

Calidad de la Energía de un Autogenerador Fotovoltaico a Pequeña Escala Conectado a la Red: Caso de Estudio

Power Quality of a Small-Scale Photovoltaic on Grid Generator: Case Study

Recibido: 22 de julio de 2022

Aprobado: 28 de noviembre de 2022

Forma de citar: L.D. Pabón Fernández, O.J. Suarez, L.F. Gonzalez Archila "Calidad de la Energía de un Autogenerador Fotovoltaico a Pequeña Escala Conectado a la Red: Caso de Estudio", *Mundo Fesc*, vol 13, no. 26, pp. 131-151, 2022

Luis David Pabón Fernández* 

Magíster en Controles Industriales
davidpabon@unipamplona.edu.co
Universidad de Pamplona
Pamplona, Colombia.

Oscar J. Suarez 

Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica
oscar.suarez@unipamplona.edu.co
Universidad de Pamplona
Pamplona, Colombia.

Luis Felipe Gonzalez Archila 

Ingeniero Eléctrico
luis.gonzalez2@unipamplona.edu.co
Universidad de Pamplona
Pamplona, Colombia.

***Autor para correspondencia:**
davidpabon@unipamplona.edu.co



Calidad de la Energía de un Autogenerador Fotovoltaico a Pequeña Escala Conectado a la Red: Caso de Estudio

Resumen

Este artículo muestra un estudio de calidad de la energía realizado sobre un auto generador, basado en energía solar fotovoltaico de pequeña escala, ubicado en la región andina de Colombia, específicamente en el municipio de Pamplona, Norte de Santander. El estudio se realiza con el analizador de redes Fluke 434-II debidamente calibrado, el cual permitió obtener los datos en el punto común de acoplamiento entre la instalación eléctrica existente del edificio y el generador fotovoltaico. De esta manera se realiza el análisis de calidad de la energía siguiendo estándares internacionales como la norma IEEE 1159 e IEEE 519; de igual manera se analizaron los datos de consumo de energía activa y reactiva donde se presentaron y clasificaron 99 eventos, tales como armónicos de tensión, sobretensiones, hundimientos, entre otros. Finalmente se plantean recomendaciones como posibles soluciones a los fenómenos electromagnéticos de calidad de la energía y eventos de consumos de potencia encontrados.

Palabras clave: Autogenerador a pequeña escala, calidad de la energía, fenómenos electromagnéticos, potencia activa, potencia reactiva, sistema fotovoltaico *on grid*.

Power Quality of a Small-Scale Photovoltaic on Grid Generator: Case Study

Abstract

This paper shows the power quality analysis of a small-scale self-generator based on photovoltaic solar energy, located in the Andean and mountainous region of Colombia, specifically in the municipality of Pamplona in the department of Norte de Santander. The study was carried out with the Fluke 434-II power quality analyzer which allowed data to be obtained at the common coupling point between the existing electrical installation of the building and the photovoltaic generator. and perform the power quality analysis following international standards such as IEEE 1159 and IEEE 519; likewise, active and reactive energy consumption data were analyzed where 99 events were presented and classified, such as voltage harmonics, surges, collapses, among others. Finally, possible solutions to the energy quality problems and power consumption events found are presented as recommendations.

Palabras clave: Active power, photovoltaic system on grid, Power Quality, reactive power, electromagnetic phenomena, small-scale auto-generator.

Introducción

A medida que la tecnología avanza y el consumo energético mundial aumenta, las energías no convencionales y las fuentes de energía renovables se convierten en el nuevo horizonte para la generación de electricidad, pues la transición energética hacia las fuentes limpias es una necesidad impuesta por la problemática medioambiental causada por las energías basadas en combustibles fósiles[1],[2].

En este contexto, dentro de las energías alternativas, la fotovoltaica, geotérmica, eólica y biomasa se presentan como las opciones más utilizadas en el mundo, debido a la disponibilidad de los recursos naturales renovables en las diferentes regiones; desde esta perspectiva el sol y la generación fotovoltaica toma un papel predominante a causa de su disponibilidad en casi la totalidad de las regiones y al gran avance tecnológico desarrollado en las últimas décadas [3].

En Colombia, el parque de generación eléctrica se ha fundamentado los combustibles de origen fósil, como el gas y el carbón, al igual que en el uso de centrales hidroeléctricas, que constituyen la mayor parte del parque de generación eléctrica [4]. En este contexto las energías no convencionales se convierten en una necesidad prioritaria promovida por el requerimiento global de la sustitución de los combustibles fósiles. Debido a esto, el gobierno colombiano promueve el uso de las energías no convencionales, de tal manera que este tipo de sistemas ya se encuentran normado a través de la ley 1715 del año 2014, que define los incentivos y los lineamientos generales para que las fuentes alternativas se puedan conectar al sistema interconectado nacional (SIN) [5].

En cuanto a lo técnico y comercial, la Comisión Regulatoria de Energía y Gas (CREG) por asignación de la ley 1715, se ha encargado de establecer procedimientos y parámetros a seguir por las empresas electrificadoras, para que las de energías alternativas puedan ser conectados al sistema de distribución local (SLD) y al SIN [6].

La claridad en la norma y la motivación de los incentivos ha permitido el auge de estos proyectos en el territorio nacional, como se observa en los informes de la Unidad De Planeación Minero-Energética (UPME) [7]. Este auge de proyectos involucra una gran incógnita referente al comportamiento de la de los sistemas eléctricos y la calidad de la energía en los usuarios, en los cuales la generación distribuida y la autogeneración hacen presencia [8], [9], [10], es por esto y con el ánimo de aportar conocimiento en la solución de esta incógnita que el presente artículo muestra los resultados de un estudio de calidad de la energía de un sistema fotovoltaico conectado a la red, real y en operación.

El estudio midió las variables eléctricas con el analizador de calidad de la energía Fluke 434-II y con base en estándares de calidad de la energía, especialmente la IEEE 1159 [11] y la IEEE 519 [12], que establecen las características de los fenómenos electromagnéticos; adicionalmente se evaluó la presencia de fenómenos indeseados en el punto de acoplamiento común del sistema (PCC) y se analizaron los datos de consumo de potencia activa y reactiva con el fin de establecer anomalías presentes y

proponer posibles soluciones tanto para los fenómenos electromagnéticos como para las anomalías de consumo de potencias.

B. Evaluación de calidad de la energía

Dentro de los requerimientos técnicos para conectar sistemas fotovoltaicos al SDL o el SIN, es indispensable el cumplimiento de normas técnicas, actualmente se exige por parte de los operadores de red que los inversores cumplan con los estándares IEEE 1547 [13] y UL 1741 [14].

Los inversores, que son los elementos principales en la conexión a red, integran también protecciones en cuanto a modo isla, variaciones de frecuencia y operación de voltaje anormal, cumpliendo así otros estándares como la EN50081 parte 1, EN50082 parte 1, CSA STD.C22.2 No.107.1, EN61000-3-2 EN62109, y DIN VDE 0126.

Con respecto a las posibles perturbaciones que puedan generarse en el dominio de la frecuencia, los inversores cumplen estándares de compatibilidad electromagnética y de conexión a la red: EN50081 parte 1, EN50082 parte 1, CSA STD.C22.2 No.107.1, EN61000-3-2, EN62109.UL, STD.1741, DIN VDE 0126, IEEE STD.1547 y 1547.A. Los cuales garantizan la operación adecuada, el seguimiento de la frecuencia fundamental y la baja emisión de armónicos. Esto significa que desde el punto de vista normativo los sistemas conectados a la red cuentan con un mínimo de condiciones técnicas para operar de una forma segura frente a diferentes escenarios de la red, sin embargo, es necesario verificar en operación las posibles interacciones que puedan aparecer. Para llevar a cabo el presente estudio de calidad de la energía se tomaron los conceptos y características establecidas en los estándares IEEE 519, IEEE 1159, EN50160 [15], IEC 61000-3-2 [16], IEC 61000-2-4 [17], del ámbito internacional, y la NTC 5001[18] en el ámbito nacional.

Los fenómenos electromagnéticos que se tuvieron en cuenta para este estudio se caracterizan en el estándar IEEE 1159 [12], en el cual se clasifica los fenómenos electromagnéticos según la Tabla I.

Categoría	Contenido Típico Espectral	Duración Típica	Magnitud Típica del voltaje
1.0 Transitorios			
1.1 Impulsos			
1.1.1 Nanosegundos	5ns de elevación	<50ns	
1.1.2 Microsegundos	1 ms de elevación	50 ns – 1ms	

1.1.3 Milisegundos	0.1 ms elevación	>1ms	
1.2 oscilatorios			
1.2.1 Baja frecuencia	<5 kHz	0.3-50ms	0-4 pu
1.2.2 Frecuencia Media	5-500 kHz	20us	0-8 pu
1.2.3 Alta Frecuencia	0.5 – 5MHz	5us	0-4 pu
2.0 Variaciones de corta duración			
2.1 Instantáneas			
2.1.1 <i>Sag</i>		0.5-30 ciclos	0.1 – 0.9 pu
2.1.2 <i>Swell</i>		0.5-30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
2.2 Momentáneas			
2.2.1 Interrupción		0.5 ciclos – 3s	<0.1 pu
2.2.2 <i>Sag</i>		30 ciclos – 3s	0.1 – 0.9 pu
2.2.3 <i>Swell</i>		30 ciclos – 3s	1.1 – 1.4 pu

2.3 Temporal			
2.3.1 Interrupción		3 s – 1min	<0.1 pu
2.3.2 <i>Sag</i>		3 s – 1min	0.1 – 0.9 pu
2.3.3 <i>Swell</i>		3 s – 1 min	1.1 – 1.2 pu
3.0 Variaciones de corta duración			
3.1 Interrupción Sostenida		>1min	0.0 pu
3.2 Bajo voltaje		>1 min	0.8 – 0.9 pu
3.3 Sobrevoltaje		>1 min	1.1 – 1.2 pu

4.0 Desbalance de V		Estado estable	0.5 – 2%
5.0 Distorsión de forma de onda			
5.1 Componente de CD		Estado estable	0 -0.1 %
5.2 Contenido armónico	0 – 100 th	Estado estable	0 – 20%
5.3 <u>Interarmónicos</u>	0 – 6 kHz	Estado estable	0 – 2%
5.4 Muestras		Estado estable	
5.5 Ruido		Estado estable	0 – 1%
6.0 Fluctuaciones de Voltaje			
	<25 Hz	Intermitente	0.1 – 7%
7.0 Variaciones de Frecuencia			
		<10 s	

Tabla I Categorías y características de fenómenos electromagnéticos (IEEE 1159 - 1995) [11].

Fuente: Adaptado de [11]

Para la distorsión armónica, el estándar IEEE 519 [12] presenta una actualización de los límites de la distorsión de voltaje, según lo indicado en la Tabla II, donde se muestran los límites según el nivel de tensión en el punto común de acoplamiento.

Bus de voltaje en el PCC	Armónico individual %	Total de distorsión armónica
V<1.0 kV	5.0	8.0
1.0 Kv< V<69 kV	3.0	5.0
69 Kv< V<161 kV	1.5	2.5
161 kV < V	1.0	1.5

Tabla II Límites de distorsión armónica de voltaje[20].

Fuente: Adaptado de [12]

I. Localización

El auto generador a pequeña escala se encuentra ubicado en la ciudad de Pamplona, en el punto con coordenadas 7°23'15.5"N 72°38'57.8"W.

II. Parámetros eléctricos del sistema

El sistema fotovoltaico consta de 38 paneles policristalinos de la marca POWEST, cada uno con una capacidad de 320 W. Estos paneles operan a su máxima potencia con una corriente de 8.64 A y 37 V de voltaje, mientras que la corriente de cortocircuito se registra a 9.189 A y el voltaje en circuito abierto alcanza los 46 V.

Los paneles están organizados en dos cadenas de 19 unidades cada una, las cuales se conectan a un inversor de la marca ABB. Este puede operar a dos frecuencias, 50 o 60 Hz, y tiene una potencia pico de 11000W en una conexión trifásica de 400 VAC. Cada MPPT del inversor opera en un rango de voltaje de 200 a 850 VDC. El sistema también incluye un transformador de 10KVA que reduce el voltaje de salida del inversor de 400 VAC a 208 VAC, que es el voltaje operativo del sistema.

El sistema de transmisión nacional de Colombia funciona a una frecuencia nominal de 60 Hz [21], por lo que se debe garantizar que el sistema fotovoltaico se sincronice de forma perfecta de tal manera que no se pueda causar daños, cumpliendo los parámetros establecidos en la resolución CREG 025 de 1995 [21], para tal medida, el sistema cuenta con un sistema operativo el cual al detectar una anomalía en la frecuencia, iniciará la suspensión de inyección a la red. De igual forma el sistema cuenta con un esquema de protecciones que permite el aislamiento de los paneles fotovoltaicos y el inversor frente a fallas de cortocircuito.

Los elementos principales del sistema fotovoltaico utilizados en el desarrollo del presente artículo se muestran en la Figura 1.



Figura 1 Sistema fotovoltaico

III. Equipos de medición

Como equipo de medida se hizo uso del analizador de redes Fluke 434-II.

IV. Toma de datos

La toma de datos se realizó en el PCC, que es el punto en el cual el sistema se conecta a la red, estas mediciones en el sistema fotovoltaico se llevaron a cabo durante tres semanas consecutivas.

D. Resultados

En la Tabla III se detallan los distintos eventos registrados por el analizador siguiendo la lo establecido en la norma IEEE 1159 [11].

EVENTOS	CANTIDAD
Caídas de tensión	10
Bajos voltajes	8
<i>Swell</i>	3
Transitorios	8
Interrupciones	4
TOTAL	33

Tabla III Eventos de la calidad en la energía de la tercera semana

Fuente: Autor

Durante el tiempo de realización de las mediciones se obtuvo un registro total de 99 eventos a continuación se muestran los resultados.

I. Frecuencia

La Figura 2 muestra el perfil de frecuencia de funcionamiento del autogenerador, el cual se mantiene en los límites establecidos por la normatividad, por lo que no se registran eventos de desconexión por variaciones de frecuencia de la red.

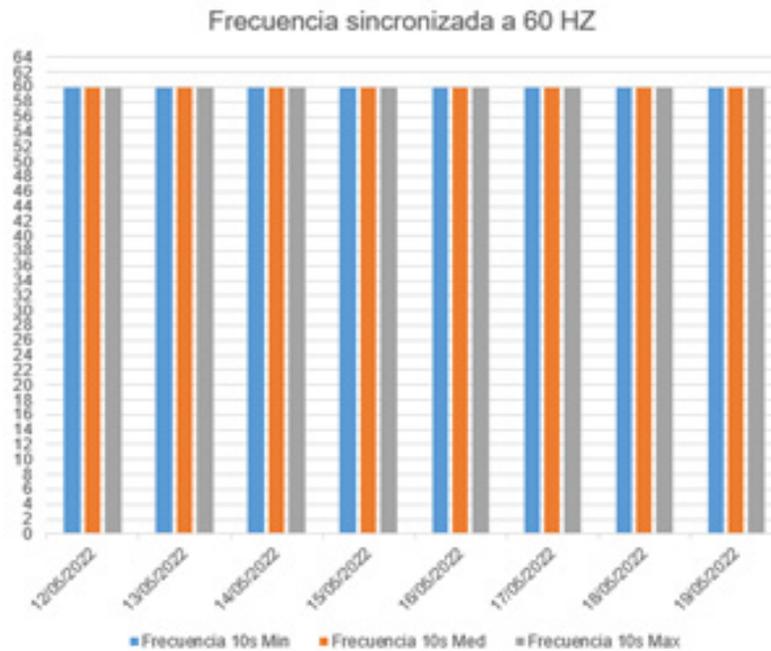


Figura 2 Frecuencia del sistema fotovoltaico

II. Interrupciones

En cuanto a este fenómeno de calidad de la energía se registraron 4 interrupciones. La Tabla IV relaciona los datos de fecha, hora, duración y fase en que se produjeron.

Tiempo	Tensión A (V)	Tensión B (V)	Tensión C (V)
49s 903 ms	X		
53 s 662 ms	X		
526ms		X	
492 ms			X

Tabla IV Eventos de interrupciones presentados
Fuente: Autor

Como se puede observar, las interrupciones presentadas son caracterizadas por su naturaleza instantáneas y monofásica.

III. Armónicos de tensión

Como muestra del registro de la distorsión armónica de tensión, la Figura 3 presenta los valores promedio de los armónicos registrados durante la primera semana, resaltando la

presencia del armónico 5 con un 2,05 % de la fundamental y llegando a un valor máximo de 7,87%. La Figura 4 muestra la misma información para la segunda semana, donde el armónico 5 tiene un porcentaje de 1,92 % de la fundamental y un valor máximo de 6,44%. Al evaluar los datos obtenidos durante la medición, con respecto a la Tabla II, se logra concluir que el sistema se encuentra en los límites establecidos por la norma durante su funcionamiento, debido a que el sobrepaso de los límites se da por muy corto tiempo, estando el percentil 99 de la distribución de datos por debajo de los límites establecidos para el THD y el aporte individual armónico.

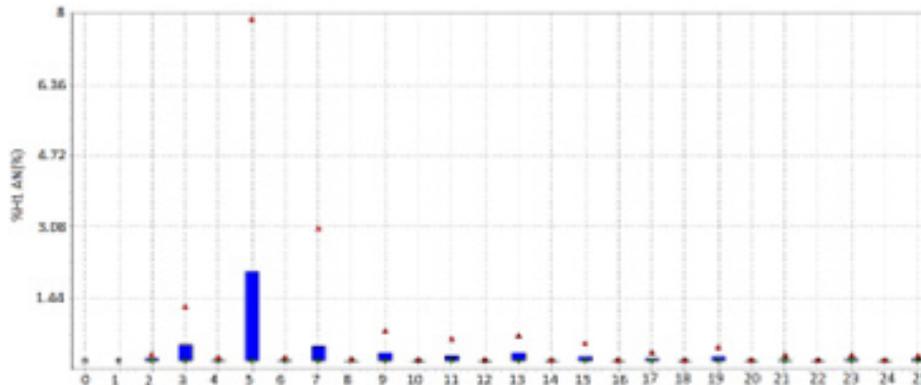


Figura 3 Armónicos de tensión de en la fase A primera semana de mediciones

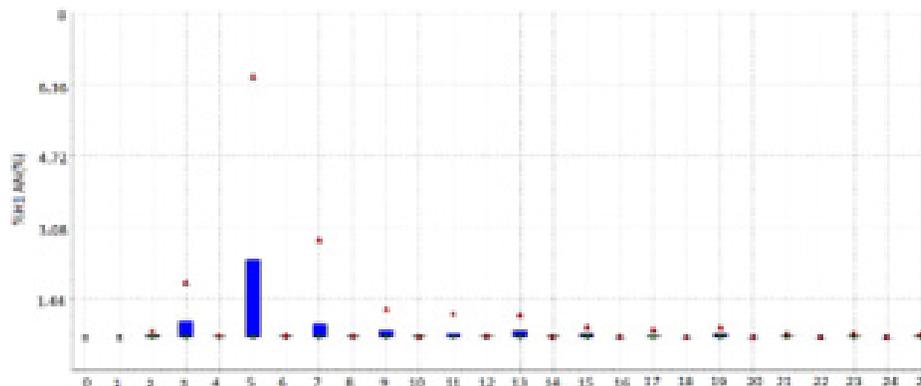


Figura 4 Armónicos de tensión de en la fase A segunda semana de mediciones

IV. Armónicos de corriente

La Figura 5 presenta una muestra del contenido armónico de las ondas de corriente inyectadas, como se puede ver el contenido es muy bajo, por lo que no hay excursiones por fuera de los límites permitidos, ni el THD ni el aporte individual de cada armónico superan el 5%.

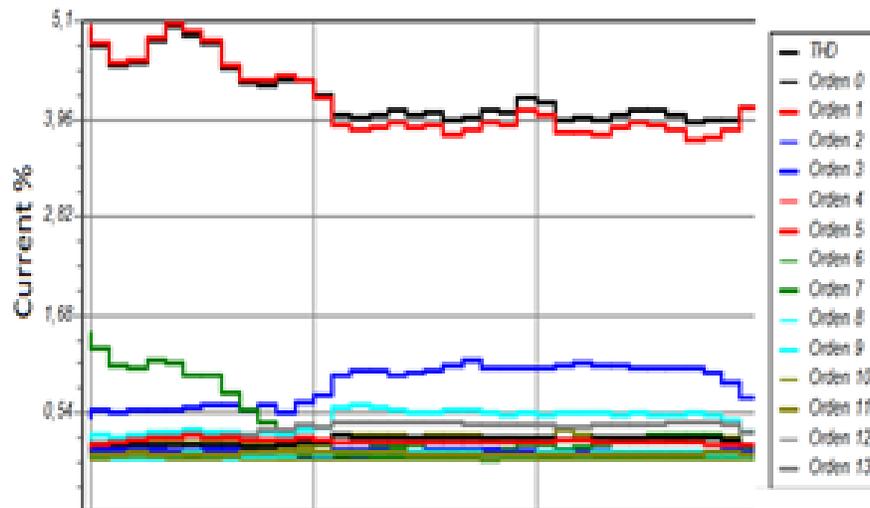


Figura 5 Contenido armónico de las ondas de corriente

V. Elevaciones de tensión Swell

En la Tabla V se muestran los tres eventos presentados dentro de esta categoría. Las elevaciones registradas están en el orden de los milisegundos, por lo que entran en la categoría de instantáneas, al ser elevaciones de muy corto tiempo no tienen gran influencia como perturbaciones del sistema

Tiempo	Tensión A (V)	Tensión B (V)	Tensión C (V)
17 ms	-	-	177.6V
16 ms	152.7V	-	-
13ms	178.8 V	-	-

Tabla V Eventos de elevaciones de tensión o Swell
Fuente: Autor

VI. Depresiones de tensión Sag

En la Tabla VI se relacionan los eventos presentados en esta categoría, se muestra la fecha, hora, duración, magnitud y fase en la que se produjeron. Como se puede observar la mayoría son instantáneos presentando duraciones del orden de los milisegundos.

Tiempo	Tensión A (V)	Tensión B (V)	Tensión C (V)
51s 64 ms	-	-	0.012
275 ms	-	-	91.698
349ms	-	-	97.889
125ms	-	-	96.043
7s 753ms	-	-	93.452
466ms	-	-	95.176 V
47 ms	-	-	65.061 V
434ms	-	-	91.337 V
387 ms	94.0	-	
25ms	-	-	91.617 V

Tabla VI Fenómenos electromagnéticos de Caídas de tensión o Sag
Fuente: Autor

VII. Bajos voltajes Under voltages

La Tabla VII relaciona los bajos voltajes registrados, se muestra al igual que en la anterior tabla, la fecha, hora, magnitud y fase en la que se produjeron.

Tiempo	Tensión A (V)	Tensión B (V)	Tensión C (V)
1 m 5 s	-	-	0.83
23m 27s	-	-	116.21
43m 40s	-	-	118.415
1m 11s	-	-	118.371
2h 40s	-	-	103.994
35m 36s	-	-	117.389
1h 36m	-	-	117.298
2m 26s	-	-	118.333

Tabla VII fenómenos electromagnéticos de huecos de tensión.

Fuente: Autor

Los eventos registrados, en su mayoría son monofásicos y tienen duraciones que superan los 10 minutos, sin embargo, no son tan pronunciados en magnitud dándose solo un único registro inferior al 0,85 pu.

VIII. Flicker

En las Figuras 6 se muestran los valores del PLT en la línea A en diferentes intervalos.

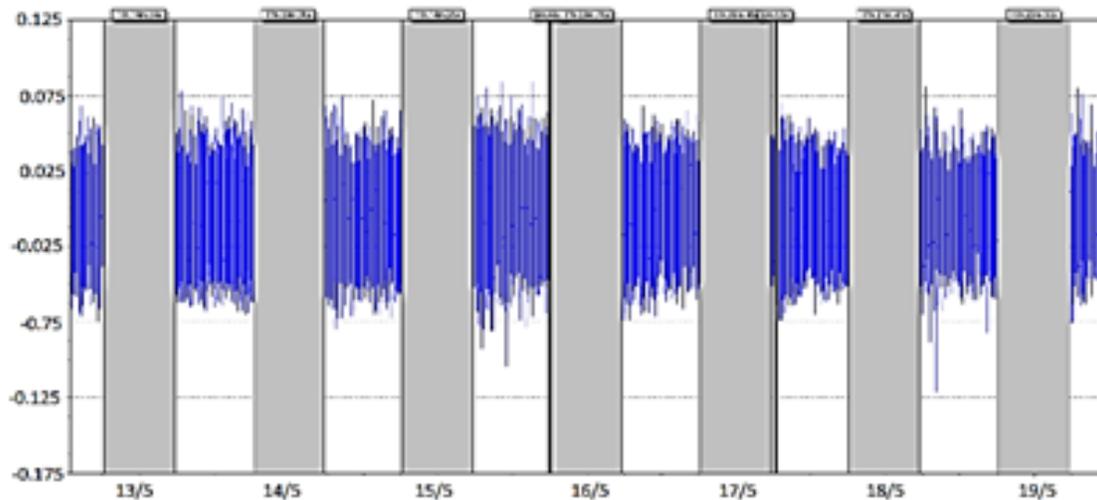


Figura 6 PLT en la fase A

El estándar IEEE 519 [12] establece para el PLT un máximo de uno, este valor en la medición está en un rango de 0.125 a 0.075, cumpliendo lo establecido con este estándar y otros [20].

IX. Transitorios

En cuanto a los fenómenos transitorios, se registraron un total de 8 eventos, los cuales se relacionan en la Tabla VIII. En la mayor parte los eventos sucedieron en las primeras horas del día, cuando el generador fotovoltaico comienza a captar los rayos de sol, presentando una excepción del día 23 de mayo de 2022 que se presentó un transitorio en las horas de la tarde.

Fecha	Hora	Fecha	Hora
13/05/202 2	5:31:11 AM	22/05/202 2	5:27:00 AM
14/05/202 2	5:37:54 AM	23/05/202 2	5:25:17 AM
15/05/202 2	5:31:40 AM	23/05/202 2	12:10:27 PM
15/05/202 2	5:47:02 AM	23/05/202 2	12:12:44 PM
16/05/202 2	5:35:29 AM	24/05/202 2	5:31:12 AM
17/05/202 2	5:34:23 AM	25/05/202 2	5:40:24 AM
18/05/202 2	5:33:18 AM	26/05/202 2	5:35:31 AM
19/05/202 2	5:30:01 AM	27/05/202 2	5:38:58 AM

Tabla VIII Fenómenos transitorios
Fuente: Autor

En la anterior tabla la duración no se muestra, y esto se da porque el equipo utilizado no tiene la capacidad para evaluar las características en magnitud de los fenómenos transitorios. De igual forma, con el analizador de red se midieron los consumos de potencia activa, reactiva, al igual que el factor de potencia y las energías activas y reactivas.

X. Potencia activa

La Figura 7 presenta los perfiles de potencia activa registrados durante seis días como una muestra de esta medición, claramente se ve que la inyección de energía da inicio aproximadamente a las 5:30 am y permanece hasta las 5:15 pm, cuando se presenta una reducción significativa y aproximadamente a las 6:20 pm el sistema deja de inyectar energía por completo.

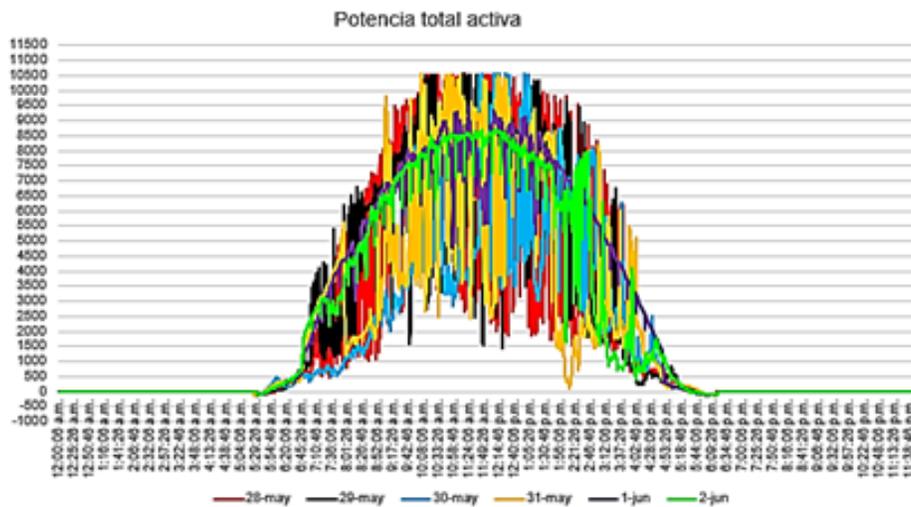


Figura 7 Potencia activa.

Los perfiles de potencia activa diarios presentan caídas abruptas y repetitivas debido a las variaciones rápidas de la irradiancia, debido a las condiciones climáticas y nubosidades presentes sobre los paneles.

XI. Potencia reactiva

La Figura 8 presenta los perfiles de consumo de potencia reactiva del sistema fotovoltaico, dos eventos aparecen repetitivamente diariamente, entre las 5:20 y 6:15 am y entre las 5:20 y 6:20 pm, momentos en los cuales el sistema hace variaciones entre consumo e inyección de reactivos, en los demás instantes de tiempo diurnos el sistema aporta reactivos a la red, aunque es un aporte muy bajo. En las noches el sistema no aporta ni consume ningún tipo de potencia. En dos días en específico se presentan eventos atípicos en las horas de la tarde, en los cuales el sistema demanda reactivos de la red.

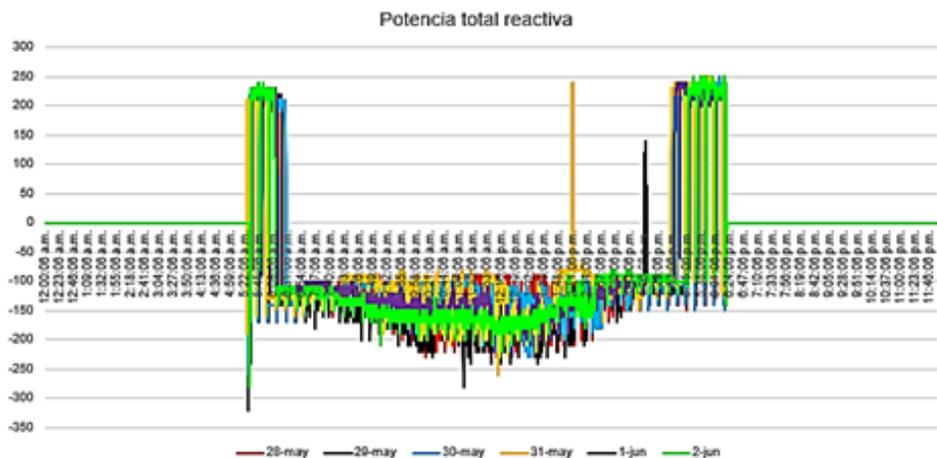


Figura 8 Potencia reactiva

XII. Potencia aparente

En la Figura 9 se presenta una muestra de los perfiles diarios de potencia aparente, estos perfiles tienen un comportamiento muy similar a los de la potencia activa, debido a que el aporte o consumo de energía reactiva no es considerable, por lo que la mayor parte de la potencia aparente será activa presentando el mismo comportamiento.

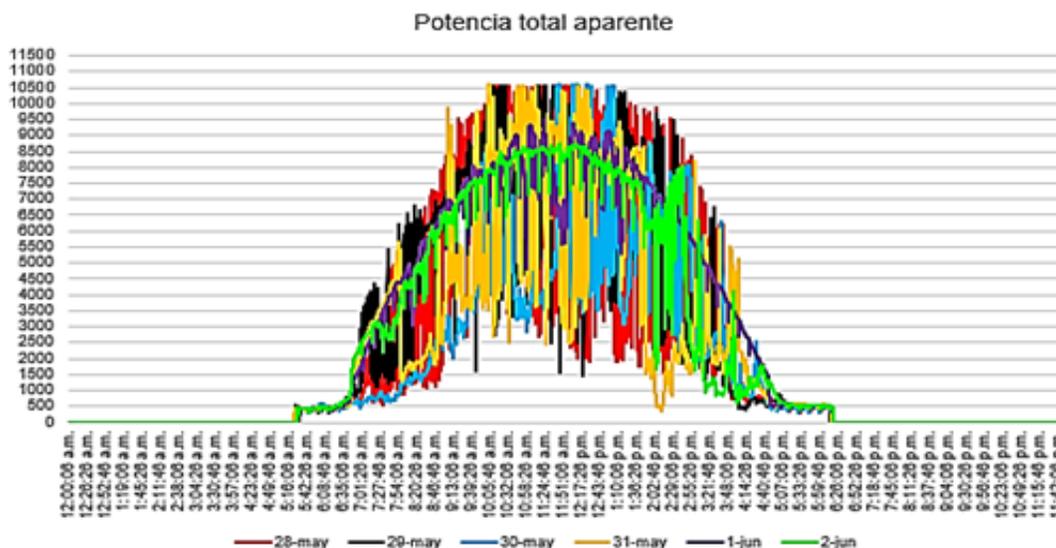


Figura 9 Potencia aparente

XIII. Factor de potencia

La Figura 10 muestra los perfiles diarios del factor de potencia, se presentan tres comportamientos, el primero en los intervalos de las 5:20 y 6:15 am y las 5:20 y 6:20 pm, en los cuales el sistema se encuentra alternando entre consumo y aporte de reactivos, siendo predominante el consumo, en este periodo el factor de potencia se cambia de capacitivo a inductivo constantemente predominando el inductivo, el segundo comportamiento se presenta entre las 6:15 am y las 5:20 pm, en el cual el sistema va incrementando el aporte de activos y por tanto el factor de potencia se eleva hasta casi tomar el valor unidad, un tercer comportamiento se presenta como atípico, en el cual una disminución del factor de potencia se da por un corto tiempo bajando del valor unidad hasta 0.3.

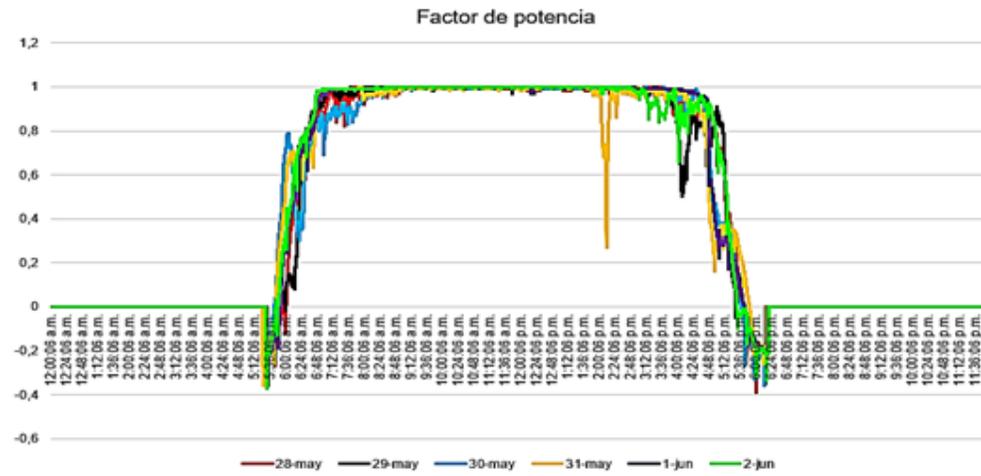


Figura 10 Factor de potencia

XIV. Energía activa

La Figura 11 presenta el comportamiento de los perfiles de la energía activa aportada o consumida por el sistema. La inyección de energía activa inicia de manera significativa entre las 6:50 am y las 8:40 am, momento en el cual el generador fotovoltaico se encuentra en mejores condiciones de irradiancia y la inyección de potencia activa es significativa, estas condiciones se reducen aproximadamente a las 5:10 pm cuando las condiciones de irradiancia disminuyen la capacidad de generación, estableciendo este valor de energía acumulada como el valor de inicio del perfil del siguiente día, esta es la explicación al comportamiento escalonado de los perfiles de energía activa.

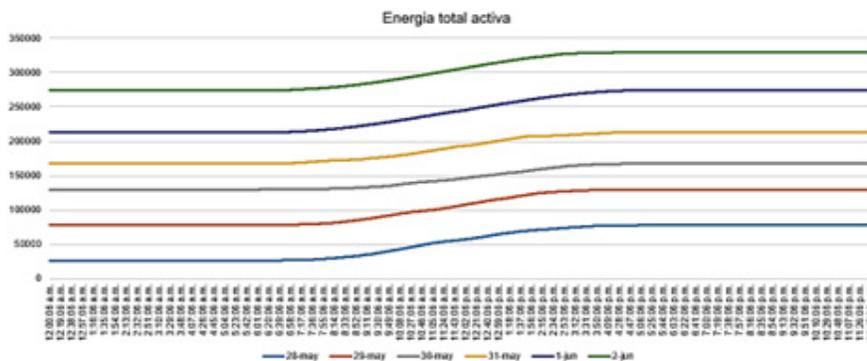


Figura 11 Energía total activa

XV. Energía reactiva

La figura 12 muestra los perfiles de potencia reactiva, en ellos se identifican tres comportamientos, los cuales pueden variar en duración y magnitud. El primer comportamiento se da en las horas iniciales y finales de funcionamiento, en estos

intervalos el sistema alterna el consumo y aporte de potencia reactiva a la red, predominando el consumo, por lo que el perfil de energía reactiva se ve decreciendo; el segundo comportamiento se da en las demás horas diurnas, en donde el aporte de energía reactiva está constantemente aumentando, por último, en las horas nocturnas el sistema no aporta ni consume energía, es por esto, que al igual que en la energía activa el acumulado de la energía de un día es el valor de inicio del perfil de reactivos del día siguiente.

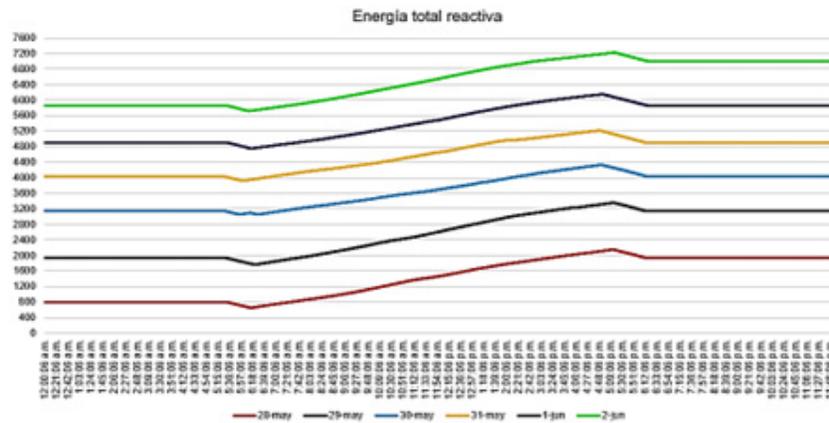


Figura 12 Energía reactiva

E. Hallazgos y soluciones

Como se pudo observar en los datos presentados en la sección anterior, el número de fenómenos electromagnéticos son mayormente depresiones de voltaje, seguido por los bajos voltajes y transitorios, las interrupciones y las elevaciones de voltaje que tienen una presencia mínima. Los demás fenómenos de calidad de la energía no tienen influencia, dicese que los desequilibrios de voltaje, fluctuaciones de frecuencia, bajos voltajes, sobre voltajes, distorsión armónica, componente de CD y distorsión interarmónica no se registraron; cabe resaltar que algunos fenómenos como las muescas o el ruido eléctrico no fueron evaluados debido a las limitaciones técnicas del equipo de medición.

En cuanto al análisis de los consumos de potencias, se puede establecer que el comportamiento de la potencia activa es normal, en coherencia con la irradiancia disponible en el instante de medición, sin embargo el comportamiento de la potencia reactiva no es del todo adecuado, ya que en las horas de inicio o del cierre del ciclo de generación existe un alternancia entre el aporte y el consumo, lo cual hace que el factor de potencia alterne y tome un valor inductivo como predominante del intervalo.

Los fenómenos electromagnéticos registrados en su mayoría son instantáneos, por lo que no tienen un impacto extendido en el tiempo, el único fenómeno registrado con una duración prolongada fue el bajo voltaje. Por lo que para dar solución a las problemáticas se plantean las siguientes soluciones:

- Control inteligente de reactivos

A causa del consumo alternante de energía reactiva del sistema y la presencia de sags, swells y bajos voltajes, se plantea desarrollar un sistema de compensación inteligente de energía reactiva; como complemento al inversor, aportando o consumiendo los reactivos que el punto de generación necesite; de igual forma este sistema podría aportar o consumir energía reactiva, con el ánimo de controlar la magnitud del voltaje del PCC para tratar de eliminar las caídas y elevaciones de tensión.

- Creación de un sistema autónomo de respaldo

Debido a que en el sistema se pueden presentar cortes de energía, el sistema on grid entrará al modo isla inmediatamente, desaprovechándose la energía que se pudiese generar con los paneles fotovoltaicos, es por esto que se plantea el diseño e implementación de un sistema autónomo con doble transferencia, la primera que permita transferir una cadena de paneles a la alimentación del sistema, y la segunda que permita conectar un inversor off grid a circuitos prioritarios de funcionamiento como los de iluminación y tomacorrientes de oficinas.

Conclusiones

La calidad de la energía del sistema en estudio en términos generales es buena, los eventos ocurridos son mínimos y en su mayoría instantáneos, siendo el evento con mayor recurrencia las depresiones de voltaje.

En el lapso posterior al ingreso y sincronización con la red, se presentan variaciones del factor de potencia a causa de la alternancia en la inyección de energía reactiva. Durante la mañana y la tarde, en los intervalos de 5:20 am a las 6:20 am, y de 5:30 pm a 6:30 pm, se observan eventos de potencia reactiva, en los cuales el perfil de dicha potencia varía rápidamente. En estos momentos, el factor de potencia tiende a ser predominantemente inductivo.

Pese a la existencia de armónicos y *Flicker*, los fenómenos permanecen dentro de los límites dados por los estándares, por lo que no se registraron eventos asociados. Las soluciones asociadas a los eventos ocurridos son relacionadas con la compensación de energía reactiva y almacenamiento de energía.

Referencias

- [1] M. ElNozahy y M. Salama, "Technical Impacts of Grid-Connected Photovoltaic Systems on Electrical Networks—A Review," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 5, May 2013, doi: 10.1063/1.4808264.
- [2] W. Salem, W. Gabr Ibrahim, A. Abdelsadek, y A. Nafeh, "Grid connected photovoltaic

- system impression on power quality of low voltage distribution system," *Cogent Engineering*, vol. 9, no. 1, 2022, doi: 10.1080/23311916.2022.2044576.
- [3] M. Farhoodnea, A. Mohamed, H. Shareef, y H. Zayandehroodi, "Power Quality Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems in Distribution Networks," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 89, no. 2 A, pp. 208–213, 2013.
- [4] Plan de Expansión de Referencia 2000. "Unidad de Planeación Minero Energética - Generación Transmisión 2000 - 2015. Ministro de Minas y Energía," pp. 1–206.
- [5] Ley N° 1715. Colombia: Diario Oficial de la república de Colombia, 2014.
- [6] Comisión de Regulación de Energía y Gas, *Resolución 174 DE 2021*. Colombia , 2021.
- [7] "Sistema de Información Eléctrico Colombiano SIEL." Acceso: Sep. 24, 2023. [Online]. Available: <http://www.siel.gov.co/Inicio/Generación/Generación1/tabid/143/Default.aspx>
- [8] J. Sexauer y S. Mohagheghi, "Voltage Quality Assessment in a Distribution System With Distributed Generation—A Probabilistic Load Flow Approach," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 3, pp. 1652–1662, 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2259599.
- [9] S. Ruiz-Romero, A. Colmenar-Santos, F. Mur-Pérez, y Á. López-Rey, "Integration of distributed generation in the power distribution network: The need for smart grid control systems, communication and equipment for a smart city — Use cases," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 223–234, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.082>.
- [10] R. Krishnan y K. Nair, "Transformer for Distributed Photovoltaic (DPV) Generation," in *2018 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECCOT)*, 2018, pp. 1659–1663. doi: 10.1109/ICEECCOT43722.2018.9001647.
- [11] "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," *IEEE Std 1159-1995*. pp. 1–80, 1995. doi: 10.1109/IEEESTD.1995.79050.
- [12] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*. pp. 1–29, 2014. doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.
- [13] "IEEE Application Guide for IEEE Std 1547(TM), IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems," *IEEE Std 1547.2-2008*. pp. 1–217, 2009. doi: 10.1109/IEEESTD.2008.4816078.

- [14] "UL 1741: UL Standard for Safety Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy Resources." Acceso: Jun. 02, 2023. [Online]. Available: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=UL1741&item_s_key=00315178
- [15] "Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución UNE-EN 50160," 2001.
- [16] Asociación Española de Normalización y Certificación, "Compatibilidad electromagnética (CEM) UNE EN 61000-3-2," p. 42, 2006.
- [17] Asociación Española de Normalización y Certificación, "Compatibilidad electromagnética (CEM) UNE-EN 61000-2-4," 2004.
- [18] ICONTEC, "*NTC 5001 CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA. LÍMITES Y METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN EN PUNTO DE CONEXIÓN COMÚN*". 2008.
- [19] Comisión de Regulación de Energía y Gas, "Resolución CREG No. 025 de 1995," *Comisión de Regulación de Energía y Gas*, p. 141, 1995.
- [20] "IEEE Recommended Practice for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems," in IEEE Std 1453-2004 (*Adoption of CEI/IEC 61000-4-15:1997+A1:2003*), pp.1-74, 2005, doi: 10.1109/IEEESTD.2005.95938