

DESARROLLO DE ESTACIÓN DE MONITOREO PARA LA EVALUACIÓN INTEGRAL DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS BIPV USANDO INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL

A. J. Aristizábal y G. Gordillo

Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá

Tel.: (57-1)3165000 Ext. 13017; Fax: (57-1) 3165135.

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo de un sistema, acompañado de la descripción del desarrollo del equipo utilizado para medir los parámetros que caracterizan la calidad de la potencia eléctrica generada por un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica (SFIR). La determinación de los parámetros de calidad de potencia tales como el rango de operación normal de tensión, la distorsión de la forma de onda, la frecuencia, el flicker de tensión y el factor de potencia se alcanzó mediante la implementación de Instrumentos Virtuales (VIs); usando el software de programación gráfica LabVIEWTM. El sistema emplea los VI's desarrollados integrados con una tarjeta de adquisición de datos y un sistema FieldPoint de la compañía National Instruments. Las pruebas realizadas revelan que el sistema es confiable y apropiado para estudios relacionados con el monitoreo de la potencia eléctrica suministrada por sistemas FV's interconectados. El monitoreo de la potencia suministrada por un sistema FV interconectado a la red eléctrica, se llevo a cabo durante un marco de tiempo de un mes, demostrando que el sistema implementado cumple con todas las especificaciones requeridas para tales fuentes de energía tanto por normas nacionales como internacionales.

Palabras claves: Celdas Solares, Sistemas fotovoltaicos, Calidad de potencia

Abstract

This paper reports on the development of a system, along with a description of the development of the associated equipment, for measuring the parameters characterizing the quality of electrical power generated by a grid-connected PV system. The determining of quality parameters such as normal voltage operating range, waveform distortion, frequency, voltage flicker and power factor was achieved through the implementation of Virtual Instruments (VI's); using the graphic programming soft-ware LabVIEWTM. The system employed the developed VI's integrated with a data acquisition card and one FieldPoint system from National Instruments. Testing revealed the developed system to be reliable and suitable for studies related to monitoring the electrical power supplied by a grid-connected PV system. Monitoring of the power supplied, by a grid-connected PV system, to a local grid during a time frame of one month, indicated that the developed system complied with all the specifications demanded for such systems by National and International standards.

Keywords: Solar Cells, PV Systems, power quality

1. Introducción

La producción de energía eléctrica utilizando módulos fotovoltaicos interconectados a la red de distribución mediante un equipo inversor, constituye una de las nuevas formas de generación de potencia distribuida que es ambientalmente limpia y que cumple los estándares de confiabilidad y de calidad de la generación convencional; adicionalmente, debido a su versatilidad es apropiada para suministrar electricidad en un amplio rango de aplicaciones, localizaciones geográficas y climas.

La estación de monitoreo aquí presentada constituye un desarrollo tecnológico, consistente en la integración de los transductores, la interfase de acondicionamiento y de adquisición de señales y el

software implementado que funcionan conjuntamente como un sistema de instrumentación.

Para que un sistema fotovoltaico interconectado opere en forma sincronizada con la red eléctrica y que suministre señales de tensión y corriente con la calidad óptima para apoyar la potencia de la misma, se han emitido a nivel mundial recomendaciones y normas destinadas a garantizar que la calidad de la potencia de salida del equipo inversor cumpla con los requerimientos necesarios para ser inyectada a las líneas de la red y que adicionalmente la instalación de esta fuente distribuida no represente riesgos para la seguridad de las personas y de los equipos involucrados.

A través de una revisión de las normas que existen en la actualidad para la instalación de sistemas fotovoltaicos interconectados se pudo establecer que se han implementado varias normas y recomendaciones, las cuales se mencionan a continuación:

- Estándar IEEE 929-2000 [1]
- Standards Australian Committee EL42, 2000 [2]
- Norma UNE-EN 61727 [3]
- Norma CEI 1194:1992 [4]

En Colombia no existe una reglamentación para la instalación y uso de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red, por lo tanto se decidió analizar las normas mencionadas anteriormente para tener información de las recomendaciones que a nivel internacional se dan en materia de instalación y operación de sistemas FV interconectados. Se encontró que el estándar IEEE 929-2000 define en forma clara y práctica los requerimientos técnicos de interconexión de sistemas fotovoltaicos a la red, por esta razón decidimos seguir estas recomendaciones para la instalación de nuestro SFIR.

El estándar expone en forma explícita, los respectivos lineamientos referentes a los parámetros de la calidad de la potencia interconectada en paralelo a la red eléctrica que se deben cumplir

de acuerdo a los límites establecidos en dicha norma. Tales parámetros son: Porcentaje Total de Distorsión Armónica, Componentes Armónicos, Frecuencia, Tensión del Sistema, Flicker y Factor de Potencia.

La salida del inversor debe tener bajos niveles de distorsión armónica para asegurar que no existan efectos adversos sobre otros equipos conectados a la red eléctrica. La distorsión armónica total debe ser menor al 5% de la frecuencia de la fundamental en relación con la salida del inversor. Cada armónico individual, debe estar limitado a los porcentajes listados en la siguiente Tabla 1.

ARMÓNICO IMPAR	LIMITE DE DISTORSIÓN
3-9	< 4.0 %
11-15	< 2.0 %
17-21	< 1.5 %
23-33	< 0.6 %
Mayor al 33	< 0.3 %

TABLA 1. Porcentajes de componentes armónicos

Los límites de los demás parámetros de calidad de potencia exigidos por este estándar se muestran en la Tabla 2.

En Colombia, el Grupo de Materiales Semiconductores y Energía Solar de la Universidad Nacional de Colombia, desde hace aproximadamente 20 años viene realizando investigaciones en temas relacionados con el desarrollo de materiales para la fabricación de celdas solares. En la actualidad este grupo hace especial énfasis en el desarrollo de prototipos de sistemas de generación fotovoltaica de electricidad para uso rural y urbano y en el monitoreo del desempeño de este tipo de plantas. En particular, se han realizado estudios relacionados con la caracterización integral del primer sistema fotovoltaico interconectado de Colombia, que cuenta con una capacidad de generación de 980 W. Este consiste básicamente en: monitoreo de las condiciones ambientales presentes en la localidad de operación del sistema, medición y análisis de los parámetros que determinan la calidad de la potencia generada, estudio de la eficiencia

Parámetros de Calidad de Potencia	Limite de Variación
Rango de operación Normal de voltaje	88 % - 110 % de V_N en el PCC
Frecuencia	59.8 Hz – 60.2 Hz (Límites para Colombia)
Factor de Potencia	> 0.85
Flicker de Voltaje	De acuerdo al estándar IEEE 519 – 1992
%THD	< 5 %

TABLA 2. Limites permitidos de calidad de potencia según el estándar IEEE 929-2000

ciencia de conversión de corriente del equipo inversor, control de las condiciones de seguridad y protección de la instalación automatizada y la implementación de funciones de archivos de la información; todo ello empleando un concepto innovador basado en la Instrumentación Virtual (IV).

2. Descripción del equipo desarrollado para evaluar el sistema fotovoltaico interconectado

El sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica a que hace mención este trabajo, representa el primer prototipo instalado en Colombia, el cual se encuentra en funcionamiento desde el mes de Junio de 2003 en la Universidad Nacional de Colombia. El SFIR consiste de un generador FV compuesto por 14 módulos de silicio monocristalino que proveen una potencia total de 980 W y por un inversor marca XANTREX de la serie SunTie 1000.

La forma como se caracteriza el desempeño del sistema interconectado a la red de distribución, es adquiriendo las señales de corriente, tensión, temperatura y radiación para determinar en el respectivo procesamiento de datos los parámetros pertinentes exigi-

dos por la norma IEEE 929-2000 que describen la calidad de nuestra señal eléctrica: porcentaje total de distorsión armónica, componentes armónicos, frecuencia y tensión del sistema, flicker y factor de potencia; y evaluar la eficiencia del sistema, las condiciones ambientales presentes y la seguridad operativa de la instalación eléctrica. Adicionalmente, se analizan otros parámetros que contribuyen con una caracterización mas completa de la calidad de potencia generada.

El sistema desarrollado permite medir en forma confiable los parámetros mencionados arriba y comprende los siguientes elementos:

- Transductores eléctricos.
- Interfase.
- Computador.
- Software.

En la Figura 1 se muestra un esquema del diagrama del Sistema FV interconectado con el equipo de caracterización.

Las mediciones de corriente AC y DC se efectúan empleando un transductor que permite medir señales grandes de corriente en un amplio rango de Amperios y las convierte en una señal de voltaje que se ajusta muy bien a las especificaciones del convertidor A/D. La tensión AC y DC se miden directamente utilizando un transductor de tensión para ajustar su valor dentro de los límites permitidos por el convertidor A/D. La adquisición de radiación y temperatura se realizó a través de sensores específicos que suministran alta exactitud en las medidas, tomadas luego por los dispositivos FieldPoint destinados para dicha labor. Como interfase se utilizó una tarjeta de alta velocidad de la National Instruments y los sistemas modulares FieldPoint ya mencionados, que son ideales para una amplia variedad de aplicaciones de automatización industrial, laboratorios, investigación y demás necesidades de medición.

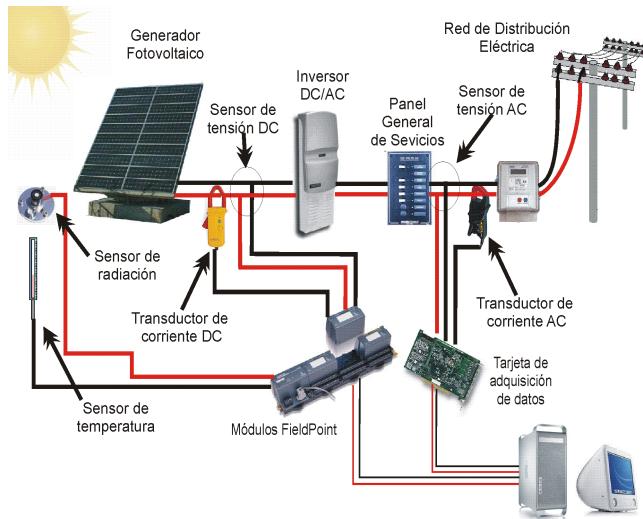


FIGURA 1. SFV interconectado y el equipo de caracterización implementado

Los programas desarrollados para la implementación del Instrumento Virtual (VI) requerido para la caracterización, se realizaron en LabVIEW 7.1, que es un lenguaje de programación gráfico que utiliza iconos en lugar de líneas de texto para crear las aplicaciones.

3. Resultados

Empleando LabVIEW se desarrolló el instrumento virtual (VI) denominado “SunVIEW”. A continuación se exponen los resultados obtenidos para cada uno de los aspectos que representan el funcionamiento del sistema.

3.1. Adquisición de Señales.

Este instrumento virtual adquiere las señales de tensión y de corriente provenientes de los transductores de medida, a través de la interfase a una velocidad de 20000 muestras/segundo. En la Figura 2 se presentan los resultados del proceso de adquisición. Se pueden visualizar las formas de onda de las señales de tensión y de corriente adquiridas del sistema y en la parte central se pueden

observar los controles del programa. Adicionalmente, se dispone de la opción de seleccionar el tipo de ventana a emplear para llevar a cabo el análisis de calidad de potencia de forma más exacta y confiable.

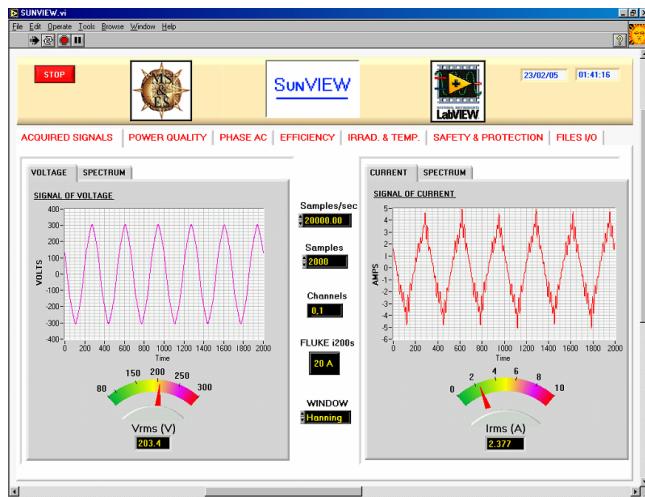


FIGURA 2. Panel Frontal de la caracterización del SFV interconectado: Adquisición de Señales. Este VI esta en capacidad de desarrollar un análisis confiable, al configurar los controles de la siguiente forma: Canales: 0,1 ; Muestras: 2000, muestras/segundo: 20000

3.2. Calidad de Energía Eléctrica.

Este instrumento virtual analiza la calidad de las señales de tensión y de corriente provenientes de los transductores de medida. En la Figura 3 se exponen los resultados del análisis de calidad de potencia. La gráfica muestra en forma de barras el porcentaje de cada componente armónico con respecto a la fundamental. En la parte superior-izquierda del panel frontal, se pueden observar los parámetros de calidad de potencia exigidos por la norma IEEE 929-2000, además de aquellos que complementan el análisis de nuestras señales eléctricas.

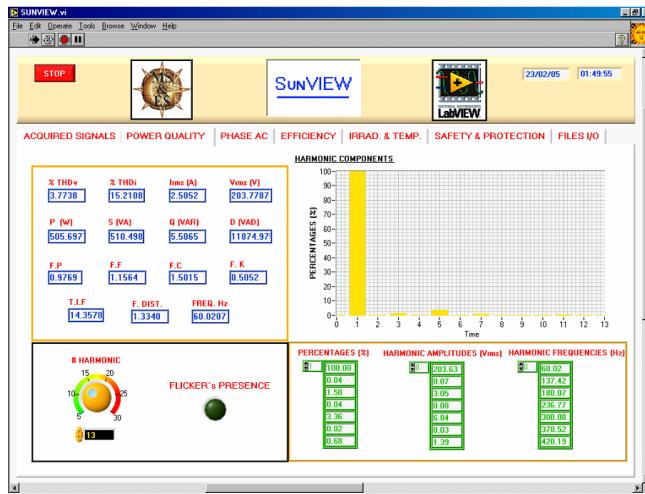


FIGURA 3. Panel Frontal de la caracterización del SFV interconectado: Calidad de Potencia Eléctrica

Se encontró que el sistema cumplía con todos los requerimientos especificados en las normas existentes. Los valores obtenidos para los parámetros de calidad analizados fueron los siguientes:

- La tensión de operación siempre se mantuvo dentro de los límites establecidos en las normas.
- No existió presencia de flicker.
- La frecuencia siempre se mantuvo dentro de los límites establecidos en las normas. La mayor frecuencia registrada fue de 60.044 Hz, y la menor fue de 59.998 Hz.
- El mayor %THD de tensión registró 3.77 %.
- Se analizó hasta el decimotercero armónico de la señal de tensión originada por el sistema interconectado.

De estos resultados se concluye que el SFIR implementado cumple satisfactoriamente con las exigencias nacionales e internacionales en materia de calidad de potencia.

3.3. Eficiencias.

Este instrumento virtual analiza las señales de tensión y de corriente de entrada y salida del inversor y mediante el procesamiento de datos interno entrega la potencia de entrada y salida del mismo equipo, así como también le eficiencia registrada en la conversión de corriente directa a corriente alterna. El mayor valor registrado fue de 95.81 %. En la Figura 4 se ilustran los resultados de este análisis:

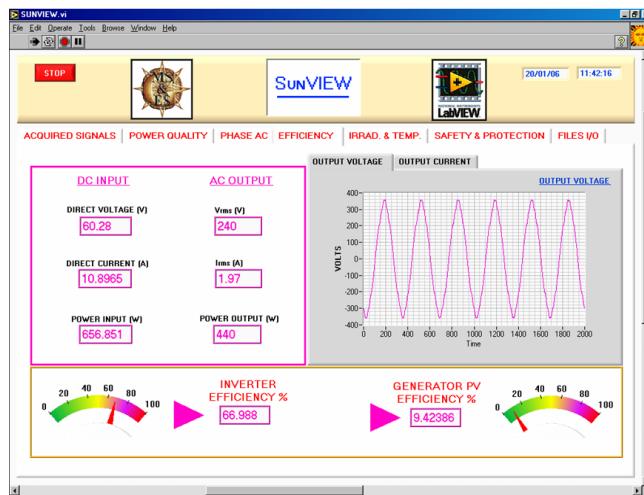


FIGURA 4. Panel Frontal de la caracterización del SFV interconectado: Eficiencias.

3.4. Análisis Fasorial

Este instrumento virtual presentado en la Figura 5, permite caracterizar la carga AC alimentada por el SFIR, al simplificar el comportamiento de estado estable a través de la representación de la corriente y el voltaje como vectores en el plano de números complejos. El propósito de este análisis es mostrar la magnitud y el ángulo de fase de nuestras variables eléctricas de interés, calcular la impedancia de la carga y el tipo de la misma; y también mostrar múltiples cantidades sobre la misma escala para propósitos de comparación.

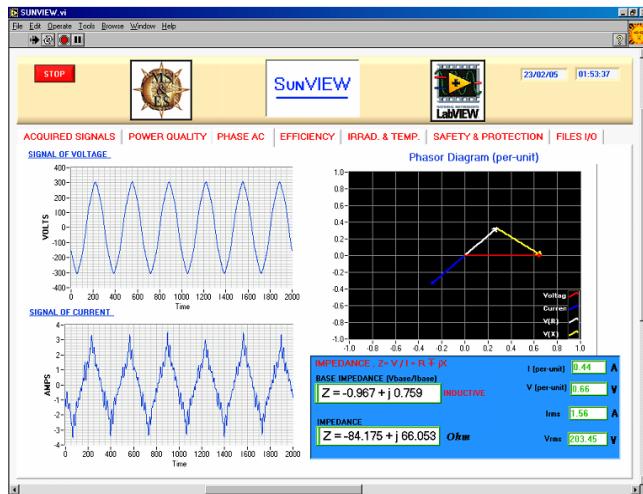


FIGURA 5. Panel Frontal de la caracterización del SFV interconectado: Análisis Fasorial.

3.5. Radiación y Temperatura

Es importante monitorear permanentemente algunos parámetros ambientales en el área de funcionamiento del SFIR ya que la producción de corriente alterna inyectada a las líneas de la red eléctrica por parte del inversor depende directamente de la radiación que incide sobre los módulos y de la temperatura ambiente. Adicionalmente, la medición y análisis estadístico de estos datos tomados durante períodos largos de tiempo, permiten estimar el potencial de radiación solar que es necesario para dimensionar óptimamente los SFV. La figura 6 muestra curvas típicas de la variación diaria de radiación y temperatura en el sitio donde está instalado el SFIR.

3.6. Seguridad y Protección.

Según el estándar IEEE 929-2000, el sistema completo debe operar de forma segura para las personas, los equipos y la red eléctrica. De esta manera el sistema está automatizado para que cada variable sea permanentemente monitoreada y se desconecte inmediatamente de la red eléctrica en caso de que sean violados los límites referentes

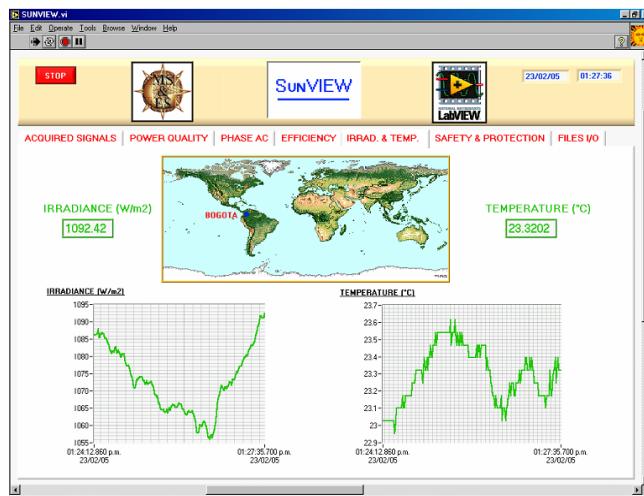


FIGURA 6. Panel Frontal de la caracterización del SFV interconectado: Radiación y Temperatura

a la tensión y frecuencia de operación o si se detecta cualquier interrupción en el fluido eléctrico de la red de distribución. A si mismo, el sistema está en capacidad de reconectarse automáticamente a la red después de sucedida una condición anormal que lo obligase a desconectarse. Adicionalmente se informa mediante LED's indicadores si son violados los límites permisibles para el factor de potencia, el porcentaje de distorsión armónica o si existe presencia de flicker en la generación de corriente, en cuyo caso se debe proceder con la desconexión manual del sistema a la red. La Figura 7 ilustra el proceso de control de seguridad y protección implementado.

3.7. Funciones de Archivos

En este aspecto se desarrolló un instrumento virtual que permitiera exportar toda la información adquirida, procesada y analizada a archivos específicos seleccionados por el usuario con el fin de controlar integralmente (mediante una base de datos completa) el comportamiento y desempeño del sistema interconectado. De esta manera se genera una fuente de información que puede ser usada para análisis posteriores, simulaciones que tienen en cuen-

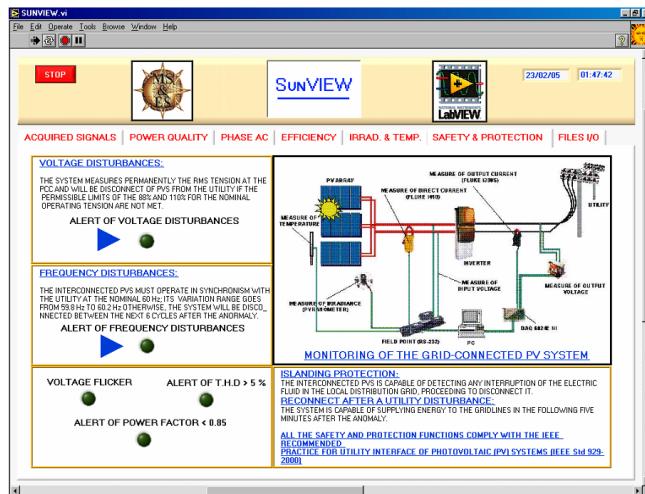


FIGURA 7. Panel Frontal de la caracterización del SFV interconectado: Seguridad y Protección.

ta variables concretas de operación fotovoltaica y la posibilidad de descargar y almacenar toda la información mediante los puertos de comunicación para los dispositivos de almacenamiento de datos del PC donde se efectúa el análisis. En la Figura 8 se muestra el VI encargado de las funciones de archivos.

4. Conclusiones

El equipo de monitoreo del desempeño de Sistemas Fotovoltaicos Interconectados que se desarrolló en este trabajo, representa una herramienta muy útil por su bajo costo, versatilidad, confiabilidad y seguridad, no solo para sistemas fotovoltaicos interconectados, sino también para cualquier clase de instalación eléctrica, gracias a sus principales características:

- Es un equipo portátil de fácil maniobrabilidad con suficientes entradas para señales de corriente, tensión, radiación y temperatura.
- Posee la capacidad para almacenar en memoria registros durante largos lapsos de tiempo.



FIGURA 8. Panel frontal de la caracterización del SFV interconectado: Archivos.

- Posee suficientes puertos de comunicación para descargar información analizada a otros dispositivos de almacenamiento de datos.
- El software que realiza el procesamiento de datos es compatible con todos los dispositivos DAQ y FieldPoint empleados y posee todas las opciones y capacidades de manejo adecuadas que permiten obtener un análisis eficiente y confiable.
- Gracias a la interfaz empleada y al respectivo software, es posible llevar a cabo simulaciones que toman en cuenta los componentes armónicos que permiten visualizar el correcto funcionamiento del equipo y el posible comportamiento del sistema bajo estudio.
- Se pueden reconfigurar fácil y rápidamente los transductores empleados con el fin de medir diferentes señales y niveles de tensión y de corriente.

El equipo implementado calcula todos los parámetros de calidad de potencia exigidos por las normas nacionales e internacionales a

saber ya que para su desarrollo se emplearon las normas IEEE 929-2000, IEEE 519-1992 y la resolución CREG 061-2000. De esta forma se obtienen las mismas funciones y resultados que se obtendrían con los diversos analizadores de calidad de potencia que se ofrecen actualmente en el mercado.

Referencias

- [1] *IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (GPV) Systems*, IEEE Std 929-2000.
- [2] *A New Australian Standard For Small Grid-Connected Renewable Generation Systems Connected Via Inverters*, Standards Australia Committee EL42, 2000.
- [3] *UNE-EN 61727 Sistemas Fotovoltaicos: Características de Interfaz de Conexión a la Red Eléctrica* Versión oficial española de la Norma europea EN 61727 de Agosto de 1995.
- [4] *CEI 1194:1992 Parámetros Característicos de los Sistemas fotovoltaicos Autónomos.*, Armonizada como EN 61194:1995.
- [5] S. Ramírez, y E. A. Cano *Calidad del Servicio de Energía Eléctrica*, Editado por J. D. Vargas, (Trabajo de Grado, Universidad Nacional, Sede Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Junio de 2003).
- [6] *IEEE Recommended Practices And Requirements For Harmonic Control In Electrical Power Systems.*, IEEE Std 519-1992.
- [7] Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), *Reglamento de distribución de energía eléctrica*, Resolución CREG 061 de septiembre 12 de 2000.

Reconocimientos

Este trabajo se llevó a cabo gracias al apoyo de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia.