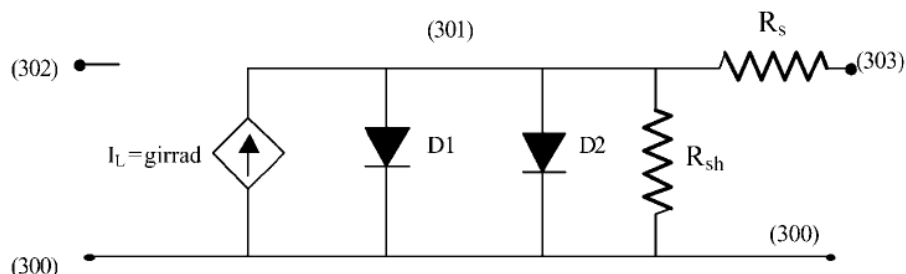


Figura 3.2 Modelo de segundo nivel del módulo solar

Fuente: Castaner, L., y Silvestre S., *Modelling photovoltaic systems using Pspice*, John Wiley & Sons, 2002

3.2.1.3 Modelo comportamental

Algunos modelos comerciales de módulos solares fabricados con materiales distintos a los tradicionales (Silicio, GaAs, o Ge) no suministran información detallada de los parámetros para poder caracterizarlo eléctricamente a partir de los modelos presentados en las secciones previas. La información suministrada en las hojas de datos se limita a los parámetros eléctricos más comunes, como corriente de cortocircuito, I_{sc} , tensión de circuito abierto, V_{oc} , y máxima potencia bajo condiciones estándar de operación, P_{max} , principalmente.

De otro lado, existe la limitación cuando se realiza un perfil de simulación empleando temperatura como variable de entrada para los modelos internos de *Orcad PSpice*, ya que lo que se obtiene es una serie de tiempo distinta para cada condición. Lo que se desea, entonces, a la hora de simular un sistema fotovoltaico es observar su comportamiento sometándolo a condiciones de temperatura e irradiancia variante a través del tiempo, aprovechando que actualmente los datos de radiación y temperatura para cada época del año, en una ubicación específica, están disponibles mediante software, o a través de observatorios meteorológicos alrededor del mundo.

Por estas razones, el modelo del panel solar que incluye un diodo no es práctico y de uso limitado. Como alternativa se utiliza el modelo comportamental basado en fuentes controladas de corriente y tensión, las cuales son capaces de modelar correctamente el comportamiento de un módulo solar cualquiera bajo condiciones de irradiancia y temperatura arbitrarias como datos eléctricos de entrada.

La representación circuital, así como el subcircuito empleado en *Orcad PSpice* se ilustra en la figura 3.3.

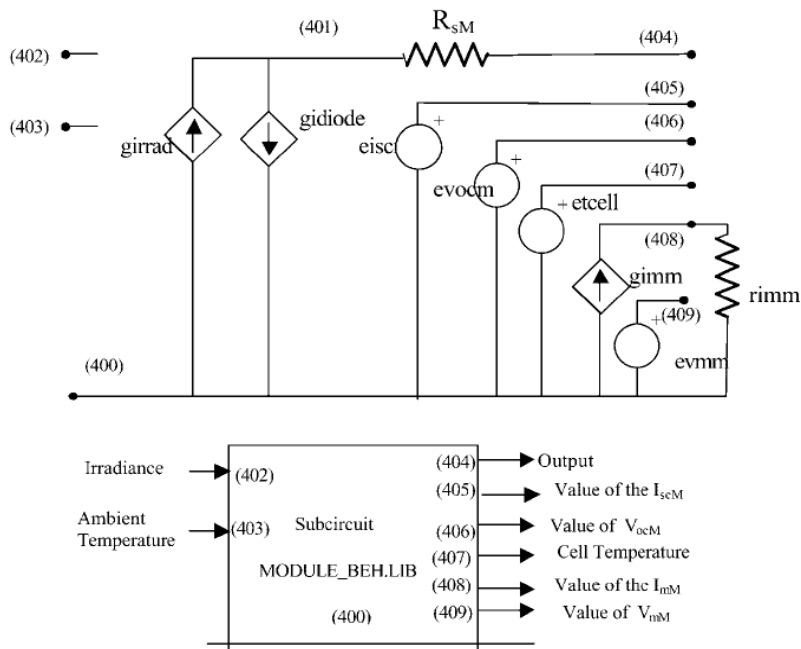


Figura 3.3 Modelo comportamental del módulo solar (arriba), y entradas y salidas del subcircuito equivalente (abajo)

Fuente: Castaner, L., y Silvestre S., *Modelling photovoltaic systems using Pspice*, John Wiley & Sons, 2002

El modelo asume que el módulo solar puede ser modelado por dos fuentes de corriente y una resistencia en serie. La primera fuente, llamada *girrad*, retorna el valor de la corriente de cortocircuito como función de la irradiancia y el coeficiente de temperatura para la corriente de cortocircuito (dado en A/°C), el cual se toma constante dentro del rango de temperaturas de interés. La expresión matemática es la siguiente:

$$I_{scM} = \frac{I_{scMr}}{1000} G + \left(\frac{dI_{scM}}{dT} \right) (T_{cell} - T_r) \quad (3.4)$$

donde

- ✚ $\left(\frac{dI_{scM}}{dT} \right)$ es el coeficiente de temperatura para la corriente de cortocircuito del módulo.
- ✚ G es la irradiancia en W/m^2 .
- ✚ T_r es la temperatura de referencia, e igual a $25^\circ C$.

T_{cell} está dada por:

$$T_{cell} - T_a = \frac{NOCT - 20}{800} G \quad (3.5)$$

donde T_a es la temperatura ambiente, $NOCT^3$ es la temperatura de la celda a una irradiancia de 800 W/m^2 y una temperatura ambiente de 20°C . La determinación de $NOCT$ depende del tipo de módulo y la clase del material de fabricación.

Luego de una serie de pruebas en una cierta cantidad de módulos fotovoltaicos, algunos investigadores [3] han encontrado una aproximación a la expresión (3.5), así:

$$T_{cell} - T_a = 0.035 \cdot G \quad (3.6)$$

la cual arroja un valor de 48°C para $NOCT$, que se utilizará como referencia en los cálculos subsiguientes.

La otra fuente retorna el término exponencial del módulo, reemplazando el diodo de difusión del modelo ideal. La expresión analítica es la siguiente:

$$I_M = I_{scM} \left(1 - e^{\frac{V_M + I_M R_{sM} - V_{ocM}}{nV_T N_s}} \right) \quad (3.7)$$

donde

V_M es la tensión en el módulo.

V_{ocM} es la tensión de circuito abierto del módulo.

V_T es el potencial térmico de la celda.

R_{sM} está definida como

$$R_{sM} = \frac{V_{ocM}}{I_{scM}} - \frac{P_{\max M}}{FF_{0M} I_{scM}^2} \quad (3.8)$$

donde $P_{\max M}$ es la potencia máxima del módulo, y

³ Del inglés *nominal operating conditions temperature*

$$FF_{0M} = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{1 + v_{oc}} \quad (3.9)$$

es el Factor de Forma para el módulo ideal sin efectos resistivos, con

$$v_{oc} = \frac{v_{oc}}{nV_T} = \frac{V_{ocM}}{N_s nV_T} \quad (3.10)$$

como el valor normalizado de la tensión de circuito abierto al potencial térmico V_T .

El modelo también entrega la tensión de circuito abierto del módulo:

$$V_{ocM} \approx V_{ocMr} + \left(\frac{\partial V_{ocM}}{\partial T} \right)_G (T_{cell} - T_r) + V_T \ln \frac{I_{scM}}{I_{scMr}} \quad (3.11)$$

con I_{scMr} como la corriente de cortocircuito del módulo, y V_{ocMr} como la tensión de circuito abierto, dados bajo condiciones estándar.

Las coordenadas para el punto de máxima potencia están dadas por:

$$I_{mM} = I_{mMr} \frac{G}{G_r} + \left(\frac{\partial I_{scM}}{\partial T} \right) (T_{cell} - T_r) \quad (3.12)$$

que retorna la corriente de máxima potencia del módulo, con I_{mMr} como la corriente de referencia en el punto de máxima potencia, y

$$V_{mM} = N_s V_T \ln \left[1 + \frac{I_{scM} - I_{mM}}{I_{scM}} \left(e^{\frac{V_{ocM}}{N_s V_T}} - 1 \right) \right] - I_{mM} R_{sM} \quad (3.13)$$

que retorna la tensión de máxima potencia del módulo.

El archivo *module_beh.lib* que implementa este modelo se incluye en el Anexo 3 .

3.2.2 Batería de plomo-ácido

En la figura 3.4 se muestra el modelo eléctrico para la batería, el cual se compone de una fuente de tensión V_1 en serie con una resistencia R_1 , cuyos valores dependen del modo de operación en que se halle (carga o descarga) en un determinado tiempo.

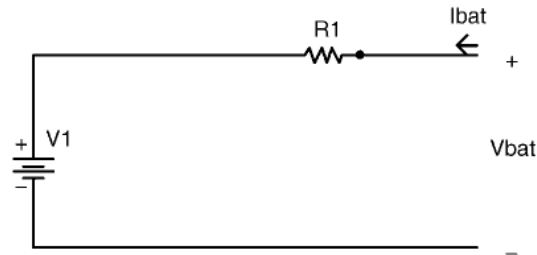


Figura 3.4 Modelo eléctrico para la batería.

El modelo en *Orcad PSpice* se fundamenta en el comportamiento durante los ciclos de carga/descarga, implementando una evolución dinámica del estado de carga SOC⁴, lo que constituye una tarea difícil particularmente para este tipo de baterías.

La figura 3.5 ilustra el comportamiento para una batería de plomo-acido, que es comúnmente utilizada en instalaciones fotovoltaicas. También ilustra los diferentes modos de operación, descritos en el presente trabajo de grado.

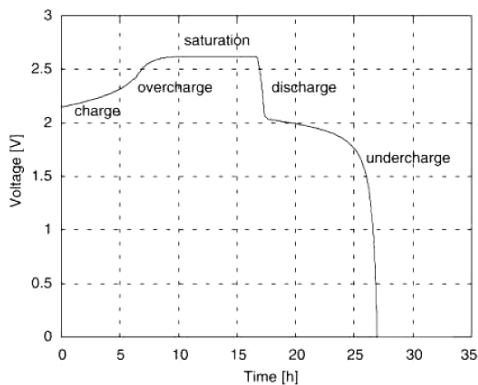


Figura 3.5 Modos de operación de la batería.

Fuente: Castaner, L., y Silvestre S., *Modelling photovoltaic systems using Pspice*, John Wiley & Sons, 2002

⁴ Del inglés *state of charge*

Como se ha mencionado anteriormente, los principales parámetros que definen una batería son:

- ✚ La capacidad nominal, C_x , para una tasa de descarga en x horas, dada en Ah.
- ✚ La tasa de carga/descarga, n_{cd} .
- ✚ El estado de carga, SOC.

Un parámetro llamado profundidad de descarga DOD⁵, y que es el complemento a la unidad del SOC, representa la fracción de descarga alcanzada por la batería, y está dada por:

$$\text{DOD} = 1 - \text{SOC} \quad (3.14)$$

Dentro del modelo utilizado se requieren algunos parámetros adicionales:

- ✚ Eficiencia de la batería en carga/descarga (adimensional), k .
- ✚ Autodescarga D , en h^{-1} .
- ✚ Estado de carga inicial en porcentaje, SOC_1 .
- ✚ Máxima energía de la batería SOC_m , en Wh.
- ✚ Valor normalizado de la energía restante al SOC_m , $\text{SOC}_n(t)$.
- ✚ Número de celdas de 2 V en serie, n_s .

Este modelo se basa en las ecuaciones descritas por Lasnier y Tan [4], que determinan los valores para V_1 y R_1 , dependiendo del modo en que esté operando la batería.

3.2.2.1 Modo carga

Las expresiones que definen los parámetros del modelo eléctrico son las siguientes:

$$V_1 = V_{ch} = (2 + 0.148\beta)n_s \quad (3.15)$$

⁵ Del inglés *depth of discharge*

$$R_1 = R_{ch} = \frac{\left(0.758 + \frac{0.1309}{1.06\beta}\right)}{SOC_m} n_s \quad (3.16)$$

con

$$\beta = \frac{SOC}{SOC_m} \quad (3.17)$$

El subíndice 'ch' indica modo carga y SOC_m el máximo valor de estado de carga, como se definió anteriormente; SOC es el estado de carga en un tiempo específico, calculado internamente por el modelo. Ambos se dan en unidades de Wh.

La expresión para determinar la tensión en la batería, V_{bat} , se deduce por la ley de Kirchhoff:

$$V_{bat} = V_{ch} + I_{bat} R_{ch} \quad (3.18)$$

3.2.2.2 Modo de descarga

Las expresiones que rigen el comportamiento en modo descarga son las siguientes:

$$V_1 = V_{dch} = (1.926 + 0.124\beta)n_s \quad (3.19)$$

$$R_1 = R_{dch} = \frac{0.19 + \frac{0.1037}{(\beta - 0.14)}}{SOC_m} n_s \quad (3.20)$$

donde el subíndice 'dch' indica modo descarga.

La salida de la batería está dada por:

$$V_{bat} = V_{dch} + I_{bat} R_{dch} \quad (3.21)$$

donde I_{bat} toma valores negativos.

El modelo equivalente en *Orcad PSpice* se muestra en la figura 3.6, donde fuentes controladas de tensión 'eVch' y 'eVdch' implementan V_{ch} y V_{dch} , respectivamente.

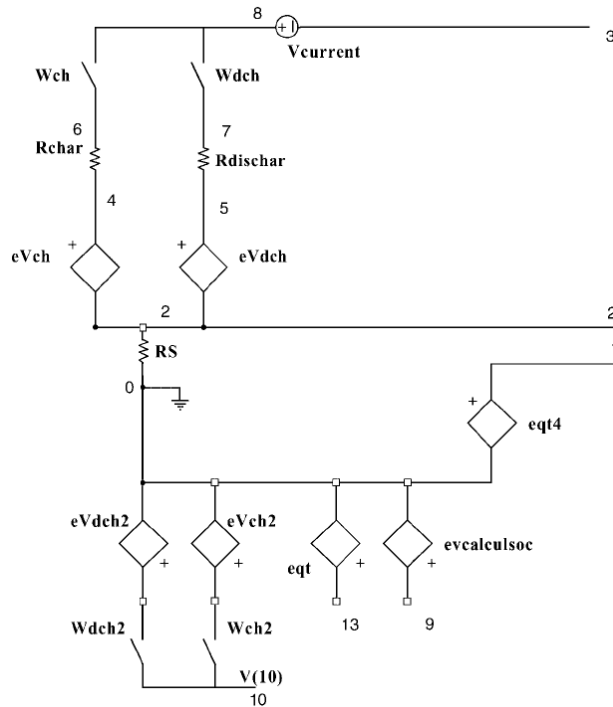


Figura 3.6 Esquemático equivalente del modelo.

Fuente: Castaner, L., y Silvestre S., *Modelling photovoltaic systems using Pspice*, John Wiley & Sons, 2002

También se incluyen dos switches controlados por corriente que tienen la función de hacer el cambio de estado de carga a descarga, y viceversa, 'Wch' y 'Wdch'. I_{bat} es la variable de control y la que determina la activación de estos *switches*, dependiendo del signo que ésta tenga: I_{bat} positivo significa modo de carga, e I_{bat} negativo, modo de descarga.

Sin embargo, lo más útil que ofrece el modelo es la posibilidad de hacer una estimación instantánea del estado de carga. Este estimativo se lleva a cabo de acuerdo a como lo describe la siguiente expresión:

$$SOC(t + dt) = SOC(t) \left(1 - \frac{D}{3600} dt \right) + k \left(\frac{V_{bat} I_{bat} - R_{1bat}^2}{3600} \right) dt \quad (3.22)$$

la cual sintetiza el balance de energía a partir del incremento del SOC, como de la energía en un diferencial de tiempo, teniendo en cuenta la auto descarga D , y la eficiencia de carga/descarga, k .

Esta ecuación se resuelve fácilmente en *Orcad PSpice* haciendo unos sencillos arreglos, dando origen a la expresión

$$SOC(t) = SOC1 + \left(\frac{1}{SOC_m} \right) \int \left(\frac{kV_{1bat} I_{bat}}{3600} - \frac{D \cdot SOC_n(t - \tau) SOC_m}{3600} \right) dt \quad (3.23)$$

donde τ es el paso interno en *Orcad PSpice*, $SOC_n(t)$ se da en porcentaje y los demás parámetros como se definieron anteriormente.

Las fuentes controladas 'evcalculosoc', 'eqt4', 'evch2', 'evdch2' y los switches 'Wch2' y 'Wdh2' son utilizados para evaluar la evolución del $SOC_n(t)$.

El modelo permite acceder a tres nodos: +/- V_{bat} y $SOC_n(t)$, el cual corresponde al valor normalizado, limitado entre 0 y 1. La figura 3.7 ilustra esto.

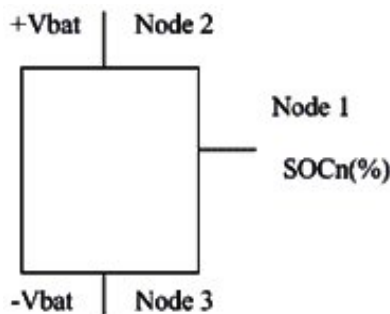


Figura 3.7 Esquemático de los nodos de acceso del modelo de la batería

El modelo ofrece resultados satisfactorios para SOC entre el 30% y el 80%, ya que está enfocado dentro de la operación en modo carga y modo descarga, no en sobrecarga ni sobredescarga (*undercharge*).

El modelo llamado *bat.cir* que implementa este modelo se incluye en el Anexo 3 .

3.2.2.3 Modelo simplificado

Debido a problemas de convergencia que se pueden originar por el uso de *switches* en el modelo anterior, surge uno alternativo que opta por emplear un único valor para R_1 indistintamente del modo de operación en que se encuentre la batería. Este valor está definido por la siguiente expresión:

$$R_1 = \frac{0,7 + \frac{0,1}{|SOC_1 - 0,2|}}{SOC_m} * n_s \quad (3.24)$$

En lugar de *switches*, el modelo emplea una sentencia *IF* para determinar el modo de operación. La figura 3.8 muestra el esquemático del modelo.

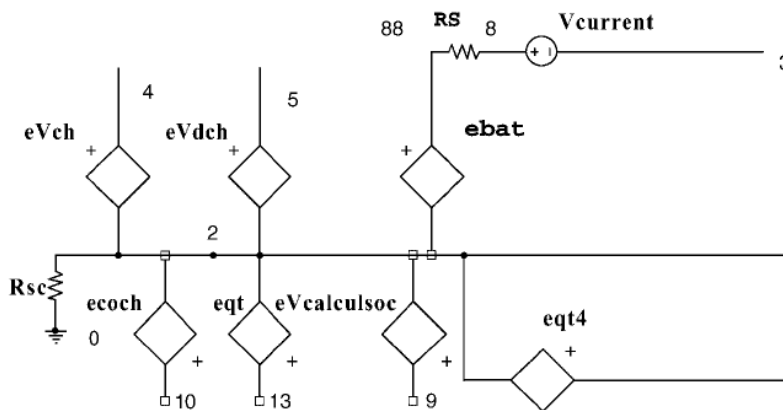


Figura 3.8 Modelo simplificado para la batería.

Fuente: Castaner, L., y Silvestre S., *Modelling photovoltaic systems using Pspice*, John Wiley & Sons, 2002

El modelo llamado *batstd.lib* que implementa el modelo se incluye en el Anexo 3.

3.2.3 Regulador

Algo crucial en un sistema fotovoltaico es el manejo eficiente de la energía para evitar que la batería entre en estados de sobrecarga o sobredescarga. Allí juega un papel importante la eficiencia en la conversión de energía, no solo de la lumínica a la eléctrica, sino también de cómo ésta es distribuida por todos los demás componentes del sistema.

Como se ha mencionado anteriormente, existen principalmente dos tipos de regulación: regulación en serie y regulación en paralelo. Por tratarse de un caso más complejo, y por ser el tipo más común de regulador, nos dedicaremos únicamente al estudio de este primero.

3.2.3.1 Regulador serie

El principal objetivo de la regulación en serie es que la batería actúe dentro de la ventana de operación definida por una tensión máxima, V_{max} , y una tensión mínima, V_{min} , ya que salirse causaría daños irreversibles tales como decremento de los niveles de densidad interna del electrolito, lo que origina la sedimentación en el fondo de la batería, reduciendo drásticamente la capacidad total si ésta permanece por un largo periodo de tiempo por fuera de esta ventana. La figura 3.9 (izq.) ilustra la conexión de un regulador serie.

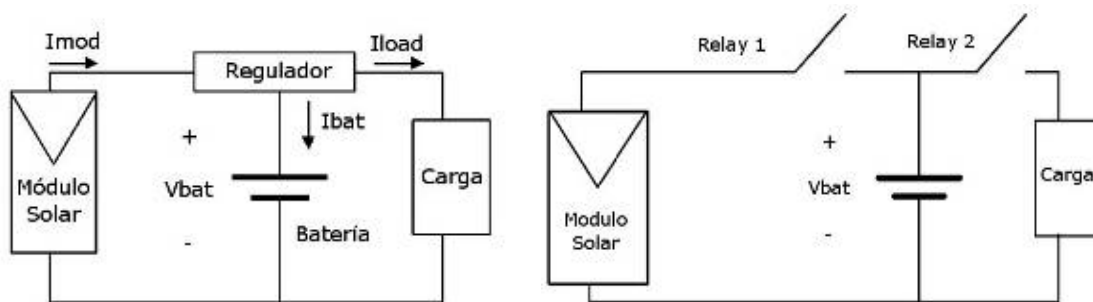


Figura 3.9 Lugar del regulador dentro del sistema fotovoltaico (izquierda).
Representación esquemática de un regulador serie (derecha).

Básicamente, lo que el regulador hace es desconectar la carga cuando la batería ha alcanzado el nivel de tensión mínimo y reconecta cuando ésta ha alcanzado la tensión nominal. Análogamente, el regulador conecta el circuito del panel y la

batería cuando esta última ha sido suficientemente descargada, y desconecta cuando la batería está completamente cargada, es decir, cuando ha alcanzado la tensión máxima, V_{max} . La figura 3.9 (der.) ilustra esto.

Para llevar a cabo la función de monitorear la carga y la descarga de la batería, dentro del modelo circuital se implementa un *switch* entre ésta y el panel, y entre ésta y la carga. Cada uno de los *switches* determina cuándo abrir o cerrar la conexión entre los dos dispositivos (panel-batería o batería-carga), según dicta el principio de regulación en serie, y cuya señal de control es la corriente que circula por la fuente $V_{current}$ del modelo. Según el signo que tome, el *switch* se abrirá o se cerrará, controlando así el proceso.

La manera más sencilla de implementar esto a nivel de circuitos es por medio de *switches* controlados o *relays*, cuya señal de disparo es accionada por un circuito comparador como el ilustrado en la figura 3.10.

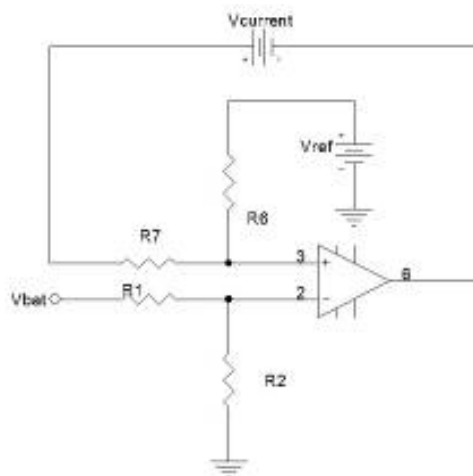


Figura 3.10 Comparador implementado para desconectar la batería cuando alcanza V_{max} o V_{min} .

El circuito comparador, conformado por un *opam* y los resistores R_1 , R_2 , R_6 y R_7 , censa a cada instante la tensión en la batería, V_{bat} , y la compara con una tensión de referencia, V_{ref} , determinada por el valor al que se alcanza la carga máxima, V_{max} , y que casi siempre es especificado en la hoja de datos de la batería. Según se escojan los valores de los resistores, el valor de V_{ref} será definido a conveniencia, generalmente igual a $V_{bat}/2$.

3.2.4 Modelo de la carga

En nuestro caso, la carga que debe alimentar el sistema fotovoltaico es el nodo WiFi, compuesto básicamente por una tarjeta *routerboard* y uno o dos radios, según sea la configuración del nodo: *estación* o *repetidor*, según se explicó en el capítulo 1. Se ha determinado que la configuración *estación* usará un radio, y para *repetidor*, dos.

El consumo de potencia del nodo está dado por el modo de operación en que éste se encuentre, que son principalmente reposo y transmisión. En la configuración *nodo estación* el consumo en reposo es de 3.92 W, y en transmisión de 6.95 W, según las pruebas de campo. Para la configuración *nodo repetidor* el consumo en reposo es de 4.77 W, y en transmisión 10.24 W, de acuerdo a datos experimentales.

La naturaleza de la onda de la corriente de carga se asemeja a una fuente *switchada*, cuyo complejo análisis trasciende los alcances del presente trabajo. Para practicidad en los cálculos, se ha decidido tomar el valor promedio en modo reposo, de igual manera para transmisión.

El nivel dc de la corriente de carga en modo reposo para la configuración *nodo estación* es de 309 mA, y en transmisión es de 528 mA, convergiendo éstos valores con los experimentales dentro de un margen de error de unos pocos mA. La amplitud máxima de los picos es de 227 mA. Para el modo transmisión se observó un nivel dc de 528 mA con una amplitud máxima para los picos de 125 mA. Estas medidas fueron obtenidas con un osciloscopio digital.

Con esta información se modeló la carga como sigue: una onda cuadrada de periodo 1 día, con un nivel dc de 320 mA para el modo reposo, y un nivel dc de 650 mA para el modo transmisión, resultando la forma que se muestra en la figura 3.11, para un escenario específico de operación.

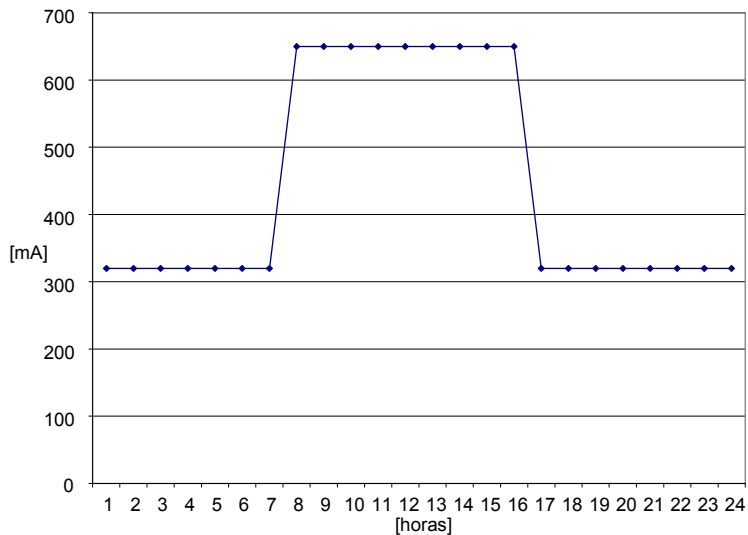


Figura 3.11 Modelo para la corriente de carga (nodo estación) en modo reposo (nivel bajo) y transmisión (nivel alto).

De igual manera, se procedió para la configuración *nodo repetidor*, exhibiendo valores de 350 mA para la operación en reposo y de 800 mA en transmisión, con un periodo de 1 día.

3.2.5 Sistema fotovoltaico completo

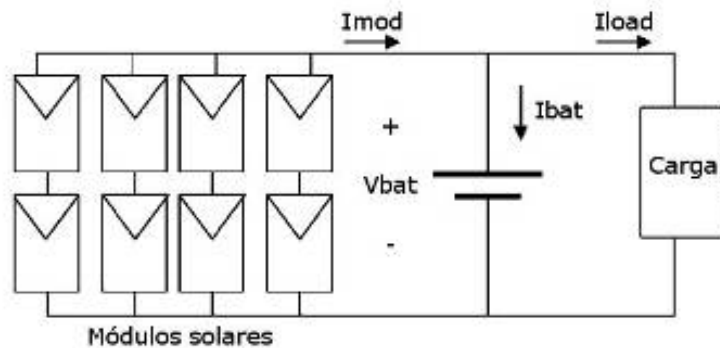


Figura 3.12 Descripción del sistema fotovoltaico completo.

Una vez descritos los modelos que describen cada uno de los elementos que componen el sistema fotovoltaico, sólo resta realizar una interconexión y efectuar la simulación de todo el sistema completo. La figura 3.12 da una idea de cómo es esta interconexión.

Existen dos tipos de simulación de interés para el sistema fotovoltaico completo, en la que se involucran, a parte de los modelos, información de radiación para la

superficie inclinada y orientada en una determinada localización, temperatura en el área, así como datos de campo con los que luego se podrán comparar los resultados obtenidos:

a) Simulación de corto término, en la que los tiempos reales de simulación son horas, días, o pueden ser incluso de meses, y

b) Simulación de largo término, en las que el tiempo de simulación real puede llegar a ser hasta años, y en las que se maneja grandes cantidades de información.

En ambos casos, las unidades internas de *Orcad PSpice* no estarán más allá de los segundos, y estarán sujetos a las series de tiempo que de radiación y temperatura se dispongan.

Para realizar la simulación de corto término, útil más adelante en el dimensionado, se utiliza el esquema descrito en la figura 3.13. Se simplifica el modelo de la batería a una fuente de tensión ideal para visualizar más claramente la dinámica energética en cada ciclo diario. También se incluye un *switch* entre carga y batería que permite activarla en los momentos del día que se desee conectarla, según el escenario de carga a analizar.

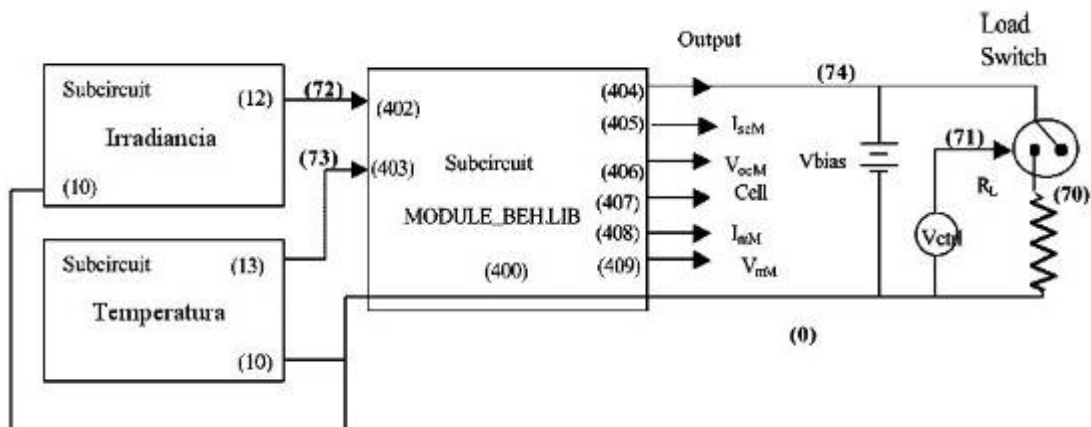


Figura 3.13 Circuito en *Orcad PSpice* para simulaciones de corto término.

Fuente: Castaner, L., y Silvestre S., *Modelling photovoltaic systems using Pspice*, John Wiley & Sons, 2002

Para realizar la simulación de largo término se utiliza el modelo que muestra la figura 3.14. Allí se aprecia que algunas modificaciones son necesarias para evitar problemas de convergencia originadas en la no-linealidad de las ecuaciones que describen los modelos y que *Orcad PSpice* tiene que resolver. Debido a que se manejan una gran cantidad de datos asociados a las variables de entrada, como son la radiación y la temperatura, y también a la salida del sistema, este tipo de simulación implica un mayor tiempo en el procesamiento de la CPU.

En el circuito, un diodo de paso es introducido entre la batería y el módulo solar para evitar corrientes de descarga. La corriente de carga es instaurada con una fuente de corriente, y la regulación de la batería es llevada a cabo por un circuito de desbordamiento, cuyo principal componente es el transistor bipolar, el cual entra en saturación cada vez que el SOC alcanza el 95%, impidiendo así la sobrecarga. El valor del *capacitor de aceleración* depende de las unidades que se manejen internamente en *Orcad PSpice*, ya que el transistor tiene que cambiar a la misma escala, aunque en el sistema real debe *switchear* a una frecuencia mucho más pequeña. En nuestro caso, cada hora corresponde a $1 \mu\text{s}$.

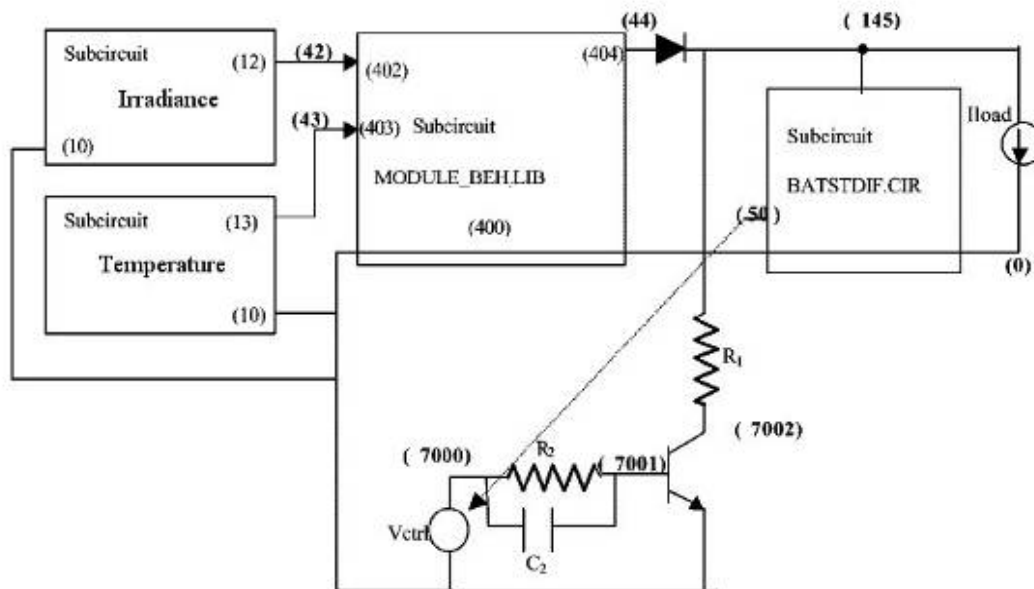


Figura 3.14 Circuito en *Orcad PSpice* para simulaciones de largo término.

Fuente: Castaner, L., y Silvestre S., *Modelling photovoltaic systems using Pspice*, John Wiley & Sons, 2002

Capítulo 4 SIMULACIÓN

4.1 Introducción

Para obtener un análisis más detallado, rápido y preciso del comportamiento de un sistema fotovoltaico, se ha utilizado la herramienta de diseño asistido por computador *Orcad PSpice* por ser de fácil uso, mayor versatilidad y amplia disponibilidad, lo que lo convierte en una de los mejores simuladores de circuitos eléctricos y electrónicos. Además, *Orcad PSpice* permite agilizar y profundizar en el dimensionado para encontrar posibles fallas que se incurren en diseños superficiales, lo que proporciona un análisis más profundo del sistema.

Debido a que la mayoría de las expresiones que describen la operación de los dispositivos fotovoltaicos son no-lineales, como se ha mostrado en el capítulo anterior, y las ecuaciones circuitales de nodo para hallar corrientes o voltajes algunas veces no tienen solución analítica, es pertinente el empleo de este tipo de herramientas de diseño asistido por computador (CAD). Específicamente, ya que la respuesta de un módulo solar está estrechamente ligada a la irradiancia y la temperatura ambiente, magnitudes en cierto modo impredecibles y variantes con el tiempo, el diseño de un sistema fotovoltaico será más preciso y dará mejores criterios en el momento de hacer el diseño final si se realiza una estimación del rendimiento en un escenario de simulación de larga duración, con datos reales de irradiancia y temperatura para el lugar de la instalación, como se verá al final de este capítulo y en el siguiente.

A continuación se presentan los resultados más preponderantes de la etapa de simulación.

4.2 Caracterización de los elementos del sistema solar

Previo a la realización de las simulaciones de todo el sistema operando bajo diferentes condiciones de trabajo, es necesaria una validación de los modelos que representan el comportamiento de cada uno de los elementos constitutivos, cerciorándose de que respondan satisfactoriamente al funcionamiento teórico y el obtenido en las pruebas, y así poder realizar extrapolaciones para otros escenarios y tiempos de operación.

4.2.1 Módulos solares

4.2.1.1 Curva I-V y potencia generada en condiciones estándar

A partir de los parámetros que suministra el fabricante en la hoja de datos, se obtuvieron las curvas características con base a los modelos explicados previamente, para luego compararlas con las del *datasheet* y tener así un presupuesto de error del modelo.

En la tabla 4.1 se sintetizan los parámetros más importantes para cada uno de los módulos solares utilizados.

| | Kyocera KS20 (policristalino) | Sunwize OEM20 (monocristalino) | Kyocera KT-65 (policristalino) |
|--|--|---|---|
| Potencia pico, P_m [W] | 20 | 20 | 65 |
| Tensión de circuito abierto, V_{oc} [V] | 21.5 | 21.0 | 21.7 |
| Corriente de cortocircuito, I_{sc} [A] | 1.24 | 1.38 | 3.99 |
| Tensión de máxima potencia, V_{mp} [V] | 16.9 | 16.5 | 17.4 |
| Corriente de máxima potencia, I_{mp} [A] | 1.20 | 1.22 | 3.75 |

Tabla 4.1 Parámetros bajo condiciones estándar: AM1.5G, 1000 W/m², Temp.=25 °C. Datos suministrados por el fabricante

En la parte de arriba de la figura 4.1 se aprecia la curva I(V) del módulo solar policristalino. En la misma figura pero en la parte baja, se observa la salida de potencia del módulo.

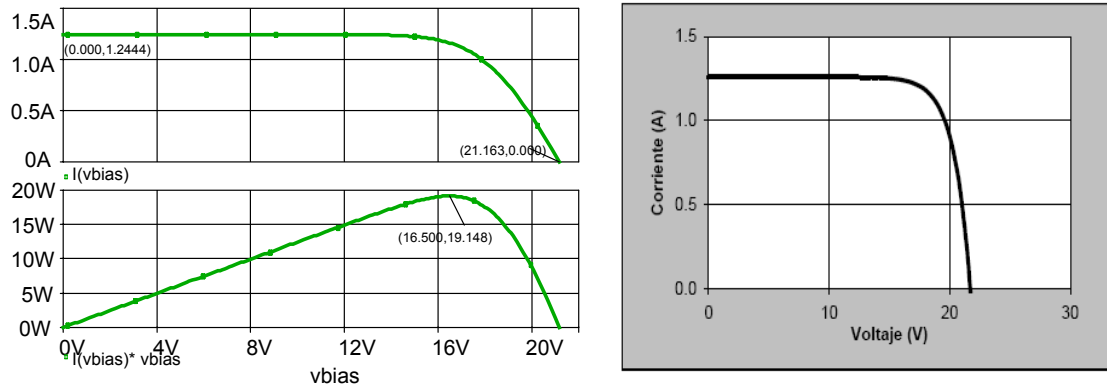


Figura 4.1 Izquierda arriba. Característica I(V) para el módulo solar policristalino KYOCERA KS20. Izquierda abajo. Potencia de salida. Derecha. Curva que suministra el fabricante.

En ambos casos (monocristalino y policristalino), las curvas son prácticamente idénticas a las suministradas por el fabricante (fijarse cómo los valores de tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito intersecan en los mismos puntos el eje horizontal y vertical, respectivamente), con lo cual se considera que el modelo escogido es confiable.

En el Anexo 4 se encuentra la curva correspondiente al módulo monocristalino.

4.2.1.2 Curva I-V y potencia para diferentes valores de irradiancia

La simulación anterior se amplió para diferentes valores de irradiancia, obteniendo las curvas que se muestra en la figura 4.2. Al igual que en la simulación bajo condiciones estándar (figura 4.1), se pudo contrastar con las curvas del *datasheet* para corregir el error del modelo. Nuevamente se encontró que la diferencia es casi nula.

En el Anexo 5 se encuentran las curvas correspondientes al módulo monocristalino.

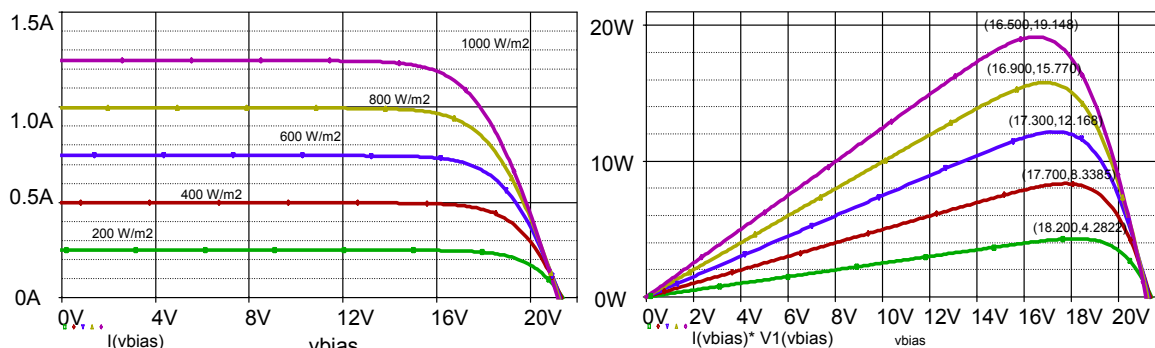


Figura 4.2 Izquierda Curva I(V) para el panel KYOCERA KS20 para algunos valores de irradiancia: 1000 (curva magenta), 800 (amarilla), 600 (azul), 400 (roja), 200 (verde) W/m². Derecha. Potencia de salida para los mismos valores de irradiancia.

4.2.1.3 Curva I(V) para diferentes valores de temperatura e irradiancia

Se pudo determinar la respuesta de los módulos monocristalino y policristalino a diferentes condiciones de temperatura ambiente. Como se esperaba, la corriente se ve afectada logarítmicamente por los cambios de temperatura (cambia muy poco), mientras que la tensión sufre cambios proporcionales del orden de los mV.

También, se corroboró cómo la corriente de salida del módulo aumenta proporcionalmente con la irradiancia, mientras que la tensión disminuye unos pocos volts a medida que ésta aumenta. Las curvas correspondientes al módulo policristalino se muestran en la figura 4.3.

En el Anexo 4 se encuentran las curvas correspondientes al módulo monocristalino.

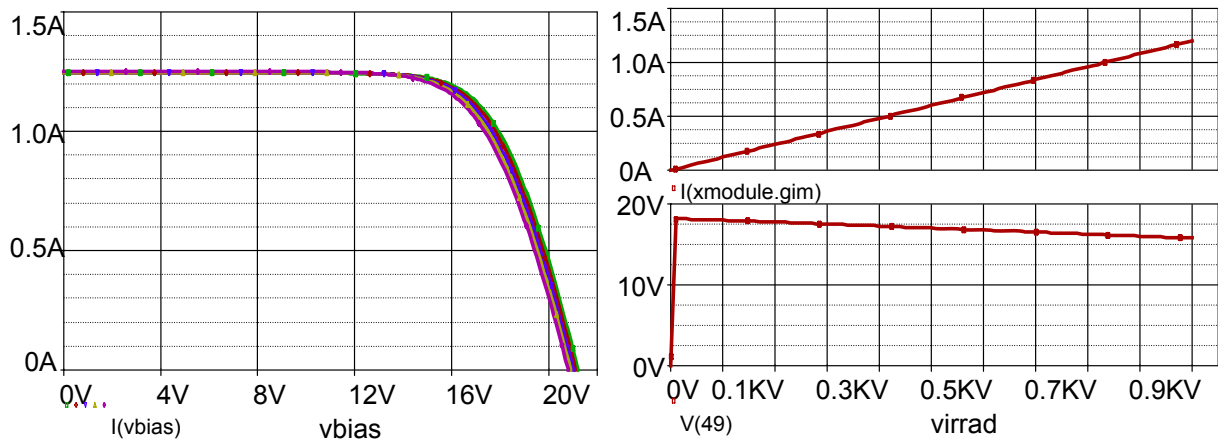


Figura 4.3 Izquierda. Curva I(V) del panel KYOCERA KS20 para un rango de temperatura ambiente entre 20 y 50°C. Nótese que la corriente de salida es prácticamente transparente a los cambios de temperatura, mientras que la tensión sí se ve afectada ligeramente. Derecha arriba. Valores de corriente en el punto de operación de máxima potencia para el mismo panel KYOCERA KS20, según varía la irradiancia. Derecha Abajo. Valores de tensión en el punto de máxima potencia para el mismo dispositivo. Nota: En el eje horizontal las unidades internas de Orcad PSpice son KV, que corresponden a W/m^2 .

Esta simulación se extrapoló para condiciones reales de irradiancia y temperatura anuales, para la ubicación y ángulo de inclinación del panel. Los parámetros más importantes del módulo fueron monitoreados. Las figuras 4.4 y 4.5 muestran los resultados.

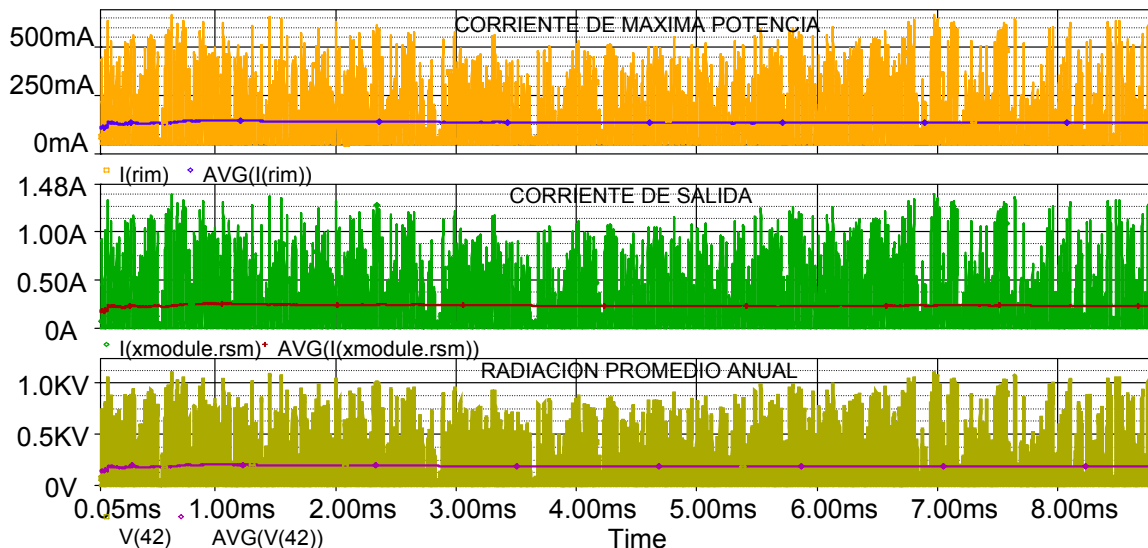


Figura 4.4 Curvas de corriente de máxima potencia (arriba), corriente de salida (medio), a radiación promedio en $\text{KW/m}^2 \text{ h}$ para una superficie inclinada 15° en la ciudad de Bucaramanga

(abajo) (Datos obtenidos con METEONORM 5.1 [8]) para el módulo solar KYOCERA KS-20. Nota: la escala de tiempo horizontal real son horas en lugar de μs .

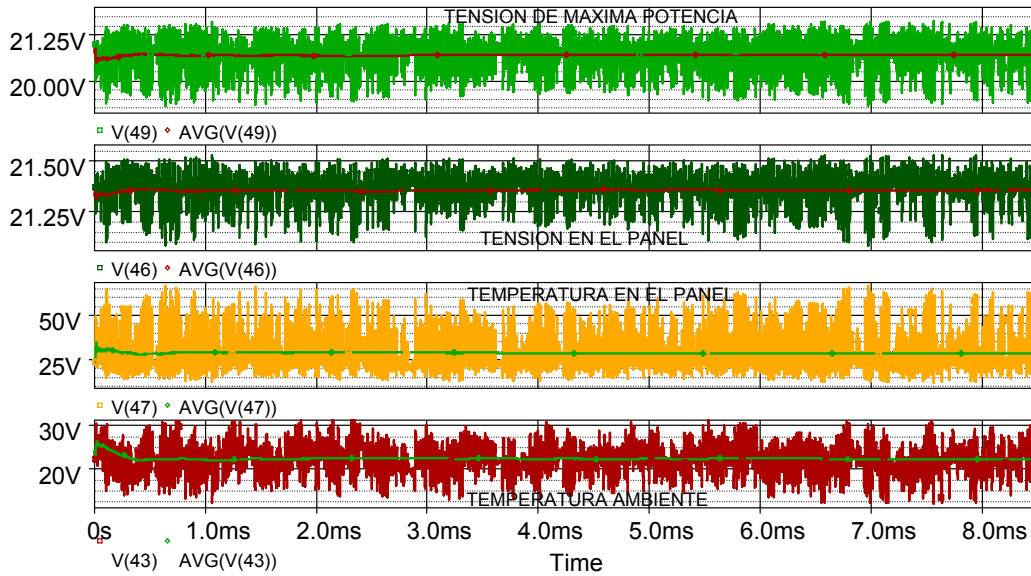


Figura 4.5 De arriba a abajo: curva de tensión a máxima potencia, tensión de salida del módulo, temperatura en el módulo, y temperatura promedio horaria en $^{\circ}\text{C}$ para la ciudad de Bucaramanga (Datos obtenidos con METEONORM 5.1) para el módulo solar KYOCERA KS-20. **Nota:** la escala de tiempo horizontal real son horas en lugar de μs .

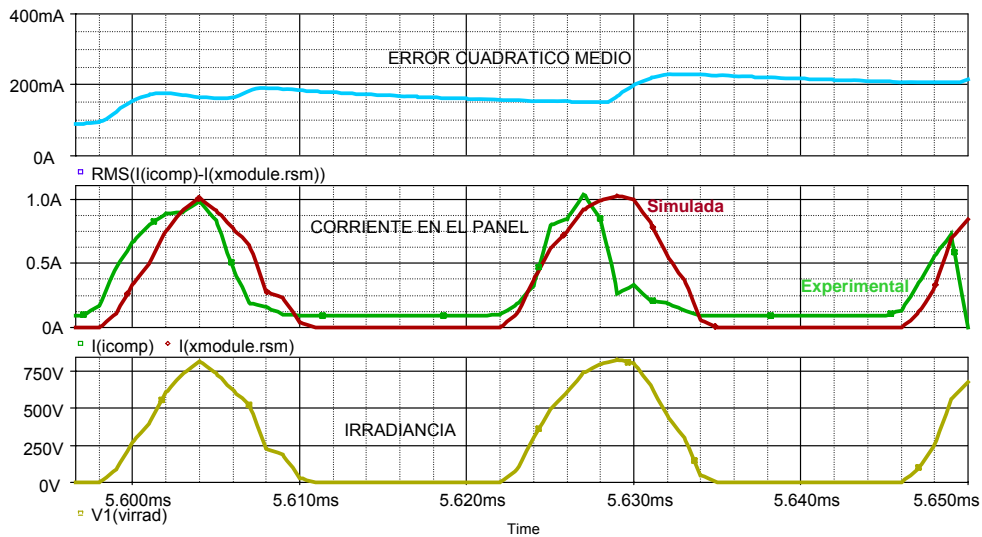


Figura 4.6 Verificación del modelo del panel. Error cuadrático medio (*arriba*) entre la corriente simulada y la experimental (*medio*) para la radiación de los días que se realizó la prueba (*abajo*).

El error cuadrático medio entre los valores para corriente que retorna el modelo y los experimentales, no excede el 20%, valor que puede ser considerable, y se

puede justificar en las aproximaciones del modelo, y en la disparidad de los datos de irradiancia utilizados.

De los resultados obtenidos, se concluye que el modelo utilizado responde a cabalidad tanto a lo presupuestado en la teoría como a lo encontrado en la práctica, dando confianza para realizar las simulaciones en las que el módulo solar interactúa con los demás elementos.

4.2.2 Batería

En la tabla 4.2 se sintetizan los parámetros más importantes de las baterías utilizadas en las simulaciones.

| | HGL 12-12 | M-TEK LPF1233HR |
|----------------------------------|-----------|--------------------|
| Tensión nominal [V] | 12 | 12 |
| Corriente máxima de descarga [A] | 180 (5 s) | 330 (5 s) |
| Capacidad (C_{25}) [Ah] | 12 | 33 |

Tabla 4.2 Parámetros de la batería. Datos suministrados por el fabricante.

El funcionamiento del modelo se comprobó mediante la simulación de la prueba de descarga de la batería HGL 12-12 a través de una resistencia de 20 Ω , y para la prueba de carga de la misma batería con una fuente de tensión constante. Los resultados se muestran en la figura 4.7. Allí se muestra la evolución en el tiempo del error cuadrático medio entre los datos simulados y los experimentales.

Por cuanto este error no excede de 1 Volt (menor del 10% de la tensión nominal, 12V), cuando el SOC está por debajo del 80% y encima del 30%, se asume que el modelo utilizado se adapta mejor al comportamiento teórico y experimental de carga que al de descarga, ya que el error obtenido para esta condición fue mayor (alrededor del 15%). Se concluye que los modelos son confiables, y que, en general, arrojan resultados satisfactorios.

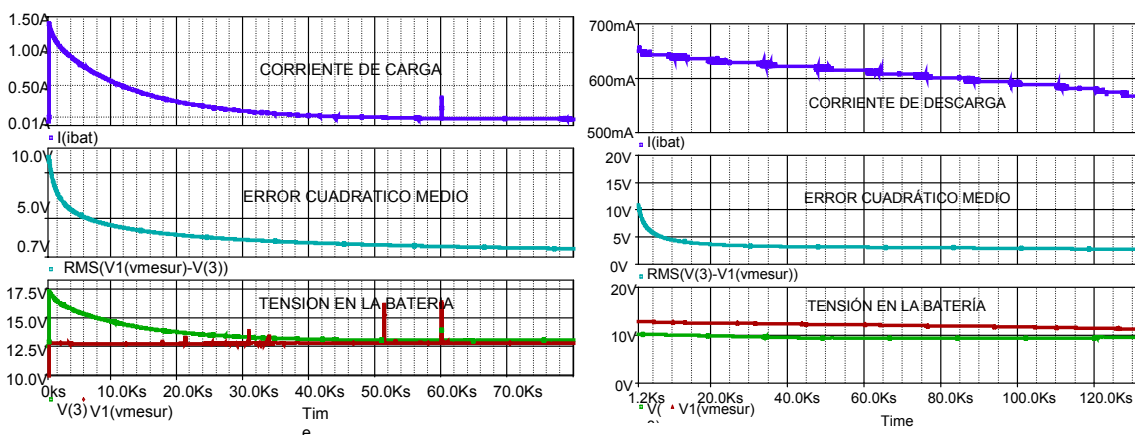


Figura 4.7 Verificación del modelo de la batería en la prueba de carga (izquierda) y prueba de descarga (derecha). La curva de la mitad muestra el error cuadrático medio entre la tensión simulada y la experimental. Se observa que la mayor diferencia no excede al 10%, cuando el SOC está entre el 30% y el 80%, como advierte el modelo.

4.2.3 Regulador

En la tabla 4.3 se sintetizan los parámetros más importantes del regulador de carga utilizado en el modelo de *Orcad PSpice*.

| | Steca PR1010 |
|---|-----------------------|
| Tensión del sistema | 12 V (24 V) |
| Corriente máxima del consumidor | 10 A |
| Tipo de regulación | por SOC o por tensión |
| Consumo propio máx. | 12 mA |
| Tensión final de carga (flota) | 13.9 (líquido) |
| Tensión de reconexión SOC/LVR | > 50%/12.6 |
| Protección contra descarga profunda SOC/LVD | < 30%/11.1 |
| Temperatura ambiente admisible | -10°C a +50°C |
| Peso | 350 g |

Tabla 4.3 Parámetros del regulador. Datos suministrados por el fabricante.

El funcionamiento del modelo es comprobado involucrando los demás elementos del sistema en la simulación. Inicialmente el panel y la batería están desconectados (en los primeros 30 Ks, el panel está a mayor tensión). Al comenzar a descargarse la batería, el regulador reconecta el circuito, pero al no haber energía disponible, ésta no puede cargarse. Cuando aparece la radiación solar (alrededor de los 80 Ks), la tensión en la batería se recupera, alcanzado un nivel máximo, momento en el cual la señal de control abre el *switch* para que ésta no se sobrecargue. En la figura 4.8 se ilustra esta dinámica.

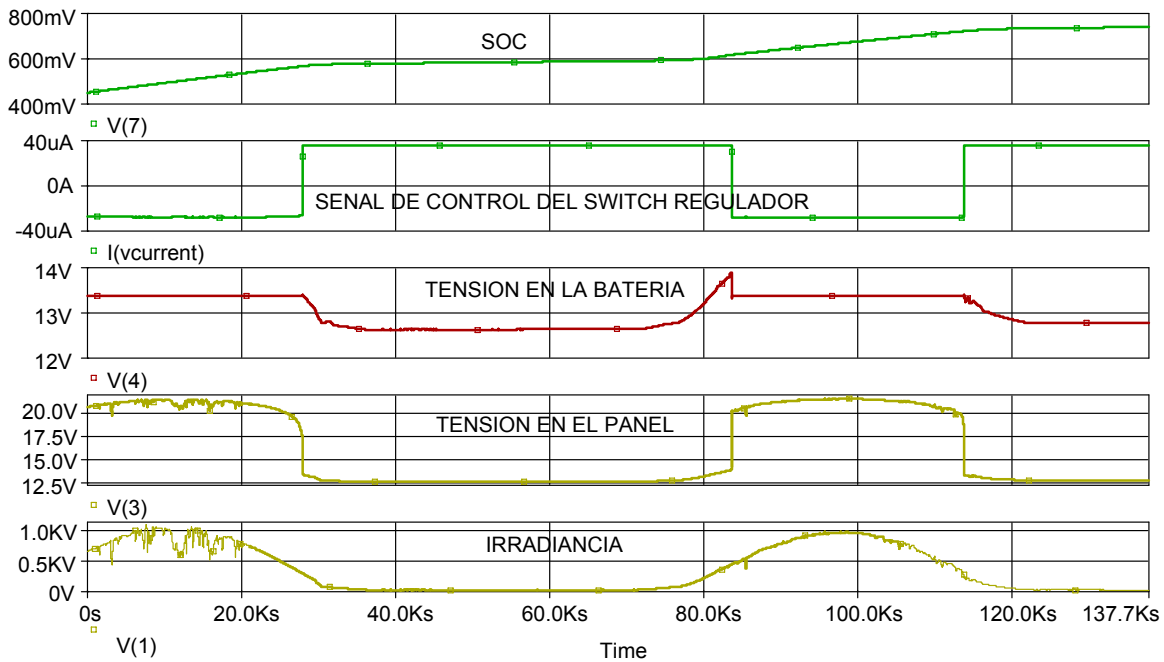


Figura 4.8 Operación del regulador dentro del sistema fotovoltaico.

4.3 Simulación del sistema fotovoltaico

Para tener un estimativo más real de la dinámica energética del sistema, se llevaron a cabo diferentes perfiles de simulación que permitieron comparar los datos de las pruebas de campo realizadas para el sistema conformado por el módulo solar KYOCERA KS20, la batería MTEK 33 Ah, un regulador STECA 10A, y el nodo estación (radio XR2, que opera bajo el estándar ieee802.11X y la *routerboard* Alix 2.D2) con los resultados obtenidos utilizando *Orcad PSpice*.

A continuación se describen las simulaciones hechas más importantes.

4.3.1 Sistema en reposo 57 horas

Las curvas de la simulación de la prueba con la carga en estado de reposo 57 horas y 2 en transmisión, se muestran en la figura 4.9. Allí, se muestra la evolución en el tiempo de cada una de las variables de entrada y de salida del sistema. Se asume el mismo SOC inicial de la prueba (70%). La corriente de carga

fue impuesta con los datos de campo mediante una sentencia *.stimulus* en el *netlist*.

Inicialmente el nodo estación transmite por dos horas, lo cual se evidencia en el nivel alto de la corriente de carga (curva violeta en la figura 4.9). En ese tiempo (entre 0 y 20 Ks) no existe radiación solar (curva amarilla), por lo tanto, es la batería quien asume enteramente la demanda energética, experimentado una caída de tensión en sus bornes (curva verde y curva roja de la figura). La caída en el SOC (curva magenta) no se hace esperar. Una vez aparecen los rayos solares la batería experimenta una recuperación, y el suministro de potencia lo comparte con el módulo solar, trayendo como consecuencia un aumento en el nivel del SOC. Esta dinámica se repite una y otra vez durante la prueba.

De la evaluación del error cuadrático medio para la tensión simulada y la experimental en la batería (curva naranja), que en el peor de los casos no excede al Volt (esto es, el 16%), cuando el SOC está entre el 80% y el 30%, se ratifica que el modelo para la batería es aceptable, y que los modelos en conjunto responden satisfactoriamente a los resultados experimentales.

El error se explica en las aproximaciones derivadas del proceso deductivo. El SOC al final de la simulación converge con el obtenido en la prueba real. Por todo esto, se asume que el modelo es coherente con la teoría y la práctica.

Dado que no se disponen de valores instantáneos de irradiancia, no es posible comparar los valores simulados con los experimentales para la corriente del módulo solar, y deducir algo con respecto al modelo del módulo solar.

En el archivo *aislado.cir* del Anexo 4 se encuentran los detalles del perfil de simulación.

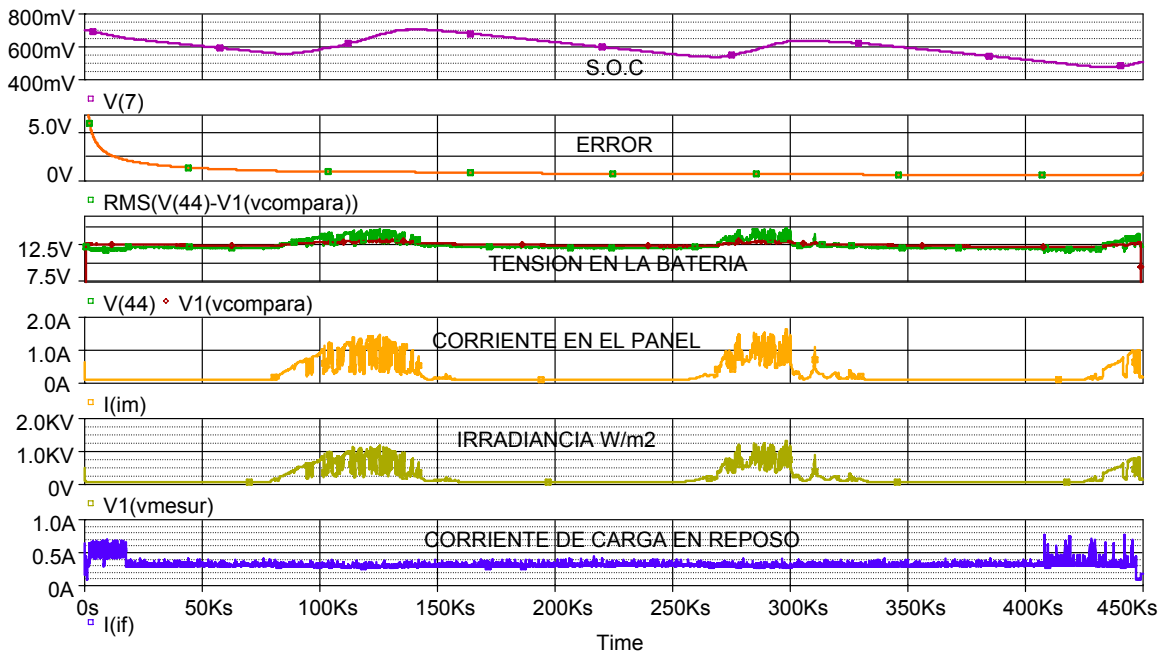


Figura 4.9 De arriba hacia abajo: (a) Evolución del SOC durante la prueba. (b) Error cuadrático medio para la tensión de la batería, entre los datos simulados y los experimentales. (c) Tensión en la batería: simulación (verde), experimental (rojo). (d) Corriente en el panel (simulado) (e) Irradiancia (modelado). (f) Corriente de la carga (experimental).

4.3.2 Sistema transmitiendo 30 horas

Las curvas de la simulación de la prueba con la carga transmitiendo 30 horas se aprecian en la figura 4.10. La corriente de carga es impuesta a la batería mediante una sentencia *.stimulus* la cual permite incluir en el *netlist* los datos experimentales. El SOC final es cercano al 20%, el cual es coherente con el comportamiento del sistema sometido a prueba. Una vez más, se observa un error cuadrático medio máximo de 1 V, cuando el SOC es menor al 80% y mayor al 30%.

El resultado general de la simulación indica que la autonomía del sistema es aproximadamente de un día. Esto concuerda con los cálculos preliminares y el presupuesto que se tenía en la prueba. Se concluye que la simulación de todo el sistema, la cual integra los diversos modelos, es confiable.

En el archivo *aislado3.cir* del Anexo 4 se encuentran los detalles del perfil de simulación.

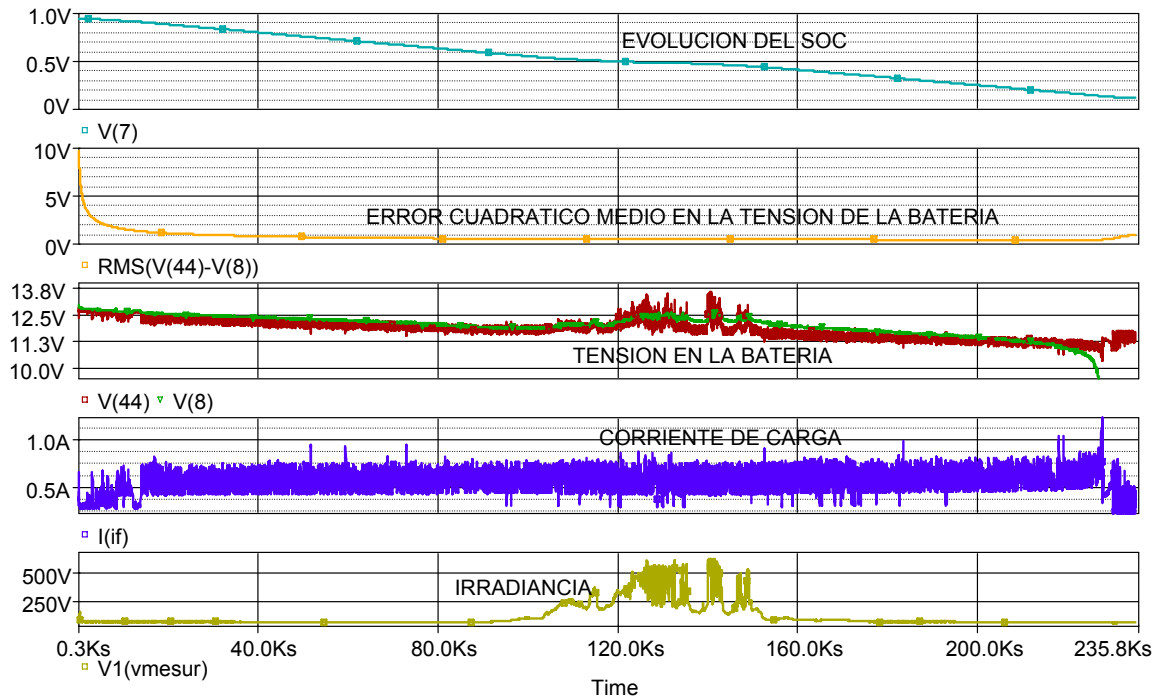


Figura 4.10 De arriba hacia abajo: (a) Evolución del SOC durante la prueba. (b) Error cuadrático medio para la tensión de la batería, entre los datos simulados y los experimentales. (c) Tensión en la batería: simulación (rojo), experimental (verde). (d) Corriente de la carga (experimental). (e) Irradiancia (modelado).

4.4 Sistema operando por un largo periodo de tiempo bajo condiciones reales

Esta vez la simulación del sistema completo no se hizo con fines comparativos, sino para proyectar su comportamiento en un año entero. Como entrada al sistema, se utilizaron los datos de radiación promedio multianual para una superficie inclinada 15° en la ciudad de Bucaramanga, COL, suministrados por el software METEONORM 5.1⁶ [8], teniendo además en cuenta la correspondiente temperatura ambiente. A la salida se implementó la corriente de carga, según el modelo descrito en la sección 3.2.4, el cual asume que el *nodo estación* se

⁶ Se escogió esta fuente por no presentar vacíos de información en las series de tiempo, además de proporcionar datos horarios de radiación solar para una superficie inclinada en un latitud específica. Se observó, además, que los promedios mensuales y anuales son coherentes con los suministrados por las demás fuentes.

encuentra transmitiendo las 8 horas centrales del día y el resto de tiempo en reposo. Esto se ilustra en la figura 4.11 para los primeros 30 días del año.

Para efectos de un procesamiento eficiente de datos, se asumió que cada hora equivaldría a $1 \mu\text{s}$ en las unidades internas de *Orcad PSpice*. El tiempo total de simulación fue de $8760 \mu\text{s}$, que es equivalente al número de horas que tiene el año entero, según lo expuesto anteriormente.

Como una primera aproximación al análisis del comportamiento del sistema, se implementó una configuración compuesta por el módulo solar KYOCERA KS-20 y la batería M-TEK 12V 33Ah, asumiendo un SOC inicial del 95%. Los resultados se muestran en la figura 4.12.

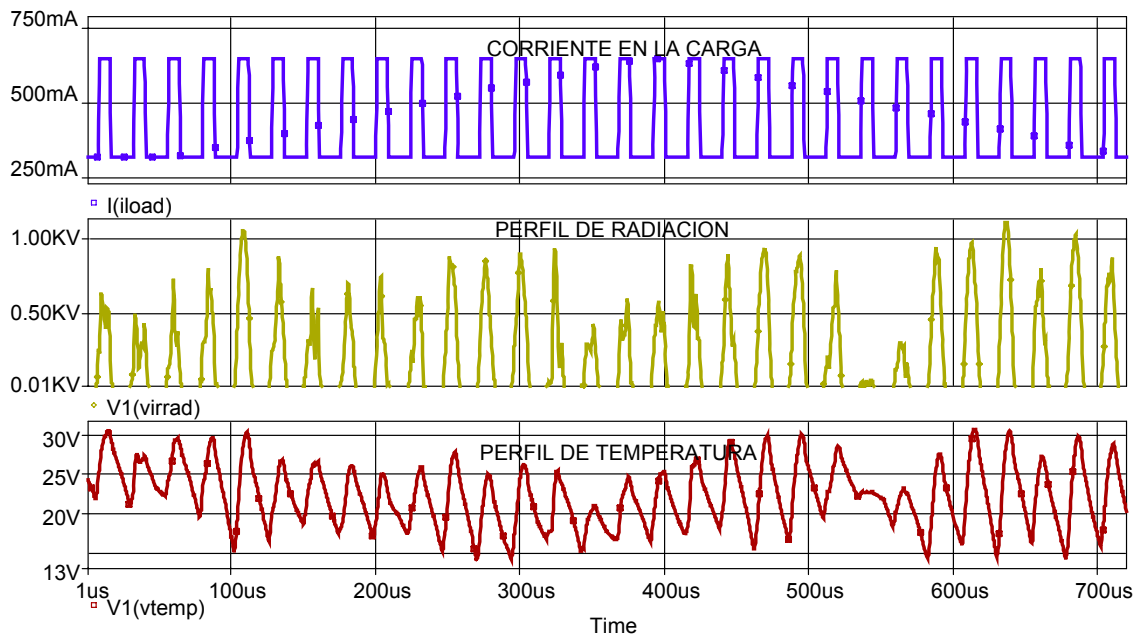


Figura 4.11 Arriba. Corriente en el *nodo estación* transmitiendo las 8 horas centrales del día, el resto de tiempo permanece en reposo. Los picos altos indican transmisión y los bajos, reposo. *Mitad*. Radiación sobre una superficie inclinada 15° ubicada en Bucaramanga (lat 7° , long $-73,17^\circ$). Datos generados con METEONORM 5.1. Abajo. Perfil de temperatura para un año promedio sobre la ciudad de Bucaramanga. **Nota:** La escala del eje horizontal son horas en lugar de ms; la del eje vertical para temperatura es $^\circ\text{C}$, y para radiación, KW/m^2 hora.

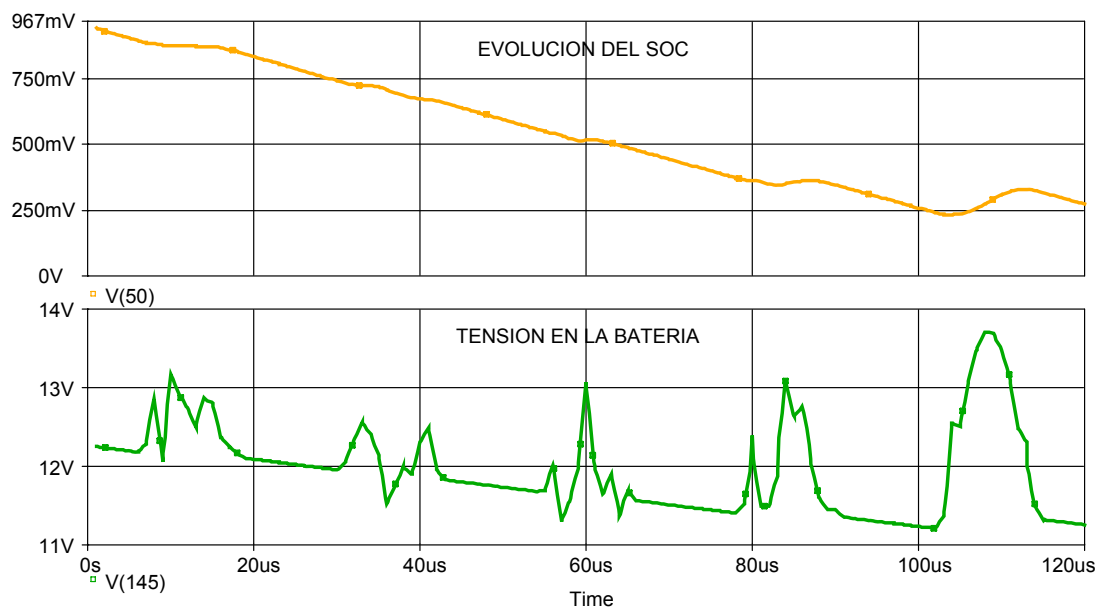


Figura 4.12 Estado de carga (SOC) y tensión en la batería para el sistema configurado con un panel KYOCERA KS-20 20W. **Nota:** La escala del eje horizontal son horas en lugar de ms.

En la figura 4.12 se muestra la evolución del SOC y la tensión en la batería. Como se aprecia en los primeros 5 días del año, el SOC experimenta una caída drástica alcanzando un valor mínimo del 25%, lo cual indica que la configuración del sistema (módulo y batería) es insuficiente para suplir la potencia que demanda este escenario de carga, tal y como se había previsto teóricamente.

En el archivo *aislado_buc_20W.cir* del Anexo 4 se encuentran los detalles de la simulación.

Para desarrollar completamente la simulación, se hace un ajuste en la configuración del sistema al introducir el módulo KYOCERA KC65T-1, que es de mayor potencia, y se mantiene la batería con el mismo SOC inicial (95%), logrando que el comportamiento en estado estable mejore por cuanto el SOC se mantiene por encima del 70% la mayor parte del tiempo, como se observa en la figura 4.13, no así alcanzando un comportamiento óptimo, ya que alcanza un valor crítico de 20.8% (menor al 30% recomendado) en los días de menor radiación. Una mejora implicaría aumentar la capacidad de la batería en un 20% o 30%,

según el factor de seguridad que se quiera introducir al diseño, para que el SOC no decaiga por debajo del nivel permitido.

Desde luego, el modelo de la batería permite cambiar el nivel inicial del SOC si se presentan problemas de convergencia en la simulación al variar la capacidad de la batería. Una vez se encuentra el punto de equilibrio entre estos dos parámetros, se obtienen los mejores resultados. En la figura 4.14 se observa el detalle de funcionamiento del circuito de control del SOC. Cuando el SOC alcanza el 95% el transistor Q1 (ver la figura 3.14) se activa drenando corriente del sistema con el fin de no llevar la batería a sobrecarga. De otro lado, al analizar los periodos en que la densidad de la corriente en el colector del circuito de desbordamiento es alta, se concluye que el panel solar está generando energía que no es aprovechada, indicando que existe una imperfección en el dimensionado.

Juntando estos tres análisis se deduce que, para mejorar la eficiencia del sistema, es necesario ajustar tanto la capacidad del panel como de la batería, lo que a nivel de costos puede significar la reducción en un porcentaje considerable.

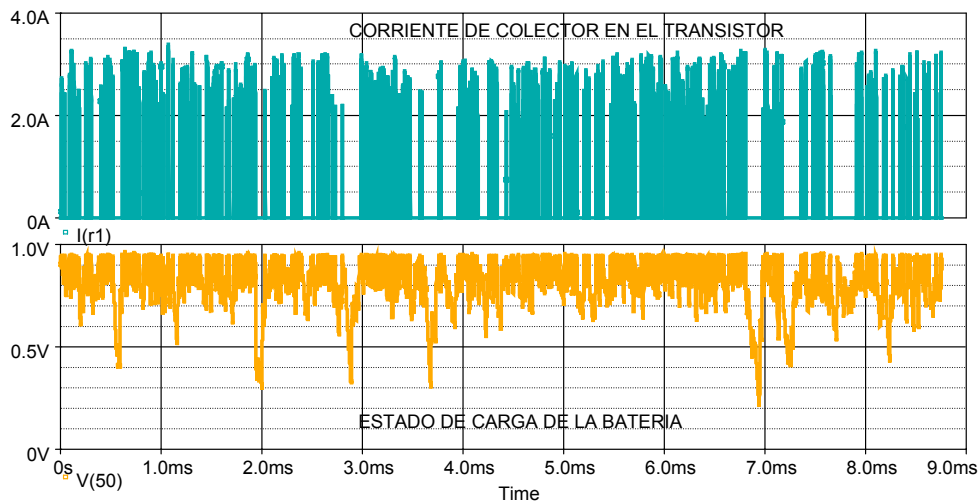


Figura 4.13 Estado de carga (SOC) y corriente de desbordamiento para el sistema configurado con el panel KYOCERA KC65T-1, operando durante el año entero. **Nota:** La escala del eje horizontal son horas en lugar de ms.

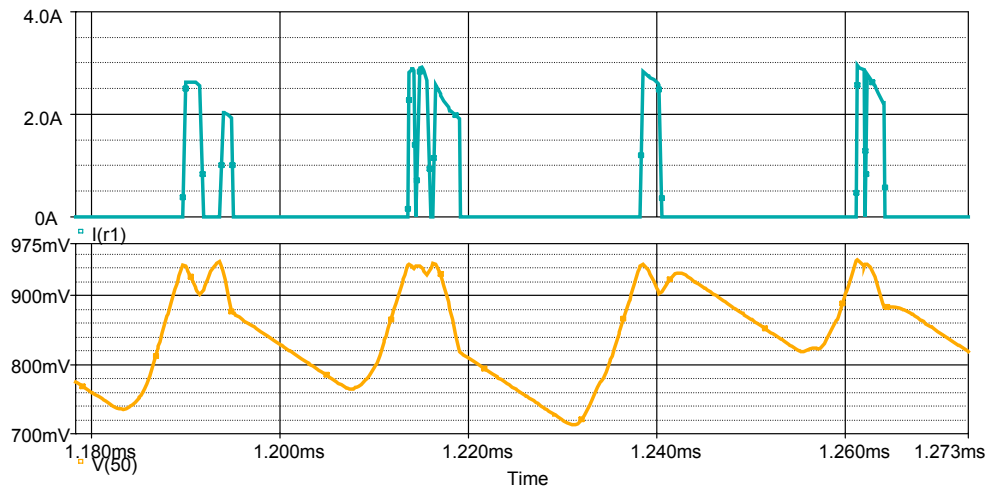


Figura 4.14 Detalle de la evolución del SOC y la corriente de desbordamiento del sistema (corriente de colector de Q1 en la figura 3.14, detallada en la sección 3.2.5). **Nota:** las unidades internas de *Orcad PSpice* son microsegundos, correspondiendo en unidades de tiempo real a horas (1 μ s corresponde a 1 hora)

En el archivo *aislado_buc_65W.cir* del Anexo 4 se encuentran los detalles de la simulación.

Finalmente, se presenta la configuración ideal, lograda con el panel KYOCERA KC40T de 40W y una batería FULLRIVER DC6512 de 62.5 Ah, que permite maximizar el aprovechamiento de la energía generada y almacenada, y minimizar costos en la instalación, luego de hacer los ajustes a la configuración anterior, ya que se redujo en más del 60% la capacidad del módulo solar (que es el elemento de mayor costo dentro del sistema), y se aumentó en casi el doble la de la batería (que representa cerca del 10% del valor del módulo). Los resultados se muestran en la figura 4.15.

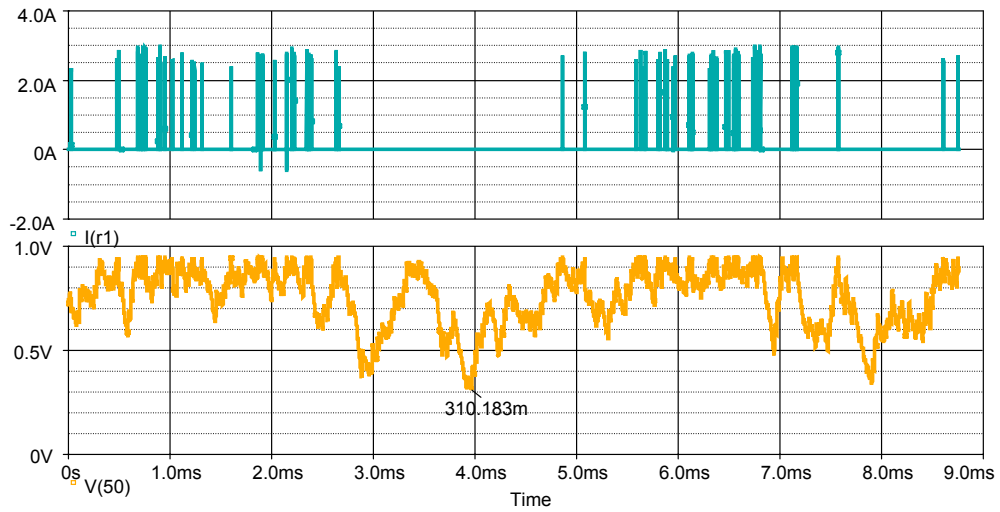


Figura 4.15 Mejoramiento a la configuración inicial. La baja densidad en los momentos en que la corriente del transistor aparece, indica que se reduce la energía desaprovechada. En la parte de debajo de la Figura, se observa que el SOC cae hasta un 31.0%. **Nota:** las unidades internas de *Orcad PSpice* son microsegundos, correspondiendo en unidades de tiempo real a horas (1 μ s corresponde a 1 hora).

Capítulo 5 DIMENSIONADO

5.1 Introducción

Al llevar a cabo el dimensionado de la instalación fotovoltaica, lo que se busca es proporcionar la mayor parte del tiempo la energía que demanda la carga en sus ciclos de funcionamiento, procurando que no haya desaprovechamiento de energía, pues esto implica elevar los costos por Watt generado.

Un procedimiento sencillo [1] para dimensionar la instalación para una aplicación dada, implica la revisión de los siguientes conceptos:

- ✚ Las horas solares pico, PSH.
- ✚ El balance de energía en el sistema fotovoltaico.
- ✚ Generación y déficit de energía.
- ✚ Simulación del sistema y comparación con datos reales.

5.2 Horas Solares Pico (PSH)

Las horas solares pico, PSH⁷, se define como la duración de un día equivalente con irradiancia de 1000 W/m², a una temperatura de celda solar de 25°. En otras palabras, es el número de horas al día en que se puede considerar que una irradiancia igual a 1000 W/m² incide sobre la superficie colectora.

Las horas solares pico (PSH) se desprenden del cálculo de la radiación solar, definida como la integral de tiempo de la irradiancia en un día. La relación que existe entre radiación y PSH se sintetiza en la siguiente expresión:

$$\int_{\text{dia}} G(t) dt = 1 \cdot PSH \quad (5.1)$$

donde $G(t)$ es el perfil de irradiancia para un día dado.

⁷ Del inglés *peak solar hours*

Por definición, la irradiancia de referencia (1000 W/m^2) del día equivalente tiene una duración de PSH horas, luego de la ecuación (5.1) se deduce que el valor numérico de la radiación solar iguala el valor numérico del parámetro PSH.

A pesar de plantear un escenario solar hipotético y no tener en cuenta los efectos de la temperatura, la utilidad del concepto de PSH radica en el hecho de que la información técnica usualmente disponible de los módulos solares comerciales está dada para condiciones estándar, como se mencionó anteriormente, por lo tanto, resulta conveniente el uso de las horas solares pico para hacer cálculos preliminares de la energía potencialmente disponible en una instalación fotovoltaica.

5.3 Balance de energía en un sistema fotovoltaico

El balance de energía, junto a las horas solares pico PSH, es el sustento del método de dimensionado para el módulo solar, y da una perspectiva ampliada de cómo las diferentes variables intervienen en el proceso.

Está visto que todos los métodos de dimensionado presentan cierto grado de inexactitud por estar sujetos a la estimación del recurso solar, que es de naturaleza aleatoria y casi impredecible, y a la incertidumbre en la energía demandada por el usuario final. Ha sido demostrado [8] que este método aplicado tiene valor práctico comparado con procedimientos más rigurosos [5.2].

El balance de energía está definido por una ecuación general asumiendo que la energía generada en un periodo de tiempo por el sistema fotovoltaico es igual a la energía consumida en el mismo periodo de tiempo:

$$P_{\max Gr} \cdot PSH = L \quad (5.2)$$

donde $P_{\max Gr}$ es la potencia nominal del módulo fotovoltaico, PSH es el valor de las horas solares pico, y L es la energía consumida por la carga en un día promedio, o día peor, en el caso más conservador.

L está definida como

$$L = 24 \cdot V_{cc} I_{eq} \quad (5.3)$$

V_{cc} es la tensión de trabajo de la carga, y I_{eq} la corriente equivalente en DC extraída por la carga. En este caso, se asume que la carga permanecerá conectada las 24 horas del día.

Los dos criterios típicos de dimensionado son los que a continuación se describen.

5.3.1 Criterio del mes peor

Para este criterio la ecuación (5.2) queda replanteada de la siguiente manera:

$$P_{\max Gr} (PSH)_{\min} = L \quad (5.4)$$

donde $(PSH)_{\min}$ es el valor de PSH en el peor mes.

Este criterio es el más conservador. Garantiza el suministro energético durante todo el año, aunque tiene el riesgo de sobredimensionar el sistema.

5.3.2 Criterio del mes promedio

Para este criterio la ecuación (5.2) es redefinida de la siguiente manera:

$$P_{\max Gr} (\overline{PSH}) = L \quad (5.5)$$

donde \overline{PSH} es el promedio de los valores de PSH para cada mes del año.

Mediante artilugios matemáticos se llega a la deducción de las siguientes expresiones para calcular el número de módulos en serie, N_{sG} , y en paralelo, N_{pG} , que componen el arreglo fotovoltaico [1]:

$$N_{sG} = (VSF) \frac{V_{cc}}{V_{mMr}} \quad (5.6)$$

$$N_{pG} = (CSF) \frac{24I_{eq}}{I_{mMr} PSH} \quad (5.7)$$

donde VSF^8 es el factor de seguridad en tensión, y CSF^9 es el factor de seguridad en corriente, los cuales agregan un grado de holgura al diseño, pues como se ha advertido, existe el riesgo de una subestimación o de una sobrestimación de la energía generada por la aproximación inherente al concepto de horas solares pico (PSH), además de obviarse la eficiencia en la interfase entre generador y carga, la eficiencia en los ciclos de carga y descarga para la batería, las pérdidas en el cableado, principalmente.

Adicionalmente, la capacidad del generador es normalizada a la carga diaria, así:

$$C_a = \frac{N_{sG} \times N_{pG} \times P_{\max Gr} \times \overline{PSH}}{L} \quad (5.8)$$

5.3.2.1 Cálculos

Para calcular la capacidad del panel, hace falta conocer los datos de radiación promedio mensual para la ubicación de la instalación. En la tabla 5.1 se sintetizan los valores mensuales para la ciudad de Bucaramanga, COL., en una superficie inclinada 15°, azimut 0° y orientación sur.

| Mes | Radiación mensual (KWh/m ² mes) | Días del mes n_i |
|------------|--|--------------------|
| Enero | 148 | 31 |
| Febrero | 131 | 28 |
| Marzo | 141 | 31 |
| Abril | 127 | 30 |
| Mayo | 135 | 31 |
| Junio | 121 | 30 |
| Julio | 131 | 31 |
| Agosto | 143 | 31 |
| Septiembre | 148 | 30 |
| Octubre | 147 | 31 |
| Noviembre | 125 | 30 |
| Diciembre | 140 | 31 |

Tabla 5.1 Radiación promedio mensual para Bucaramanga, COL., y días de cada mes. Datos obtenidos con el software METEONORM 5.1 [8].

⁸ Del inglés *voltage safety factor*

⁹ Del inglés *current safety factor*

De la tabla 5.1 se desprende la tabla 5.2, la cual muestra la radiación promedio diaria para cada mes, de donde se deducen los valores de \overline{PSH} diarios.

| Mes | Radiación diaria (KWh/m ² día) |
|-------------------------|---|
| Enero | 4.77 |
| Febrero | 4.68 |
| Marzo | 4.54 |
| Abril | 4.23 |
| Mayo | 4.35 |
| Junio | 4.03 |
| Julio | 4.23 |
| Agosto | 4.61 |
| Septiembre | 4.93 |
| Octubre | 4.74 |
| Noviembre | 4.17 |
| Diciembre | 4.52 |
| Promedio mensual | 4.48 KWh/m² día |

Tabla 5.2 Radiación promedio diaria, y por extensión, \overline{PSH} .

El valor promedio diario de la radiación mensual de los datos de la tabla 5.2 es 4.48 KWh/m² día. Por lo tanto, se deduce que el valor de \overline{PSH} diario es de 4.48 horas. Este valor converge con el suministrado por la referencia [7].

De la ecuación (5.5), asumiendo que el *nodo estación* está transmitiendo las 24 horas del día a otro nodo, se calcula la potencia nominal del generador fotovoltaico

$$P_{\max Gr} = \frac{L}{\overline{PSH}} = \frac{6.95 \text{ W} \cdot 24 \text{ horas}}{4.48 \text{ horas}} = \frac{166.8 \text{ Wh}}{4.48 \text{ horas}} = 37.23 \text{ W} \quad (5.9)$$

resultado que se redondea al valor comercial más cercano, es decir, 40 W. Al hacer esto, implícitamente se introduce el factor de seguridad en tensión y en corriente, VSF y CSF , respectivamente, según las ecuaciones (5.6) y (5.7), cuyo valor numérico depende de los parámetros I_{mMr} e V_{mMr} para cada referencia específica.

5.4 Balance energético diario en un sistema fotovoltaico

Dentro de las principales tareas que debe realizar una batería al interior del sistema fotovoltaico, se encuentran:

- ✚ Cubrir los requerimientos energéticos de la carga durante la noche.
- ✚ Cubrir la diferencia entre los valores instantáneos que la carga demanda y la potencia generada, para un determinado momento del día.
- ✚ Cubrir el déficit mensual (o estacional) de energía, para el caso en que el sistema opera durante todo el año.

Con estas premisas, es importante primero hacer un presupuesto de energía bajo tres escenarios distintos en los que trabajaría la carga, antes de realizar el dimensionado de la capacidad de la batería o acumulador.

5.4.1 Carga funcionando las 24 horas del día

Cuando la cantidad de energía demandada por la carga es menor a la generada, la energía excedente puede ser almacenada por la batería, si ésta aún no está completamente cargada; y en el caso contrario, es decir, cuando la energía demandada supera la generada, la batería debe proveer la energía faltante. A esta dinámica es a la que el sistema debe enfrentarse la mayoría del tiempo, que es cuando la energía consumida no es igual a la generada. Se dice entonces que se presenta un descasamiento de potencia (*power mismatch*).

Esta dinámica se modela matemáticamente de la siguiente manera:

$$E(t) = \int_0^t [P_G - P_L(t)] dt \quad (5.10)$$

donde $P_G(t)$ es la potencia disponible a la salida del módulo, la cual depende de la irradiancia y la temperatura, de la particularidad de la conexión de la carga, como protecciones eléctricas y equipos acondicionadores de potencia como reguladores

de carga, MPPT¹⁰, etc.; y $P_L(t)$ es la potencia que consume la carga. La integral en la ecuación (5.10) puede tomar valores positivos o negativos durante el tiempo de cálculo.

Para efectos de practicidad, el análisis asume una carga resistiva, y un valor de tensión ideal (constante) para la batería, que implícitamente significa que puede almacenar (o proveer) un cantidad infinita de energía. El valor de esta resistencia se calcula a partir de las expresiones

$$I_L = \frac{\int_0^t P_L(t) dt}{V_{cc} 24} \quad (5.11)$$

$$R_L = \frac{V_{cc}}{I_L} \quad (5.12)$$

El modelo utilizado para calcular el déficit en este escenario es de la figura 3.13, donde se muestra el *switch* encargado de conectar o desconectar la carga, dependiendo del tiempo de operación. En el caso de la carga conectada 24 horas, este *switch* permanece cerrado todo el tiempo.

5.4.1.1 Cálculos

Para el caso del *nodo estación* transmitiendo y en estado de reposo¹¹ se tomaron como valores de referencia los obtenidos experimentalmente de 6.95 W y 3.92 W, respectivamente, y a partir de éstos se calculó la corriente y la resistencia equivalente que se muestra en el circuito de la figura 3.13.

a) Carga transmitiendo

La corriente de carga se obtuvo según la expresión (5.11), así:

¹⁰ Del inglés *Maximum Power Point Trackers*

¹¹ O en *stand by*

$$I_L = \frac{\int_0^t P_L(t) dt}{V_{cc} \cdot 24} = \frac{166.8Wh}{12.7V \cdot 24horas} \approx 550mA \quad (5.13)$$

y a partir de este valor se calculó la resistencia equivalente de carga, R_L , según lo indica la ecuación (5.12)

$$R_L = \frac{V_{cc}}{I_L} = \frac{12.7}{550mA} = 23\Omega \quad (5.14)$$

Con los valores obtenidos en (5.13) y (5.14), además de los parámetros del módulo policristalino KYOCERA KS-20, se realizó con *Orcad PSpice* el perfil de simulación que se encuentra en el archivo *mismatch_buc.cir*, el cual aparece en el Anexo 5 . Como la batería se asume ideal, es decir, que entrega una tensión constante e igual a 12 V todo el tiempo sin sufrir caídas y almacenar energía infinita, no se utilizó el modelo del regulador de carga.

La tensión de control, V_{ctrl} , de la figura 3.13, se implementa mediante un *switch* en serie de baja resistencia, que a su vez tiene como señal de control un pulso de tensión que se activa durante el tiempo que dura conectada la carga (24 horas para este caso, que en unidades internas de *Orcad PSpice* equivale a 24 μs , para efectos de reducir el tiempo de procesamiento).

En la figura 5.2 se observan los resultados de la simulación, en la cual se utilizó la masa de datos de radiación solar suministrados por la CDMB¹² (Bucaramanga, COL), para determinar el valor promedio multianual de la radiación solar diaria. Para temperatura, se utilizaron los datos que arroja el software METEONORM 5.1.

La energía en la batería en un tiempo t está dada por

$$E_{bat} = \int_0^t I_{bat} V_{cc} dt \quad (5.15)$$

¹² Sigla de la Corporación de la Defensa de la Meseta de Bucaramanga

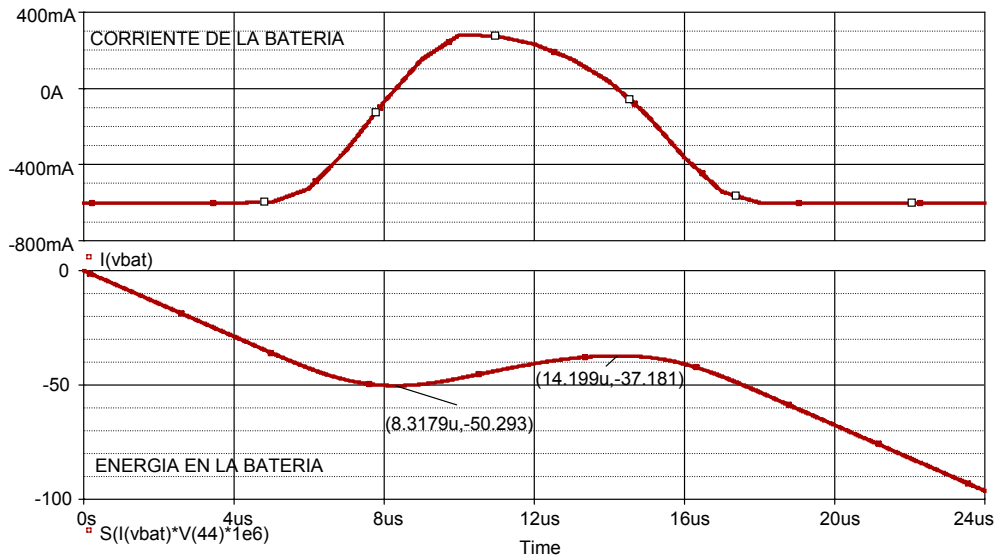
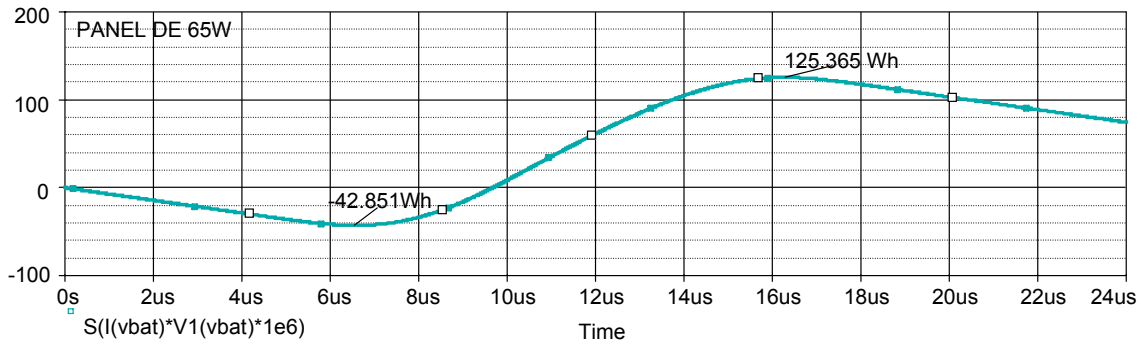


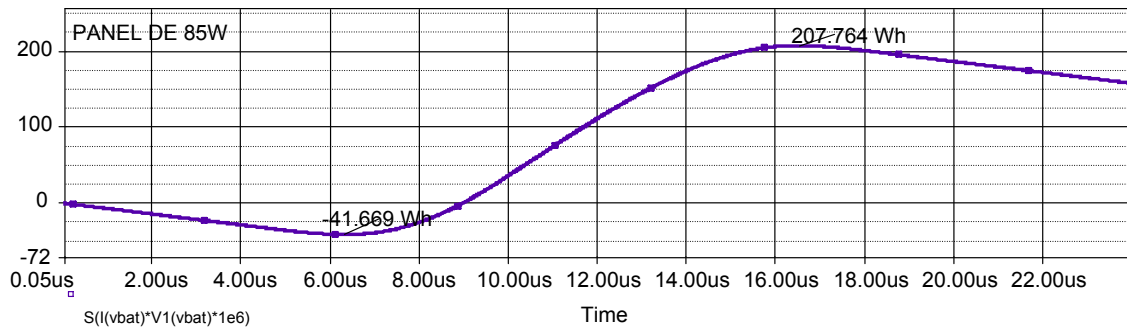
Figura 5.1 Descasamiento de energía (*mismatch*) para el nodo estación en transmisión las 24 horas del día. *Arriba.* Corriente de la batería. *Abajo.* Energía en la batería. **Nota:** las unidades el eje x son horas.

Como se aprecia en la parte alta de la figura 5.1, la batería asume la corriente que demanda la carga cuando no hay radiación solar. Esto se evidencia en que toma valores negativos, ya que no existe generación de energía en el módulo fotovoltaico antes del amanecer y luego del ocaso. De la parte baja de la figura se observa que la energía almacenada en la batería sufre una caída de 50.293 Wh en las primeras horas de la mañana, momento en el cual experimenta una ligera recuperación, pero al final del día sufre una caída brusca, lo que indica que el sistema está desbalanceado.

Una simulación alternativa para los paneles KYOCERA KC65T y KYOCERA KC85T, de 65W y 85W, respectivamente, muestra resultados más favorables, los cuales se aprecian en la figura 5.2. De ella se infiere que el tamaño de la batería debería ser al menos de $42.851 \text{ Wh} + 125.365 \text{ Wh} = 168.216 \text{ Wh}$, que es el ciclo diario de la batería, para el panel de 65W, y de $41.669 \text{ Wh} + 207.764 \text{ Wh} = 249.433$, para el panel de 85W.



(a)



(b)

Figura 5.2 Descasamiento de energía (*mismatch*) para la carga en transmisión las 24 horas del día, para un sistema configurado con un panel de 65 W (a) o uno de 85W (b). **Nota:** las unidades del eje x son horas.

b) Carga en reposo

Para el caso del *nodo estación* en reposo, se procedió de la misma manera, tomando como valor base el obtenido experimentalmente, es decir, de 3.92 W. La respectiva corriente de carga fue calculada igual que en el caso anterior a partir de la expresión

$$I_L = \frac{\int_{dia} 3.92 dt}{V_{cc} \cdot 24} = \frac{94.08 Wh}{12.7V \cdot 24 horas} \approx 310 mA \quad (5.16)$$

Igual que en el caso de la resistencia de carga

$$R_L = \frac{V_{cc}}{I_L} = \frac{12.7}{310 mA} \approx 41 \Omega \quad (5.17)$$

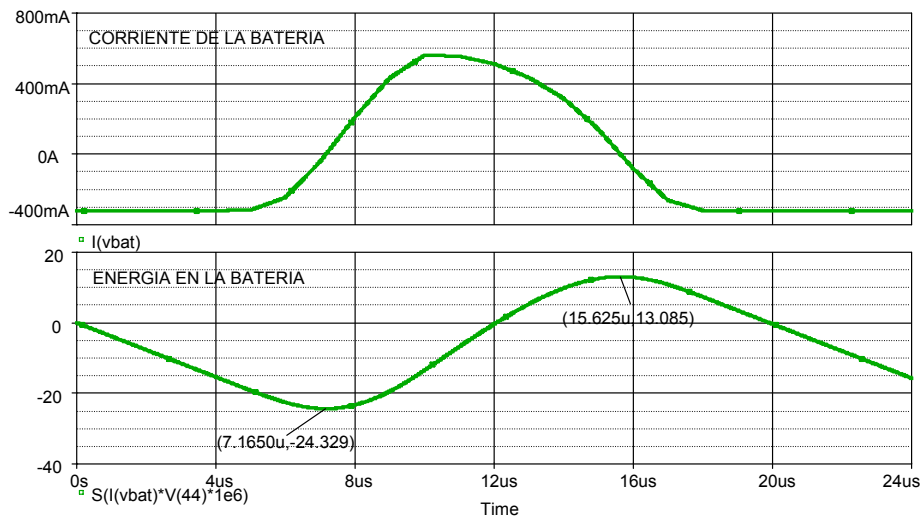


Figura 5.3 Mismatch para la carga en reposo todo el día. *Arriba*. Corriente de la batería. *Abajo*. Energía en la batería.

Nota: las unidades el eje x son horas.

Con estos datos se obtuvieron las gráficas que se muestran en la figura 5.3. De la parte baja de la figura se observa que la máxima energía almacenada por la batería es de +13.085 Wh y la mínima de -24.329 Wh. En este caso la capacidad de la batería debería ser de $13.085 \text{ Wh} + 24.329 \text{ Wh} = 37.414 \text{ Wh}$.

5.4.2 Carga operando en la noche

Este escenario es para el *nodo estación* transmitiendo en horas de la noche (4 horas en total), cuando la energía captada es prácticamente nula, por lo tanto la batería debe asumir completamente el suministro eléctrico, lo que representa un caso extremo de funcionamiento.

En la figura 5.4 se observa que en este caso la batería acumula energía durante el día y libera una parte a la carga en las 4 horas que dura la conexión. Al final del día queda un remanente de energía en la batería, que será la energía inicial para el día siguiente. En este escenario, la capacidad de la batería debería ser de 76.463 Wh. Los parámetros del modelo corresponden a los del panel KYOCERA KS-20. En el archivo *noche_buc.cir* del Anexo 5 se encuentran los detalles de la simulación.

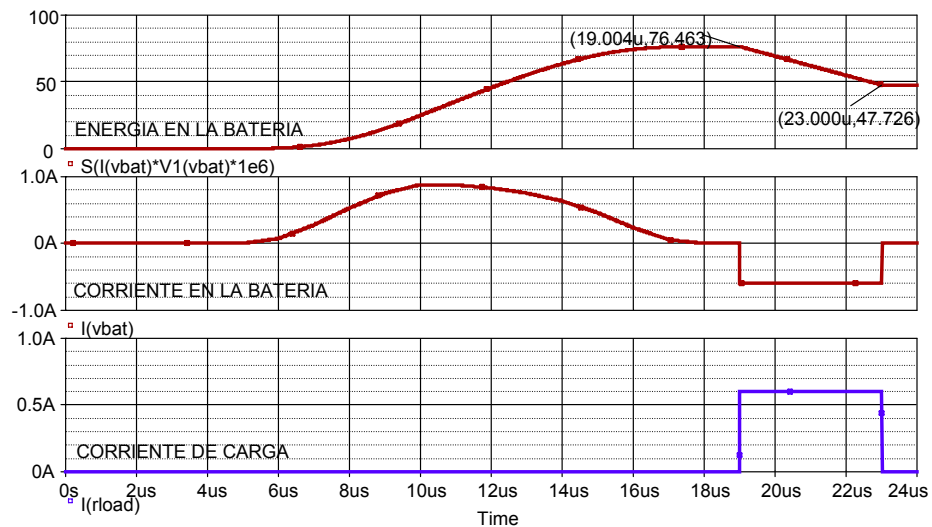


Figura 5.4 Carga transmitiendo 4 horas en la noche. *Arriba.* Energía en la batería. *Medio.* Corriente en la batería. *Abajo.* Corriente de carga. **Nota:** las unidades el eje x son horas.

5.4.3 Carga operando en horas centrales del día

Se asume que el nodo estará transmitiendo las 8 horas centrales del día, es decir, de 8 A.M. a 4 P.M. Los valores de corriente y resistencia son los antes calculados, y los parámetros del modelo para el panel son los del policristalino de 20W.

En la figura 5.5 se aprecia que la batería acumula energía en los primeros instantes de radiación solar y comienza a entregarla a la carga en las 8 horas de conexión. Al final del día, el remanente energético es de aproximadamente 20.484 Wh, energía inicial para el ciclo del siguiente día.

Para este caso, la capacidad de la batería debería ser de 20.484 Wh, el cual es el valor más pequeño de los tres escenarios analizados.

En el archivo *dia_buc.cir* del Anexo 5 se encuentran los detalles de la simulación.

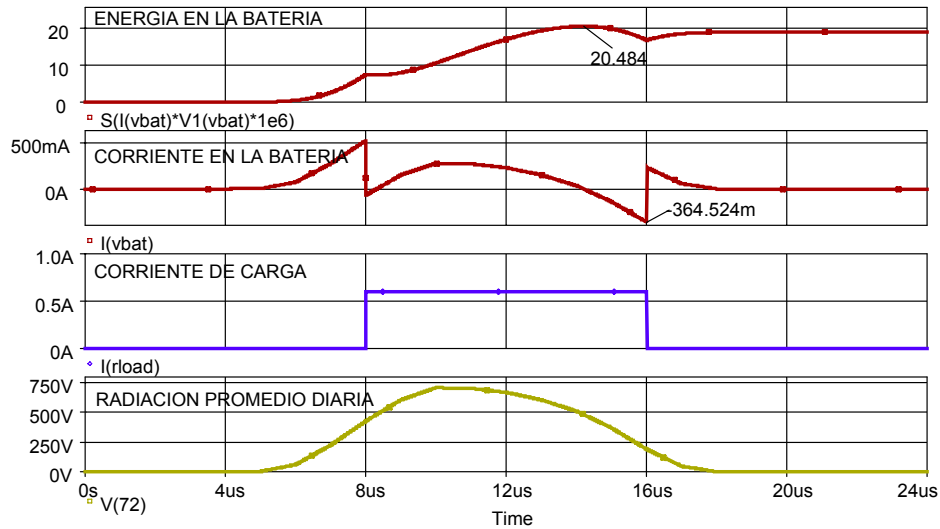


Figura 5.5 Carga transmitiendo las 8 horas centrales del día (8:00 horas a 16:00). En la curva de abajo se aprecia el perfil de irradiancia para un día promedio en Bucaramanga. **Nota:** las unidades el eje vertical son W/m^2 , y las del eje x son horas.

5.5 Balance energético mensual

El requerimiento esencial de una instalación fotovoltaica es que pueda suministrar energía a una carga conectada la mayoría del año. Para lograr esto, es pertinente hacer un análisis del comportamiento del sistema utilizando los datos de radiación solar incidente sobre la superficie inclinada.

El estimativo del balance de energía mensual se hizo con base en los datos obtenidos con METEONORM 5.1.

Los valores mensuales de la energía generada son calculados a partir de:

$$(E_{gen})_{mes} = N_{sG} \times N_{pG} \times P_{maxGr} \times (PSH)_{mes} \quad (5.18)$$

Y la energía consumida durante el mes está dada por:

$$(E_{cons})_{mes} = n_i \times (E_{cons})_{dia} \quad (5.19)$$

donde n_i es el número de días de cada mes.

El balance mensual está dado por:

$$E_{balance} = (E_{gen})_{mes} - (E_{cons})_{mes} = N_{sG} \times N_{pG} \times P_{maxGr} \times (PSH)_{mes} - n_i \times (E_{cons})_{dia} \quad (5.20)$$

5.5.1 Cálculos

Para calcular el déficit energético mensual de nuestro sistema de comunicaciones, se utilizaron los datos de las tablas 5.1 y 5.2.

La potencia promedio consumida por el *nodo estación* se asumió como 6.95 W transmitiendo.

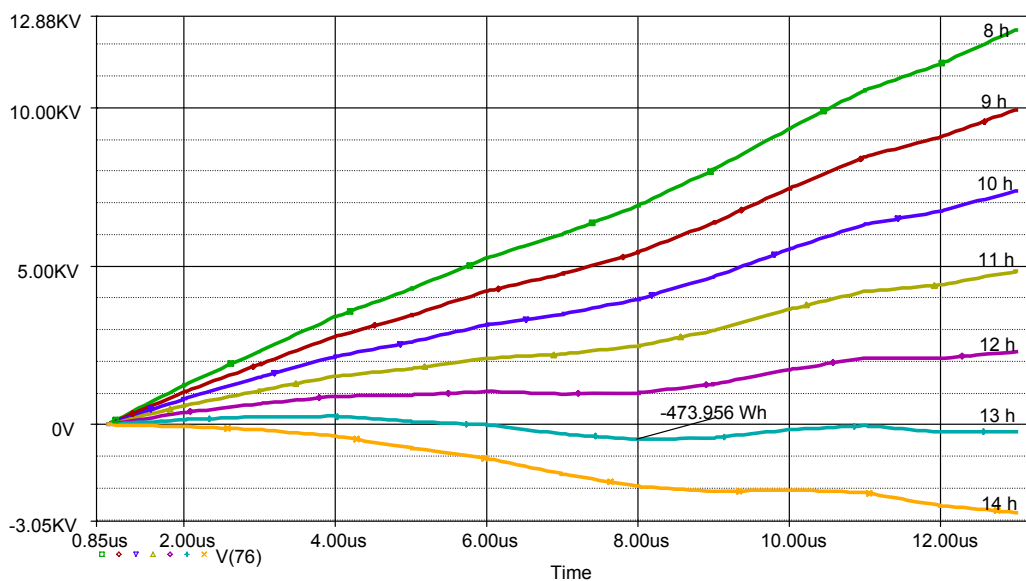


Figura 5.6 Balance energético mensual para el nodo transmitiendo de 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14 horas al día alimentado con un panel de 20W.

De la figura 5.6 se observa que el caso límite se da para un funcionamiento de 13 horas, en el que se alcanza un déficit energético máximo de 473.956 Wh. El caso más crítico ocurre para un funcionamiento de 14 horas, en que el déficit es significativo, mientras que en los demás casos no se presenta una falencia energética importante.

En el archivo *mensual_buc2.cir* del Anexo 5 se encuentran los detalles de la simulación.

5.6 Procedimiento simplificado para dimensionar la batería

Una expresión sencilla para calcular la capacidad de la batería viene dada por [1]:

$$E_{bateria} = \left\{ MAX \left[(E_{balance})_{max} + E_{backup}, E_{cycle} \left(\frac{1}{x} \right) \right] \right\} \frac{1}{y} \cdot \frac{1}{\eta_{cd}} \quad (5.21)$$

donde

- ✚ $E_{balance\ max}$ es el máximo déficit mensual de energía durante un año entero de operación.
- ✚ E_{backup} es la energía almacenada considerando un cierto número de días de operación del sistema sin generación de potencia, debido a fallas en el mismo, mantenimiento, o varios días con nubosidad, o poca radiación solar.
- ✚ E_{cycle} es el déficit de energía originado por descasamiento de potencia, o carga nocturna.
- ✚ x es el factor cíclico diario de la batería.
- ✚ y es el factor de máxima profundidad de descarga.
- ✚ η_{cd} es la eficiencia de carga/descarga en la batería.

La ecuación (5.21) es dada generalmente en términos de Ah, como sigue:

$$C = \frac{E_{bateria}}{V_{cc}} \quad (5.22)$$

En la nomenclatura de sistemas fotovoltaicos es usual encontrar la capacidad de la batería normalizada a la carga diaria, así:

$$C_s = \frac{E_{bateria}}{L} \quad (5.23)$$

5.6.1 Cálculos

Para estimar la capacidad de la batería requerida, a partir de la expresión (5.20), se toma el valor de 473.956 Wh calculado en la sección 5.5 como máximo déficit mensual, esto es

$$(E_{balance})_{max} = 473.956 \text{ Wh} \quad (5.24)$$

Considerando una autonomía de 5 días

$$E_{backup} = 5 \text{ días} \times 13 \text{ horas} \times 6.95 \text{ W} = 451.75 \text{ Wh} \quad (5.26)$$

y, tomando $x = 1.5$ como el peor caso para el factor cíclico diario de la batería, que es cuando poca radiación solar es convertida en energía, se toma el máximo ciclo diario posible: $13 \text{ horas} \times 6.95 \text{ W} = 90.35 \text{ Wh/día}$, se tendría

$$E_{bateria} = \left\{ \text{MAX} \left[473.956 + 451.75, 90.35 \left(\frac{1}{0.15} \right) \right] \right\} \frac{1}{0.8} \cdot \frac{1}{0.95} = 1218.03 \text{ Wh} \quad (5.27)$$

Esta capacidad en Ah está dada por la ecuación (5.22)

$$C = \frac{E_{bateria}}{V_{cc}} = \frac{1218.03}{12.7} = 95.91 \text{ Ah} \quad (5.27)$$

que normalizada a la carga diaria, ecuación (5.23), sería

$$C_s = \frac{E_{bateria}}{L} = \frac{1218.03}{90.35} = 13.48 \quad (5.28)$$

De la ecuación (5.8)

$$C_a = \frac{N_{sG} \times N_{pG} \times P_{\max Gr} \times \overline{PSH}}{L} = \frac{1 \times 1 \times 20 \times 4.48}{90.35} = 0.99 \quad (5.29)$$

Para otra configuración, se obtuvo una relación de 1.98 con un panel de 40W, y de 8.77 para la batería. Otras combinaciones se muestran en la tabla 5.3.

| Capacidad del panel | C_a ec. (5.8) | Déficit energético mensual | C_s ec. (5.23) | Capacidad de la batería |
|---------------------|-----------------|----------------------------|------------------|-------------------------|
| 20 W | 0.99 | 473.956 Wh | 13.48 | 95.91 Ah |
| 40 W | 1.98 | 0 | 8.77 | 62.39 Ah |
| 65 W | 3.22 | 0 | 8.77 | 62.39 Ah |

Tabla 5.3 Distintas configuraciones para el nodo estación transmitiendo 13 horas.

De la tabla se concluye que al aumentar la capacidad del panel se alcanza un punto en el que se reduce el déficit energético mensual a cero, haciendo que el valor de C_s se sature en 8.77, lo que indica que la instalación podría estar sobredimensionada.

5.7 Dimensionado para varios escenarios de carga

En esta sección se describe el método de dimensionado adoptado, el cual integra los resultados de la simulación y los fundamentos teóricos previos. Al final se muestran los resultados obtenidos para cada configuración del nodo (*estación* o *repetidor*) en los distintos escenarios de carga.

Como una primera aproximación a la configuración del sistema, se calculó la capacidad mínima del módulo solar para suplir la demanda diaria de la carga, según dicta la ecuación 5.8, tomando como valor para \overline{PSH} el presentado en la tabla 5.2. Para la batería se hizo lo propio usando la expresión 5.21, solo que esta vez las pérdidas mensuales son iguales a cero, como consecuencia de la elección del panel, mientras que el valor de E_{cycle} se tomó igual a la carga nocturna para cada escenario de carga.

Como segundo paso, luego de la simulación con los valores calculados anteriormente y los datos de radiación solar y temperatura para el año entero, se centró la atención en la evolución del SOC y la energía generada por el panel. Mediante un proceso iterativo que consiste en ajustar los valores iniciales en un porcentaje específico, introduciendo así en la instalación el factor de seguridad deseado, se llegó a la configuración óptima, que es cuando no existe sobredimensionado o subdimensionado del panel o la batería. Los criterios principales son que el SOC no esté por debajo del 30% (según las recomendaciones del fabricante) y la densidad en la curva de la corriente de desbordamiento sea baja a lo largo del año, lo cual busca que la energía desaprovechada sea mínima.

Es importante anotar que también el SOC inicial juega un papel fundamental como parámetro de entrada del modelo de la batería, siendo una variable determinante en el funcionamiento global del sistema fotovoltaico durante el periodo de tiempo simulado. Los resultados obtenidos garantizan una operación del sistema durante todo el año, situándose por encima de los logrados con métodos estáticos y aproximados. La confiabilidad en los datos de entrada de radiación solar y temperatura, así como la certeza que se tenga del consumo de la carga, marcarán el éxito en el dimensionado.

Parte de este procedimiento se ilustra en la figura 5.7 para un caso particular de carga, en el que se halló la configuración óptima con un panel de 43 W y una batería de 770 Wh. Nótese que el SOC decae cuando hay poca radiación disponible, sin sobrepasar del 30% recomendado, y que la corriente de desbordamiento presenta baja densidad. En el Anexo 5 se encuentran algunas otras curvas para los demás escenarios. Las tablas 5.4 y 5.5 sintetizan los resultados generales.

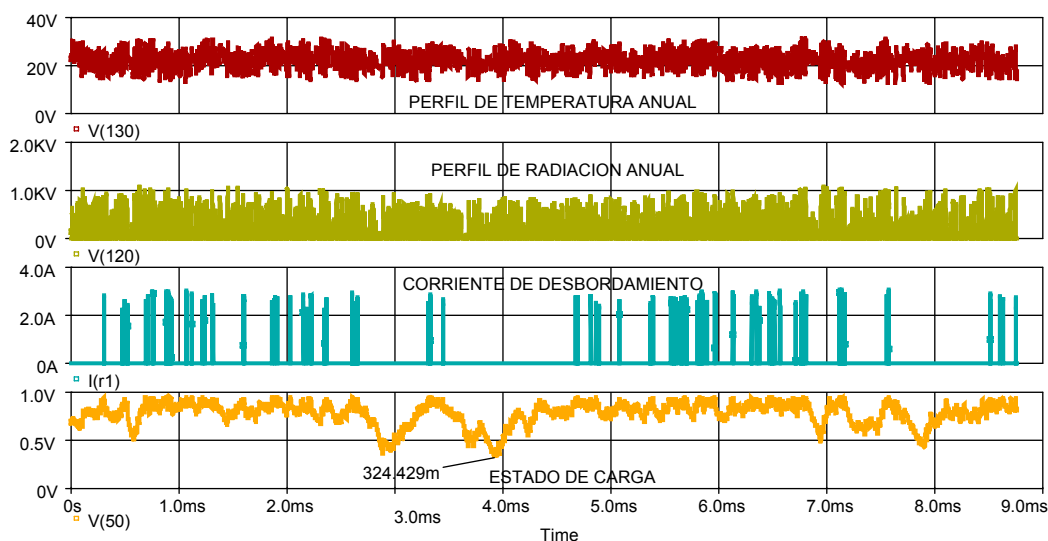


Figura 5.7 Simulación del dimensionado para el nodo repetidor transmitiendo 12 horas.

| Consumo diario | Escenario de carga | SOC inicial | SOC mínimo | Capacidad del panel | C_a | Capacidad de la batería | C_s | Autonomía* |
|----------------|--------------------------|-------------|------------|---------------------|-------|-------------------------|-------|------------|
| 90.35 Wh | Transmitiendo 13 horas | 60% | 33.9% | 43 W | 2.13 | 420 Wh | 4.65 | 3 días |
| 118.32 Wh | Transmitiendo 8 horas** | 60% | 30.7% | 43 W | 1.63 | 810 Wh | 6.85 | 4.5 días |
| 130.44 Wh | Transmitiendo 12 horas** | 70% | 31.5% | 54 W | 1.85 | 600 Wh | 4.60 | 3 días |
| 166.80 Wh | Transmitiendo 24 horas | 75% | 31.8% | 65 W | 1.71 | 1025 Wh | 6.15 | 4 días |

Tabla 5.4 Dimensionado para el nodo estación en diferentes escenarios de carga.

*Se calcula a partir de la expresión (5.21) asumiendo una profundidad de descarga máxima de 70%, una eficiencia del 95% en el ciclo carga/descarga de la batería, y que no hay déficit energético mensual.

**El resto de tiempo el nodo permanece en reposo (*stand by*).

| Consumo diario | Escenario de carga | SOC inicial | SOC mínimo | Capacidad del panel | C_a | Capacidad de la batería | C_s | Autonomía* |
|----------------|--------------------------|-------------|------------|---------------------|-------|-------------------------|-------|------------|
| 122.88 Wh | Transmitiendo 12 horas | 70% | 32.4% | 43 W | 1.57 | 770 Wh | 6.27 | 4.2 días |
| 158.24 Wh | Transmitiendo 8 horas** | 80% | 32.8% | 65 W | 1.84 | 830 Wh | 5.25 | 3.5 días |
| 180.12 Wh | Transmitiendo 12 horas** | 70% | 36.3% | 65 W | 1.62 | 900 Wh | 5.00 | 3.3 días |
| 245.76 Wh | Transmitiendo 24 horas | 90% | 32.7% | 85 W | 1.52 | 1200 Wh | 4.88 | 3.3 días |

Tabla 5.5 Dimensionado para el nodo repetidor en diferentes escenarios de carga.

*Se calcula a partir de la expresión (5.21) asumiendo una profundidad de descarga máxima de 70%, una eficiencia del 95% en el ciclo carga/descarga de la batería, y que no hay déficit energético mensual.

**El resto de tiempo el nodo permanece en reposo (*stand by*).

Nota: el regulador de carga es idéntico para todas la configuraciones, ya que en cualquier caso la corriente de carga no será superior a 5 A, siendo este el parámetro que se deberá tener en cuenta a la hora de seleccionar el dispositivo, como también el tipo de regulación, preferiblemente tipo serie o por SOC.

5.8 Costos

Es importante calcular los costos por watt del sistema de comunicaciones para tener una idea de la inversión que sólo en materia de elementos se deberá hacer. Para eso, se calcula el costo por watt de cada una de las configuraciones de carga presentadas en las tablas 5.4 y 5.5 utilizando como base los precios actuales para módulos solares y baterías que arroja la firma de consultoría e informes de investigación en energía solar *Solar Buzz* a través de su web site [9]. La figura 5.8 muestra que los costos se elevan proporcionalmente a la cantidad de watts instalados, como es apenas lógico. Sin embargo, la tendencia es que los costos de instalación bajen con los años conforme se masifica el uso de la energía solar. Se debe tener en cuenta que no se ha incluido el costo del regulador para cada instalación, ni del cableado y las protecciones, las estructuras de soporte y anclaje y demás accesorios que el nodo de comunicaciones pueda necesitar.

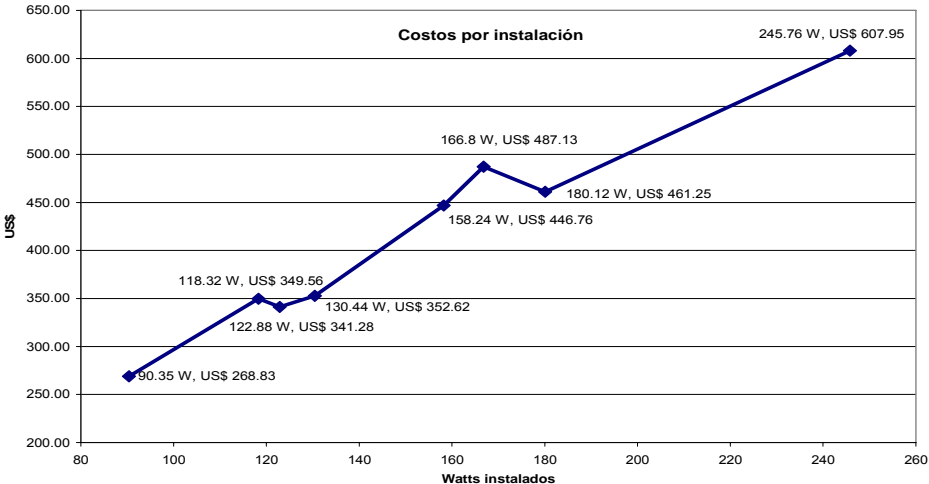


Figura 5.8 Costos para la instalación en dólares.

CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

A continuación se enuncian las conclusiones y observaciones más relevantes que a nivel global se sacaron para cada área de conocimiento involucrada en el presente trabajo, no sin antes mencionar que se cumplió a cabalidad con el objetivo general, y los objetivos específicos planteados en el plan de proyecto, a partir del desarrollo ordenado y sistemático de sus fases constitutivas. El cumplimiento de los objetivos se dejó evidenciado en cada uno de los capítulos que integran este libro, presentados previamente.

Radiación solar

- ✚ La determinación del recurso solar disponible, materia prima en una instalación fotovoltaica, es esencial en la etapa preliminar de diseño; cuanto más ajustada a la realidad sea la estimación de este recurso, el dimensionado del sistema fotovoltaico estará más cercano al óptimo, que es un reflejo del balance ideal de energía en un periodo de tiempo: la energía generada iguala a la consumida.
- ✚ Se observó correspondencia entre la radiación solar teórica y la experimental para la zona de pruebas. En general, está dentro de los niveles típicos medidos para la ubicación geo-espacial.

Sistema solar fotovoltaico

- ✚ Se comprobó en el terreno la aplicabilidad de la energía solar fotovoltaica, siendo una alternativa viable, eficiente y relativamente económica para la alimentación de pequeños sistemas de comunicaciones alimentados con DC, como es el caso de un nodo Wi-Fi. La posibilidad de integrar todo el sistema en una sola unidad o prototipo liviano, portátil y de fácil instalación, es una ventaja importante de este tipo de soluciones.

- ✚ El balance energético de un sistema fotovoltaico está directamente relacionado con la cantidad de energía solar captada, con la eficiencia en la conversión de energía eléctrica, con la energía almacenada por la batería, con la energía consumida por la carga, y las pérdidas del sistema por cableado y consumo del regulador. El caso ideal es que dichas pérdidas sean nulas, y el módulo solar pueda suplir durante las horas del día el suministro de potencia a la carga y, simultáneamente, suplir el déficit energético de la batería, que únicamente alimentaría a la carga en las horas de la noche. En general, esa situación no se da, por lo que siempre debe existir un factor de seguridad para el dimensionado, asumiendo que la batería tendrá que acarrear durante días enteros el suministro de energía (días de autonomía); que el módulo no convertirá toda la energía solar captada en eléctrica, y que existe un grado de incertidumbre en los datos que de radiación solar (principalmente PSH) se tengan.
- ✚ Los costos en la inversión de un sistema solar fotovoltaico todavía son altos para aplicaciones que demandan mayor potencia al de un nodo Wi-Fi, que es relativamente costoso, siendo el módulo solar el elemento que más peso aporta a la ecuación. La tendencia en los últimos años es que el costo por Watt se ha dado a la baja en los países industrializados (según datos de Abril de 2010 llevados a cabo por una importante firma consultora [9], en EE.UU alrededor de US\$4.23 y en Europa de €4.13 por Watt). En Colombia los precios se han mantenido relativamente constantes, y en general este tipo de soluciones sigue siendo poco viable para la mayoría de la población.

Sistema de adquisición de datos

- ✚ Con la tasa de muestreo que ofrece el *data logger* utilizado, se pudo obtener una medición confiable de las variables de interés, a pesar de la naturaleza pulsante de la corriente de carga. Una valoración paralela llevada a cabo con el osciloscopio, un instrumento de medida mucho más robusto, arrojó como

resultado en distintas pruebas que el error existente en la medición con el *datalogger* es mínimo (menor al 5%), lo cual es aceptable para el orden de magnitud de las corrientes que se están manejando (mA).

Etapas de pruebas

- ✚ Es importante conocer con exactitud el comportamiento de la carga a alimentar, es decir, su consumo en Watts, para hacer un dimensionado fiable. El equilibrio del sistema fotovoltaico será mantenido siempre y cuando se conozca con certeza tanto la entrada al sistema (radiación solar y temperatura ambiente) como la salida (demanda de potencia de la carga), haciendo las aproximaciones a que haya lugar si ésta es de naturaleza no-lineal, como en nuestro caso, con el fin de simplificar el proceso de dimensionado. A partir de entonces se diseñará un sistema eficiente y confiable. Por lo tanto, una etapa de pruebas es fundamental si se quiere lograr este objetivo. Además, con las pruebas se conoce detalladamente el funcionamiento de los elementos y se aprende más de la dinámica energética del sistema operando en el tiempo. Un buen diseño tiene como pilar una etapa previa de pruebas de campo.
- ✚ La limitación de las pruebas es que resultan imprácticas por lo costos de la logística implícita y lo dispendioso de realizarlas durante prolongados periodos de tiempo. Lo ideal sería poder verificar en la práctica el funcionamiento teórico. No obstante, este trabajo utiliza un método de diseño guiado por la sistematización, cuyos resultados son altamente confiables, según lo encontrado en [1], [5] y [6], lo cual se pudo comprobar en la práctica al hallar convergencia entre simulación, pruebas y teoría. La simulación de sistemas fotovoltaicos con herramientas de diseño asistido por computador (CAD) permite profundizar en el análisis, lo que difícilmente se logra únicamente con una etapa de pruebas y métodos menos ortodoxos de diseño.

- ✚ En síntesis, la etapa de pruebas sirve para caracterizar individualmente los elementos del sistema solar fotovoltaico, del nodo Wi-Fi, y también de todo el sistema funcionando, y a partir de los resultados contrastar lo hallado previamente en la teoría y en las especificaciones técnicas del fabricante, para luego ajustar los modelos y realizar una simulación apropiada.

Modelado

- ✚ Se halló que las curvas obtenidas en la caracterización de los elementos, como módulos solares, baterías, y regulador de carga, convergen con las proporcionadas por los fabricantes en un margen de error muy pequeño, dando así confianza en la utilización de las especificaciones técnicas de los equipos como parámetros de entrada en los modelos.

Simulación

- ✚ Simular un sistema fotovoltaico también permite refinar su dimensionado, por cuanto integra la mayor parte de las variables involucradas en el flujo energético: irradiancia, temperatura, inclinación y orientación de la superficie colectora, parámetros eléctricos de los elementos, perfil de carga, principalmente. En el corto tiempo que tarda la simulación (desde segundos hasta unos pocos minutos) se puede visualizar lo que ocurre en años; más aún, permite extrapolar los resultados y hacer proyecciones en la evolución del sistema fotovoltaico. La fiabilidad de los resultados obtenidos con la simulación se sustenta en qué tanto se ajustaron los modelos de los elementos a su comportamiento real, lo cual se logró únicamente cuando pruebas de campo y simulación se retroalimentaron entre sí.

Dimensionado

- ✚ El dimensionado del sistema fotovoltaico para alimentar un nodo Wi-Fi es igual o más complejo que el corrientemente utilizado para cualquier otra carga, ya que depende del tipo de configuración del nodo (*estación* o *repetidor*), del

modo de operación (reposo, recepción o transmisión), y del tiempo de funcionamiento, que en general es variable. Pese a esa incertidumbre, el presente trabajo planteó un dimensionado concreto para un número finito de casos, pero que se puede fácilmente extrapolar a uno específico, según lo requiera el proyecto UIS-Colciencias. Quedó demostrado que se puede incurrir en sobredimensionado incluso si se tienen datos confiables de irradiancia, una buena aproximación para el consumo de la carga, y herramientas versátiles de simulación.

- ✚ Un dimensionado realizado con base a datos horarios de radiación solar es altamente confiable en la medida que los datos consultados lo sean. Al analizar el comportamiento del sistema durante un año promedio se está teniendo un muy buen conocimiento de la respuesta del sistema a todas las condiciones climáticas para un escenario de carga específico. La tarea del diseñador consiste en ir ajustando los parámetros de los modelos, mediante un proceso iterativo hasta obtener el resultado óptimo, partiendo de un cálculo base o presupuesto inicial para el módulo solar (ecuación 5.8) y batería (ecuación 5.21). Lógicamente, para llegar a este nivel es necesario que previamente se haya hecho una caracterización de los modelos eléctricos de cada uno de los elementos, para garantizar que las estimaciones sean valederas.
- ✚ Quedó visto que un buen dimensionado conjuga los resultados de la estimación del recuso solar, la simulación y las pruebas de campo. Entre más información detallada del sistema se pudo adquirir, el dimensionado realizado estuvo más cerca del óptimo. Para el caso general, aunque algunas veces no se disponga de datos de radiación solar mensual u horaria en una ubicación específica, siendo ésta la mayor limitante, y se apele a métodos técnicos o estáticos para dimensionar, se pueden lograr resultados que garanticen la operación anual sin inconvenientes, pero el riesgo de incurrir en sobredimensionado o subdimensionado, que a la larga disparan los costos por Watt instalado, es alto.

RECOMENDACIONES

Finalmente, se señalan algunas recomendaciones con el fin de orientar futuras investigaciones o trabajos que tengan que ver con los temas tratados en el presente trabajo.

Radiación solar

✚ Realizar un estimativo confiable de la radiación solar, así como de temperatura ambiente para el lugar de la instalación, no es una tarea difícil por la diversidad de fuentes de información disponibles (observatorios meteorológicos, agencias espaciales, estaciones climáticas locales y nacionales, software especializado, métodos estocásticos de cálculo, principalmente). Lo más apropiado, desde el punto de vista de la ingeniería solar, es cotejar la información y buscar coherencia entre las distintas fuentes consultadas para no incurrir en sobrestimación o subestimación de la radiación solar. Se enfatiza realizar este procedimiento para lograr resultados satisfactorios, al igual que los obtenidos en este trabajo atendiendo esta recomendación.

Sistema solar fotovoltaico

✚ Un inconveniente que se presenta en las baterías de plomo-ácido, además de aumentar significativamente el peso de la instalación, es la gasificación del electrolito al formarse oxígeno e hidrógeno gaseoso a causa de los ciclos de carga/descarga y las altas temperaturas. Inconveniente que se torna grave cuando la estructura de almacenamiento o cofre plástico no dispone de orificios de ventilación. Lo recomendable es proveer a la batería al menos un orificio libre de humedad por donde pueda respirar y mantener una condición favorable de temperatura. De lo contrario, se pondría en riesgo su vida útil, o peor aún, la salud del operario.

- ✚ Dentro de la configuración de un sistema solar fotovoltaico, resulta crucial en la administración eficiente de la energía el empleo del regulador de carga, en las aplicaciones que lo requieren, como es el caso de un nodo Wi-Fi. Obviar su implementación implica desaprovechar gran parte de la energía captada y almacenada, además de exponer a riesgo de daño permanente la batería. A la hora de su elección se deberá tener en cuenta principalmente el tipo de regulación (si es serie o paralelo; por SOC o por tensión), su consumo y la capacidad de corriente. Por los resultados satisfactorios que se obtuvieron, recomendamos vehementemente la regulación por SOC, por tratarse del tipo más completo.
- ✚ Es importante realizar la conexión del sistema solar fotovoltaico tal y como lo recomienda el manual de instrucciones del regulador de carga. Efectuar conexiones irregulares significa acortar la vida útil del dispositivo y poner en riesgo de cortocircuito o avería los demás elementos, según lo hallado en la literatura.
- ✚ El mantenimiento mínimo de un sistema solar fotovoltaico consiste en verificar que la superficie colectora del panel se encuentre libre de polvo o suciedad, y que la batería no presente sulfatación de los bornes, producto de una alta profundidad de descarga (DOD), en el caso de baterías de plomo-ácido. Es importante en todo momento tener en cuenta las recomendaciones generales de instalación y mantenimiento que hacen las entidades especializadas en sistemas fotovoltaicos, y que ya algunos países (caso concreto España) han adoptado como regulativas dentro de su legislación en lo que tiene que ver con el uso de esta tecnología.

Sistema de adquisición de datos

- ✚ Es indispensable el uso de un sistema de adquisición de datos, como el *datalogger* y sus respectivos circuitos sensores acondicionadores de señal, cuando se desea monitorear el comportamiento eléctrico de un sistema en

periodos prolongados de tiempo. La versatilidad, la fácil operación y la confianza en las mediciones, se reflejan en el costo de los equipos, perfilándose como una alternativa viable para la recopilación de información en un sistema fotovoltaico. Una característica importante que debería tener este dispositivo, si se quiere evitar cubiertas protectoras o estructuras de soporte, consistiría en que fuera *outdoor*, y en la medida en que el presupuesto lo permita, con circuitos sensores incorporados, proveyendo con esto más espacio y menos peso a la unidad de pruebas.

Modelado

✚ En general, los modelos seleccionados se ajustan dentro de un margen de error aceptable (del 18% en el peor caso) a los cálculos teóricos y a los resultados experimentales. Las disimilitudes surgen debido a las simplificaciones hechas en el proceso deductivo, así como del perfil específico de simulación implementado, y de las características propias del elemento. Al utilizar los modelos con menos idealizaciones se pueden presentar problemas de convergencia o desbordamiento interno de datos, por lo que se recomienda probar con el modelo simplificado o generalizado, que ofrece también resultados satisfactorios.

Simulación

✚ Se recomienda el uso del software *Orcad PSpice* por la inmensa versatilidad que presta a la hora de hacer los análisis de interés a un sistema fotovoltaico, en el que interaccionan gran cantidad de variables eléctricas y meteorológicas. Se resalta la utilidad de la sentencia *.stimulus* para involucrar datos experimentales en la simulación, bien sea como fuente de tensión o de corriente; útil sobretodo cuando se desea comparar los resultados simulados con los experimentales.

- ✚ En la simulación del sistema completo, el modelo de la batería es casi siempre el que presenta problemas de convergencia dentro del análisis que ejecuta *Orcad PSpice*. Si esto sucede, se recomienda utilizar el modelo simplificado que reemplaza los *switches* del modelo generalizado por sentencias 'IF'. Al combinar adecuadamente los parámetros de entrada del modelo (SOC total y SOC inicial) algunas veces se superan estos inconvenientes, que en el mayor de los casos se deben a que la evolución del SOC sale del rango de trabajo recomendado del modelo, esto es, entre el 30% y el 80%. Análogamente, el modelo comportamental del módulo solar puede originar problemas de este tipo para valores de irradiancia y temperatura ambiente cercanos a cero. Algunos artificios, como por ejemplo asignar un valor igual a la unidad para esos datos, podrían solucionar los inconvenientes. Recomendamos insistentemente consultar la referencia [1] si se quiere ampliar la visión en el uso de simulaciones para dimensionar un sistema solar fotovoltaico.

Dimensionado

- ✚ Aún cuando el dimensionado del sistema fotovoltaico se realizó específicamente para la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana, el procedimiento básico es fácilmente extrapolable a otras latitudes del territorio nacional, para lo cual se deberán tener muy en cuenta los datos de radiación solar y temperatura así como el escenario de carga para el nodo WiFi (si es *nodo estación* o *nodo repetidor*, horas transmitiendo, horas en reposo, etc).

BIBLIOGRAFÍA

[1] Castaner, L., y Silvestre S., *Modelling photovoltaic systems using Pspice*, John Wiley & Sons, 2002.

[2] Green, M.A., *Solar cells*, Bridge Printery, Rosebery, NSW, Australia, 1992.

[3] Ross, R.G. y Smocler, M.I., *Flat-plate Solar Array Project Final Report, Volume VI: Engineering – Sciences and Realibility*, Jet Propulsion Laboratory. Publicación 86-31, 1986.

[4] Lasnier, F., y Tang, T. G., *Photovoltaic Engineering Handbook*, Adam Hilguer, 1990.

[5] Markvart, T., Castañer, L. y Egido, M.A. *Sizing and reliability of stand-alone PV systems*, 12th European photovoltaic solar energy conference, pp. 1722-24, Amsterdam, abril 1994.

[6] Egido, M.A. y Lorenzo, E., *The string of standalones PV systems: a review and a proponed new method*, solar energy materials and solar cells, 26, 51, 1992.

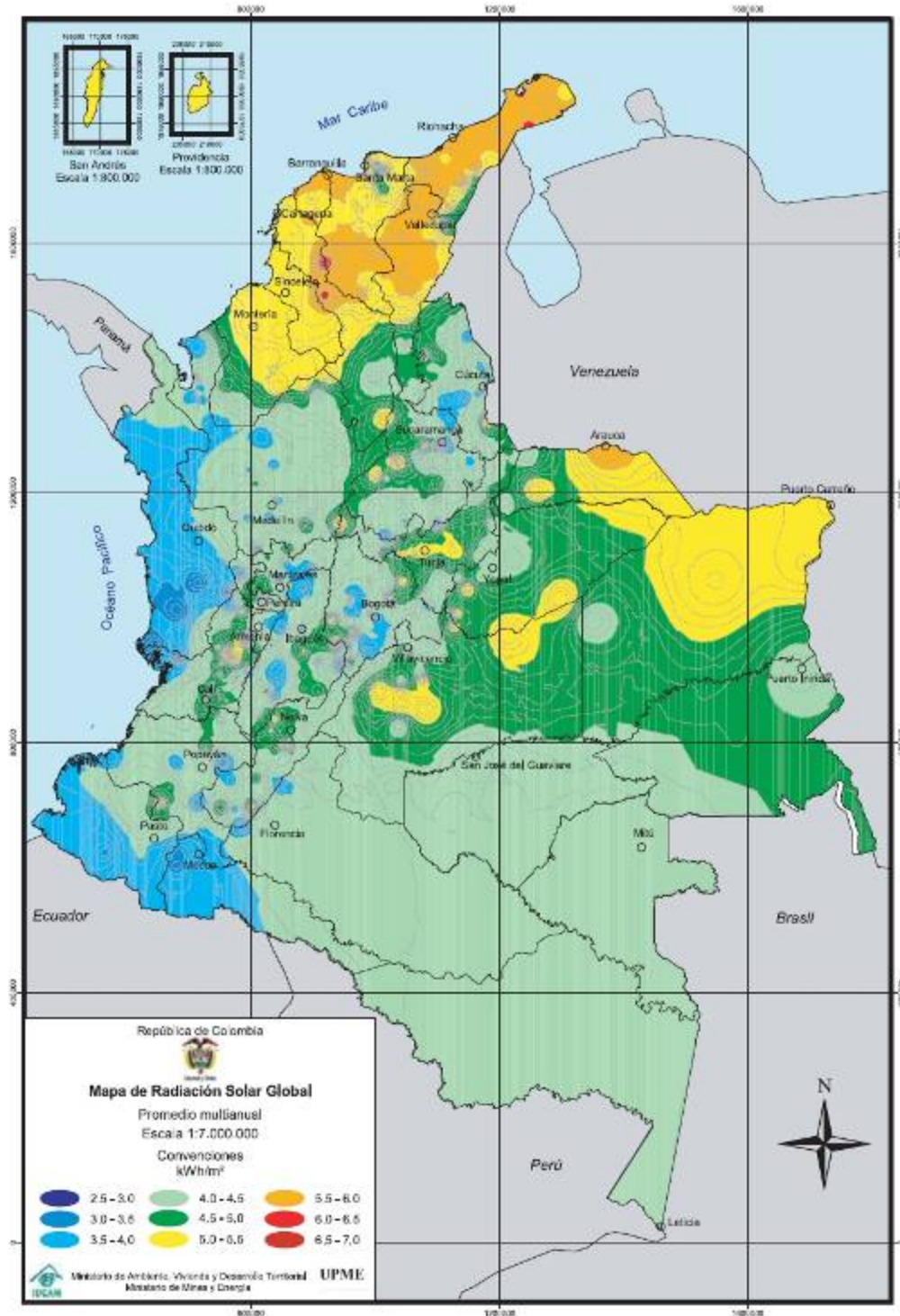
[7] UPME, IDEAM, *Atlas de Radiación solar de Colombia*, 2005.

[8] Meteotest Meteororm Ver. 5.1, Switzerland, www.meteonorm.com

[9] <http://www.solarbuzz.com>

Anexo 1

1. Mapa de radiación solar global para Colombia. Promedio multianual



Anexo 2

1. Cálculo de autonomía (teóricos aproximados)

Sistema funcionando solo con la batería:

Cálculo del tiempo de autonomía para una descarga del 70%.

Por corriente: $T_a = 0.7 * C_i / I$ (1)

Por Potencia: $T_a = 0.7 * C_E / P_c$ (2)

donde

$$C_E = C_i * V_b \quad (3)$$

Cálculos

Por corriente: $T_a = 0.7 * 12 / 1.13167 = 7.42268$ [h] (4)

Por potencia: $C_E = 12 * 12$ (5)

$$T_a = 0.7 * 144 / 13.58 = 7.42268$$
 [h] (6)

donde

- ✚ T_a : Tiempo de autonomía [h].
- ✚ C_i : Capacidad nominal de la batería en Ah.
- ✚ C_E : Capacidad nominal de la batería en Wh.
- ✚ P_c : Potencia nominal consumida por la carga [W].
- ✚ I : Corriente nominal de la carga [A].
- ✚ V_b : Tensión en la batería

| Tipo de batería | Carga 1 | Carga 2 |
|----------------------|----------------------|--------------------|
| Fullriver 12 V 12 Ah | 7 h; 25 min; 21.65 s | 10 h; 51 min; 2 s |
| Fullriver 12 V 24 Ah | 14 h; 50 min; 43,3 s | 21 h; 42 min; 4 s |
| M-TEK 33 Ah | 20 h; 24 min; 44,5 s | 29 h; 50 min; 31 s |

Tabla 1. Autonomía para las distintas baterías.

2. Sistema funcionando solamente con el módulo solar

El estimativo de los tiempos se llevó a cabo tomando en cuenta la radiación promedio de la zona según los datos recopilados de las distintas fuentes, y las horas solares pico (PSH) para estimar la energía disponible en el área.

Los paneles utilizados generan una potencia pico de 20 W a la radiación estándar de 1000 [W/m₂].

Calculo del tiempo de autonomía:

$$T_a = PSH * P_p / P_c \quad (7)$$

$$T_a = 5 * 20 / 13.58 = 13.364 \text{ [h]} \quad (8)$$

donde

- ✚ T_a : tiempo de autonomía [h].
- ✚ P_p : potencia generada por el panel a 1000 [W/m²].
- ✚ P_c : potencia nominal consumida por la carga [W].
- ✚ PSH : horas solares pico.

| Panel | Carga 1 | | | | | Carga 2 | | | | |
|-----------------------------|--------------------|------------|------------|------------|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | Horas de sol (PSH) | | | | | | | | | |
| | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| Kyocera Monocristalino 20 W | 7h; 21 min | 5h; 53 min | 4h; 25 min | 2h; 56 min | 1 h; 28 min | 10h;45 Min | 8h;36 min | 6h;27 min | 4h;18 Min | 2h;9 Min |
| Sunwize Policristalino 20 W | 7h; 21 min | 5h; 53 min | 4h; 25 min | 2h; 56 min | 1 h; 28 min | 10h;45 Min | 8h;36 min | 6h;27 min | 4h;18 Min | 2h;9 Min |

Tabla 1. Datos de autonomía con el módulo solar.

3. Sistema funcionando con el panel y la batería

Para el sistema completo se hace un análisis cada 12 horas. Parte de este análisis se muestra en la siguiente tabla. Las horas de radiación promedio al día que se toman son PSH=4.

$$E_p = P_p * PSH \text{ [Wh]} \quad (9)$$

$$E_c = P_c * T \text{ [Wh]} \quad (10)$$

$$E_b = E_{br} + E_p - E_c \text{ [Wh]} \quad (11)$$

- ✚ E_p : energía generada por el panel.
- ✚ E_c : energía consumida por la carga en un periodo de tiempo determinado
- ✚ T : tiempo.
- ✚ E_b : energía en la batería.
- ✚ E_{br} : energía restante en la batería.

Cálculos

El cálculo es iterativo, así que el valor inicial para E_b se toma el 70% de C_E .

Para las horas de sol del día $T=12$ y $PSH=4$.

$$E_p = 20 * 4 = 80 \text{ [Wh]} \quad (12)$$

$$E_c = 13.58 * 12 = 162.96 \text{ [Wh]} \quad (13)$$

$$E_b = 12 * 12 \text{ [Wh]} = 144 \text{ [Wh]} \quad (14)$$

$$E_{br} = 0.7 * 144 + 80 - 162.96 = 17.84 \quad (15)$$

Para la noche $T=12$ y $PSH=0$.

$$E_b = 20 * 0 = 0 \text{ [Wh]} \quad (16)$$

$$E_c = 13.58 * 12 = 162.96 \text{ [Wh]} \quad (17)$$

$$E_{br} = 17.84 + 0 - 162.96 = -145.12 \text{ [Wh]} \quad (18)$$

Ya que el valor es menor que cero entonces se calculan las horas restantes de la siguiente forma.

$$T = 17.84 / 13.58 = 1.3137 \text{ [h]} \quad (19)$$

Como se puede observar, este cálculo se hace para el caso más favorable, que es iniciar en las horas de sol del día, ya que si se hiciera comenzando en la noche sería el mismo cálculo que se hizo para la batería sola, porque la carga es demasiado grande y no la soportaría más de 12 horas.

En la tabla 2 se muestran los resultados para un sistema con la carga 1, con uno de los paneles que generan 20 W y la variación de las distintas baterías.

| Hora del día | Fullriver 12 V 12 Ah | Fullriver 12 V 24 Ah | M-TEK 12 V 33 Ah |
|--------------|----------------------|----------------------|------------------|
| 6 AM | 100.8 | 201.6 | 396 |
| 6 PM | 17.84 | 118.64 | 194.24 |
| 6 AM | -145.12 | -44.32 | 31.2800 |
| 6 PM | | | -51.6800 |
| | Tiempo total | | |
| | 13 h; 19 min | 20 h; 44 min | 32 h; 12 min |

Tabla 2. Capacidad restante en la batería y tiempo de autonomía.

En la tabla 3 se muestran los resultados para un sistema con la carga 2, con uno de los paneles que generan 20 [W] y la variación de las distintas baterías.

| Hora del día | Fullriver 12 V 12 Ah | Fullriver 12 V 24 Ah | M-TEK 12 V 33 Ah |
|--------------|----------------------|----------------------|------------------|
| 6 AM | 100.8 | 201.6 | 277.2 |
| 6 PM | 69.32 | 170.12 | 245.72 |
| 6 AM | -42.1600 | 58.64 | 134.24 |
| 6 PM | | 27.16 | 102.76 |
| 6 AM | | -84.3200 | -8.72 |
| | Tiempo total | | |
| | 19 h; 27 min | 26 h; 55 min | 35 h; 6 min |

Tabla 3. Capacidad restante en la batería y tiempo de autonomía.

4. Prueba de laboratorio

Se llevó a cabo una prueba en el laboratorio para cotejar el consumo dado por el fabricante en la hoja de datos de los equipos. Los datos que se obtuvieron fueron los siguientes:

| Consumo con routerboard Alix 2D2, radio XR2 | |
|--|--------|
| Reposo: 4,5 min | 3,75 W |
| Transmisión: 5 min | 7 W |
| Recepción: 5 min | 5 W |

Tabla 4. Datos de laboratorio consumo del sistema.

Como se puede observar en la grafica, los consumos se disminuyeron bastante. Para esta carga se hace a continuación el cálculo de la autonomía total del sistema. Suponiendo que siempre se está transmitiendo, se toma un consumo de 7 [W].

| Hora del día | Fullriver 12 V 12 Ah | Fullriver 12 V 24 Ah | M-TEK 12 V 33 Ah |
|---------------------|----------------------|----------------------|------------------|
| 6 AM | 100.8 | 201.6 | 396 |
| 6 PM | 96.8000 | 197.6 | 273.2 |
| 6 AM | 12.8 | 113.6 | 189.2 |
| 6 PM | 8.8 | 109.6 | 185.2 |
| 6 AM | -75.2 | 25.6 | 101.2 |
| 6 PM | | 21.6 | 97.2 |
| 6 AM | | -62.4 | 13.2 |
| 6 PM | | | 9.2 |
| 6 AM | | | -74.8 |
| Tiempo total | | | |
| | 37 h; 15 min | 63 h; 5 min | 85 h; 19 min |

Tabla 5. Autonomía del nodo Wi-Fi para una potencia generada en el panel de 80 W diarios.

5. Prueba del sistema en reposo y transmitiendo

En esta prueba el sistema estuvo transmitiendo durante 2 horas y 20 horas de reposo. Durante esta prueba, el nodo generó tráfico de 24Mbits/s durante las 2 primeras horas, después entró en reposo hasta finalizar la prueba.

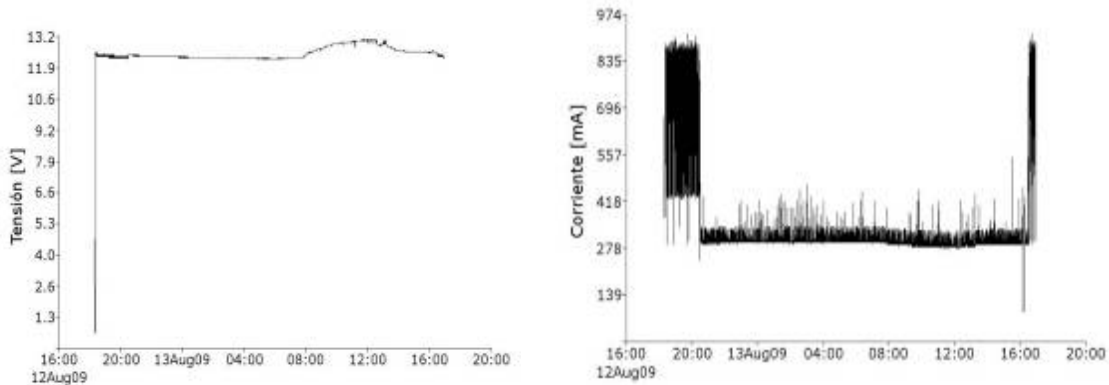


Figura 1. Corriente (izquierda) y tensión (derecha) en la carga.

Cálculos de la potencia consumida por la carga

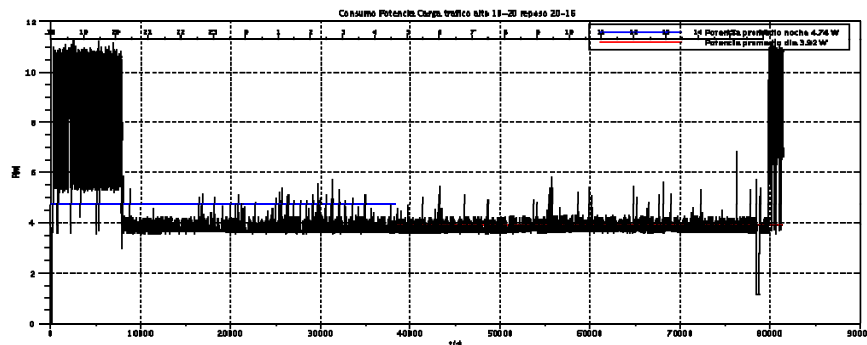


Figura 2. Potencia consumida por la carga en la noche

Para esta prueba se generó tráfico alto entre las 18-20, después se dejó que el nodo de transmisión trabajara en reposo hasta el otro día hasta las 14 horas.

Mediciones de la potencia promedio en la carga

| NODO 1 | |
|--------------------|------|
| Potencia noche [W] | 4.74 |
| Potencia día [W] | 3.92 |

Tabla 6. Consumo de potencia en la carga.

El nodo está consumiendo $4.74 \text{ W} \times 1 \text{ hora} + 11 \text{ horas} \times 3.92 \text{ W} = 95.26 \text{ Wh}$.

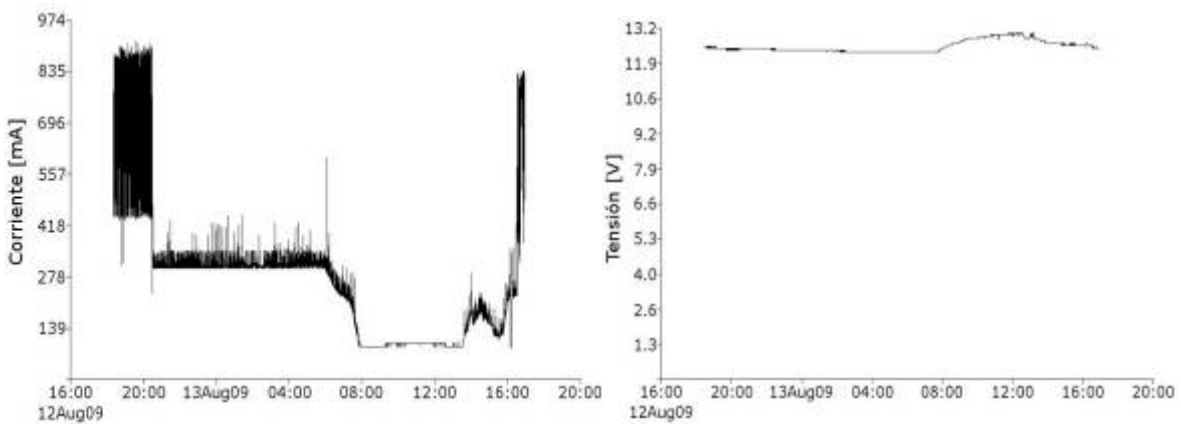


Figura 3. Corriente (izquierda) y tensión (derecha) de la carga.

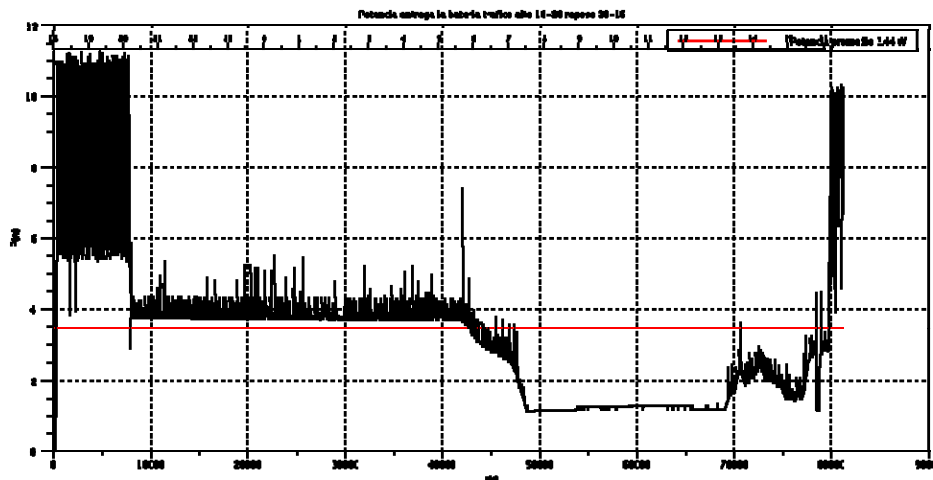


Figura 4. Potencia promedio entregada por la batería.

La potencia promedio que tuvo que entregar la batería durante las 22 horas que duro la prueba fué de 3.44W, el valor de potencia que le entrego a la carga cuando

tiene trafico alto es de 8.72W, en la grafica se puede apreciar cuando la energía proveniente de la radiación solar entra a dar el suministro de potencia para la carga.

Recolección de energía a través del módulo solar KYOCERA KS-20

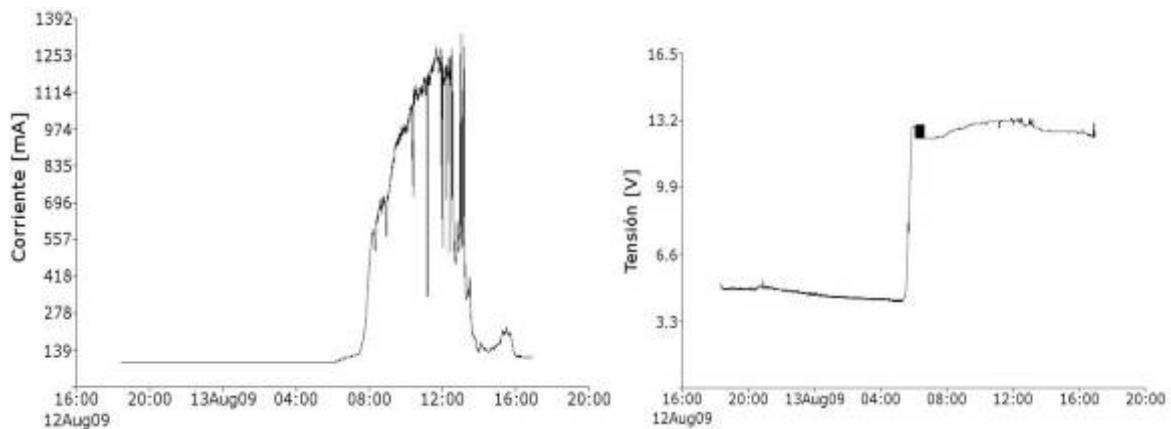


Figura 5. Corriente (izquierda) y tensión (derecha) en el panel.

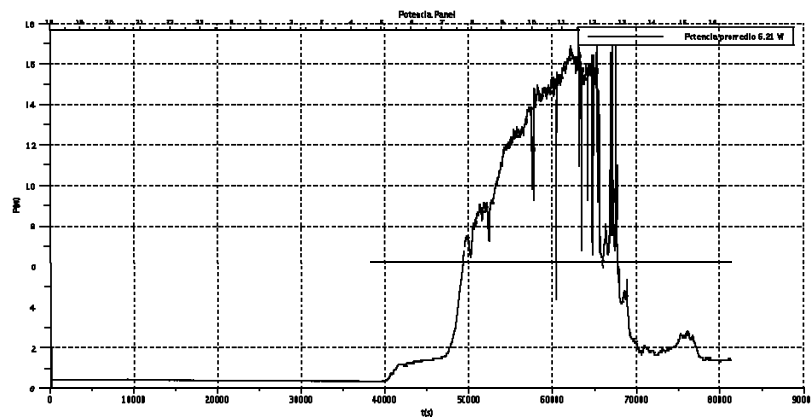


Figura 6. Potencia generada por el panel.

Medidas de la potencia promedio generada por el módulo solar en el día entre las 5:00 horas hasta las 16:00

| NODO 1 | |
|--------------------|------|
| Potencia noche [W] | 0 |
| Potencia día [W] | 6.21 |

Tabla 7. Potencia que entrega el módulo solar.

La potencia generada en el día fue de 11 horas X 6.21 W = 68.31 W, conociendo que el valor de la potencia generada por el panel es igual a 20 W con una

radiación solar de 1000 W/m^2 lo que permite considerar que el valor de PSH al día es de 3.4 horas.

6. Prueba del sistema transmitiendo

La duración de la prueba fue de 30 horas. Se inició el 3 de septiembre a las 5:20 p.m. y terminó el día 5 de septiembre a la 1 a.m. El sistema de almacenamiento de energía llegó a un estado de carga del 30%.

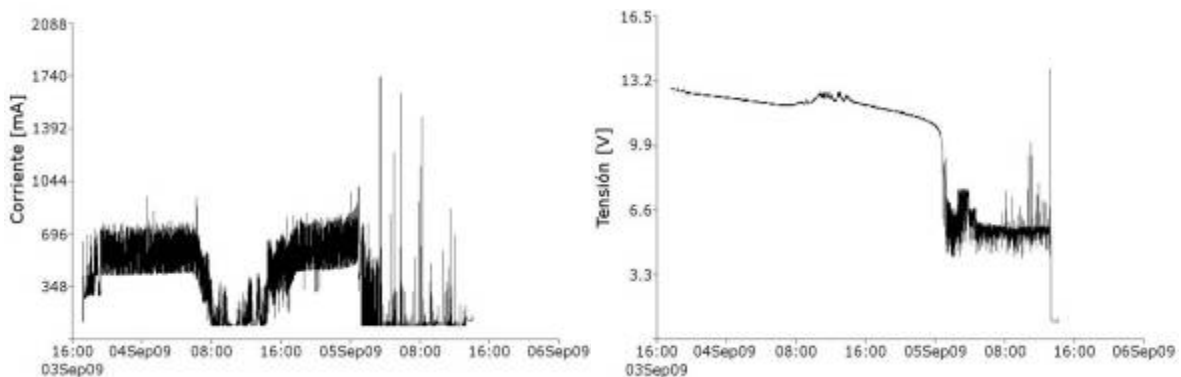


Figura 7. Corriente en la batería. Tensión en la batería.

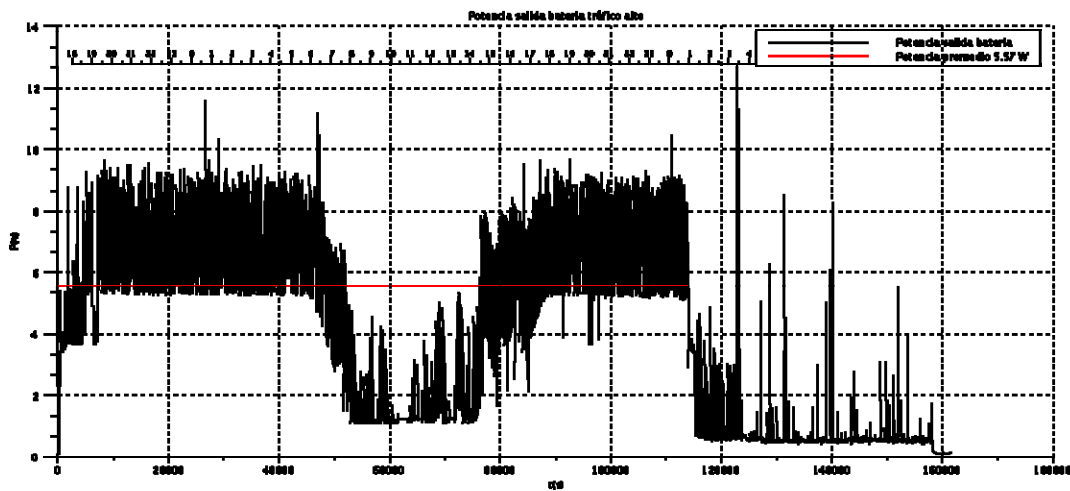


Figura 8. Potencia que entrega la batería en las 30 horas de prueba

Potencia que entrega la batería a la carga

El consumo promedio de la prueba fue de 5.57 W , con un consumo de potencia pico de 11.7 W . La potencia total que entrega la batería a la carga está dada por $5.57 \text{ W} \times 29.5 \text{ horas} = 164.315 \text{ Wh}$

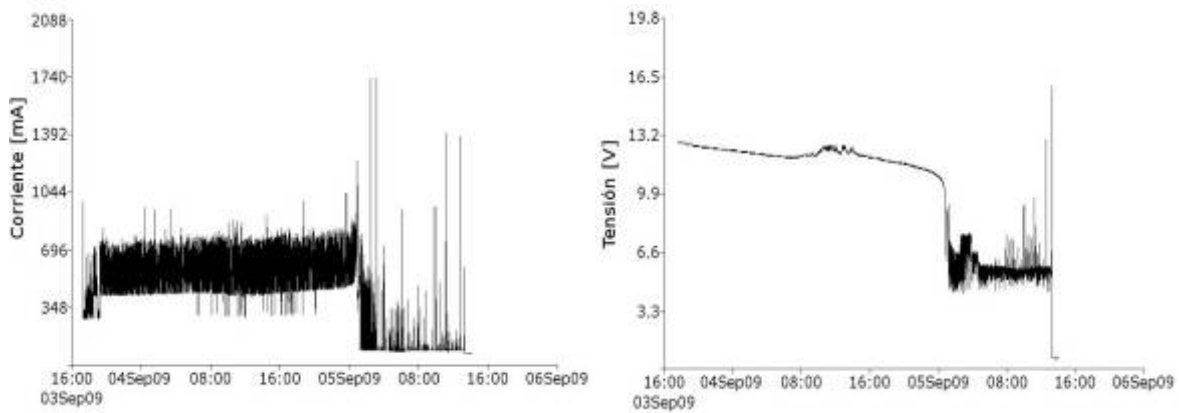


Figura 9. Corriente (izquierda) y tensión (derecha) en la carga.

Debido a la disminución en la tensión en la batería que se refleja en la carga el sistema para poder mantener el consumo de potencia comienza a incrementar el consumo de corriente.

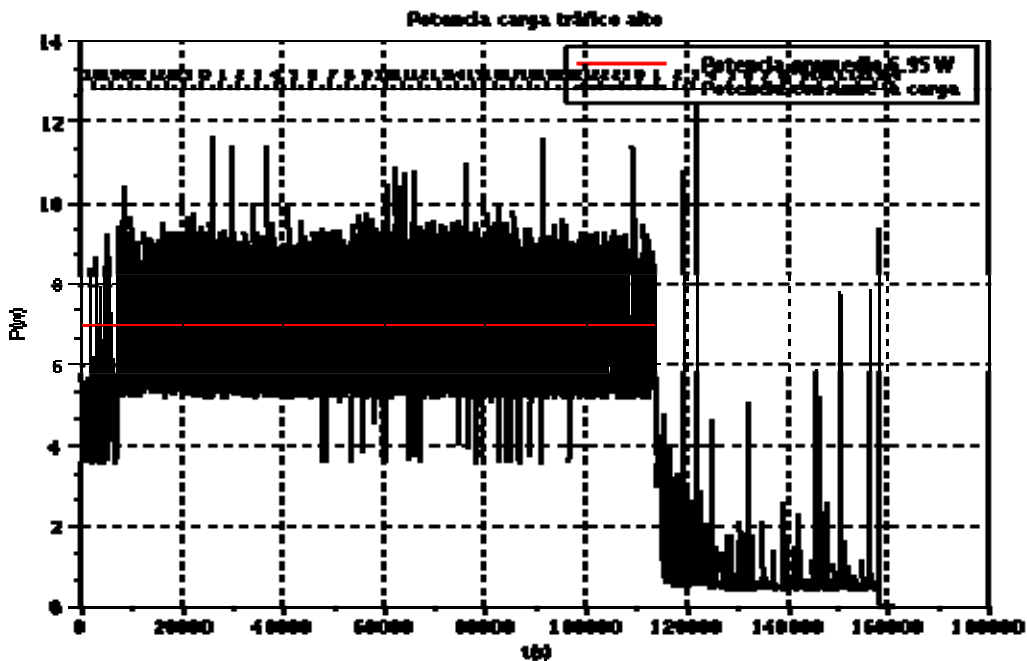


Figura 10. Potencia que consume la carga

La potencia que consume la carga tiene un valor de 6.95W, calculando el $6.95 \text{ W} \times 29.5 \text{ horas} = 205.025 \text{ W}$ fue la potencia que consumió el nodo estación Wi-Fi transmitiendo.

Mediciones realizadas sobre el sistema de alimentación con energía solar.

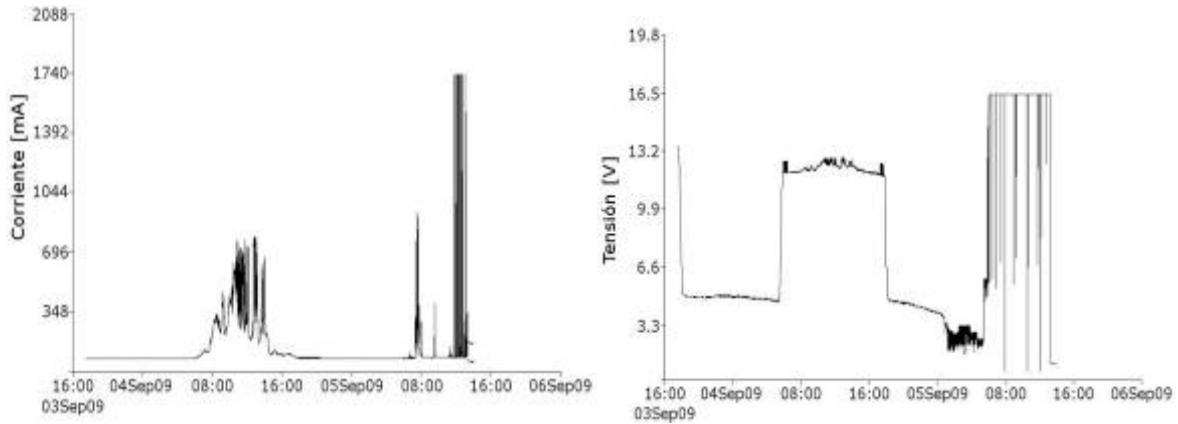


Figura 11. Corriente (izquierda) y tensión (dercha) en el panel.

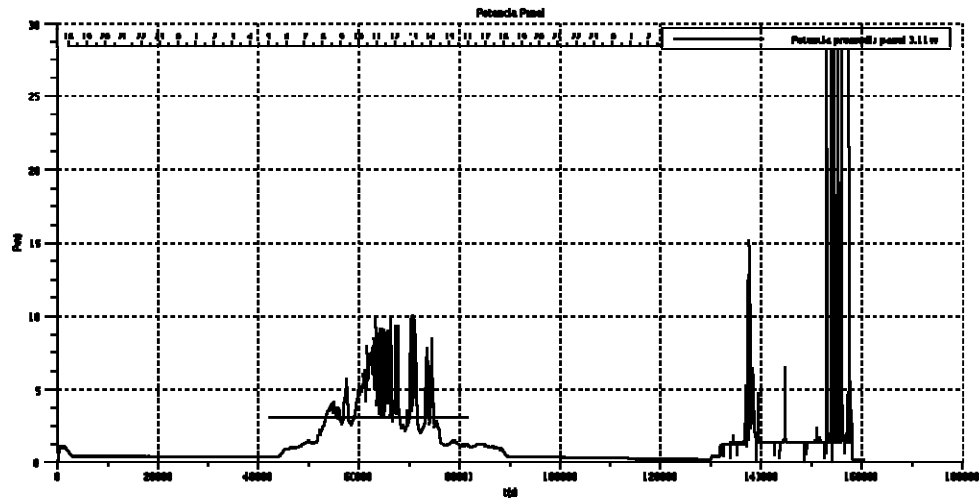


Figura 12. Potencia entregada por el panel entre las 5:00 y las 18:00 horas.

La potencia que se obtuvo del panel solar fue de 3.11 W. El día presentó características de encontrarse densamente nubado. A esto se le atribuye que solo alcanzara a generar $3.11 \text{ W} \times 13 \text{ horas} = 40.33 \text{ Wh}$, teniendo como base que la generación de potencia inició a las 5:00 horas y terminó a las 18:00.

En el balance de energía está dado por

$$E_{\text{solar}} + E_{\text{batería}} = E_{\text{regulador}} + E_{\text{carga}} + E_{\text{pérdidas, error mediciones}} \quad (20)$$

$$40.33 \text{ Wh} + 164.31 \text{ Wh} = E_{\text{regulador}} + 205.5 \text{ Wh} + E_{\text{pérdidas, error mediciones}} \quad (21)$$

De lo cual se puede concluir que la potencia que consume el regulador es despreciable y que los errores en las medidas también son pequeños. Además, que la potencia que consume la carga con tráfico alto de 24Mbps/s es de 7 W, y la potencia generada por el módulo solar está variando de 2 a 4 horas de radiación nominal 1000 W/m^2 al día obteniendo un promedio de generación de 20W, oscilando entre un día nublado y uno con escasa nubosidad.

Anexo 3

1. Modelos para los elementos del sistema solar fotovoltaico usados en Orcad PSpice

Modelos tomados de la referencia [1]

MODULE_BEH.LIB

```
* INPUT PARAMETERS:AREA,AM1.5 JSCMR,AM1.5 VOCMR,AM1.5 PMAXMR
* AM1.5 VM MR,AM1.5 IM MR, CURRENT TEMP COEFF.,VOLTAGE TEMP.COEFF,
* NOCT, REFERENCE TEMPERATURE

* NODES
* (400) REFERENCE
* (401) INTERNAL NODE
* (402) INPUT, IRRADIANCE
* (403) INPUT, AMBIENT TEMPERATURE
* (404) OUTPUT
* (405) OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=SHORT CIRCUIT CURRENT(A) AT
* IRRADIANCE AND TEMPERATURE
* (406) OUTPUT, OPEN CIRCUIT VOLTAGE AT IRRADIANCE ANDTEMPERATURE
* (407) OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=CELL OPERATING TEMPERATURE(°C)
* (408) OUTPUT, MPP CURRENT
* (409) OUTPUT, MPP VOLTAGE

.subckt module_beh 400 402 403 404 405 406 407 408 409 params:
+ iscmr=1, coef_iscm=1, vocmr=1, coef_vocm=1,pmaxmr=1,
+ noct=1,immr=1 , vmmr=1, tr=1, ns=1, np=1

girrad 400 401 value={v(402)/1000*(iscmr+coef_iscm*(v(407)-25))}

eisc 405 400 value={v(402)/1000*(iscmr+coef_iscm*(v(407)-25))}
evoc 406 400 value={if (v(405)>1e-11, vocmr+coef_vocm*(v(407)-25)+8.66e-5*
+ (v(407)+273)*log(v(405)/(iscmr)),0)}

etcell 407 400 value={v(403)+(noct-20)/800*v(402)}

gidiode 401 400 value={v(405)/(exp(v(406)/(ns*8.66e-5*(v(407)+273)))-1)*
+ (exp(v(401)/( ns*8.66e-5*(v(407)+273)))-1)}
rsm 401 404 {vocmr/(iscmr)-pmaxmr/(iscmr**2*(vocmr/(ns*0.0258)-log
+ ((vocmr/(ns*0.0258))+0.72))/(1+vocmr/(ns*0.0258))}
.func frsm() {vocmr/(iscmr)-pmaxmr/(iscmr**2*(vocmr/(ns*0.0258)-log
+ ((vocmr/(ns*0.0258))+0.72))/(1+vocmr/(ns*0.0258))}

gim 400 408 value={immr*v(402)/1000+coef_iscm*(v(403)-25)}
rimm 408 400 1
evmm 409 400 value={if (v(402)>0.001, ns*8.66e-5*(v(407)+273)*log(1+(v(405)-
v(408))/v(405)*(exp(v(406)/
+ (ns*8.66e-5*(v(407)+273)))-1))-v(408)*frsm,0)}
.ends module_beh
```

BAT.CIR

```
.subckt bat 3 2 1 PARAMS: ns=1, SOCm=1, k=1, D=1, SOC1=1
evch 4 2 value={{2+(0.16*v(1))}*ns}
evdch 5 2 value={{1.926+(0.248*v(1))}*ns}
rsacar 2 0 0.000001
rch 4 6 {rchar}
.func rchar() {{(0.758+(0.1309/(1.06- SOC1)))*ns*100/SOCm}
rdch 5 7 {rdischar}
.func rdischar() {{(0.19+(0.1037/(SOC1-0.14)))*ns*250/SOCm}
vcurrent 3 8 dc 0
Wch 6 8 vcurrent sw1mod
.model sw1mod iswitch (ioff=-10e-12 , ion=10e-12, Roff=1.0e+8, Ron=0.01)
Wdiscar 7 8 vcurrent sw2mod
.model sw2mod iswitch (ioff=10e-12 , ion=-10e-12, Roff=1.0e+8, Ron=0.01)
eqt 13 0 value={SOC1 +(sdt(v(9))/SOCm)}
eqt4 1 0 value={ limit (v(13), 0 , 1)}
evcalcsoc 9 0 value={{k*v(10)*i(vcurrent)/3600}-(D*SOCm*v(13)/3600)}
evch2 11 0 value={{2+(0.16*v(1))}*ns}
evdch2 12 0 value={{1.926+(0.248*v(1))}*ns}
Wdiscar2 12 10 vcurrent sw2mod
Wch2 11 10 vcurrent sw1mod
.ends bat
```

BATSTD.CIR

```
.subckt batstd 3 2 1 PARAMS: ns=1, SOCm=1, k=1, D=1, SOC1=1
evch 4 2 value={{2+(0.16*v(1))}*ns}
evdch 5 2 value={{1.926+(0.248*v(1))}*ns}
rch 4 6 {rchar}
.func rchar() {{(0.758+(0.1309/(1.06- SOC1)))*ns*100/SOCm}
rdch 5 7 {rdischar}
.func rdischar() {{(0.19+(0.1037/(SOC1-0.14)))*ns*250/SOCm}

vcurrent 3 8 dc 0
Wch 6 8 vcurrent sw1mod
.model sw1mod iswitch (ioff=-20e-3 , ion=20e-3, Roff=1.0e+8, Ron=0.001)
Wdiscar 7 8 vcurrent sw2mod
.model sw2mod iswitch (ioff=20e-3, ion=-20e-3, Roff=1.0e+8, Ron=0.001)

eqt 13 2 value={SOC1 +(sdt(v(9))/SOCm)}
eqt4 1 2 value={ limit (v(13), 0 , 1)}
evcalcsoc 9 2 value={{k*v(10)*i(vcurrent)/3600}-(D*SOCm*v(13)/3600)}
ecoch 10 2 value={IF (i(vcurrent)>0, v(4), v(5))}

.ends batstd
```

BATSTDIF.CIR

```

.subckt batstdif 3 2 1 PARAMS: ns=1, SOCm=1, k=1, D=1, SOC1=1
evch 4 2 value={{2+(0.16*v(1))}*ns}
evdch 5 2 value={{1.926+(0.248*v(1))}*ns}
rserie 8 88 {rs}
.func rs() {{(0.7+(0.1/(SOC1-0.2)))*ns*175/SOCm}}
ebat 88 2 value={{IF (i(vcurrent)>0, v(4), v(5))}}
vcurrent 3 8 dc 0
eqt 13 2 value={{SOC1 +(1e6*sdt(v(9))/SOCm)}}
eqt4 1 2 value={{ limit (v(13), 0 , 1)}}
evcalculsoc 9 2 value={{(k*v(10)*i(vcurrent)/1)-(D*SOCm*v(13)/1)}}

ecoch 10 2 value={{IF (i(vcurrent)>0, v(4), v(5))}}

.ends batstdif

```

Anexo 4

1. Curvas para el módulo monocristalino obtenidas con la simulación

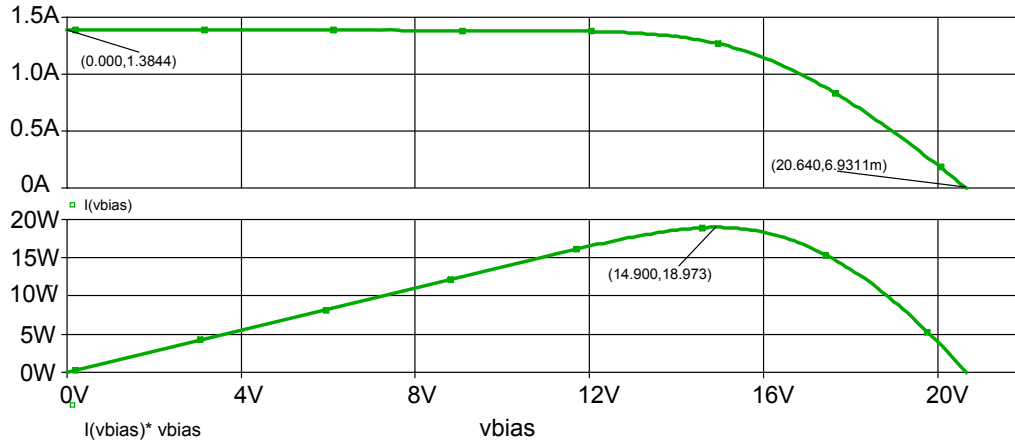


Figura 1. Arriba. Característica I-V para el módulo solar monocristalino SUNWIZE OEM 20. Abajo. Potencia de salida para el mismo módulo.

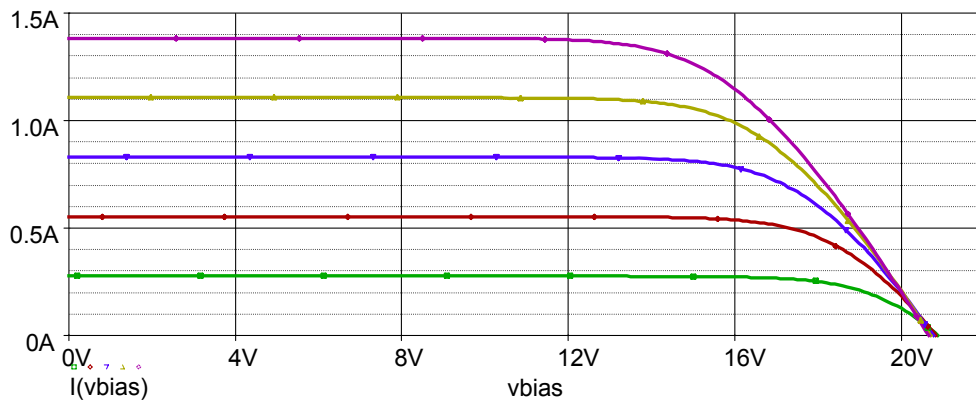


Figura 2. Curva I(V) para el panel SUNWIZE OEM20 para algunos valores de irradiancia: 1000 (magenta), 800 (amarillo), 600 (azul), 400 (rojo), 200 (verde) W/m^2 .

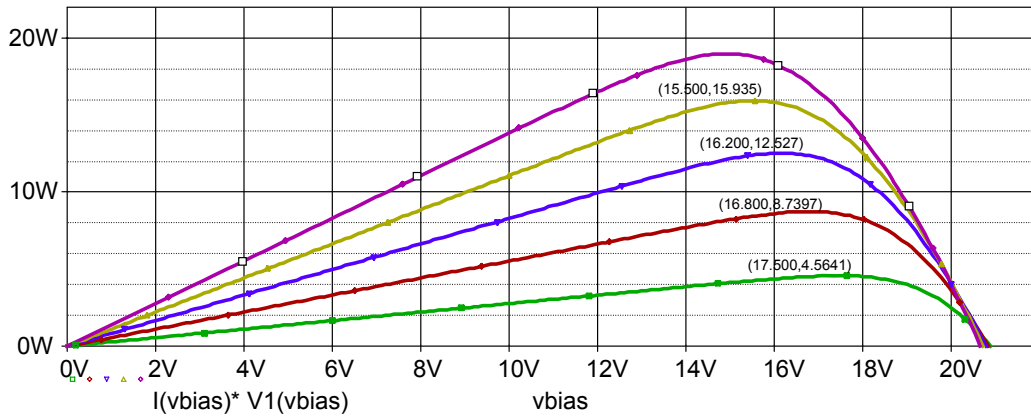


Figura 3. Curvas de potencia de salida. En la gráfica están demarcados los puntos de máxima potencia para el panel SUNWIZE OEM20 a diferentes valores de irradiancia: 1000, 800, 600, 400, 200 W/m^2 .

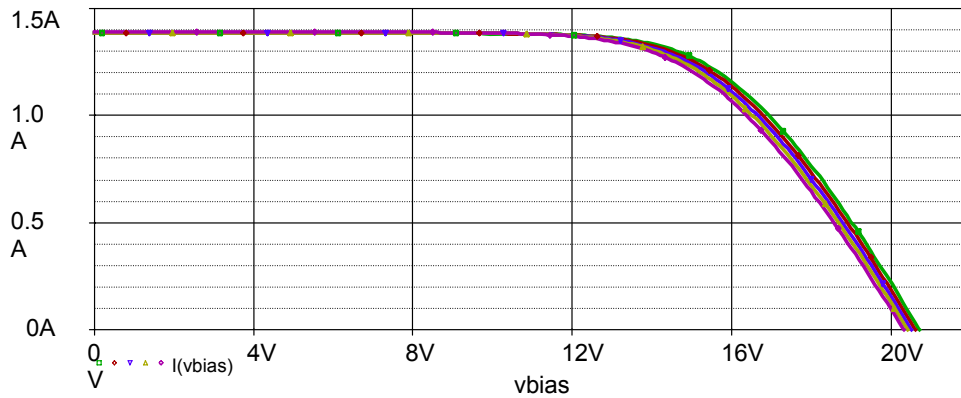


Figura 40. Curva I(V) del panel SUNWIZE OEM20 para un rango de temperatura ambiente entre 20 y 50°C. Nótese que la corriente de salida es prácticamente transparente a los cambios de temperatura, mientras que la tensión sí se ve afectada ligeramente.

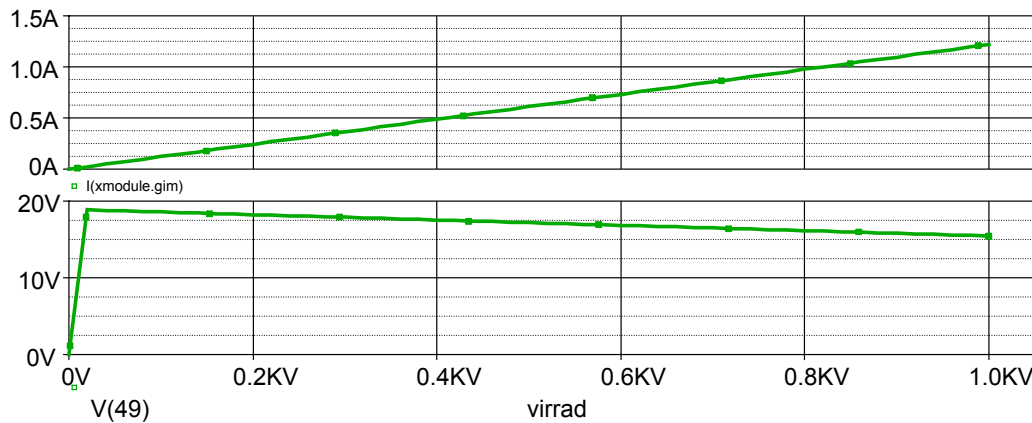


Figura 5. Arriba. Valores de corriente en el punto de operación de máxima potencia para el panel SUNWIZE OEM20, según varía la irradiancia. Abajo. Valores de tensión en el punto de máxima potencia para el mismo dispositivo. Nota: En el eje horizontal las unidades internas de PSpice son KV, que corresponden a W/m^2 .

2. Prueba al modelo de la batería

Para ver cómo evoluciona el SOC y la tensión en el modelo de la batería, se le somete a una prueba simple: una corriente de forma senoidal es conectada en los terminales, mientras se monitorea el SOC a la salida del modelo.

La corriente obliga a la batería entrar en modo de carga o descarga según toma valores positivos o negativos. Cuando la corriente hace los cruces por cero, la batería cambia de modo carga a modo descarga, o viceversa. A medida que este ciclo se repite, el estado de carga (SOC) de la batería evoluciona periódicamente forzado por la forma de onda de la corriente de excitación. También, se ve como la tensión en los bornes sufre una caída a causa de la corriente que demanda la fuente de alterna. En la figura 6 se aprecia esta dinámica. Arbitrariamente se asumió un SOC inicial del 70%.

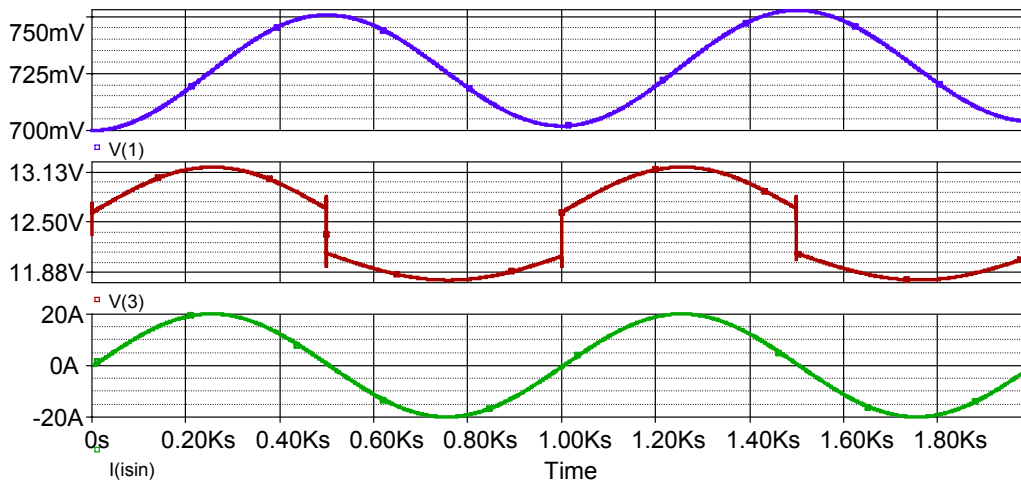


Figura 6. Abajo. Corriente senoidal de 20 A de amplitud y frecuencia 1 KHz que es inyectada a la batería MTK 12V 3Ah. Medio. Tensión en los bornes de la batería. Arriba. SOC normalizado.

3. Simulación del sistema operando con la carga en reposo y transmitiendo

Los resultados de la simulación de la prueba con la carga en estado de reposo 2 horas y transmitiendo 20 horas se muestran en la figura 7.

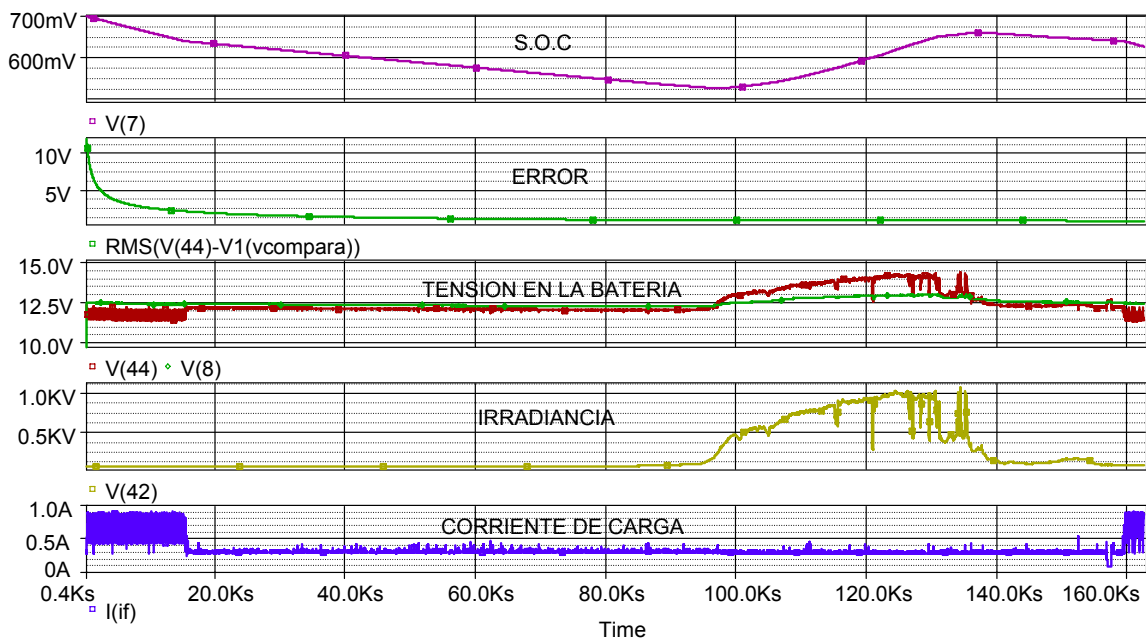


Figura 7. De arriba hacia abajo: (a) Evolución del SOC durante la prueba. (b) Error cuadrático medio para la tensión de la batería, entre los datos simulados y los experimentales. (c) Tensión en la batería: simulación (rojo), experimental (verde). (d) Irradiancia (modelado). (e) Corriente de la carga (experimental).

De las curvas de tensión en la batería (simulada y experimental), se calcula el error cuadrático medio, cuyo valor máximo es de 1 V para SOC < 80%. Este error se presenta fundamentalmente a las aproximaciones que introduce el modelo. El SOC al final de la prueba toma un valor del 70%.

4. Netlist de las simulaciones

AI SLADO.CIR

* Comparación de simulación y datos medidos para corriente en el panel y * batería. Utilización de datos reales de corriente como carga.

** PANEL KYOSERA-KS20 ***

.include module_beh.lib

xmodule 0 42 43 44 45 46 47 48 49 module_beh params: iscmr=1.24, coef_iscm=0.13e-3,

+ vocmr=21.5, coef_vocm=-0.01, pmaxmr=20,

+ noct=47, immr=1.20, vmmr=16.9, tr=25, ns=36, np=1

vtemp 43 0 dc 25

*xmodule 0 42 43 module_1 params: iscmr=1.24, vocmr=21.5, ns=36, np=1, nd=1, ta=25, tr=28, pmaxmr=20

*.inc module_1.lib

*** BATERIA MTEK 33AH ***

xbat1 44 0 7 batstd params: ns=6, SOCm=396, k=.68, D=1e-3, SOC1=0.7

.inc batstd.cir

.inc irradiancia21Ago.stl

vmesur 42 0 stimulus virrad

*** Fichero para implementar la corriente en la carga

.inc 21Ago_rep_59h_il.stl

if 44 0 stimulus icarga

*** Fichero para comparar medidas: corriente del panel

.inc 21Ago_rep_59h_ip.stl

im 10 0 stimulus ipanel

rmo 10 0 10000

*** y la tensión en la batería

.inc 21Ago_rep_59h_vb.stl

vcompara 8 0 stimulus vbateria

rc 8 0 1000000

.tran 60s 450000s 1

.probe

.end

AISLADO3.CIR

* Prueba del sistema transmitiendo 30 horas (108000 segundos)

* Comparación de simulación y datos medidos para corriente en el panel y * batería. Utilización de datos reales de corriente como carga

** PANEL KYOSERA-KS20 ***

.include module_beh.lib

xmodule 0 42 43 44 45 46 47 48 49 module_beh params: iscmr=1.24, coef_iscm=0.13e-3,

+ vocmr=21.5, coef_vocm=-0.01, pmaxmr=20,

+ noct=47, immr=1.20, vmmr=16.9, tr=25, ns=36, np=1

vtemp 43 0 dc 25

*** BATERIA MTEK 33AH ***

xbat1 44 0 7 batstd params: ns=6, SOCm=396, k=.9, D=1e-3, SOC1=0.95

.inc batstd.cir

```
*** Fichero para implementar los datos de irradiancia de ese día
.inc irradiancia_3sept.stl
vmesur 42 0 stimulus virrad
```

```
*** Fichero para implementar la corriente en la carga
.inc 30h_trans_il.stl
if 44 0 stimulus icarga
```

```
*** Fichero para comparar medidas: corriente del panel
.inc 30h_trans_ip.stl
im 10 0 stimulus ipanel
rmo 10 0 10000
```

```
*** y la tensión en la batería
.inc 30h_trans_vb.stl
vcompara 8 0 stimulus vbateria
rc 8 0 1000000
```

```
.tran 48s 235000s 1
.probe
.end
```

AISLADO_BUC_20W.CIR

```
* Datos de radiación anual para una superficie inclinada 15 grados
* en Kw/m2 hora, y temperatura para la ciudad de Bucaramanga.
* La corriente de carga se implementa como una señal cuadrada de
* amplitud 650 mA y nivel dc de 320 mA, y periodo 1 día
* en el archivo il_anual.stl
```

```
.include rad_sup_inc15_buc.stl
.include temp_buc.stl
.include il_anual.stl
```

```
.include module_beh.lib
.include batstdif.cir
```

```
**Parámetros del módulo KYOCERA KS20 de 20W
```

```
xmodule 0 42 43 44 45 46 47 48 49 module_beh params: iscmr=1.24, coef_iscm=0.13e-3,
+ vocmr=21.5, coef_vocm=-0.01, pmaxmr=20,
+ noct=47, immr=1.20, vmmr=16.9, tr=25, ns=36, np=1
```

```
**Parámetros de la batería MTEK 33Ah 12V
```

```
xbat 145 0 50 batstdif params: ns=6 SOCm=1218.03 k=0.9 D=1e-5, SOC1=0.65
```

```
d1 44 145 diode
.model diode d (is=1e-9)
```

```
iload 145 0 stimulus icarga
```

```

econtrol_soc 7000 0 value={if (v(50)>0.95, 15, -1)}
r2 7000 7001 100
c2 7000 7001 1n
r1 145 7002 4
q1 7002 7001 0 q40240
.model q40240 npn (is=1e-9)

```

```

virrad 120 0 stimulus vradbuc
eirrad 42 0 value={if (v(120)>1, v(120), 1)}

```

```

vtemp 130 0 stimulus vtempbuc
etemp 43 0 value={if (v(130)>1, v(130), 1)}

```

```

.tran 1u 8760u 1u
.options abstol=1 reltol=0.01 vntol=1 gmin=1e-6 itl4=350
.options stepgmin
.probe
.end

```

AI SLADO_BUC_65W.CIR

- * Simulación de larga duración del sistema fotovoltaico
- * Datos de radiación anual para una superficie inclinada 15 grados
- * en Kw/m2 hora, y temperatura para la ciudad de Bucaramanga.
- * Simulación nodo estación

```

.include rad_sup_inc15_buc.stl
.include temp_buc.stl
.include il_anual.stl
.include module_beh.lib
.include batstdif.cir

```

```

xmodule 0 42 43 44 45 46 47 48 49 module_beh params: iscmr=3.99 coef_iscm=1.59e-3,
+ vocmr=21.7, coef_vocm=-8.21e-2, pmaxmr=65,
+ noct=47, immr=3.75, vmmr=17.4, tr=25, ns=36, np=1

```

```

xbat 145 0 50 batstdif params: ns=6 SOCm=900 k=0.9 D=1e-5, SOC1=0.7

```

```

d1 44 145 diode
.model diode d (is=1e-9)
iload 145 0 stimulus icarga

```

```

econtrol_soc 7000 0 value={if (v(50)>0.95, 15, -1)}
r2 7000 7001 100
c2 7000 7001 1n
r1 145 7002 4
q1 7002 7001 0 q40240
.model q40240 npn (is=1e-9)

```

```

virrad 120 0 stimulus vradbuc
eirrad 42 0 value={if (v(120)>1, v(120), 2)}

```

```
vtemp 130 0 stimulus vtempbuc
etemp 43 0 value={if (v(130)>1, v(130), 1)}

.tran 1u 8760u 1u
.options abstol=1 reltol=0.01 vntol=1 gmin=1e-6 itl4=350
.options stepgmin
.probe
.end
```

Anexo 5

1. Netlist de las simulaciones

MISMATCH_BUC.CIR

- * Descasamiento de potencia entre la energía generada y la consumida
- * para el nodo transmitiendo 24 horas al día
- * Se incluyen datos de irradiancia promedio diario para
- * la ciudad de Bucaramanga, suministrados por la CDMB.

```
.include irrad_buc.lib  
.include temp_buc.lib  
.include module_beh.lib
```

```
xtemp 43 0 temp_buc  
xirrad 42 0 irrad_buc
```

```
xmodule 0 42 43 44 45 46 47 48 49 module_beh params: iscmr=1.24, coef_iscm=0.13e-3,  
+ vocmr=21.5, coef_vocm=-0.01, pmaxmr=20,  
+ noct=47, immr=1.20, vmmr=16.9, tr=25, ns=36, np=1
```

```
vbat 44 0 dc 12  
rload 44 0 20  
.tran 0.01u 24u 0 0.01u  
.option stepgmin  
.probe  
.end
```

NOCHE_BUC.CIR

- * Carga conectada únicamente de noche 4 horas (19-23 horas)
- * para modo de operación en transmisión
- * datos de irradiancia y temperatura reales
- * Panel KYOCERA KS-20

```
.include irrad_buc.lib  
.include temp_buc.lib  
.include module_beh.lib  
xtemp 73 0 temp_buc  
xirrad 72 0 irrad_buc
```

```
xmodule 0 72 73 74 75 76 77 78 79 module_beh params: iscmr=1.24, coef_iscm=0.13e-3,  
+ vocmr=21.5, coef_vocm=-0.01, pmaxmr=20,  
+ noct=47, immr=1.20, vmmr=16.9, tr=25, ns=36, np=1
```

```
vbat 74 0 dc 12  
rload 80 0 20
```

```
sload 74 80 81 0 switch1  
.model switch1 vswitch roff=1e8 ron=0.01 voff=0 von=5
```

```
vcontrols1 81 0 0 pulse (0,5,19u,0,0,4u,24u)
.tran 0.01u 24u 0 0.01u
.option stepgmin
.probe
.end
```

DIA_BUC.CIR

* Carga transmitiendo las 8 horas centrales del día.
* Activación mediante switch controlado.

```
.include irrad_buc.lib
.include temp_buc.lib
.include module_beh.lib
xtemp 73 0 temp_buc
xirrad 72 0 irrad_buc
```

*Modulo Kyocera KS20
xmodule 0 72 73 74 75 76 77 78 79 module_beh params: iscmr=1.24, coef_iscm=0.13e-3,
+ vocmr=21.5, coef_vocm=-0.01, pmaxmr=20,
+ noct=47, immr=1.20, vmmr=16.9, tr=25, ns=36, np=1

```
vbat 74 0 dc 12
rload 80 0 20
```

```
sload 74 80 81 0 switch1
.model switch1 vswitch roff=1e8 ron=0.01 voff=0 von=5
vcontrols1 81 0 0 pulse (0,5,8u,0,0,8u,24u)
```

```
.tran 0.01u 24u 0 0.01u
.option stepgmin
.probe
.end
```

MNESUAL_BUC2.CIR

* Se asume que el nodo está transmitiendo 8 horas al día,
* lo que da un consumo diario de $6.95 \times 8 = 55.6 \text{ Wh}_{\text{dia}}$
* Los datos de radiación mensual promedio fueron proporcionados
* por METEONORM 5.1

```
.include rad_mensual.lib
xrad 72 0 rad_mensual
```

```
.include dias_mes.lib
xdm 73 0 dias_mes
```

```
.param nsg=1, npg=1, pmaxmr=54.8571, eday=245.76
egen_mes 74 0 value={nsg*npg*pmaxmr*v(72)}
econs_mes 75 0 value={eday*v(73)}
```

```

eout 76 0 value={sdt(1e6*(v(74)-v(75)))}
*.step param NPG list 3 6 8
*.step param EDAY list 55.6 62.5 69.5 76.45 83.4 90.35 97.3
.tran 0.1u 13u
.probe
.end

```

2. Simulación para otros escenarios de carga

- a. **Nodo estación transmitiendo 24 horas ($I_{load}=600$ mA, 166.8 Wh/día)**
 Panel 65W + batería 1000 Wh (80 Ah@12.7 V). SOCmin = 31.8%

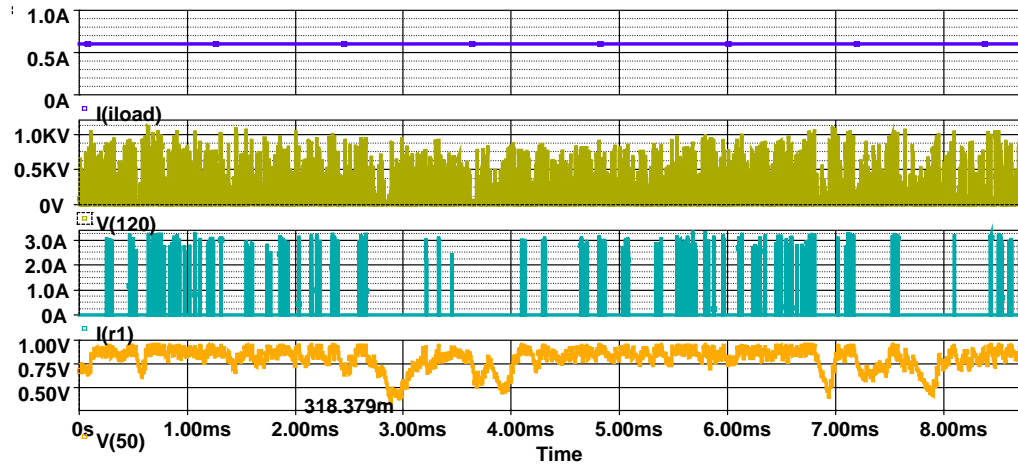


Figura 1. De arriba a abajo: corriente de carga, perfil de radiación, corriente de desbordamiento en el transistor, SOC en la batería. Nota: el eje vertical corresponde a horas en lugar de μ s. Por conveniencia, se tomó que 1 μ s equivale a 1 hora.

- b. **Nodo estación transmitiendo 13 horas (a intervalos de 1 hora)**
Consumo diario = 90.35 Wh
 Panel 43 W + batería 795 Wh (70 Ah@12.7 V). SOCmin = 57.3%.

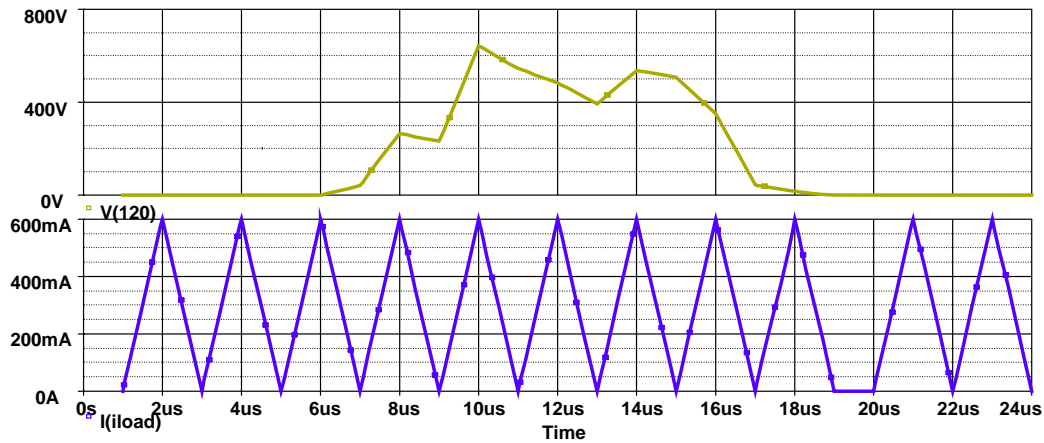


Figura 2. Perfil de radiación para un día (arriba). Corriente de carga (abajo). Nota: el eje vertical corresponde a horas en lugar de μ s. Por conveniencia, se tomó que 1 μ s equivale a 1 hora.

Panel 43 W + batería 400 Wh (32 Ah@12.7 V). SOCmin = 33.9%

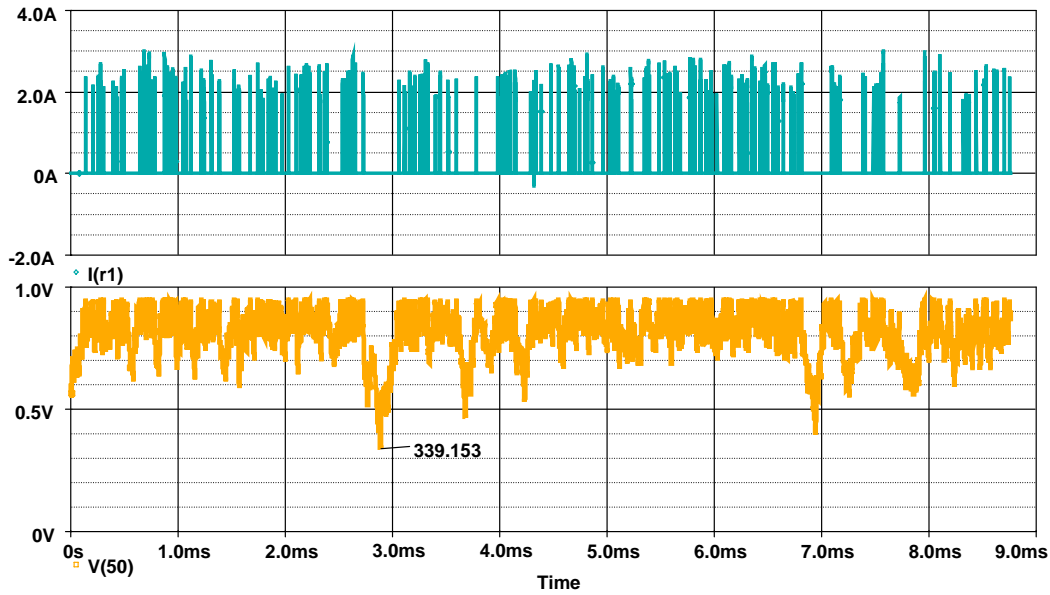


Figura 3. Corriente de desbordamiento en el transistor (arriba), y SOC en la batería (abajo). Nota: el eje vertical corresponde a horas en lugar de μ s. Por conveniencia, se tomó que 1 μ s equivale a 1 hora.

c. Nodo repetidor transmitiendo 8 horas y el resto de tiempo en reposo (10.24 W, 800 mA, 375 mA@ 12.8 V) Consumo total = 158.24 Wh
 Panel 85 W + batería 750 Wh (58Ah@12.8V)

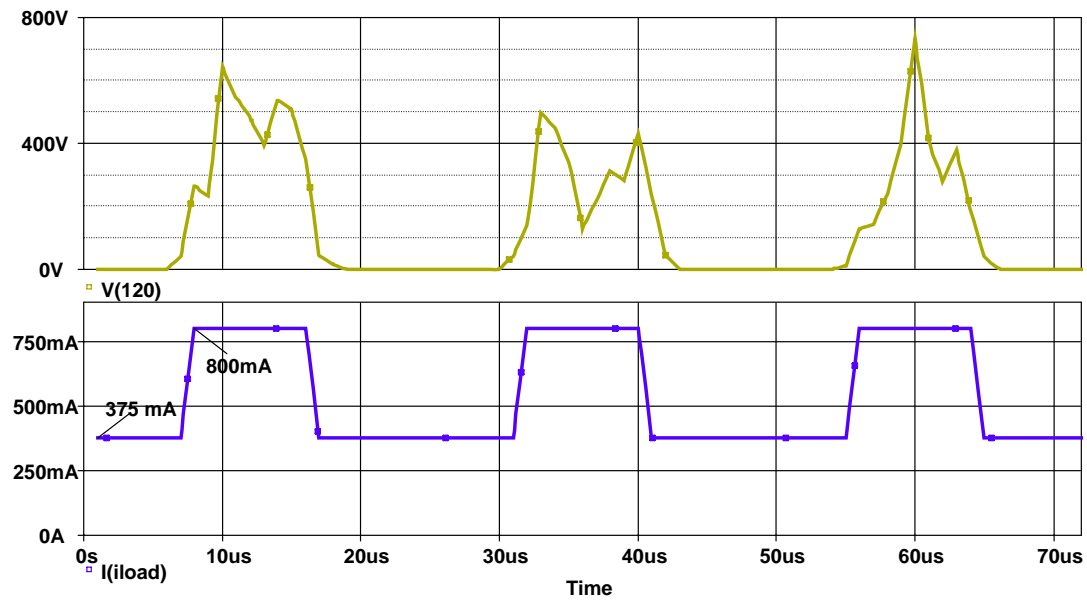


Figura 4. Perfil de radiación para un día (arriba). Corriente de carga (abajo). Nota: el eje vertical corresponde a horas en lugar de μ s. Por conveniencia, se tomó que 1 μ s equivale a 1 hora.

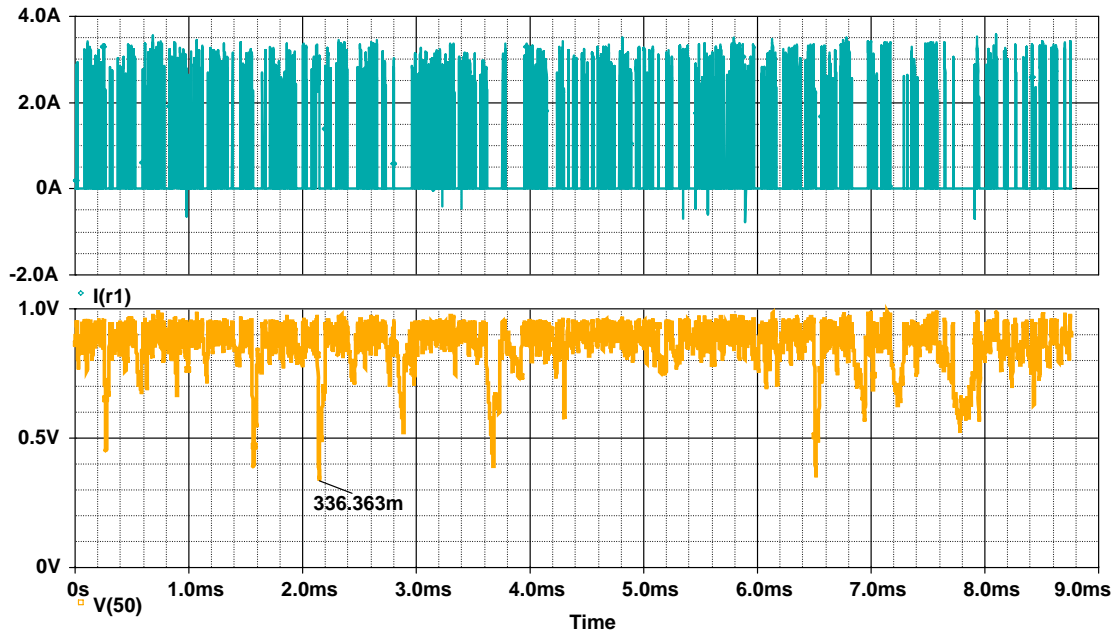


Figura 5. Corriente de desbordamiento en el transistor (arriba), y SOC en la batería (abajo). Nota: el eje vertical corresponde a horas en lugar de μs . Por conveniencia, se tomó que 1 μs equivale a 1 hora.

d. Nodo repetidor transmitiendo 24 horas (10.24 W, 800 mA @ 12.8 V)
 Panel 85 W + batería 1180 Wh (93 Ah@12.8V)

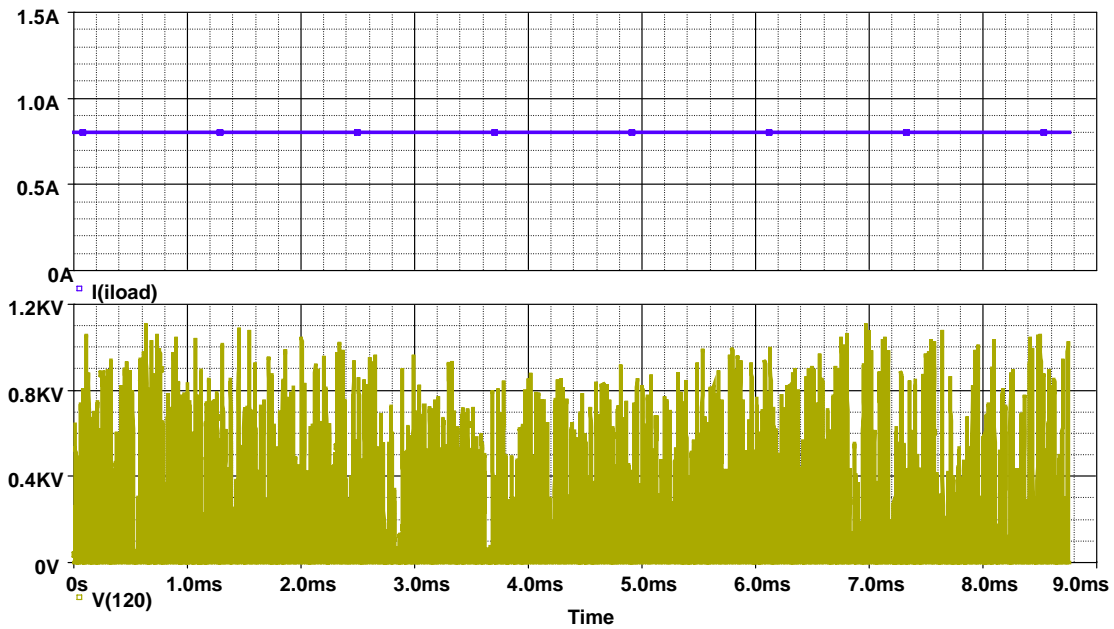


Figura 6. Perfil de radiación para un día (arriba). Corriente de carga (abajo). Nota: el eje vertical corresponde a horas en lugar de μs . Por conveniencia, se tomó que 1 μs equivale a 1 hora.



Figura 7. Corriente de desbordamiento en el transistor (arriba), y SOC en la batería (abajo). Nota: el eje vertical corresponde a horas en lugar de μ s. Por conveniencia, se tomó que 1 μ s equivale a 1 hora.